

# Određivanje hidrauličkih parametara tla temeljem baze podataka pedotransfernih funkcija

---

**Krsnik, Paula**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:221329>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**



*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



# **ODREĐIVANJE HIDRAULIČKIH PARAMETARA TLA TEMELJEM BAZE PODATAKA PEDOTRANSFERNIH FUNKCIJA**

DIPLOMSKI RAD

Paula Krsnik

Zagreb, rujan 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:

Poljoprivredna tehnika - Melioracije

# **ODREĐIVANJE HIDRAULIČKIH PARAMETARA TLA TEMELJEM BAZE PODATAKA PEDOTRANSFERNIH FUNKCIJA**

DIPLOMSKI RAD

Paula Krsnik

Mentor:

Doc. dr. sc. Vilim Filipović

Zagreb, rujan 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## **IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Paula Krsnik**, JMBAG 0178112578, rođena 27.12.1997., u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

### **ODREĐIVANJE HIDRAULIČKIH PARAMETARA TLA TEMELJEM BAZE PODATAKA PEDOTRANSFERNIH FUNKCIJA**

Svojim potpisom jamčim:

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

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

\_\_\_\_\_  
*Potpis studentice*



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZVJEŠĆE

### O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Paule Krsnik**, JMBAG 0178112578, naslova

#### ODREĐIVANJE HIDRAULIČKIH PARAMETARA TLA TEMELJEM BAZE PODATAKA PEDOTRANSFERNIH FUNKCIJA

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

Povjerenstvo:

potpisi:

1. Doc. dr. sc. Vilim Filipović mentor

\_\_\_\_\_

2. Doc. dr. sc. Igor Bogunović član

\_\_\_\_\_

3. Prof. dr. sc. Stjepan Husnjak član

\_\_\_\_\_

## Zahvala

*Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Vilimu Filipoviću koji je prihvatio mentorstvo i svojim znanstvenim i stručnim znanjem i savjetima oblikovao ideju te pomogao pri izradi ovoga diplomskog rada, zahvaljujem na povjerenju, strpljenju i vremenu koje je uložio.*

*Zahvaljujem se svim djelatnicima Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu koji su svojim znanjem, radom i trudom pomogli pri izradi ovog rada kao i stjecanju moga znanja u struci.*

*Posebno zahvaljujem dečku koji je bio uz mene u svim sretnim, ali i teškim trenucima te na strpljenju i bezuvjetnoj podršci tijekom postizanja svojih ciljeva.*

*Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji kojoj i pripisujem najveće zasluge za dosadašnji uspjeh, roditeljima i sestri koji su me tokom cijelog mog školovanja podupirali te bili podrška u svim trenucima mog školovanja i života te bez kojih sve ovo što sam do sada postigla ne bi bilo moguće.*

*Hvala Vam !*

# Sadržaj:

SAŽETAK

SUMMARY

1. UVOD .....	1
1.1. Cilj rada .....	2
2. PREGLED LITERATURE .....	3
2.1. Tok vode u tlu .....	3
2.1.1. Hidrauličke karakteristike tla .....	3
2.1.2. Vodne konstante tla .....	5
2.1.3. Hidraulička provodljivost tla .....	7
2.1.4. Vodni potencijal tla .....	8
2.2. Pedotransferne funkcije .....	8
2.2.1. Metode za razvoj i rad pedotransfernih funkcija .....	12
2.3. Modeliranje .....	14
2.3.1. Modeliranje pronosa tvari .....	17
2.3.2. Pripremanje, postavljanje i rad modela .....	18
2.3.3. Opis HYDRUS programa za modeliranje toka vode i transporta tvari .....	19
2.3.3.1. HYDRUS 1D .....	19
2.3.4. Rosetta program za procjenu PTF - ja .....	21
3. MATERIJALI I METODE .....	23
3.1. Područje istraživanja .....	23
3.2. Izbor tipova tala i pedološke karakteristike na lokacijama istraživanja .....	26
3.3. Klimatski parametri .....	33
3.4. Određivanje hidrauličkih parametara tla HYDRUS modelom .....	38
3.5. Primjena numeričkog modeliranja hidrauličkih parametara tla .....	41
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	43
4.1. Rezultati hidrauličkih parametara istraživanih površina tla .....	43
4.2. Grafikoni retencijskih krivulja na istraživanim lokacijama .....	45
5. ZAKLJUČAK .....	62
6. LITERATURA .....	64

POPIS TABLICA .....	72
POPIS SLIKA .....	73
ŽIVOTOPIS .....	84



## Sažetak

Diplomskog rada studentice **Paule Krsnik**, naslova

### **ODREĐIVANJE HIDRAULIČKIH PARAMETARA TLA TEMELJEM BAZE PODATAKA PEDOTRANSFERNIH FUNKCIJA**

Određivanje hidrauličkih parametara često je vrlo zahtjevno, dugotrajno i vrlo skupo, pa se sve više prilazi procjeni navedenih parametara primjenom pedotransfernih funkcija. Pedotransferne funkcije (PTF) koriste se kao alternativni alat za predviđanje fizikalnih i kemijskih svojstava tla iz drugih dostupnijih analiziranih svojstava. Vrlo je važno da se do hidrauličkih karakteristika tla dođe brzo i efikasno s obzirom da su one nužne u različitim primjenama. Iako postoji veliki broj različitih PTF metoda, sve one rade na istom principu pokušavajući odrediti svojstva tla, kao što je hidraulička vodljivost s obzirom na samo nekoliko izmjerenih svojstava tla kao što su veličina čestica, tekstura i struktura tla, gustoća tla. Razvojem tehnologije, razvijaju se mnogobrojni numerički programi i modeli koji mogu rješavati probleme toka vode i transporta raznih čestica, odnosno rade na principu PTF-ja, a najviše korišteni su HYDRUS (Rosetta) i SOILPAR.

Podaci o tlu na terenu prikupljeni su na 35 lokacija diljem Republike Hrvatske, te se koristi baza podataka o svim osnovnim značajkama na različitim tipovima tala. Istraživanje je provedeno na sedam tipova tala gdje su zabilježene značajke kao matični supstrat, tip tla, sadržaj pijeska, praha i gline, način korištenja i dr. Uz pomoć HYDRUS (Rosetta) programa izračunate su hidrauličke značajke tla iz osnovnih parametara tla kako bi se dobile retencijske krivulje tla.

**Ključne riječi:** pedotransferne funkcije, hidraulički parametri tla, numeričko modeliranje, baza podataka, tok vode

## Summary

Of the master's thesis **Paule Krsnik** - student, entitled

### **DETERMINATION OF HYDRAULIC SOIL PARAMETERS BASED ON PEDOTRANSFER FUNCTIONS DATABASE**

Determining hydraulic parameters is often very demanding, time-consuming and very expensive, so the assessment of these parameters with pedotransfer functions is increasingly being approached. Pedotransfer functions (PTF) are used as an alternative tool to predict the physical and chemical properties of soil from other more available analyzed properties. It is very important to achieve the hydraulic characteristics of the soil quickly and efficiently since they are necessary in various applications. Although there are a large number of different PTF methods, they all work on the same principle trying to determine soil properties, such as hydraulic conductivity given only a few measured soil properties such as particle size, soil texture and structure, density. With the development of technology, numerous numerical programs and models are being developed that can solve the problems of water flow and transport of various particles. They can work on the principle of PTF, and the most used are HYDRUS (Rosetta) and SOILPAR.

Soil field data were collected at 35 locations throughout the Republic of Croatia, and a database of all basic characteristics on different soil types is used. The research was conducted on seven soil types and recorded features such as parent material, soil type, sand, silt and clay content, method of use, etc. Using the HYDRUS (Rosetta) program, the hydraulic characteristics of the soil were calculated from the basic soil parameters to obtain soil water retention curves.

**Keywords:** pedotransfer functions, soil hydraulic parameters, numerical modelling, database, water flow

## 1. UVOD

Voda je jedan od najznačajnijih i biljkama najpotrebnijih vegetacijskih faktora, a tok vode znatno utječe na količinu i kvalitetu vode. Životni procesi biljke mogu se odvijati jedino u prisutnosti pristupačne količine vode u tlu, što znači da se time održava optimalna količina vlage u tlu. Optimalna vlaga u tlu ovisi o fizikalnim i kemijskim svojstvima tla te vrsti i razvojnoj fazi uzgajanje biljke. U vezi optimalne vlažnosti tla potrebno je poznavati njene granične vrijednosti pa se za donju granicu uzima lentokapilarna vlažnost, a za gornju poljski vodni kapacitet. Poznavajući režim vlažnosti moguće je odrediti stanje odnosno dinamiku vlage u tlu. Karakteristična retencijska krivulja vode jedan je od temeljnih konstitutivnih odnosa u mehanici nesaturiranog tla, a definira odnos količine vode u tlu i vodnog potencijala.

Hidraulički parametri tla vrlo su važni za funkcioniranje agroekosustava pa su prijeko potrebni za istraživanja, ali je njihovo mjerenje vrlo zahtjevno i financijski skupo. Određivanje hidrauličkih parametara tla temeljem terenskih opažanja (npr. procjedni lizimetri, TDR senzori) i laboratorijskih analiza predstavlja primarnu komponentu u određivanju toka vode i vodnog režima. Hidrauličke karakteristike tla opisuju makroskopske odnose između vodnog potencijala, faze koncentracije i ponašanja kretanja vode i plinova u tlu (*Durner i Flühler 2005.*). Sve se više koriste pedotransferne funkcije putem kojih se izrađuju i procjenjuju hidrauličke značajke tla. Trenutno je najkorištenija, najraširenija i najprihvaćenija van Genuchtenova funkcija za dobivanje i opisivanje hidrauličkih značajki tla. Navedena funkcija bazira se na preciznoj procjeni parametara kako bi se dobila što točnija retencijska krivulja tla. *Filipović (2015.)* navodi da je tok vode u nesaturiranoj zoni tla puno kompleksniji nego u saturiranoj zoni. Za simuliranje toka vode u nesaturiranom tlu potrebno je odrediti dvije hidrauličke karakteristike tla: relativnu količinu vode u tlu (parametar retencijske krivulje tla) i hidrauličku provodljivost nesaturiranog tla (parametar krivulje hidrauličke provodljivosti). Retencijske krivulje tla i vode tla imaju ključnu ulogu u nezasićenom tlu što je relativno novo studijsko područje koje ima široku primjenu posebno u geotehničkom i geo-okolišnom inženjerstvu.

Modeli toka vode i pronosa tvari koriste se kao alati kojima se mogu opisati i predvidjeti specifični procesi i u saturiranoj i nesaturiranoj zoni tla. Razni modeli mogu poslužiti za

testiranje i provedbu pokusa na različitim tipovima tala, na uzgajanim kulturama, u primjeni gnojidbe i sredstava za zaštitu bilja. Sve su češća istraživanja koja se posvećuju nesaturiranoj zoni tla koja može biti izvor mnogih tvari koja se mogu klasificirati kao onečišćivala te u kojoj dolazi do njihova ispiranja (*Filipović i sur., 2016.*).

## **1.1. Cilj rada**

U prikazanom istraživanju koje je provedeno na 35 lokacija diljem Republike Hrvatske cilj je primjenom pedotransfernih funkcija procijeniti hidrauličke parametre tla na temelju teksture tla na različitim tipovima tala.

## 2. PREGLED LITERATURE

### 2.1. Tok vode u tlu

Kretanje ili tok vode vrlo je važan proces koji utječe i na količinu i na kvalitetu vode u cijelom (agro)ekosustavu. Gibanje ili kretanje vode može biti kroz zasićeno (saturirano) i nezasićeno (nesaturirano) tlo, a brzina i smjer gibanja ovise o agregatnom stanju vode, količini vode u tlu, teksturi, strukturi i porozitetu tla, sadržaju organske tvari u tlu i silama koje uzrokuju gibanje (*Šimunić, 2013.*). Voda se u tlu može kretati u svim smjerovima, a smjer gibanja ovisi o djelovanju kohezivnih sila u kapilarama tla. Gibanje vode u tlu uglavnom uzrokuju kapilarne sile, sila gravitacije i hidrostatski tlak (*Tomčić, 1988.*). Tijekom prirodnog vlaženja tla oborinama ili sustavom navodnjavanja voda se kreće prema dolje odnosno descendentno, dok se ascendentno kretanje ili kretanje prema gore odvija kapilarnim vlaženjem od strane podzemne vode. Za potrebe utvrđivanja vodnog režima tla i regulacije vode u tlu treba voditi računa o tri osnovna oblika gibanja tekuće vode: kapilarnom gibanju, infiltraciji (upijanje) i vodopropusnosti (filtraciji) vode (*Šimunić, 2013.*), ali isto tako je potrebno i poznavanje vodnih konstanti tla.

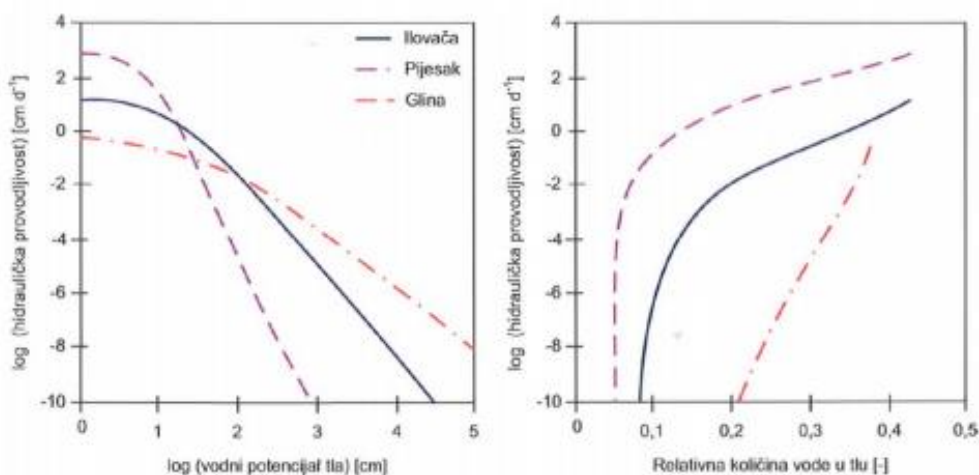
#### 2.1.1. Hidrauličke karakteristike tla

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 Flüher, 2005.*). Navedeni odnosi ovise o mnogo čimbenika, kao naprimjer temperaturi, (geometrijskoj) strukturi pora u tlu, karakteristikama površine matriksa tla, te o karakteristikama vlažećih i ne-vlažećih tekućina koje se nalaze u prostoru pora. Karakteristike zadržavanja vode i hidraulička vodljivost poznate su za većinu mineralnih vrsta tla i mogu se procijeniti iz fizikalnih svojstva tla, poput specifične i sadržaja organske tvari, koristeći pedotransferne funkcije (*Schaap i sur., 1998.*) jer su hidraulički i fizički svojstva tla međusobno su usko povezana (*Gupta i Larson, 1979.*). Hidraulička svojstva također su češće proučavana na neobrađenim organskim tlima (*Weiss i sur., 1998; Gnatowski i sur., 2002.; Schwärzel i sur., 2006.*), ali ne na obrađenim organskim tlima.

Uzme li se 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.*). Za simulaciju toka vode u nesaturiranom tlu potrebno je odrediti dvije hidrauličke karakteristike tla: relativnu količinu vode u tlu (parametar retencijske krivulje tla) i hidrauličku provodljivost nesaturiranog tla (parametar krivulje hidrauličke provodljivosti). Retencijske krivulje tla definiraju odnos između relativne količine vode u tlu (omjer mase vode u tlu i mase osušenog tla) i vodnog potencijala tla te imaju karakterističan odnos za različite tipove tla.

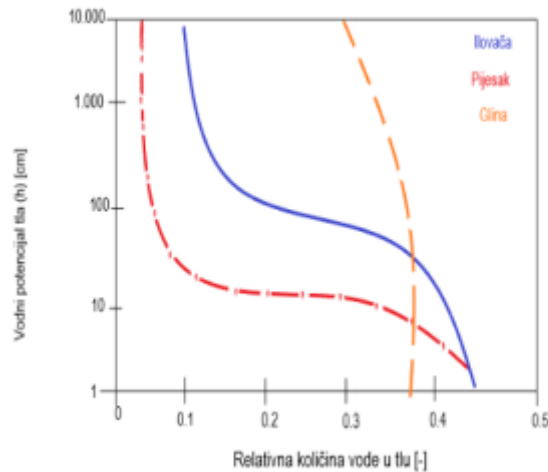
Teksturno lakša (pjeskovita) tla gube vodu mnogo brže od teksturno težih tala (glina) kao izravan odraz distribucije veličine pora u tlu pri određenoj teksturnoj jedinici tla (*Filipović, 2015.*). S obzirom da većina pora u teksturno lakšim tlima ima veći promjer, voda će se procijediti kod malih negativnih potencijala tla, a u teksturno težim tlima (glina, ilovača, praškasta ilovača) procjeđivanje vode događa se pri vrlo visokim vrijednostima negativnog vodnog potencijala (slika 2.3.). Oblik retencijske krivulje opisuje se primjenom različitih modela, a najčešći je van Genuchten - Mualem model (*van Genuchten, 1980.*).

Hidraulička provodljivost je sposobnost tla za prijenos (transport) vode pa je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu (slika 2.2.). Kao takva, hidraulička provodljivost se smanjuje tijekom sušenja tla i smanjenjem volumena pora koje su ispunjene vodom (*Maloić, 2018.*). Saturirano tlo ima mnogo veću hidrauličku provodljivost kod teksturno lakših tala (pijesak), nego u tlima glinovite ili ilovaste teksture. Kako tlo prelazi iz saturirane u nesaturiranu fazu hidraulička provodljivost drastično se smanjuje (mnogo je izraženije u pjeskovitim nego u ilovastim ili glinovitim tlima) (*Filipović, 2015., Dirksen, 1998.*).



**Slika 2.1.** Primjer odnosa hidrauličke provodljivosti i vodnog potencijala tla te odnos hidrauličke provodljivosti i relativne količine vode u tlu za teksturno različita tla

(Izvor: Filipović, 2015.)



**Slika 2.2.** Primjer retencijske krivulje tla za pijesak, ilovaču i glinu

(Izvor: Carsel i Parish, 1988.)

Većina modela za simulaciju toka vode u nesaturiranoj zoni tla temelje se na Richardsovoj jednadžbi toka vode (jednodimenzionalni tok u vertikalnom smjeru) (Richards, 1931.).

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, „dual ring“ infiltrometri). Takve metode nam omogućuju određivanje hidrauličkih karakteristika izravno na terenu i rezultiraju boljim predviđanjima toka vode i transporta tvari u nesaturiranoj zoni tla.

## 2.1.2. Vodne konstante tla

Stanje vlažnosti tla izražava se kao količina vode u tlu, a može se količinski odrediti i u laboratoriju i na terenu. Ona predstavlja ravnotežno stanje između privlačne sile čvrstih čestica tla i vode. Vrijednost vodnih konstanti ovisi o vrsti tla, točnije o njegovim fizikalnim (tekstura, struktura, porozitet tla, zbijenost tla, nagib terena) i kemijskim karakteristikama (u najvećoj mjeri sadržaj organske tvari). Za vodu i vodni režim u tlu najznačajnije su: maksimalni higroskopicitet, točka venuća, lentokapilarna vlažnost, poljski kapacitet tla za vodu i

maksimalni kapacitet tla za vodu koje će u nastavku biti malo više pojašnjene zbog korištenja u radu.

Maksimalni higroskopicitet označava maksimalnu količinu vlage koju zrakosušno tlo može adsorbirati. Sila držanja vlage odgovara tlaku od 3 MPa ili 30 bara, a približno dvostruka vrijednost ove konstante maksimalnog higroskopiciteta odgovara vrijednosti kod točke venuća.

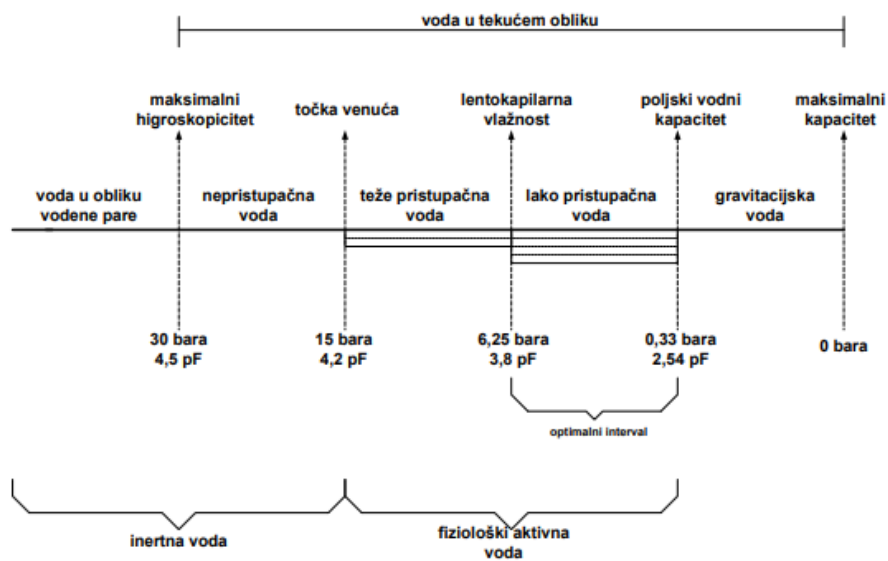
Točka venuća definira se kao ravnotežno stanje držanja vode između sila čestica tla te usisne sile korijena biljke. Biljka u tom stanju počinje venuti jer nema dovoljnu količinu pristupačne vode koja je potrebna za funkcioniranje fizioloških procesa. Također sila držanja vode kod točke venuća odgovara tlaku od 1,5 MPa odnosno 15 bara što je jednako usisnoj sili korijena biljke. Za točku venuća može se reći i da je donja granica pristupačne ili fiziološki aktivne vode u tlu, točnije donja granica teže pristupačne vode biljkama dok je voda ispod točke venuća nepokretna i nepristupačna biljkama (*Šimunić, 2013.*).

Lentokapilarna vlažnost granica je između teže i lakše pokretne vode u tlu te se pri ovoj konstanti prekida kapilarna veza u kapilarnim porama. Sadržaj vode ispod ove vlažnosti uzrokuje otežanu opskrbu biljaka vodom, a sila držanja vode je pri tlaku 0,625 MPa odnosno 6,25 bara što ispada 60 - 70 % vrijednosti poljskog kapaciteta tla za vodu.

Poljski kapacitet tla za vodu odgovara sadržaju vode u tlu u trenutku kada su mikropore popunjene vodom, a makropore zrakom (*Šimunić, 2013.*). To je maksimalna količina vode koju tlo može zadržati i gornja granica lako pristupačne vode za biljke, a sila držanja ovisi o teksturi tla te tlak iznosi 0,033 MPa ili 0,33 bara.

Maksimalni kapacitet tla za vodu najveća je količina vode koju tlo može primiti, ali ne zadržati. On ovisi o fizikalnim i kemijskim značajkama tla, ali najviše o teksturi i strukturi tla te ukupnom sadržaju pora i humusa u tlu. Na slici 2.1. biti će prikazane ranije navedene vodne konstante i njihove vrijednosti koje će biti važne u kasnijem istraživanju i izračunu radi usporedbe.





Slika 2.3. Vrste i oblici vode u tlu, vodne konstante i sile držanja vode

### 2.1.3. Hidraulička provodljivost tla

Hidraulička provodljivost je sposobnost tla za prijenos (transport) vode i kao takva je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Smanjuje se tijekom sušenja tla i sa smanjenjem volumena pora koje su ispunjene vodom. Hidraulička provodljivost tla mnogo je veća kod teksturno lakših tala (pijesak) nego u tlima glinovite ili ilovaste teksture (Maloić, 2018.). Hidraulička provodljivost se drastično smanjuje kako tlo prelazi iz saturirane u nesaturiranu fazu. Hidraulička je provodljivost u nesaturiranom mediju funkcija materijalnih varijabli koje opisuju strukturu pora (npr. poroznost i koeficijent pora), svojstva fluida (gustoća i viskoznost) te relativne količine fluida (vlažnost i stupanj zasićenosti) u sustavu (Lu, Likos, 2004.). Ovisnost hidrauličke provodljivosti o relativnoj količini vode u porama opisana je tzv. karakterističnom funkcijom hidrauličke provodljivosti (Kavur i sur., 2010.). Ova je funkcija izrazito nelinearna, a provodljivost se kreće u vrlo širokim granicama (promjene do desetak redova veličine). Zbog toga je određivanje karakteristične funkcije hidrauličke provodljivosti vrlo delikatan zadatak, a izravno eksperimentalno mjerenje je vrlo zahtjevno (Kavur i sur., 2010.)

#### 2.1.4. Vodni potencijal tla

Voda u tlu može biti u različitim oblicima, ali i sadržavati različite oblike i količine energije. Potencijalna je energija važna za gibanje vode u tlu, a razlika u toj energiji omogućuje njezino gibanje od višeg potencijala manjeg podtlaka) u tlu prema nižem (većem podtlaku) i to se odvija dok se ne postigne ujednačena vlažnost odnosno stanje ujednačenog potencijala. Vodni potencijal u tlu opisuje slobodnu energiju po jedinici volumena vode u otopini u odnosu na standardno stanje vode, a isto tako definira se kao energija koja je potrebna da bi se neka količina vode premjestila u nezasićenom tlu. Potencijal vode u tlu je mjera stanja energije vode u tlu koja se izražava kao suma triju najvažnijih potencijala: osmotskog, hidrostatskog i gravitacijskog (*Ondrašek i sur., 2015.*).

Ovisno o stanju vodnog potencijala tla moguće su određene promjene u biljci, točnije u potencijalu biljke. Vodni potencijal ima dvije osnovne uloge i to su da regulira kretanje vode kroz staničnu membranu i koristi se kao mjera vodnog statusa biljke.

#### 2.2. Pedotransferne funkcije

Procjena svojstava tla i drugih lakše i jednostavnije mjerljivih svojstava tla predstavljala je veliki izazov za znanost od samih početaka dvadesetog stoljeća, gdje su se javile i prve jednadžbe. U pedologiji, pedotransferne funkcije, prediktivne su funkcije određenih svojstava tla koje koriste podatke iz istraživanja karakteristika tla.

Prvi PTF model došao je iz studije *Briggsa i McLane-a (1907.)*, koji su odredili koeficijent uvenulosti, koji se definira kao postotak sadržaja vode tla kada se biljke koje rastu u tom tlu prvo dovedu u stanje uvenuća iz kojeg se ne mogu oporaviti u približno zasićenu atmosferu bez dodavanja vode u tlo, što ovisi o veličini čestica. Uvođenjem koncepta poljskog kapaciteta i točke venuća, sljedeća istraživanja u razdoblju od 1950. do 1980. godine pokušavala su povezati raspodjelu veličine čestica, specifičnu gustoću te sadržaj organske tvari s poljskim vodnim kapacitetom i točkom venuća. Prema *Veihmeyeru i Hendricksonu (1927.)*, svojstva vlažnosti tla povezala su se prvi puta s teksturom tla putem regresije. U drugoj polovici dvadesetog stoljeća, regresijske jednadžbe već su vrlo dobro bile raširene u klasifikaciji i kartografiji što se znatno jače razvilo do danas. Mnogobrojne agencije za znanost o tlu imale

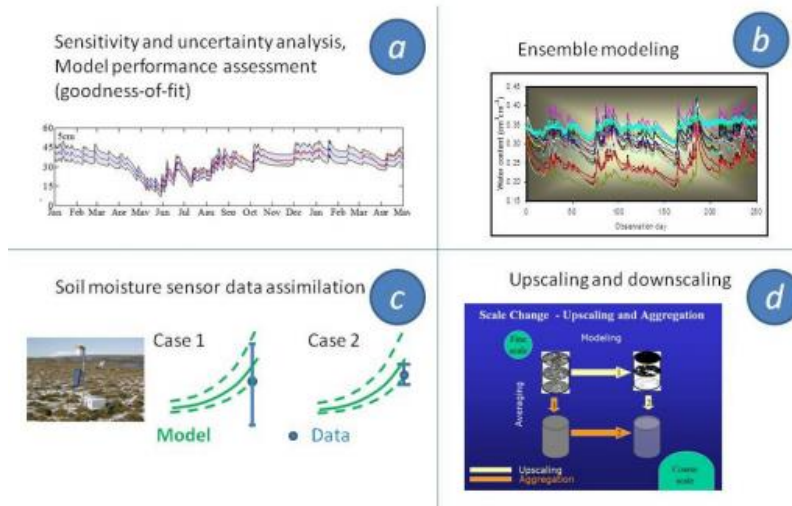
su svoje neslužbeno pravilo za procjenu svojstava tla koja se teško mogu izmjeriti, a zbog određenih teškoća, troškova mjerenja i dostupnosti velikih baza podataka, najopsežnije istraživanje u razvoju PTF-ja bilo je za procjenu retencijskih krivulja i hidrauličke vodljivosti.

*Lamp i Kneib (1981.)* uveli su pojam pedofunkcija, dok su *Bouma i van Lanen (1987.)* koristili termin transfer funkcija. Da bi se izbjegla zabuna s pojmom prijenosna funkcija koja se koristi u fizici tla i u mnogim drugim disciplinama, Johan Bouma (1989.) kasnije ju je nazvao pedotransfer funkcija. Iako koncept pedotransfera funkcije službeno nije priznat do 1989. godine, te se dugo primjenjuje za procjenu svojstava tla koja je teško odrediti, većinom se osnivačem smatra Bouma. Pojam pedotransfernih funkcija (PTF) stvorio je Johan Bouma kao prevođenje podataka koji su dostupni i prikupljeni (morfologija tla, tekstura i struktura tla, pH) u one koji su potrebni za istraživanje. Koncept pedotransferne funkcije koju je *Bouma (1989.)* predložio, obuhvaća ranije spomenute procjene, ali je on sam svoj koncept opisao kao prevođenje podataka tla koje imamo u podatke koje nemamo, ali istovremeno trebamo. Ključni aspekt prijedloga pedotransfernih funkcija bila je povezanost pedologije tla i istraživanja tla, omogućujući stvorene perspektive na temelju lokaliziranih uzoraka. PTF-je kao cilj imaju prijenos podataka o sastavu tla u informacije koje opisuju funkcioniranje tla (konstante mineralizacije, svojstva sorpcije, hidrauličke funkcije tla), a one mogu dovesti do kvantificiranja usluga ekosustava (opskrba biljke vodom i hranjivim tvarima, regulacija klime i biogeokemijskih ciklusa, puferiranje, filtriranje otopljenih tvari, pristupačnost tla i slično) (*Vereecken i sur., 2016.; Bouma, 1989.*).

*Bouma (1989.)* je pokušao raspodijeliti i razlikovati dvije vrste pedotransfernih funkcija: kontinuirane i klasne. Kontinuirane PTF-je odnose se na količinu i koriste se kontinuirano, to su: količina i sadržaj organske tvari, pijeska, praha i gline, dok se klasne PTF-je odnose na parametre koji služe u modeliranju. Također, jedan od primjera *Bakera i Boume (1975.)* su višestruka mjerenja retencijskih krivulja tla i hidrauličke vodljivosti u podzemni horizont muljevitih ilovastih tala, te su dobivene krivulje relativno uskih traka gdje je vidljivo vrlo dobro poklapanje s ranijim mjerenjima i podacima. Serija tala se stoga koristi kao PTF koja se također može povezati određenim horizontima tla unutar određenog niza tla ili u općenitije klase teksture (*Baker, 1978.*). Sličnu analizu horizonata tala u Nizozemskoj napravili su *Wösten i sur. (1986.)* gdje su usporedili i generirali četiri metode sa hidrauličkim funkcijama uzorkovanih

tala te koristili izravna mjerenja i kontinuirane PTF-ove. U navedenim analizama koje su provedene, razlike nisu bile značajne statistički gledano, ali je prikazan potencijal obje vrste pedotranfernih funkcija (*Wösten i sur., 1990.*).

Procjena prostorne varijabilnosti postaje nužna u mnogim primjenama obrade tla. Na slici 2.4., ilustrirana je važnost korištenja podataka povezanih sa procjenom varijabilnosti u nekoliko vrsta modeliranja tla (*Pachepsky i sur., 2015.*). Osjetljivost modela na hidraulička svojstva zahtijeva znanje o varijabilnosti istih svojstava. Procjena izvedbe modela trebala bi se osloniti na usporedbu nesigurnosti podataka i predviđanja modela (slika 2.4.a). Modeli isto tako ne bi trebali biti precizniji od podataka za koje se pretpostavlja da će se reproducirati (*Deng i sur., 2009.*). Druga upotreba varijabilnosti sustava sastoji se u upotrebi multimodelnih simulacija (slika 2.4.b). Kombinirajući predviđanja pomoću različitih neovisnih modela, četo nazvanih multimodelnim predviđanjem, tehnika modeliranja postaje sve popularnija (*Liao i sur., 2014.*). Primjer na slici 2.4.b prikazuje rezultate rješavanja Richardsove jednadžbe toka pomoću HYDRUS-1D s 19 vjerojatnih skupova hidrauličkih parametara tla (*Guber i sur., 2005.*), a još jedna upotreba varijabilnosti podataka može se pronaći u asimilaciji podataka iz mreže senzora tla što prikazuje slika 2.4.c. Modeli toka vode u tlu nužno se temelje na pojednostavljenim pretpostavkama o mehanizmima, procesima i parametrima retencije i toka vode, što uzrokuje pogreške u predviđanju modela toka vode u tlu. Potreba za poznavanjem neizvjesnosti rezultata mjerenja zahtijeva pronalaženje procjena varijabilnosti sadržaja vode. Prema *Arori i sur. (2015.)*, poznavanje varijabilnosti hidrauličkih parametara tla je preduvjet za nadogradnju korištenja Monte Carlo simulacija. Takvo nadograđivanje uključuje više simulacija u skali, a zatim usrednjavanje ("modeliranje do usrednjavanja" bijela strelica na slici 2.4.d) ili usrednjavanje hidrauličkih svojstava nakon čega slijede simulacije s prosječnim parametrima ("usrednjavanje do modeliranja" narančasta strelica na slici 2.4.d).



**Slika 2.4.** Korištenje podataka o varijabilnosti hidrauličkih svojstava tla i sadržaja vode u tlu.

- a) ocjena rezultata kalibracije modela (Izvor: *Qu i sur., 2014.*);
- b) analiza sadržaja vode u tlu (Izvor: *Guber i sur., 2009.*);
- c) analiza modela protoka vode u tlu, rezultati dvaju slučajeva relativne razlike u rezultatima modeliranja i rezultatima mjerenja;
- d) mogućnosti višestrukih simulacija;

Trenutno se kontinuirane PTF-je koriste za parametriranje procesa tla u simulacijskim modelima vode, energije i ciklusa od polja do kontinentalne skale. Kontinuirane funkcije mogu biti klasificirane kao točkaste ili parametarske (*Vereecken i sur., 2010.*). Točkaste PTF-je procjenjuju, naprimjer, specifične točke krivulje zadržavanja vode kao što je točka uvenuća, dok se parametarske procjenjuju, naprimjer, parametre modela Mualem-van Genuchten (*van Genuchten, 1980.*). Kontinuirane PTF-je bilježe rani rad na izvođenju hidrauličkih svojstava tla, poput retencijskih karakteristika vode, nezasićena i zasićena hidraulička vodljivost i sadržaj vode u tlu na propisanim tlačnim glavama za jednostavna svojstva tla (*Bloemen, 1977, 1980; Clapp i Hornberger, 1978; Cosby i sur., 1984.*). Zapravo, većina ranih radova na PTF-jama bila je usmjerena na procjenu hidrauličkih parametara tla karakteristike zadržavanja vode i hidrauličke vodljivosti funkcije (*Vereecken i sur., 2010.*) jer je te parametre vrlo teško i skupo mjeriti, ali su ključni za sve simulacije toka vode, organske tvari i energije. Procjene ovih parametara su najpoznatiji i najrazvijeniji primjeri pedotransfernih funkcija koje su u osnovi konstrukcije ostalih pedotransfernih funkcija kao naprimjer toplinske vodljivosti tla.

Pedotransferne funkcije tla (PTF) definiraju se kao alat za pretvorbu temeljnih podataka o tlu, kao što su: tekstura tla, struktura tla, specifična gustoća tla, sadržaj gline, praha i pijeska, sadržaj humusa, strukturne i morfološke informacije. pH, redoks i koncentracije minerala (*McBratney i sur., 2002.*), u specifičnije parametre kao što su hidrauličke značajke tla. Razvojem računalne tehnologije razvijeni su i mnogobrojni numerički modeli koji na temelju pedotransfernih funkcija mogu rješavati probleme kretanja vode, topline i tvari (onečišćivača) u nezasićenoj zoni. Modeli koji će u nastavku biti detaljnije opisani koriste se u znanstvenim istraživanjima u agroekosustavima, a primjenom istih modela pretvorbe PTF-ja na velikoj bazi podataka može se dobiti sigurna i detaljna procjena hidrauličkih parametara. U zadnjih nekoliko godina broj PTF aplikacija znatno se povećao zbog sve većeg korištenja GIS modeliranja.

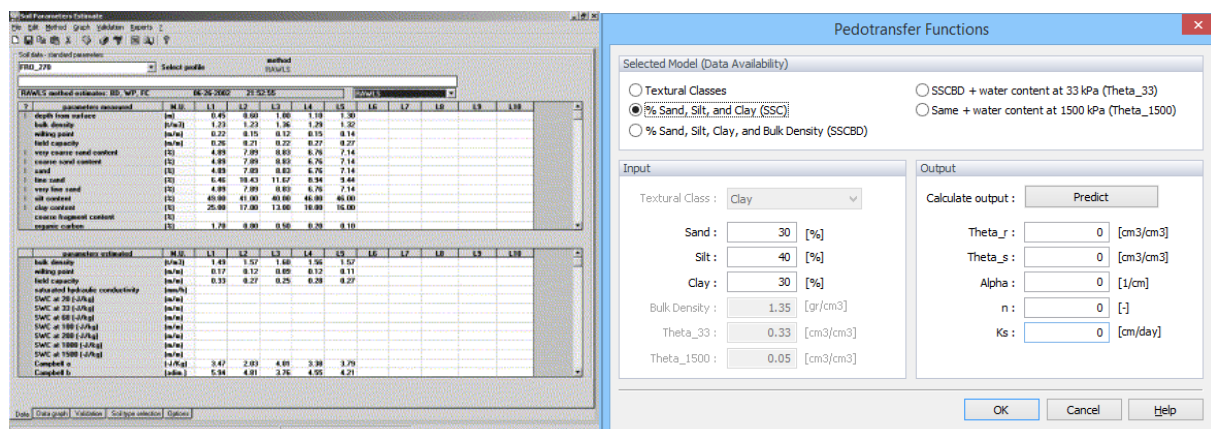
### **2.2.1. Metode za razvoj i rad pedotransfernih funkcija**

Kao što je već ranije navedeno, posljednjih se nekoliko desetljeća znatno povećao razvoj različitih vrsta PTF-ja, a osnovne su točkaste i parametarske pedotransferne funkcije. Točkaste procjenjuju vrijednosti vlage u tlu pri fiksnim vrijednostima tlaka (*De Jong i Loebel, 1982.*), a parametarske procjenjuju parametre funkcija koje opisuju promatrani podaci za niz vrijednosti vodnog potencijala tla (*McCuen i sur., 1981.*). Napori su se, tijekom posljednjih nekoliko godina, usredotočili na razvoj parametarskih PTF-ja jer one pružaju matematičke značajke funkcija za MRC ili krivulju hidrauličke vodljivosti (HCC) koji se direktno i izravno mogu koristiti u matematičkim modelima. Isto tako, nedavno su razvijeni pristupi višestrukog modeliranja koji kombiniraju predviđanja s različitim PTF-jama kako bi se izveo jedan skup hidrauličkih parametara ili agregatni izlaz modela koji su dobiveni za svaki od pojedinačnih PTF-ja (*Guber i sur., 2005., 2009.*). Guber i sur. (2009.), zasada koriste devetnaest objavljenih funkcija i HYDRUS-1D za modeliranje režima vlažnosti tla u agroekosustavu. Do najbolje točnosti u pogledu sadržaja vlage u tlu na različitim dubinama, došlo se promatranjem i ocjenjivanjem raznih metoda kombiniranja rezultata simulacije od svih devetnaest pojedinačnih modela.

Postoji nekoliko dostupnih programa koji pomažu u određivanju hidrauličkih svojstava tla pomoću funkcija pedotransfera, a među najviše korištenim su SOILPAR i ROSETTA (slika 2.5.).

SOILPAR je program za procjenu parametara tla, a omogućuje: pohranu podataka o tlu u georeferenciranu bazu podataka, izračunavanje procjena hidroloških parametara tla pomoću čak petnaest postupaka, uspoređivanje procjena s izmjerenim podacima koristeći statističke indekse i grafiku te izradu karata pomoću ESRI formata (*Acutis i Donatelli, 2003.*). Grafičko sučelje napravljeno je na temelju Excel-a i CropSyst-a, a cijeli softver radi pod sustavom Windows 98/NT/2000/XP te ga je moguće besplatno preuzeti putem interneta. Jedanaest metoda bavi se procjenom neke od sljedećih karakteristika: sadržaj vode u tlu pri određenom vodnom potencijalu tla, zasićena hidraulička vodljivost i specifična gustoća. Tri metode bave se procjenom parametra retencije vode u tlu, a jedna retencijskom krivuljom tla.

ROSETTA je programski paket koji u svome radu uključuje algoritme za računalno modeliranje i analizu proteinskih struktura (*Schaap i sur., 1999.*). Ovaj je program odnosno softver u početku služio kao alat za predviđanje strukture, ali kasnije je omogućio značajan znanstveni napredak.



Slika 2.5. Programi dostupni za rad pedotransfernih funkcija; SOILPAR (lijevo); ROSETTA (desno)

## 2.3. Modeliranje procesa u tlu

Mnoge kemijske tvari koje se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji mogu predstavljati veliki problem ako se procjeđuju u dublje slojeve i podzemne vode. Simulacije toka vode i transporta onečišćivala imaju sve važniju ulogu u modernom pristupu zaštite vodnih resursa i održive poljoprivredne proizvodnje (*Barry, 1992., Šimunek i Bradford, 2008.*). U posljednjih nekoliko godina sve veća pozornost pridaje se nesaturiranoj zoni tla jer se u toj zoni lakše mogu sanirati izvori onečišćenja prije nego dospiju u dublje vodonosne slojeve (*Ondrašek i sur., 2015.*), a razvojem računalne tehnologije razvijeni su i mnogi programi koji mogu numerički rješavati probleme kretanja vode, topline i onečišćivala u (ne)saturiranoj zoni. U mnogobrojnim se radovima provlači ova tematika procjeđivanja tvari i vode kroz slojeve tla što je isto tako veliki pokazatelj rada i želje znanstvenika za novim istraživanjima i zaključcima.

Kao što je već ranije navedeno, procesi toka vode u tlu vrlo su važni i znato utječu na kvalitetu i količinu, pa su numerički modeli oni koji omogućuju simulaciju kompleksnijih procesa i kretanja tvari u tlu i sve se više koriste kao jedan od osnovnih alata. Pronos tvari u nesaturiranoj zoni tla jedan je od najkompleksnijih i najzahtjevnijih problema u numeričkom modeliranju (*Filipović, 2015.*). Određivanje hidrauličkih parametara tla temeljem terenskih opažanja i laboratorijskih analiza predstavlja primarnu komponentu u određivanju toka vode i vodnog režima. Različiti modeli mogu poslužiti za testiranje i provedbu pokusa na različitim tipovima tla, uzgajanim kulturama, primjenom različitih sredstava za zaštitu bilja i prihrane. Jedan od važnih zadataka provedbe numeričkih simulacija tokova je primjena modela u poljskim uvjetima, kako bi se efikasno mogli procijeniti učinci, ali i povećati efikasnost rada.

Pojednostavljena verzija nekog fizičkog sustava koji bi bio kompliciran za analizu, obuhvaćajući sve njegove dijelove, naziva se modelom (*Young i Freedman, 2000.*). Ukoliko je riječ o modeliranju nesaturirane zone koja čini jedan jako složen hidrogeološki sustav potrebno je napraviti model koji će zadržati jednostavnost, ali isto tako opisati sve značajne parametre. Tri glavne vrste modela su konceptualni, fizički i analogni te matematički modeli (*van Dijk, 2003.*). Također modele možemo podijeliti i s obzirom na predmet istraživanja u hidrologiji: model toka, model transporta ili pronosa tvari, model transporta topline i model transformacije.



Konceptualni model opisni je model nekog sustava utemeljen na kvalitativnim pretpostavkama o njegovim elementima, vezama između tih dijelova i granicama sustava (*Ružičić i sur., 2012.*). Kreiranjem konceptualnog modela u nesaturiranoj zoni potrebno je definirati geometriju sustava nesaturirane zone, hidrauličke uvjete u odnosu tlo - voda, sredinu između hidrogeoloških i fizičkih parametara tla te ponašanje okoline. Fizički i analogni modeli predstavljaju modele koji se izvode u kontroliranim odnosno laboratorijskim uvjetima pri čemu se kontroliraju različiti faktori koje utječu na sami model. Fizički i analogni modeli prikaz su nekog velikog sustava u malom (*Bačani i Posavec, 2011.*). Primjer takvih modela je Darcy-eva aparatura u kojoj se proučava filtracija vode kroz pijesak (*Darcy, 1856.*). Matematički modeli primjenjuju se u slučaju kada je određeni sustav teško opisati riječima što pokazuje njegovu kompleksnost. Ako postoji model toka podzemne vode, potrebno je definirati ograničenje na granicama sustava, ali i unutar sustava. Ta ograničenja su zapravo početni i granični uvjeti opisani pomoću matematičkih jednadžbi.

Modeli su konceptualni opisi ili aproksimacije koje opisuju fizički sustav koristeći matematičke jednadžbe; modeli nisu točni opisi nekog fizičkog sustava ili procesa (*Kumar, 2001.*). Primjenjivost modela ovisi o tome koliko matematičke formule mogu aproksimirati fizički sustav koji se modelira, a točnost modela ovisi i o ispravnosti parametara potrebnih za rad modela. Kada se govori o modelima toka podzemne vode koji opisuju tečenje podzemne vode i pronos tvari, u tim modelima koriste se matematičke jednadžbe koje se zasnivaju na određenim pojednostavljenim pretpostavkama (smjer tečenja, geometrija vodonosnika, heterogenost sedimenta unutar vodonosnika, mehanizmi pronosa tvari, kemijske reakcije i sl.) (*Maloić, 2018.*). Samo neki od mnogobrojnih modela koji se bave simulacijom i modeliranjem procesa u tlu su: CANDY, DAISY, ECOSSE, EPIC, HYDRUS, ORCHIDEE i R-SWMS.

Model agroekosustava CANDY u samim je počecima razvijen kao pomoćni alat za simulaciju dinamike dušika i ugljika u tlima i služio je kao ulaz i izlaz podataka, a danas je razvijen za samostalan za rad. Model se sastoji od više modula od kojih su neki obavezni za modeliranje agroekosustava, dok drugi nisu, ali se mogu uključiti ili isključiti ovisno o zadatku i dostupnim podacima. CANDY se sastoji od baze podataka odnosno modularnog sustava parametara i od rezultata modela ili jednostavnije ulaznih i izlaznih podataka. Ulazni podaci uključuju svojstva tla i biljaka, početne vrijednosti tla, vremenske podatke, podatke o upravljanju

poljoprivrednim tlom te vrijednosti mjerenja, a izlazni podaci sastoje se od varijabli stanja i tokova koji su povezani s tlom i usjevima te tokovima povezanim s organskom tvari, dušikom i vodom.

DAISY je simulacijski model fizikalnih i bioloških procesa na poljoprivrednoj površini koji prati stanje i tokove vode, energije, dušika, ugljika i pesticida kako iznad tako i ispod površine tla. Model može predvidjeti proizvodnju, utjecaj na okoliš s obzirom na ispiranje i promjene kvalitete tla (ugljik) tijekom određenog vremena. Ulazni podaci za početak rada modela DAISY su dnevni ili satni vremenski podaci (oborine, globalno zračenje, temperatura), podaci o upravljanju poljoprivrednom površinom (žetva/sjetva, obrada tla, navodnjavanje, odvodnja, primjena gnojiva i pesticida) i kvaliteta tla (tekstura, struktura, sadržaj humusa), a izlazni su isto prethodno navedeni, ali promijenjeni tijekom simulacije.

EPIC je model koji se temelji na procesu koji simulira fizikalno-kemijske procese koji se odvijaju u tlu i u vodi. Može se podijeliti na 9 područja odnosno komponenata kojima se bavi i to su: klima, hidrologija, erozija, hranjive tvari, temperatura tla, rast biljaka, kontrola biljnog okoliša, obrada tla i ekonomski proračuni. EPIC je dizajniran za simulaciju poljskih procesa, farmi ili manjih slivova koji je homogen s obzirom na klimu, tlo, uporabu zemljišta i topografiju te djeluje isključivo na vrijeme, pa prema tome se simulacije uglavnom izvode dugoročno, a moguće su i za tisuće godina unaprijed.

Jedan od najnaprednijih i najviše korištenih softverskih paketa su HYDRUS-1D i HYDRUS 2D/3D (*Šimunek i sur., 1999.*). On se koristi za simulacije odnosno modeliranje toka vode i transporta otopina u nesaturiranom mediju u jednodimenzionalnoj ravnini. HYDRUS 2D/3D omogućuje primjenu modela u dvodimenzionalnoj ravnini (*Šimunek i sur., 2006.*). Program je tijekom godina korišten u više stotina znanstvenih radova zbog njegove široke primjene, a jedna od koristi je za simulacije primjene fertirigacije i procesa transporta dušika.

ORCHIDEE je model kopnene biosfere (*Krinner i sur., 2005.*) koji izračunava transport ugljika, vode i energije između površina kopna i atmosfere. Komponenta vode i energije izračunava glavne biofizičke varijable i rješava energetske i hidrološke ravnoteže u vremenu od pola sata. Ugljični modul opisuje fotosintezu i disanje, spore komponente 15 zemaljskog ciklusa ugljika

(uključujući LAI - lisna površina, raspodjelu ugljika u biljnim rezervoarima, dinamiku ugljika u tlu i razgradnju otpada) koji se svakodnevno izračunavaju.

R-SWMS je numerički model za simulaciju transporta otopljene tvari i protoka vode unutar sustava tlo - biljka. Na temelju jednadžbi protoka i transporta u 3D matriksu tla i unutar 3D mreže ksilema korijena, simulira unos otopljene tvari i vode biljnim korijenima za rastući korijenov sustav. Trodimenzionalni rast korijena funkcija je uvjeta okoliša (otpor tla, koncentracija hranjivih sastojaka, temperatura) i biljnih parametara.

Navedeni modeli pokrivaju velik broj mogućnosti, od rješavanja relativno jednostavnih problema jednodimenzionalnog transporta onečišćivala do rješavanja složenih problema višedimenzionalnog toka i transporta onečišćivala uključujući niz biokemijskih reakcija. (*Filipović, 2012.*).

### **2.3.1. Modeliranje pronosa tvari**

Modeliranje toka vode i različitih tvari služi kao alat kojim se mogu opisati i predvidjeti specifični procesi u nesaturiranoj i saturiranoj zoni tla. Naprimjer, različiti modeli mogu poslužiti za testiranje i provedbu pokusa na različitim tipovima tla, na uzgajanim kulturama, u primjeni gnojidbe i sredstava za zaštitu bilja, a sve kako bi se tlo i voda zaštitili od onečišćenja. Modeli su potrebni za projektiranje ili sanaciju odlagališta otpada (industrijski, gradski ili za dugoročno zbrinjavanje raznih drugih vrsta otpada kao naprimjer radioaktivni otpad) (*Mateković, 2018.*). Velik broj modela razvijen je za simuliranje mnogobrojnih procesa koji mogu opisati jednostavnije i složenije biogeokemijske procese te se mogu koristiti u različite svrhe. Ukoliko je riječ o modeliranju nesaturirane zone koja čini jedan jako složen hidrogeološki sustav potrebno je napraviti model koji će zadržati jednostavnost, ali isto tako opisati sve značajne parametre. U nesaturiranoj zoni tla postoji mogućnost eliminacije odnosno razgradnje i sanacije onečišćivala prije ispiranja u podzemne vodne resurse. Pronos tvari u tlu povezan je s tokom vode u nesaturiranoj zoni pa je u modeliranju pronosa tvari vrlo je važno procijeniti vodnu bilancu tla koja uvelike utječe na koncentraciju i biokemijske reakcije različitih supstancija (*Mateković, 2018.*). Pronos tvari u nesaturiranoj zoni tla jedan je

od najkompleksnijih i najzahtjevnijih problema u numeričkom modeliranju (*Filipović 2015.*), koji uključuje transport vode i kemijskih supstancija, kemijske reakcije i mikrobiološke transformacije. Modele treba gledati kao jedan od vrlo naprednih i korisnih „alata“ kojima se uz pravilnu upotrebu mogu predvidjeti različiti procesi koji se odvijaju u (agro)ekosustavima.

### **2.3.2. Priprema, postavljanje i rad modela**

Kako što svaki rad i istraživanje, tako i modeliranje započinje prikupljanjem podataka o određenom problemu koji se rješava, kako bi se dobio konceptualni model. Dobiveni model zapravo je detaljan prikaz funkcioniranja samog sustava s obzirom na dobivene podatke. Prirodni se sustav ne može biti potpuno konceptualiziran pa je vrlo važno pravilno odrediti koji su podaci potrebni za izračun i onda samo njih unijeti u konceptualni model. Nakon prikupljanja i interpretacije podataka odnosno konceptualnog modela, pristupa se postavljanju kompjutorskog modela. Podaci koji su uneseni u matematički model predstavljaju najbolju procjenu kako sustav funkcionira, ali su u stvarnosti rezultati nesigurni. Vrijednosti unesenih podataka prema potrebi se prilagođavaju u procesu kalibracije modela što znači da se podaci usklađuju kako bi se najbolje opisali istraživani sustavi. Kalibracija modela podrazumijeva iterativni postupak, točnije postupno mijenjanje parametara uz pokretanje simulacije nakon svake promjene, sve dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje rezultata modela i mjernih vrijednosti pa se može reći da je kalibracija modela zapravo rješavanje inverznog problema (*Mateković, 2018.*). Nakon kalibracije modela, model se pušta u rad i započinje se s generacijom rezultata potrebnih za rješavanje određenog problema. Pri postavljanju modela svakako je potrebno voditi računa o ispravnom određivanju obilježja predmetnog područja, ispravnom odabiru podataka koji će se unijeti u konceptualni model i ispravnom odabiru programa za modeliranje. Odabrani računalni program za modeliranje treba simulirati uvjete koji su zatečeni na terenu, pa se prema obilježjima i konceptualnom modelu odlučuje hoće li se koristiti jednodimenzionalan, dvodimenzionalan ili trodimenzionalan prikaz modela toka i pronosa tvari.

### 2.3.3. Opis HYDRUS programa za numeričko modeliranje toka vode i transporta tvari

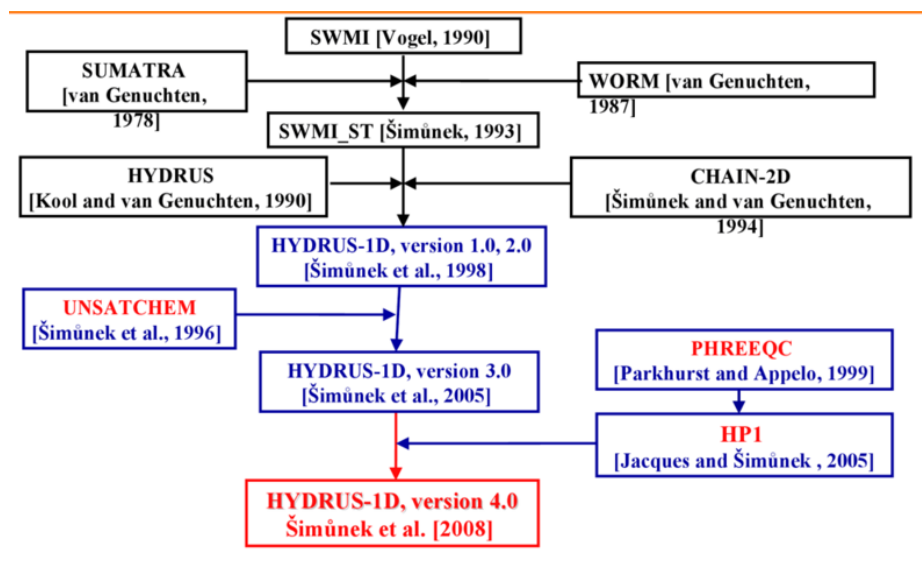
Iako su već ranije spomenuti i navedeni neki od modela koji se koriste za modeliranje i simulaciju toka i transporta vode i različitih tvari, ovdje se stavlja naglasak na model koji se koristi prilikom ovog istraživanja, a to je HYDRUS. Program odnosno softverski paket HYDRUS, zasnovan na Windows sustavu, koristi se za analizu protoka vode, topline, otopljenih tvari u promjenjivo zasićenim medijima tla u različitim ravninama pa se dijeli na HYDRUS 1D i HYDRUS 2D/3D. Iako HYDRUS-1D simulira protok vode, otopljene tvari i transport topline u jednoj dimenziji i predstavlja softver za javno vlasništvo, HYDRUS 2D/3D distribuira se komercijalno te proširuje mogućnosti simulacije u drugoj i trećoj dimenziji. Cijeli paket sastoji se od računalnog programa i interaktivnog korisničkog grafičkog sučelja za predobradu podataka, diskretizaciju profila tla te grafički prikaz rezultata. Osim simulacija toka vode, numerički model omogućuje i specifikaciju distribucije korijena biljke, vode i hranjiva koje je biljka usvojila u odnosu na navodnjavanje ili oborina.

#### 2.3.3.1. HYDRUS 1D

HYDRUS 1D sa spominjanjem započinje u početnim *van Genuchtenovim* radovima (1989.) i njegovim modelima SUMATRA i WORM, ali i u SWMI i HYDRUS modelima. U modelu SUMATRI koristili su se hermijski kubični konačni elementi, u WORM-u linearni konačni elementi, stariji HYDRUS-ov kod koristio se za rješenje jednadžbi protoka vode i otopljene otopine, a SWMI je koristio krajnje konačne razlike za rješavanje jednadžbe toka. Značajke ova četiri spomenuta modela, prvo su bile spomenute u modelu SWMI\_ST koji se u početku temeljio na DOS-u (*Šimůnek i sur., 1993.*), a kasnije na HYDRUS simulatoru koji je kao osnovu imao Windows sustav (*Šimůnek i sur., 1998.*). Ukupno postoji četiri verzije HYDRUS-a 1D: verzija 1 važna je za 16-bitni Windows 3.1, verzija 2 za 32-bitni Windows 95, verzija 3 sadržavala je glavni ionski modul UNSATCHEM (*Suarez i Šimůnek, 1997.*) za simulaciju transporta ugljičnog dioksida i višekomponentnog transporta glavnih iona (uključen je i u HYDRUS 2D/3D), a verzija 4 uključuje UNSATCHEM modul i HP1 program (*Jacques i Šimůnek, 2013.*). Zadnja četvrta verzija

rezultat je spajanja HYDRUS-1D modula s biogeokemijskim programom PHREEQC te se kao zadnja može koristiti na najviše područja.

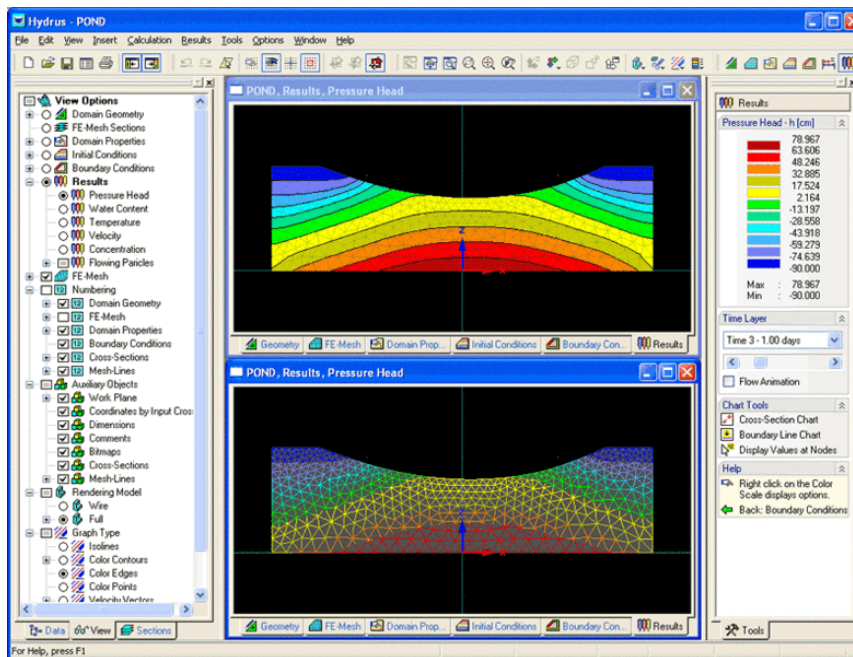
Iako standardni moduli HYDRUS-1D mogu simulirati transport otopljenih tvari koje su ili potpuno neovisne ili uključene u sekvencijalne lance razgradnje prvog reda, dva nova modula mogu razmatrati međusobne interakcije između više otopljenih tvari kao što je naprimjer kationska izmjena i taloženje odnosno otapanje ([https://hr.abadgar-q.com/wiki/Hydrus\\_\(software\)](https://hr.abadgar-q.com/wiki/Hydrus_(software))).



Slika 2.6. Povijest razvoja modela HYDRUS-1D

(Izvor: [https://hr.abadgar-q.com/wiki/Hydrus\\_\(software\)](https://hr.abadgar-q.com/wiki/Hydrus_(software)) )

Upotreba numeričkog modela HYDRUS-1D vrlo je uspješna za procjenu hidrauličkih parametara tla, optimizirajući vodu tla, kretanje otapala i zaštitu podzemnih voda. (Gogolev i sur., 2002., Bethune i sur., 2008., Jimenez-Martinez i sur., 2009., Mattern i sur., 2010.). Površinsko stanje tla vrlo je komplicirano za stjecanje točnih podataka kao što su evapotranspiracija, evaporacija tla i navodnjavanje te mogu uzrokovati neuspjeh modela (Lu i sur., 2011.). Odabir dubine ispod zone ukorijenjenosti kao gornje granice modela s mjerenjem sadržaja vode tla i potencijala kroz duži period, može biti rješenje problema (Scott i sur., 2000.).



Slika 2.7. Prikaz rada modela HYDRUS-1D

(izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:MainPg\\_04.qif](https://en.wikipedia.org/wiki/File:MainPg_04.qif))

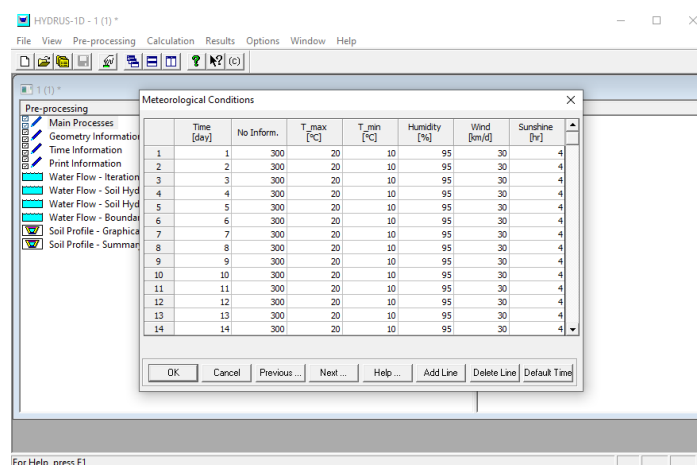
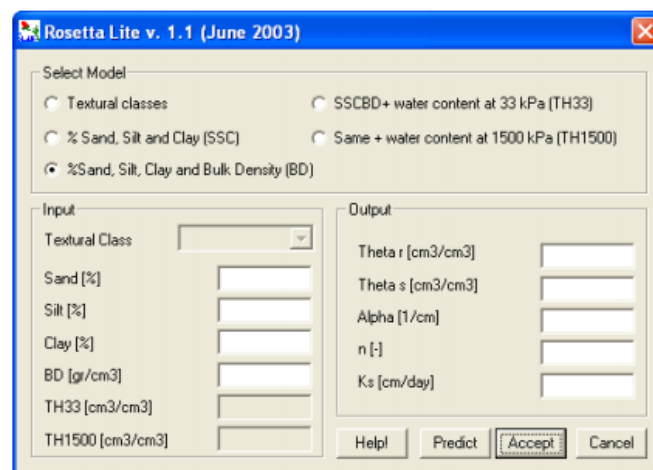
### 2.3.4. Rosetta program za procjenu PTF-ja

Rosetta (Rosetta - Lite) je besplatan program koji koristi pedotransferne funkcije za procjenu i računanje hidrauličke vodljivosti tla (*Schaap i sur., 2001.*). Rosetta V 1.0 radi na principu Windows 95/98 sustava i nudi pet pedotransfernih funkcija koje omogućuju predviđanje hidrauličkih svojstava s ograničenim ili proširenim skupovima ulaznih podataka. Ograničen pristup vrlo je koristan jer omogućuje optimalno korištenje dostupnih ulaznih podataka. Nezasićene hidrauličke funkcije ključni su ulazni podaci u numeričkim modelima procesa nesaturirane zone, a one mogu biti izmjerene izravno ili neizravno (*Schaap i sur., 1999.*). Ovaj program može koristiti sljedeće ulazne podatke: klase teksture tla, postotak pijeska/praha/gline, gustoća i točka retencije vode pri 33 kPa i 1500 kPa. Rosetta se temelji na tablicama baze podataka ACCESS-97 koje omogućuju učinkovito rukovanje i traženje male i velike količine podataka, a oni se mogu ručno unijeti ili pročitati s ASCII datoteke (*Schaap i sur., 1999.*). Maksimalna količina uzoraka s kojima Rosetta može raditi ograničena je dostupnim prostorom na tvrdom disku. Hidraulička svojstva koja se procjenjuju mogu biti izvedena na ASCII datotekama kako bi se mogla koristiti i u nekim drugim programima. Već

ranije spomenuta baza ACCESS-97, nije potrebna za pokretanje Rosette, ali se može koristiti pri upravljanjima i predviđanjima na nekim većim projektima i to jedino pod uvjetom da tablice koje su izrađene nisu promijenjene već izvorno napravljene.

U radu Rosette za izračun hidrauličke vodljivosti tla ( $K_s$ ) potrebni su osnovni (ulazni) podaci o udjelu čestica tla (pijesak, prah, glina) u tlu koji su dobiveni analizom i volumna gustoća tla. Volumna gustoća tla ima poseban značaj na utjecaj saturiranosti tla i hidrauličku vodljivost s obzirom da odražava strukturu tla i distribuciju pora u tlu (*Saxton i Rawls, 2006.*).

*Radcliffe i Šimunek (2010.)* ističu da pedotransferne funkcije mogu prouzročiti velika odstupanja stvarnih i predviđenih vrijednosti, a to sve ovisi o tome koliko se ulaznih podataka koristi. Dodavanjem ulaznih parametara kao što su udio organske tvari, poroznost tla te struktura tla mogu znatno pridonijeti dobivanju boljeg pedotransfernog modela, a isto tako poboljšati točnost hidrauličke vodljivosti tla (slika 2.8.).



Slika 2.8. Prikaz izgleda programa Rosetta

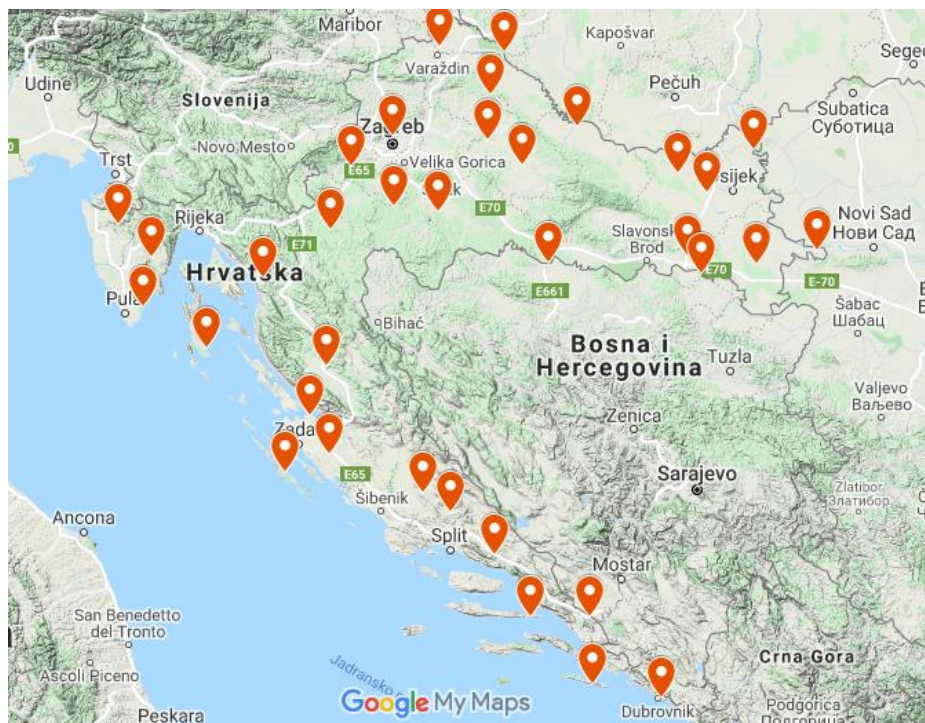


### 3. MATERIJALI I METODE

#### 3.1. Područje istraživanja

U Republici Hrvatskoj nailazi se na veliki broj poljoprivrednih površina kao i privatnih te državnih gospodarstava koje se koriste u različitim razmjerima. Postoje mnogobrojni podaci o prosječnim površinama obrađenih i neobrađenih površina, o ukupnim poljoprivrednim površinama te o površinama na kojima se uzgajaju određene količine kultura, ali se ti podaci stalno mijenjaju i razlikuju. Najveći udio površina u RH namijenjen je za uzgoj žitarica, industrijskog i krmnog bilja, ali tu je i uzgoj voćaka, povrća, maslina, vinove loze, trajnih nasada koji znatno povećavaju i poboljšavaju sliku poljoprivredne proizvodnje.

Istraživanje je provedeno na području Republike Hrvatske, na 35 lokacija (slika 3.1.). Karta s prikazom lokacija uzorkovanja napravljena je u Google Maps-u i za svaku lokaciju navedene su osnovne karakteristike (točna lokacija profila tla, geografska širina i dužina, biljna zajednica ili kultura, tip tla) (slika 3.1.). Izbor lokacija izvršen je u suradnji znanstvenika i stručnjaka Sveučilišta u Zagrebu - Zavoda za melioracije, Zavoda za pedologiju te Zavoda za opću proizvodnju bilja.



**Slika 3.1.** Terenska karta Republike Hrvatske s lokacijama uzorkovanja

U nastavku poglavlja biti će tablično navedene istraživane lokacije u cijeloj RH te zajedno s njima tip tla i biljna zajednica koja se tamo nalazi.

**Tablica 3.1.** Popis lokacija uzorkovanja tla, tipova tla te biljnih zajednica koji se nalaze na tim područjima diljem RH

	LOKACIJA	LOKACIJA	BILJNA ZAJEDNICA	TIP TLA
1	Bačka Palanka	Smitovac	oranica	černoziem
2	Bjelovar	Ladislav	oranica	pseudoglej
3	Brod	Donji Andrijevi	oranica	močvarno glejno tlo
4	Čakovec	Sokolovac	šuma bukve sa dlakavim šašem	lesivirano tlo
5	Čazma	Rakitnica	šuma hrasta lužnjaka i običnog graba	pseudoglej
6	Donji Miholjac	Brezovica	oranica	močvarno glejno tlo
7	Dubrovnik	Srđ	travnjak	rendzina
8	Dugi Otok	Žman	makija	rendzina
9	Đurđevac	Veliki Pazut	oranica	močvarno glejno tlo
10	Gospić	Ostrvica	oranica	lesivirano tlo
11	Karlovac	Grubešići	zapuštena bujadnica	lesivirano tlo
12	Kostajnica	Lug	šuma hrasta lužnjaka s velikom žutilovkom	močvarno glejno tlo
13	Makarska	Zaglava	makija	crvenica
14	Mljet	Babino Polje	makija s alepskim borom	rendzina
15	Mostar	Jakići	napuštena oranica	crvenica
16	Novigrad	M. Blato	zapušteni pašnjak	crvenica
17	Ogulin	Alino brdo	šuma bukve i jele	rendzina
18	Omiš	Bile Laže	kraški pašnjak	crvenica
19	Osijek	Križevačko Polje	oranica	lesivirano tlo
20	Pakrac	Gornja Varoš	oranica	aluvijalno tlo

**Tablica 3.1.** Popis lokacija uzorkovanja tla, tipova tla te biljnih zajednica koji se nalaze na tim područjima diljem RH - nastavak

21	Pazin	Bajci	šuma medunca i bjelograba	crvenica
22	Petrinja	Gornja Bučica	oranica	pseudoglej
23	Ptuj	Vratno	oranica	močvarno glejno tlo
24	Pula	Kavran	oranica	crvenica
25	Rab	O. Cres – Murtovnik	oranica	pseudoglej
26	Rovinj	Motovun	oranica	močvarno glejno tlo
27	Samobor	Rački Gaj	kultura četinjača	pseudoglej
28	Slatina	Gornje Bazje	travnjak	močvarno glejno tlo
29	Sombor	V. Kazuk	šuma vrbe i topole	aluvijalno tlo
30	Split	Mileševo	pašnjak	rendzina
31	Šibenik	Bunčići (Petrovo Polje)	oranica	aluvijalno tlo
32	Vinkovci	Sikirevci	oranica	aluvijalno tlo
33	Vukovar	Otok	oranica	lesivirano tlo
34	Zadar	Plemići	pašnjak	aluvijalno tlo
35	Zagreb	Gračani	kultura običnog bora	rendzina

### 3.2. Izbor tipova tala i pedološke karakteristike na lokacijama istraživanja

Prema *Husnjaku (2014.)* i njegovoj klasifikaciji, ali i na temelju provedenih terenskih i laboratorijskih istraživanja na prethodno navedenim lokacijama, izdvojeno je sedam tipova tala na čijim će se obilježjima kasnije temeljiti baza podataka. Baza podataka tipova tala uključuje sljedeće značajke: koordinate uzorkovanja, nadmorsku visinu, način korištenja, matični supstrat, tip tla, sadržaj pijeska, praha i gline, sadržaj humusa i pH. Sve navedeno provesti će se za ova tla: aluvijalno tlo, crvenica, černoziem, lesivirano tlo, močvarno glejno tlo, pseudoglej i rendzina (slika 3.2.). U tablici 3.1. navedeni su tipovi tala i lokacije na kojima se nalaze, ali u tablici 3.2. će biti jednostavnije prikazan broj lokacija pod određenim tipom tla.

**Tablica 3.2.** Broj lokacija na kojima se nalazi koji tip tla, te red kojemu tla pripadaju

TIP TALA	BROJ LOKACIJA	RED TALA
Aluvijalno tlo	5	hidromorfna
Crvenica	6	terestrička
Černoziem	1	terestrička
Lesivirano tlo	5	terestrička
Močvarno glejno tlo	7	hidromorfna
Pseudoglej	5	semiterestrička
Rendzina	6	terestrička

Tla istraživanih lokacija pripadaju trima redovima tala, najviše terestričkim, a ostali hidromorfnim i semiterestričkim. Red terestričkih tala karakterizira vlaženje isključivo oborinskom vodom, pri čemu se suvišna voda slobodno i bez duljeg zadržavanja perkolira kroz solum tla te se u tlu unutar 1 m dubine ne javlja prekomjerno vlaženje suvišnom vodom. Red semiterestričkih tala karakterizira povremeno prekomjerno vlaženje suvišnom vodom unutar 1 m dubine koja je podrijetlom oborinska i koja stagnira u horizontu i na horizontu slabe do vrlo slabe vodopropusnosti (*Husnjak, 2014*). Red hidromorfnih tala karakterizira prekomjerno vlaženje podzemnom vodom unutar 1 m dubine, ali uz to se može javiti i dopunska suvišna voda kao poplavna, slivena ili oborinska voda koja dulje stagnira u horizontu ili na horizontu

slabe ili vrlo slabe vodopropusnosti. Različitost obilježja tala odražava se na intenzitet i pravac razvoja tala te na fizikalna, kemijska i biološka svojstva tla (*Husnjak, 2014.*).

Na pet lokacija istraživanog područja nalazi se aluvijalno tlo. Prema *Husnjaku (2014.)* aluvijalno tlo ili češće korišten pojam fluvijalno tlo (fluvisol) pripada razredu inicijalnih (nerazvijenih) tala. Nastaje isključivo na području dolina uz područje velikih rijeka gdje učestalo dolazi do izlivanja rijeka iz korita. Na nastanak i obilježja fluvijalnih nanosa veliki utjecaj ima intenzitet i učestalost poplava. Fluvijalno tlo obilježava specifični način formiranja matičnoga supstrata, koji čine recentni fluvijalni nanosi. Svrstava se u nerazvijena hidromorfna tla zbog mladosti nanosa i zbog činjenice da učestalo taloženje novih čestica tla sprječava razvoj pedogenetskih procesa. Za izdvajanje podtipova fluvijalnoga tla kao kriteriji izabrani su prisutnost karbonata i intenzitet vlaženja podzemnom vodom. Na razini varijeteta kao kriterij izabrani su dubina tla do šljunka te pojava zaslanjivanja i alkalizacije. Na razini forme kao kriteriji izabrani su teksturni sastav površinskog sloja tla unutar gornjih 30 cm dubine te sadržaj skeleta.

Na šest lokacija istraživanih područja nalazi se crvenica koja prema klasifikaciji *Husnjaka (2014.)*, pripada razredu rezidualnih kambičnih tala. Crvenica je tlo koje nastaje iz razreda humusno - akumulativnih tala, točnije vapnenačko - dolomitne crnice kao tipa tla. Razvija se na vrlo različitim reljefnim formama brežuljkastog i brdovitog reljefa, ali i na zaravnjenim dijelovima terena. Crvenica ima automorfni način vlaženja, znači vlaženje oborinskom vodom koja se slobodno procjeđuje kroz solom tla. Za izdvajanje podtipova crvenice izabran je kriterij dostignuti stadij razvoja. a njezin proizvodni potencijal ključni utjecaj ima dubina tla, stjenovitost, nagib, površina homogene cjeline s crvenicom te nadmorska visina terena.

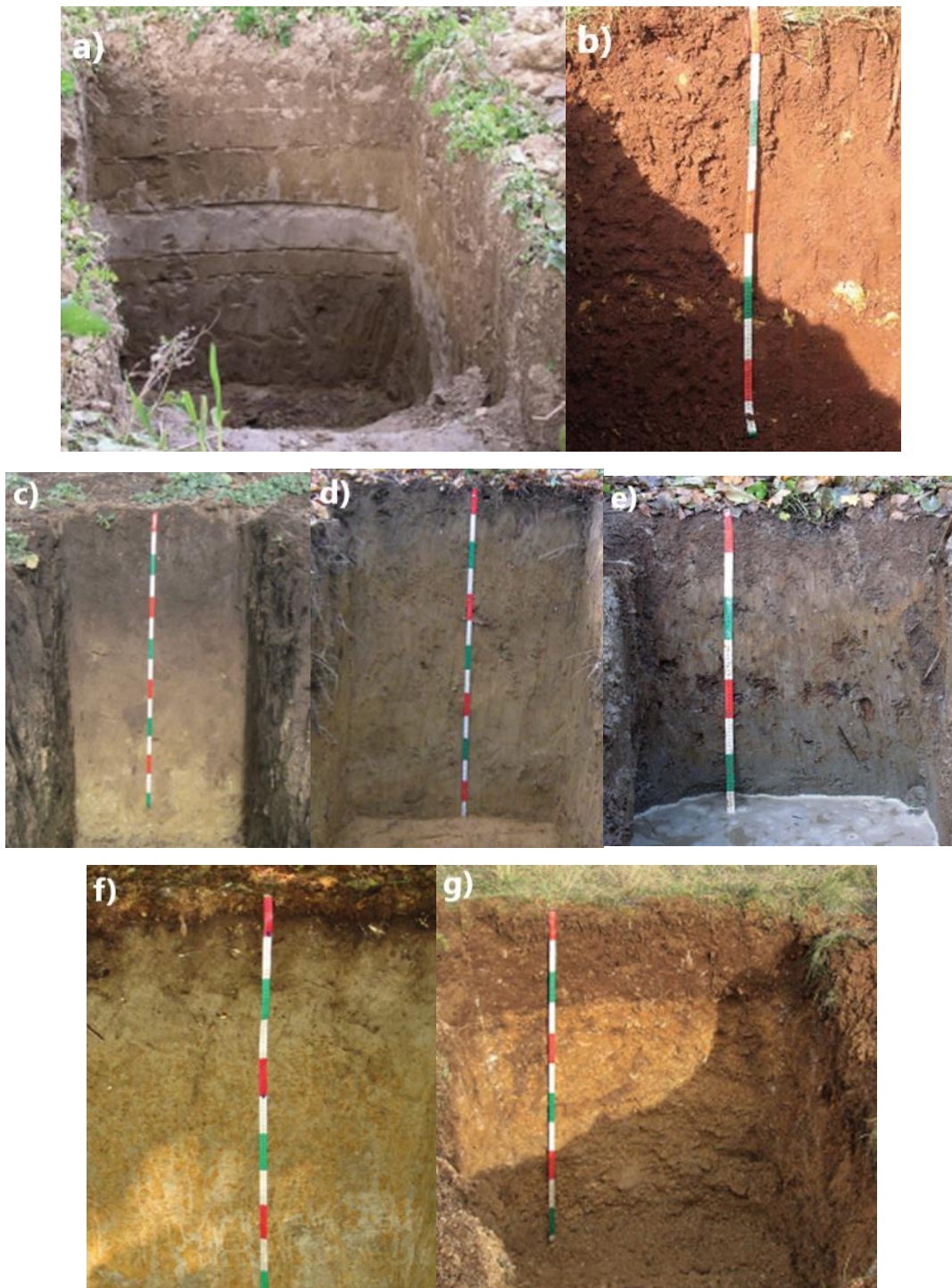
Na jednoj lokaciji istraživanih područja nalazi se černoziem koji također pripada razredu humusno - akumulativnih tala. Černoziem je tlo nastalo daljnjim razvojem iz sirozema, a matični supstrat za nastanak predstavljao je karbonatni les koji sadrži i do 30 % karbonata. Karakterizira ga stabilna mrvičasta struktura i idealni vodozračni odnosi te dominantno automorfni način vlaženja. Podtipovi černoziema izdvajaju se na temelju vrste matičnoga supstrata. Na razini forme kao kriterij izabrana je dubina humusno-akumulativnoga horizonta te dubina podzemne vode unutar 2,0 m dubine.

Na pet lokacija istraživanih područja nalazi se lesivirano tlo ili luvisol koje prema *Husnjakovoj* klasifikaciji pripada razredu eluvijalno-iluvijalnih tala, a nastaje razvojem automorfni tala iz tipičnog i rezidualnoga kambičnog razreda. Lesivirano tlo i spomenuta kambična tla razvijaju se na vrlo različitim matičnim supstratima. Veći dio lesiviranih tala obilježava pretežno rahli humusno-akumulativni i eluvijalni horizont lakše teksture te zbijeniji iluvijalni horizont glinasto ilovaste teksture. Za podjelu lesiviranog tla na podtipove izabrana je vrsta matičnoga supstrata, a razini varijeteta kao kriterij za razvrstavanje toga tla izabrani su dostignuti stadij razvoja te pojava podzemne vode ispod 1,0 m dubine tla.

Na sedam lokacija istraživanih područja nalazi se močvarno glejno tlo ili češće korišten pojam hipoglej koji pripada razredu hipoglejnih tala. Ovaj se tip tla nalazi u zoni stalne prisutnosti podzemne vode i tamo dominiraju anaerobni procesi. Hipoglej nastaje na području prostranijih mikrodepresija s relativno plitkim podzemnim vodama, ali najveći dio nastaje uglavnom na matičnom supstratu koji čine stariji „lakši” fluvijalni nanosi (pjeskovitog do glinasto ilovastog teksturnog sastava). Za izdvajanje podtipova hipogleja kao kriterij izabrana je prisutnost karbonata, a na razini varijeteta kao kriterij izabran je sadržaj humusa.

Na pet lokacija istraživanih područja nalazi se pseudoglej koji pripada razredu pseudo i stagnoglejnih tala. Pseudoglej nastaje u područjima humidne klime odnosno u uvjetima različitih kombinacija pedogenetskih čimbenika zbog kojih se pojavljuje stagniranje oborinskih voda. Pseudoglej karakterizira vlaženje dominantno oborinskom vodom, koja se zbog prisutnosti slabo propusnoga horizonta ne procjeđuje slobodno kroz solum. Kao kriterij za podjelu pseudogleja na podtipove izabrana je forma reljefa na kojoj se taj tip tla javlja. Na razini forme kao kriteriji izabrani su reakcija tla i stupanj zasićenosti tla bazama.

Na šest lokacija istraživanih područja nalazi se rendzina. Prema *Husnjaku (2014.)*, rendzina pripada razredu humusno-akumulativnih tala. Uglavnom nastaje daljnjim razvojem sirozema, ali i na koluvijalnim i fluvijalnim nanosima. Razvija se pretežno na rastresitom matičnom supstratu i na različitim reljefnim formama. Kriterij za izdvajanje podtipova je vrsta matičnog supstrata. Na razini varijeteta kriterij za razvrstavanje rendzine je stupanj razvoja tla koji upućuje na karbonatnost i nekarbonatnost. Na razini forme kao kriterij izabrana je ekološka dubina.



**Slika 3.2.** Prikaz pedoloških profila tipova tala koja se istražuju; a) aluvijalno tlo; b) crvenica; c) černoziem; d) lesivirano tlo; e) močvarno glejno tlo; f) pseudoglej; g) rendzina (Izvor: *Husnjak, 2014.*)

**Tablica 3.3.** Karakteristike tla, sistematska pripadnost i fizikalna svojstva tla na lokacijama istraživanja - nastavak

	Lokacija	Poljoprivredna površina	Tip tla	Podtip,varijetet, forma tla	Sadržaj mehaničkih čestica (%)			pH (H <sub>2</sub> O)	Humus (%)
					Pijesak	Prah	Glina		
1	Bačka Palanka - Smitovac	oranica	černozem	na lesu, posmeđeni, srednje duboki	34,5	34,6	30,9	7,4	1,5
2	Bjelovar - Ladislav	oranica	pseudoglej	na zaravni, srednje duboki, eutrični	52,8	38,1	9,1	6,2	2,2
3	Brod - Donji Andrijevi	oranica	močvarno glejno tlo	hipoglejno	30,2	37,4	32,4	6,7	3,0
4	Čakovec - Sokolovac	šuma bukve s dlakavim šašem	lesivirano tlo	tipično	49,0	31,3	19,7	5,2	11,7
5	Čazma - Rakitnica	šuma hrasta lužnjaka i običnog graba	pseudoglej	na zaravni	59,0	31,4	9,6	4,7	5,7
6	Donji Miholjac - Brezovica	oranica	močvarno glejno tlo	hipoglejno, mineralno, karbonatno	36,5	37,2	26,3	5,8	2,3
7	Dubrovnik - Srđ	travnjak	rendzina	na dolomitnom vapnencu, plitka	45,0	21,7	33,3	7,3	9,9
8	Dugi Otok - Žman	makija	rendzina	na koluviju vapnenca, karbonatna, duboka	40,2	35,2	24,6	7,3	8,5
9	Đurđevac - Veliki Pazut	oranica	močvarno glejno tlo	hipoglejno, mineralno	71,6	20,0	8,4	7,6	1,5
10	Gospić - Ostrvica	oranica	lesivirano tlo	na vapnenoj breci	34,7	47,9	17,4	6,2	3,5



**Tablica 3.3.** Karakteristike tla, sistematska pripadnost i fizikalna svojstva tla na lokacijama istraživanja - nastavak

11	Karlovac - Grubešići	zapuštena bujadnica	lesivirano tlo	na vapnencima, tipično	29,9	43,8	26,3	5,3	-
12	Kostajnica - Lug	šuma hrasta lužnjaka s velikom žutilovkom	močvarno glejno tlo	hipoglejno	55,9	25,7	18,4	6,1	21,6
13	Makarska - Zaglava	makija	crvenica	tipična, plitka	34,0	33,2	32,8	7,3	7,7
14	Mljet - Babino Polje	makija s alepskim borom	rendzina	na pijesku, karbonatna	92,3	2,0	5,7	7,2	3,1
15	Mostar - Jakići	napuštena oranica	crvenica	antropogenizirana	23,6	14,4	62,0	8,0	2,3
16	Novigrad - M.Blato	zapušteni pašnjak	crvenica	tipična, na krednim vapnencima	29,2	20,6	50,2	6,3	3,4
17	Ogulin - Alino brdo	šuma bukve i jele	rendzina	posmeđena	34,8	43,0	22,2	6,8	8,1
18	Omiš - Bile Laže	Kraški pašnjak	crvenica	tipična	18,8	33,3	47,9	7,5	7,3
19	Osijek - Križevačko Polje	oranica	lesivirano tlo	na lesu	45,2	32,7	22,2	6,1	1,2
20	Pakrac - Gornja Varoš	oranica	aluvijalno tlo	karbonatno, neoglejeno	54,6	25,1	20,3	7,5	2,6
21	Pazin - Bajci	šuma medunca i bjelograba	crvenica	lesivirana	33,4	23,7	42,9	5,6	10,0
22	Petrinja - Gornja Bučica	oranica	pseudoglej	obronačni, distrični, antropogeni	34,2	41,8	24,0	6,6	2,6

**Tablica 3.3.** Karakteristike tla, sistematska pripadnost i fizikalna svojstva tla na lokacijama istraživanja - nastavak

23	Ptuj - Vratno	oranica	močvarno glejno tlo	amfiglejno, mineralno, nekarbonatno	40,6	40,2	19,2	6,8	3,2
24	Pula - Kavran	oranica	crvenica	duboka, antropogenizirana	35,3	25,6	39,1	6,5	3,0
25	Rab - O. Cres - Murtovník	oranica	pseudoglej	ravničarski, duboki, eutrični	60,6	15,8	23,6	6,0	4,6
26	Rovinj - Motovun	oranica	močvarno glejno tlo	hipoglejno	9,8	53,2	37,0	7,7	3,3
27	Samobor - Rački Gaj	kultura četinjača	pseudoglej	ravničarski, eutrični, srednje duboki	40,4	26,9	32,7	6,3	3,6
28	Slatina - Gornje Bazje	travnjak	močvarno glejno tlo	amfiglejno, mineralno, nekarbonatno	22,2	44,5	33,3	6,1	-
29	Sombor - V. Kazuk	šuma topole i vrbe	aluvijalno tlo	karbonatno, oglejeno, vrlo duboko	28,0	44,4	27,6	7,5	8,0
30	Split - Mileševo	pašnjak	rendzina	na dolomitu, srednje duboka	43,6	22,0	34,4	7,6	9,1
31	Šibenik - Bunčići (Petrovo Polje)	oranica	aluvijalno tlo	karbonatno, antropogeno	37,3	32,2	30,5	8,3	2,5
32	Vinkovci - Sikirevci	oranica	aluvijalno tlo	karbonatno	42,7	30,3	27,0	7,7	1,3
33	Vukovar - Otok	oranica	lesivirano tlo	na lesu	51,6	31,7	16,7	6,6	1,7
34	Zadar - Plemići	pašnjak	aluvijalno tlo	karbonatno, oglejeno, zaslanjeno	38,0	47,5	14,5	7,9	2,1

35	Zagreb - Gračani	kultura običnog bora	rendzina	na litotamnijskom vapnencu	59,3	20,8	19,9	7,9	15,8
----	---------------------	----------------------	----------	-------------------------------	------	------	------	-----	------

### 3.3. Klimatski parametri

Srednje vrijednosti klimatskih parametara daju uvid u klimatske osobitosti svakog područja. Usporedbom klimatskih parametara za različita razdoblja može se steći uvid u stabilnost klimatskih prilika nekog područja, ali i njihova promjenjivost može biti indikacija klimatskih promjena. Na meteorološkim postajama svakodnevno se mjere i opažaju vrijednosti klimatskih elemenata: sijanja sunca, temperature zraka, naoblake, oborine, relativne vlažnosti zraka, tlaka zraka, smjera i brzine vjetera i ostalih. Na osnovi višegodišnjih nizova podataka stvara se slika klimatskih prilika za područje reprezentativnosti pojedine meteorološke postaje ili se korištenjem motrenja više postaja s nekog područja, dobiva uvid u regionalne klimatske prilike. Na klimatske prilike najviše utječu geografska širina, nadmorska visina, raspodjela kopna i mora, reljef i vrsta podloge.

U ovome radu, u svrhu analize klimatskih parametara za svih 35 lokacija diljem cijele Hrvatske, korišteni su podaci sa 7 meteoroloških postaja za razdoblje 2020. godine. U tablici koja slijedi popis je lokacija i njihovih najbližih meteoroloških postaja.

**Tablica 3.4.** Popis istraživanih lokacija podijeljenih prema najbližim meteorološkim postajama

	<b>Meteo postaje</b>	<b>Lokacije</b>
1.	OSIJEK	<ul style="list-style-type: none"><li>- Bačka Palanka (Smitovac)</li><li>- Osijek (Križevačko Polje)</li><li>- Vinkovci (Sikirevci)</li><li>- Vukovar (Otok)</li><li>- Sombor (V. Kazuk)</li></ul>
2.	SLAVONSKI BROD	<ul style="list-style-type: none"><li>- Slatina (Gornje Bazje)</li><li>- Petrinja (Gornja Bučica)</li><li>- Brod (Donji Andrijevi)</li><li>- Đurđevac (Veliki Pazut)</li><li>- Donji Miholjac (Brezovica)</li></ul>
4.	ZAGREB	<ul style="list-style-type: none"><li>- Zagreb (Gračani)</li><li>- Bjelovar (Ladislav)</li><li>- Samobor (Rački Gaj)</li><li>- Čakovec (Sokolovac)</li></ul>

**Tablica 3.4.** Popis istraživanih lokacija podijeljenih prema najbližim meteorološkim postajama  
- nastavak

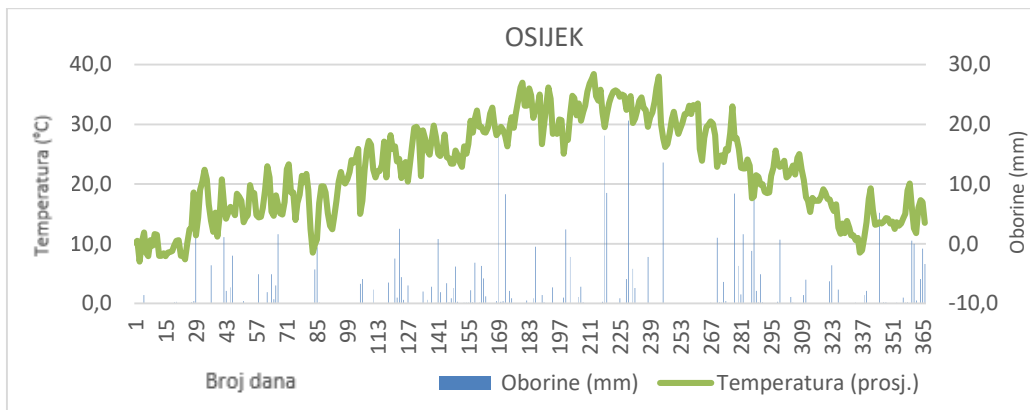
		- Čazma (Rakitnica)
5.	GOSPIĆ	- Gospić (Ostrvica) - Pakrac (Gornja Varoš) - Kostajnica (Lug) - Karlovac (Grubešići) - Ogulin (Alino Brdo)
6.	RIJEKA	- Rovinj (Motovun) - Pazin (Bajci) - Rab (O.Cres - Murtovnik) - Pula (Kavran) - Ptuj (Vratno)
7.	ZADAR	- Zadar (Plemići) - Split (Mileševo) - Šibenik (Bunčići - Petrovo Polje) - Novigrad (M. Blato) - Dugi Otok (Žman)
7.	DUBROVNIK	- Dubrovnik (Srđ) - Omiš (Bile Laže) - Makarska (Zaglava) - Mljet (Babino Polje) - Mostar (Jakići)

S obzirom na istraživane lokacije i njihove najbliže meteo postaje, u nastavku će biti opisane osnovne vrijednosti klimatskih parametara za 2020. godinu koje su korištene pri izradi krivulja i grafova.

Meteorološka postaja Osijek zabilježila je sljedeće podatke:

- prosječna godišnja količina oborina: 578 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 98,7 mm (kolovoz)
- najmanja prosječna količina oborina: 13,8 mm (siječanj)
- srednja godišnja temperatura: 12,5 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 0,4 °C (siječanj)

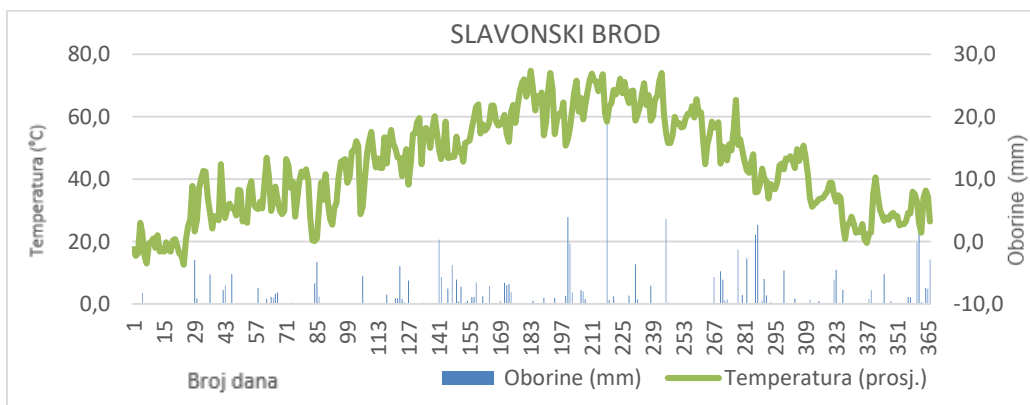
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 23,4 °C (kolovoz)



**Slika 3.3.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

Meteorološka postaja Slavonski Brod zabilježila je sljedeće podatke:

- prosječna godišnja količina oborina: 680,1 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 108,6 mm (listopad)
- najmanja prosječna količina oborina: 13,9 mm (travanj)
- srednja godišnja temperatura: 12,3 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 0,2 °C (siječanj)
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 23,1 °C (kolovoz)

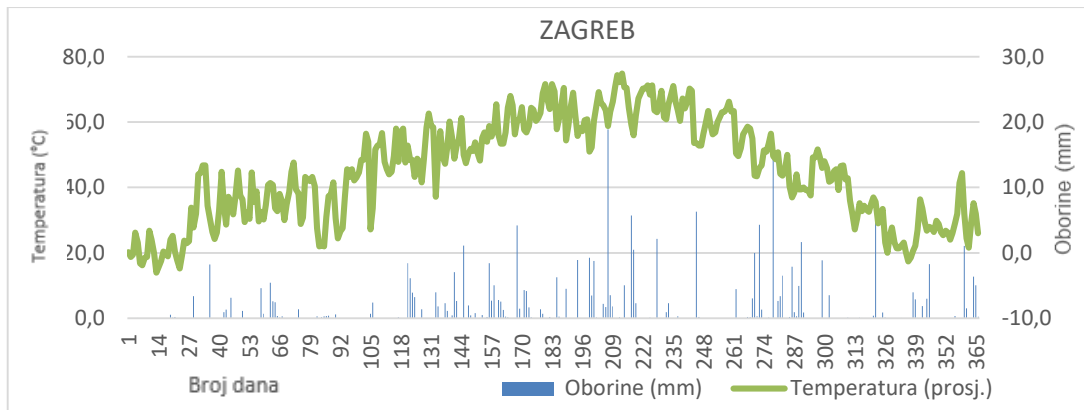


**Slika 3.4.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

Meteorološka postaja Zagreb zabilježila je sljedeće podatke:

- prosječna godišnja količina oborina: 950,4 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 159,6 mm (srpanj)

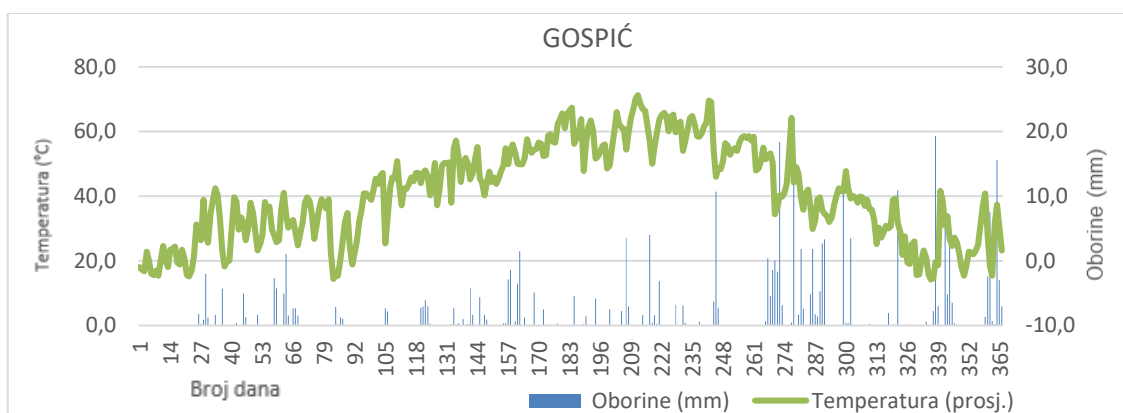
- najmanja prosječna količina oborina: 8,7 mm (siječanj)
- srednja godišnja temperatura: 12,6 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 1,0 °C (siječanj)
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 22,9 °C (kolovoz)



**Slika 3.5.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

Meteorološka postaja Gospić zabilježila je sljedeće podatke:

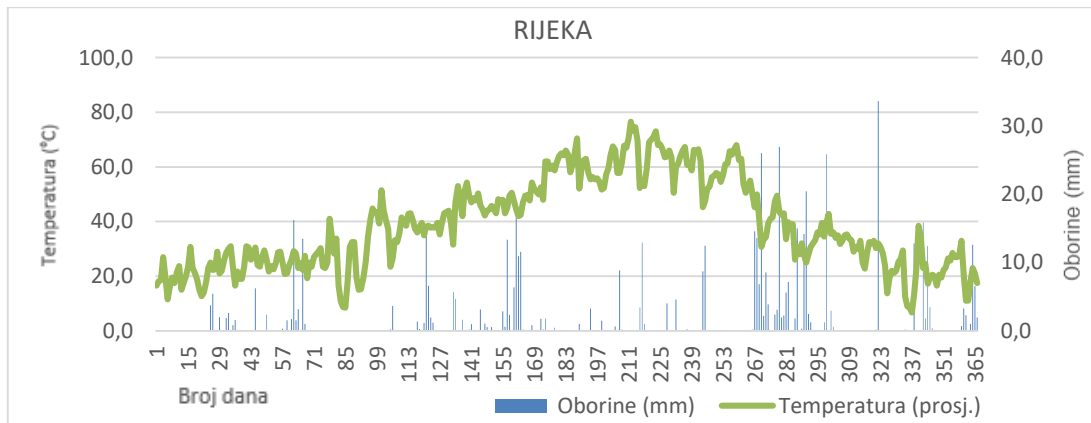
- prosječna godišnja količina oborina: 1215,1 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 270,2 mm (prosinac)
- najmanja prosječna količina oborina: 24,0 mm (siječanj)
- srednja godišnja temperatura: 10,6 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 0,9 °C (siječanj)
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 20,8 °C (kolovoz)



**Slika 3.6.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

Meteorološka postaja Rijeka zabilježila je sljedeće podatke:

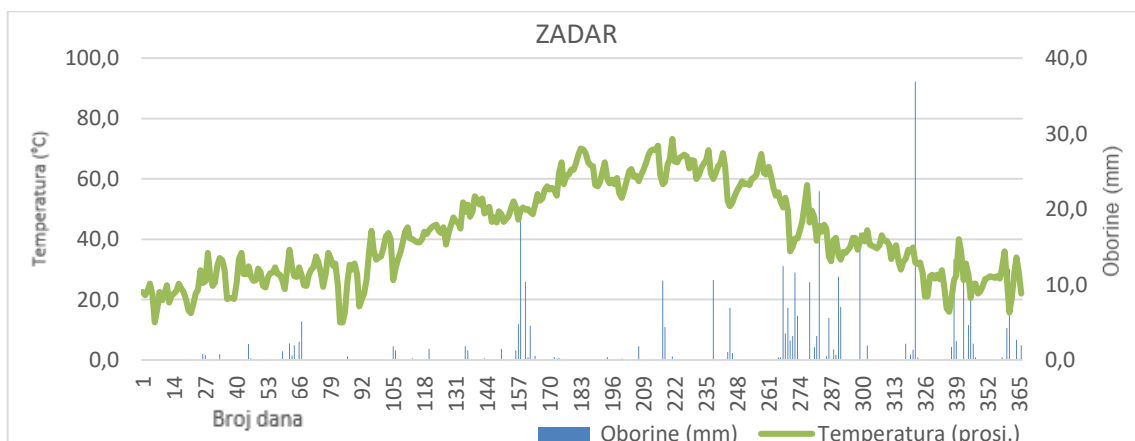
- prosječna godišnja količina oborina: 1427,4 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 338,7 mm (listopad)
- najmanja prosječna količina oborina: 28,3 mm (siječanj)
- srednja godišnja temperatura: 15,5 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 8,1 °C (siječanj)
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 25,3 °C (kolovoz)



**Slika 3.7.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

Meteorološka postaja Zadar zabilježila je sljedeće podatke:

- prosječna godišnja količina oborina: 882,8 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 206,4 mm (listopad)
- najmanja prosječna količina oborina: 3,8 mm (siječanj)
- srednja godišnja temperatura: 16,6 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 9,0 °C (siječanj)
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 25,9 °C (kolovoz)

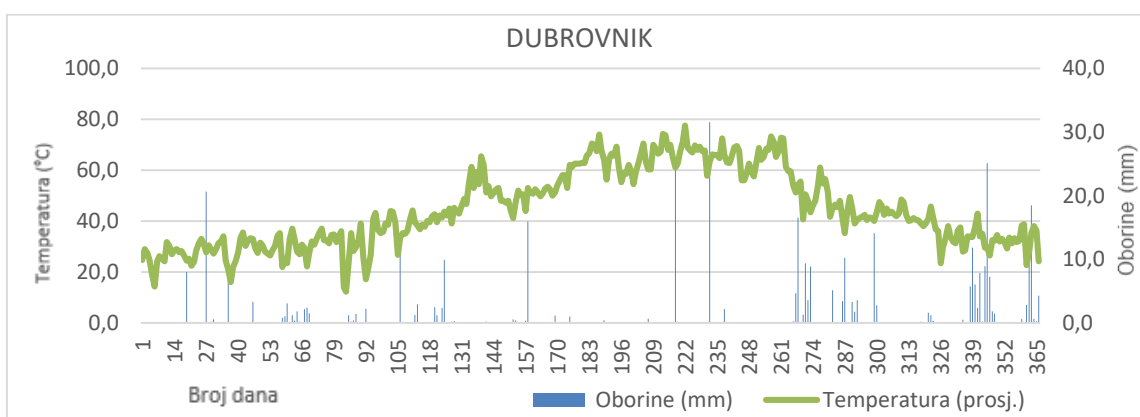




**Slika 3.8.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

Meteorološka postaja Dubrovnik zabilježila je sljedeće podatke:

- prosječna godišnja količina oborina: 958,9 mm
- najveća prosječna mjesečna količina oborina: 291,6 mm (prosinac)
- najmanja prosječna količina oborina: 2,7 mm (srpanj)
- srednja godišnja temperatura: 17,8 °C
- najniža prosječna mjesečna temperatura: 10,7 °C (siječanj)
- najviša prosječna mjesečna temperatura: 26,9 °C (kolovoz)



**Slika 3.9.** Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživanog razdoblja (2020. godina)

### 3.4. Određivanje hidrauličkih parametara tla HYDRUS modelom

HYDRUS je programski paket koji modelira kretanje vode i određenih tvari u dvo- i trodimenzionalnom varijabilno-saturiranom mediju, točnije tlu. Paket se sastoji od HYDRUS računalnog programa s grafičkim sučeljem, a radi na principu rješavanja Richardsove jednadžbe za saturirani i nesaturirani tok vode (*Richards, 1931.*) te jednadžbe advekcije i disperzije za pronos tvari. Tok vode moguće je istovremeno promatrati i u vertikalnom i horizontalnom smjeru kao i u sve tri dimenzije.

Za simuliranje toka vode u jednodimenzionalnoj ravnini korištena je Richardsova jednadžba za Darcyjev tok vode u (ne)saturiranom mediju:

$$(1) \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} - S(h)$$

$$(2) \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h)$$

$\partial$  - vodni potencijal tla [ $L^3/L^3$ ]

$h$  - voda u porama tla [L]

$K$  - hidraulička vodljivost nesaturiranog tla [L/T]

$z$  - vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore)

$t$  - vrijeme [T]

$S$  - voda koju biljka usvaja [T]

Za simuliranje toka u dvodimenzionalnoj ravnini također je korištena Richardsova jednadžba za Darcyjev tok vode u (ne)saturiranom poroznom mediju:

$$(3) \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K(h) \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S(h)$$

$h$  - vodni potencijal tla [L]

$K$  - hidraulička vodljivost nesaturiranog tla [L/T]

$K_{ij}^A$  - tenzor anizotropije [-]

$x_i$  - prostorna koordinata [L]

$z$  - vertikalna koordinata [L]

$t$  - vrijeme [T]

$S$  - voda koju biljka usvaja [T]

Prethodno navedene jednadžbe korištene za rješavanje toka vode u tlu mogu se jednostavnije zapisati kao:

$$(4) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (K \nabla H) - S_w$$

$\theta$  - količina vode u tlu [ $L^3/L^3$ ]

$K$  - hidraulička propusnost nesaturiranog tla [L/T]

$H$  - hidraulički potencijal tla [L]

$S_w$  - voda koju biljka usvaja [T]

$\nabla$  - operator prostorne promjene

$t$  - vrijeme [T]

Retencijskim krivuljama tla određuje se odnos između relativne količine vode u tlu  $\theta$  (masa vode u tlu / masa osušenog tla) i vodnog potencijala tla  $h$ .

Van Genuchten-Mualemov model koristi se za opisivanje hidrauličkih parametara tla (*van Genuchten, 1980.*), a razvijen je kombiniranjem empirijski utemeljene jednadžbe potencijala koja opisuje odnos između tlačne visine ( $h$ ) i sadržaja vlage ( $\theta$ ) s prediktivnim modelom raspodjele veličina pora za nezasićenu hidrauličku vodljivost (*Mualem, 1976.*). Model je zapisan kao:

$$(5) \theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|^n)^m} ; h < 0$$

$$(6) \theta(h) = \theta_s ; h \geq 0$$

$$(7) K(h) = K_s S_e^l \left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right)^2$$

$$(8) Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$(9) m = 1 - \frac{1}{n} ; n > 1$$

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

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

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

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

$h$  - vodni potencijal tla [L]

$\vartheta$  - volumna količina vode u tlu

$Se$  - efektivna saturacija tla

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

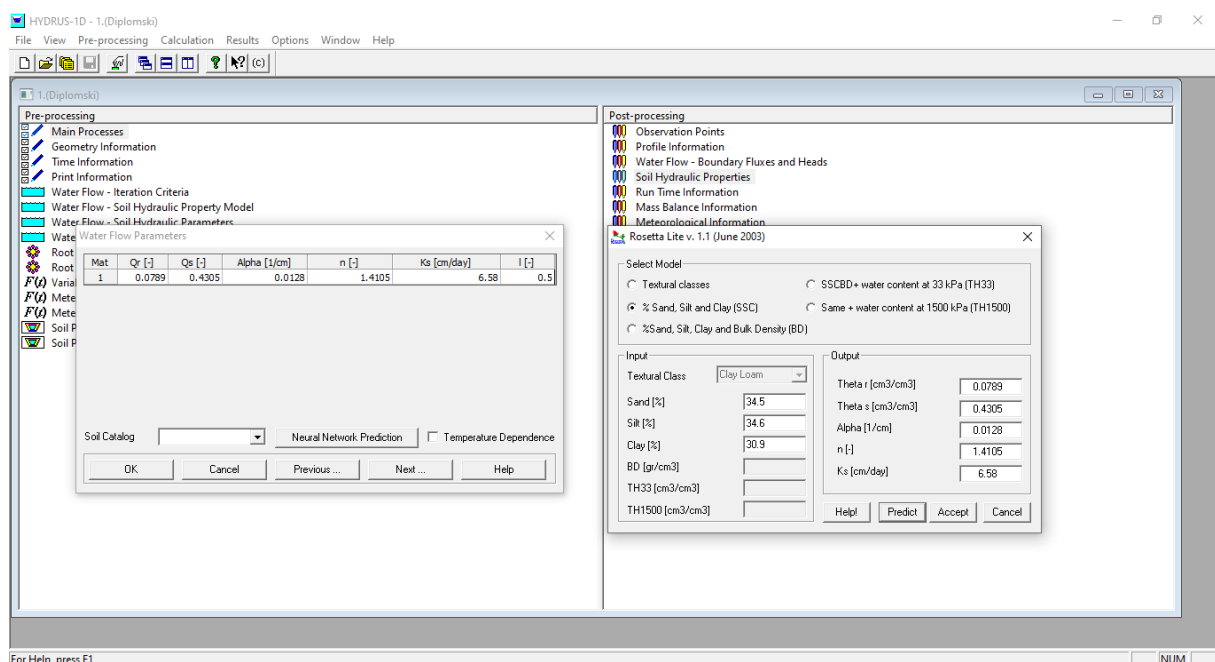
$m$  - koeficijent optimizacije

$\alpha$  - inverzna vrijednost svih pora ispunjenih zrakom [ $L^{-1}$ ]

$n$  - indeks raspodjele veličine pora i faktor povezanosti pora (0,5 - preporučena vrijednost)

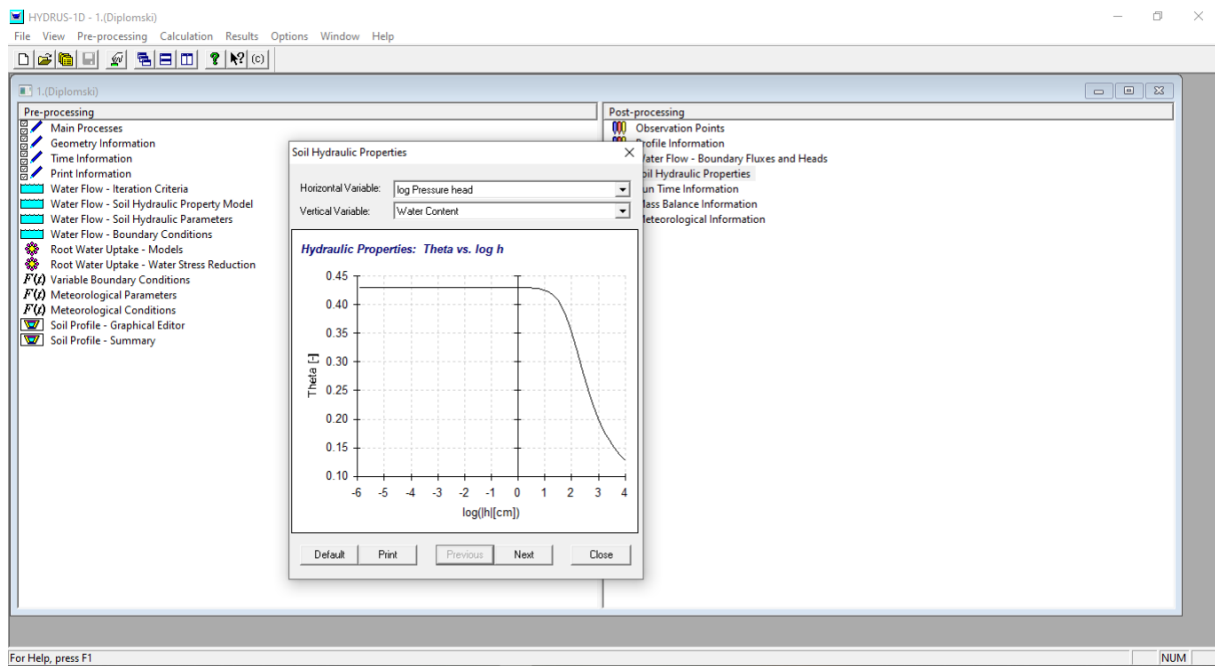
### 3.5. Primjena numeričkog modeliranja hidrauličkih parametara tla

Pri modeliranju toka vode navedenih lokaliteta diljem RH korišten je softverski programski paket HYDRUS 1D te unutar njega i Rosetta model. Za predviđanje i simulaciju toka vode koristilo se vrijeme od 365 dana s očitanjima vrijednosti za 60., 121., 182., 243., 304. i 365. dan, dok je dubina profila tla postavljena na 50 cm. Za svaku lokaciju uneseni su podaci o sadržaju mehaničkih čestica (% pijeska, praha i gline) kako bi se dobili hidraulički parametri te klimatski podaci najbliže meteorološke postaje kako bi se dobila konačna simulacija toka vode.



**Slika 3.10.** Unos podataka o sadržaju mehaničkih čestica na 1.lokaciji istraživanja (Bačka Palanka - Smitovac) u programu HYDRUS

Svaki uzorak sa 35 lokacija razlikuje se po jedinstvenom i različitom sadržaju mehaničkih čestica odnosno sadržaju i količini pijeska, praha i gline, ali imaju iste unesene podatke s najbližih meteoroloških postaja. Prikaz podataka i simulacije retencijske krivulje dobiven je za sve istraživane lokalitete te u programu Excel napravljen detaljan prikaz toka vode u tlu (slika 3.10 i slika 3.11.).



**Slika 3.11.** Prikaz retencijske krivulje toka vode na 1.lokaciji istraživanja (Bačka Palanka - Smitovac) u programu HYDRUS

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. Rezultati hidrauličkih parametara istraživanih površina tla

Prema različitim tipovima tala na lokacijama te njihovim fizikalnim i kemijskim svojstvima (sadržaj mehaničkih čestica, volumna gustoća tla, struktura tla, tekstura tla,...), prema klimatskim parametrima (temperatura, oborine, vlažnost zraka, jačina vjetra, sijanje sunca) izračunate su i dobivene vrijednosti i hidrauličkih parametara (tablica 4.1.). Količina vode u tlu pri (ne) potpunoj saturaciji, hidraulička provodljivost tla i ostali izračunati van Genuchten-ovi parametri potrebni su za izračun vodnog režima tla odnosno kapaciteta tla za vodu (FC), točke venuća (WP), količine fiziološki aktivne vode (PAW), početka navodnjavanja (MAD), evapotranspiracije (ET) koji se u ovom slučaju nisu računali, ali su osnovna baza podataka. Varijabilnost  $\theta_s$  ovisi o karakteristikama tla, fizikalnim i kemijskim svojstvima tla koja se međusobno razlikuju te njihovom varijacijom dolazi do različitog zadržavanja vode u tlu.

Količina vode u tlu pri uvjetima potpune saturacije ( $\theta_s$ ) na istraživanom području varirala je od  $0,0401 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (lokacija 2. - Bjelovar - Ladislav i lokacija 9. - Đurđevac - Veliki Pazut) do  $0,0969 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (lokacija 15. - Mostar - Jakići), a rezidualna količina vode u tlu ( $\theta_r$ ) na istraživanom području varirala je od  $0,3724 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (lokacija 14. - Mljet - Babino Polje) do  $0,4840 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (lokacija 26. - Rovinj - Motovun). Maksimalna hidraulička provodljivost tla ( $K_s$ ) javlja se na lokaciji 14. (Mljet - Babino polje) kod tipa tla rendzine i iznosi  $431,81 \text{ cm/dan}$ , a minimalna hidraulička provodljivost tla javlja se na lokaciji 27. (Samobor - Rački Gaj) kod tipa tla pseudogleja i iznosi  $5,43 \text{ cm/dan}$ .

**Tablica 4.1.** Hidraulički parametri tla dobiveni pomoću HYDRUS programa (Rosetta) na temelju PTF

Lokacija	Pijesak	Prah	Glina	$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	Alpha (1/cm)	n (-)	Ks (cm/dan)	l (-)
1	34,5	34,6	30,9	0,0789	0,4305	0,0128	1,4105	6,58	0,5
2	52,8	38,1	9,1	0,0401	0,3922	0,0158	1,4497	30,92	0,5
3	30,2	37,4	32,4	0,0818	0,4403	0,0116	1,4225	8,76	0,5
4	49,0	31,3	19,7	0,0609	0,3976	0,0164	1,418	13,03	0,5
5	59,0	31,4	9,6	0,0405	0,3884	0,0233	1,4111	36,53	0,5
6	36,5	37,2	26,3	0,0731	0,4211	0,0111	1,4539	7,59	0,5
7	45,0	21,7	33,3	0,0784	0,4123	0,0214	1,309	6,6	0,5
8	40,2	35,2	24,6	0,07	0,4135	0,0124	1,4427	7,07	0,5
9	71,6	20,0	8,4	0,0401	0,3856	0,0371	1,4514	52,51	0,5
10	34,7	47,9	17,4	0,0596	0,4082	0,0064	1,5794	18,33	0,5
11	29,9	43,8	26,3	0,0749	0,4304	0,0083	1,5082	12,59	0,5
12	55,9	25,7	18,4	0,0574	0,3907	0,0222	1,383	18,39	0,5
13	34,0	33,2	32,8	0,0809	0,4334	0,0136	1,3895	6,22	0,5
14	92,3	2,0	5,7	0,0566	0,3724	0,0298	2,7523	431,81	0,5
15	23,6	14,4	62,0	0,0969	0,4779	0,0237	1,182	14,69	0,5
16	29,2	20,6	50,2	0,0924	0,459	0,0219	1,2338	13,58	0,5
17	34,8	43,0	22,2	0,0675	0,4158	0,0082	1,5208	13	0,5
18	18,8	33,3	47,9	0,0954	0,4789	0,0155	1,3022	13,65	0,5
19	45,2	32,7	22,2	0,0657	0,4045	0,0146	1,4262	9,36	0,5
20	54,6	25,1	20,3	0,0608	0,3926	0,0218	1,376	15,73	0,5
21	33,4	23,7	42,9	0,0881	0,4433	0,02	1,2771	7,12	0,5
22	34,2	41,8	24,0	0,0705	0,4201	0,0088	1,5035	11,9	0,5
23	40,6	40,2	19,2	0,0612	0,4044	0,0097	1,4991	10,35	0,5
24	35,3	25,6	39,1	0,0853	0,4359	0,0186	1,3055	5,44	0,5
25	60,6	15,8	23,6	0,0644	0,3856	0,0268	1,3255	15,15	0,5
26	9,8	53,2	37,0	0,0943	0,484	0,0098	1,4595	12,66	0,5
27	40,4	26,9	32,7	0,0793	0,4208	0,0178	1,3449	5,43	0,5
28	22,2	44,5	33,3	0,0858	0,4563	0,0095	1,4619	12,17	0,5
29	28,0	44,4	27,6	0,0772	0,4359	0,0083	1,5043	12,47	0,5
30	43,6	22,0	34,4	0,0797	0,4156	0,0212	1,3058	6,23	0,5
31	37,3	32,2	30,5	0,0778	0,4249	0,0142	1,3941	5,66	0,5
32	42,7	30,3	27,0	0,0728	0,4126	0,0157	1,3941	6,92	0,5
33	51,6	31,7	16,7	0,0552	0,3928	0,0172	1,4211	17,29	0,5
34	38,0	47,5	14,5	0,0536	0,4028	0,0067	1,5754	21,21	0,5
35	59,3	20,8	19,9	0,0593	0,3877	0,0255	1,3582	18,57	0,5

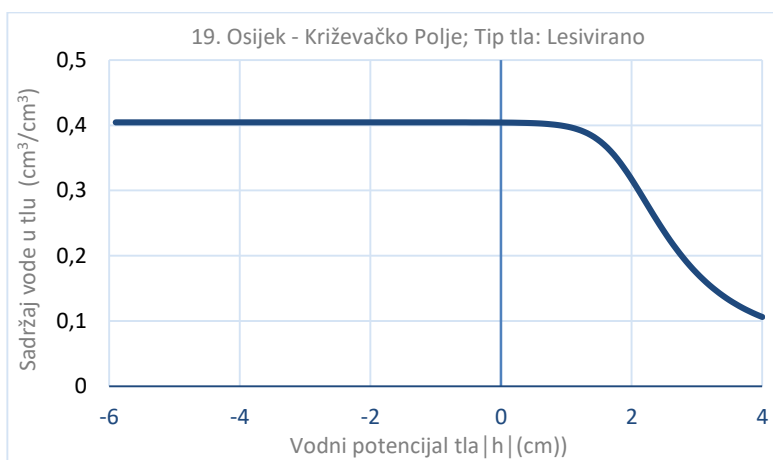
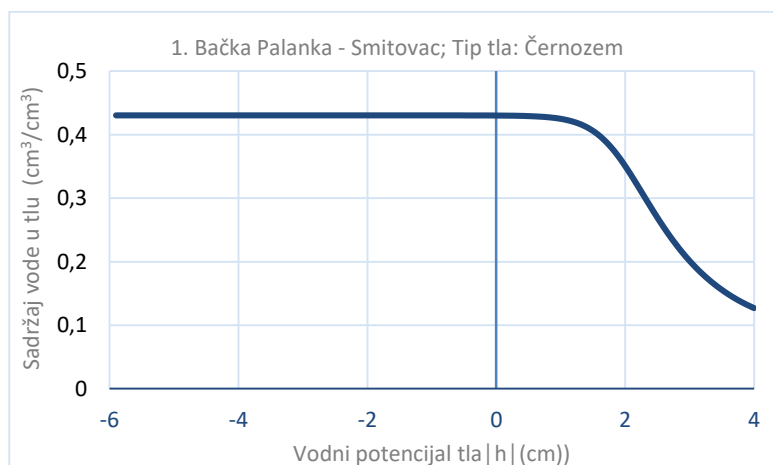


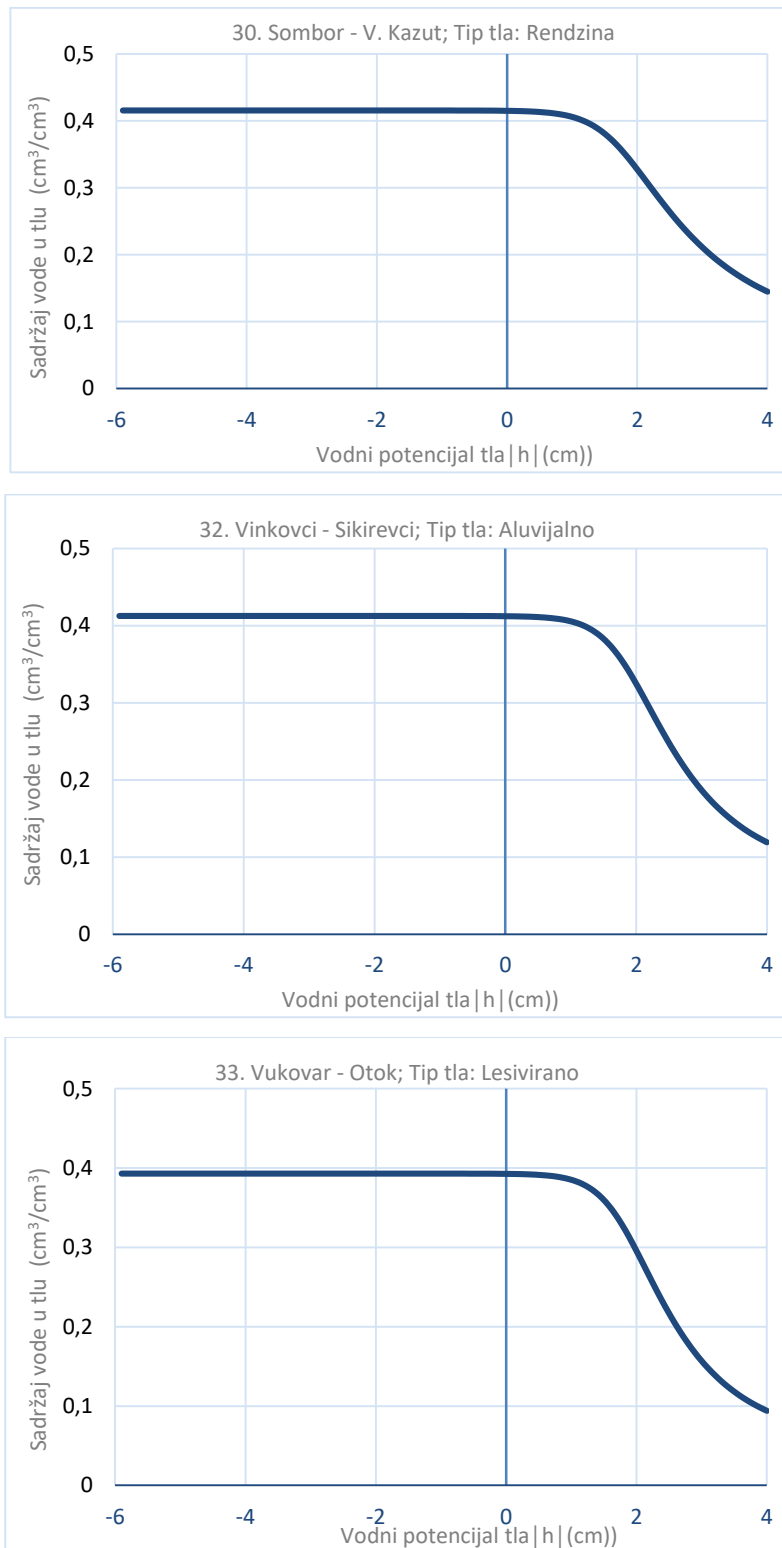
## 4.2. Grafikoni retencijskih krivulja na istraživanim lokacijama

U RH postoji vrlo raširen spektar različitih tipova tala pa je različit utjecaj klimatskih parametara na tlo. Retencijske krivulje tla i ostali parametri optimizirani su pomoću programa HYDRUS na temelju izračunatih podataka dobivenih na neporušenim uzorcima tla (*van Genuchten i sur., 1991.*).

Na 35 lokacija koje su istraživane, uzorkovano je 7 tipova tala čije su retencijske krivulje prikazane na slikama ispod (slike 4.1. - 4.7.), a podijeljene prema meteorološkim stanicama. Na svakoj slici navedena je lokacija uzorkovanja i tip tla, os x koja prikazuje vodni potencijal tla (log pressure head), os y koja prikazuje količinu vode u tlu (water content) i jednu liniju plave boje koja prikazuje retencijske krivulje tla određene lokacije.

### 1. Meteo postaja - OSIJEK:



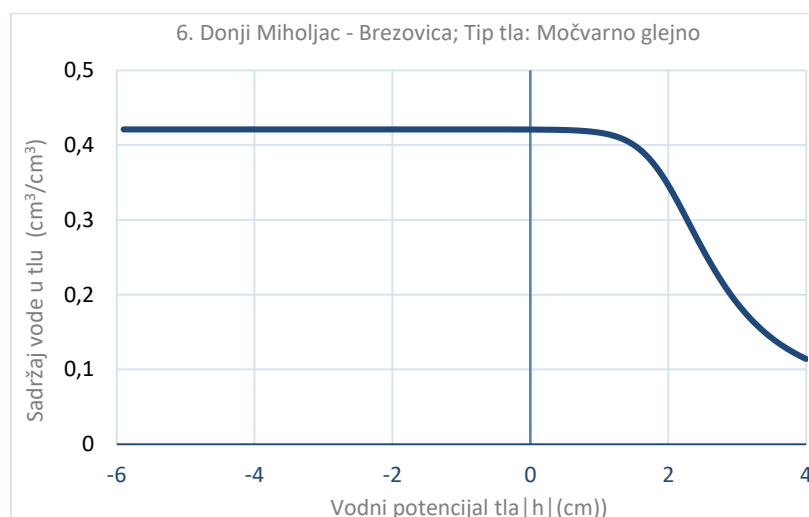
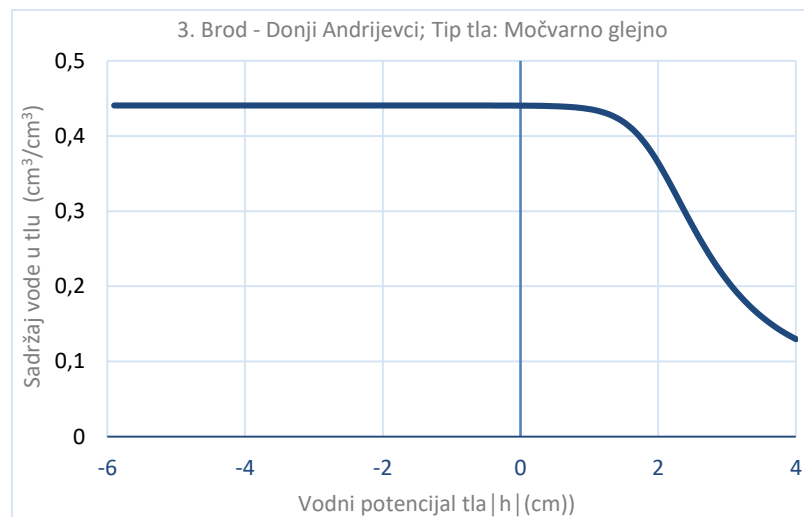


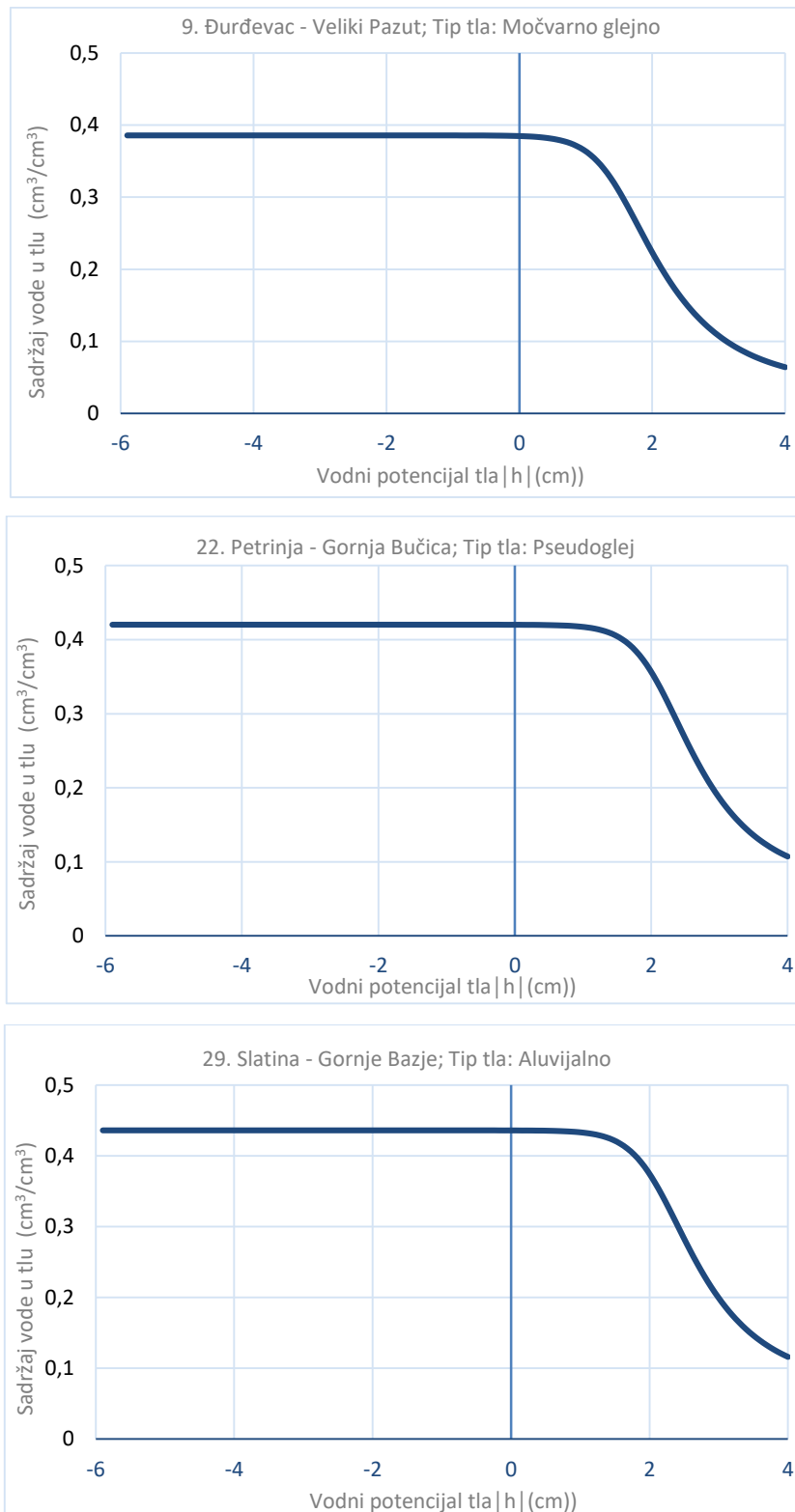
**Slika 4.1.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Osijeka

Prva meteorološka postaja Osijek obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sisanje sunca, jačina vjetra,

temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.1. navedene su lokacije u blizini Osijeka i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: černoziem, rendzina, aluvijalno i lesivirano tlo. Na lokaciji 1. najviša količina vode u tlu iznosi 0,44 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,13 % pri točki venuća. Na lokaciji 19. najviša količina vode u tlu iznosi 0,41 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,10 % pri točki venuća. Na lokaciji 30. najviša količina vode u tlu iznosi 0,42 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,14 % pri točki venuća. Na lokaciji 32. najviša količina vode u tlu iznosi 0,42 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,12 % pri točki venuća. Na lokaciji 33. najviša količina vode u tlu iznosi 0,40 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,09 % pri točki venuća.

## 2. Meteo postaja - SLAVONSKI BROD:



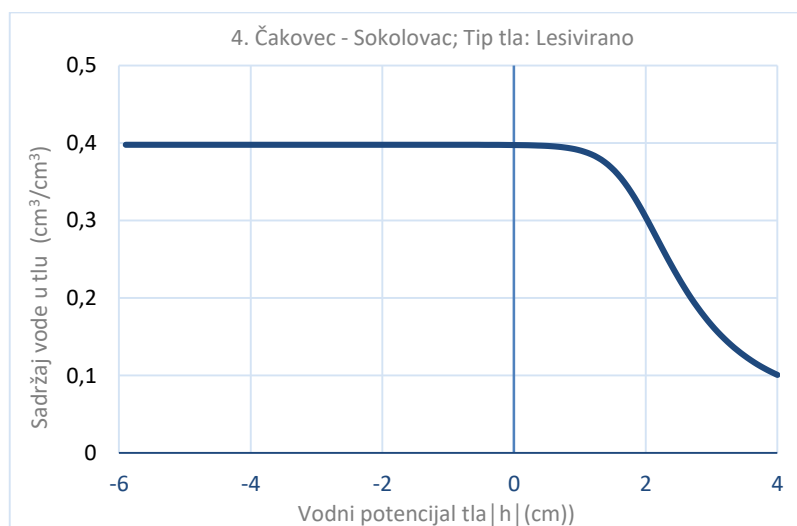
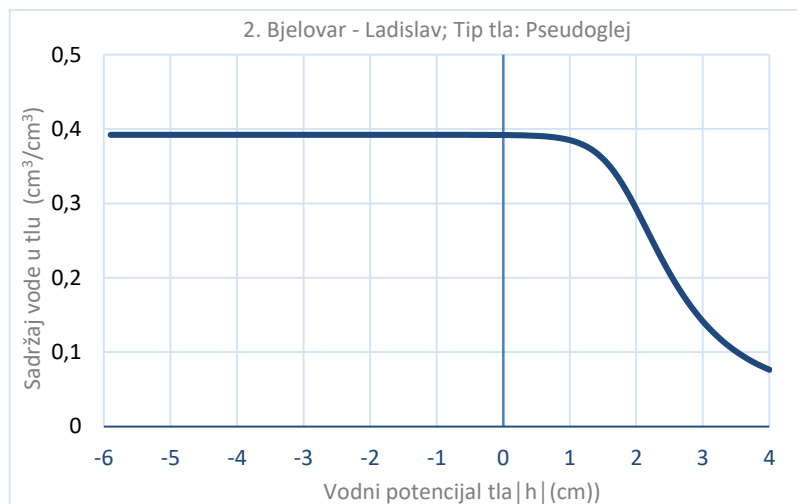


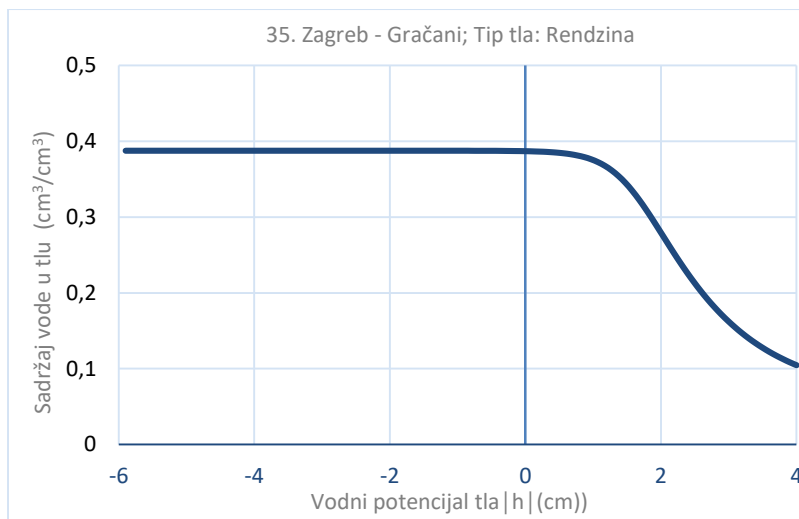
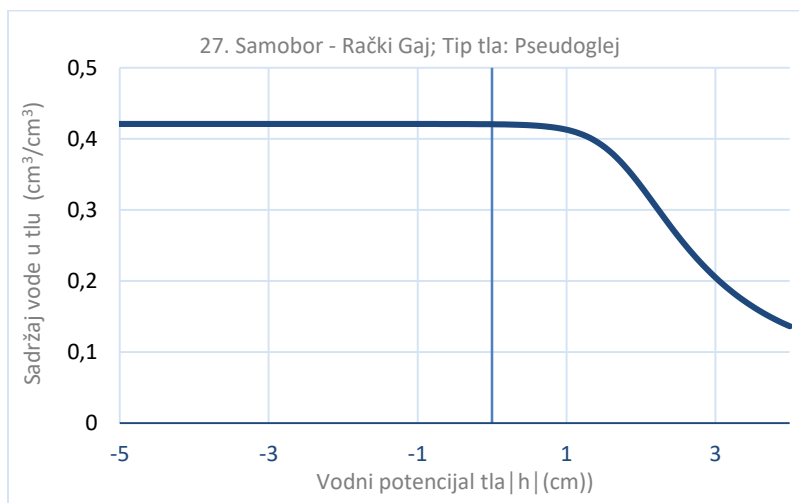
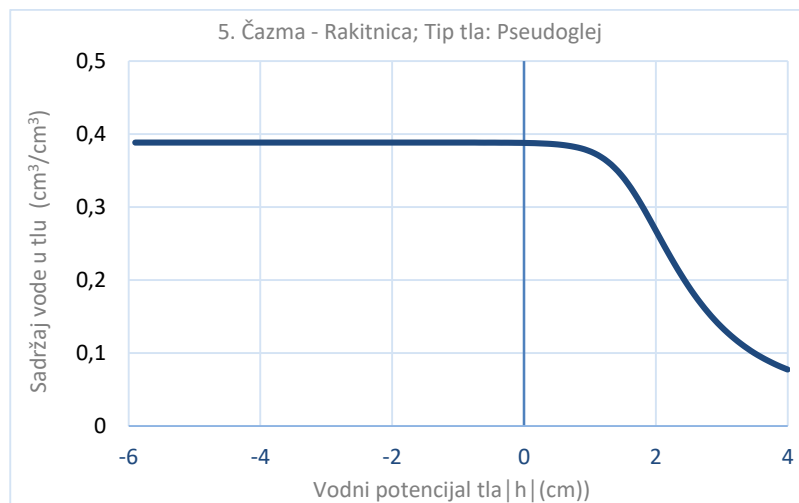
**Slika 4.2.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Slavenskog Broda

Druga meteorološka postaja Slavonski Brod obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sisanje sunca, jačina vjetrova,

temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.2. navedene su lokacije u blizini Slavenskog Broda i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: pseudoglej, močvarno glejno i aluvijalno tlo. Na lokaciji 3. najviša količina vode u tlu iznosi 0,44 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,13 % pri točki venuća. Na lokaciji 6. najviša količina vode u tlu iznosi 0,43 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,12 % pri točki venuća. Na lokaciji 9. najviša količina vode u tlu iznosi 0,38 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,06 % pri točki venuća. Na lokaciji 22. najviša količina vode u tlu iznosi 0,43 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,11 % pri točki venuća. Na lokaciji 29. najviša količina vode u tlu iznosi 0,44 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,11 % pri točki venuća.

### 3. Meteo postaja - ZAGREB:



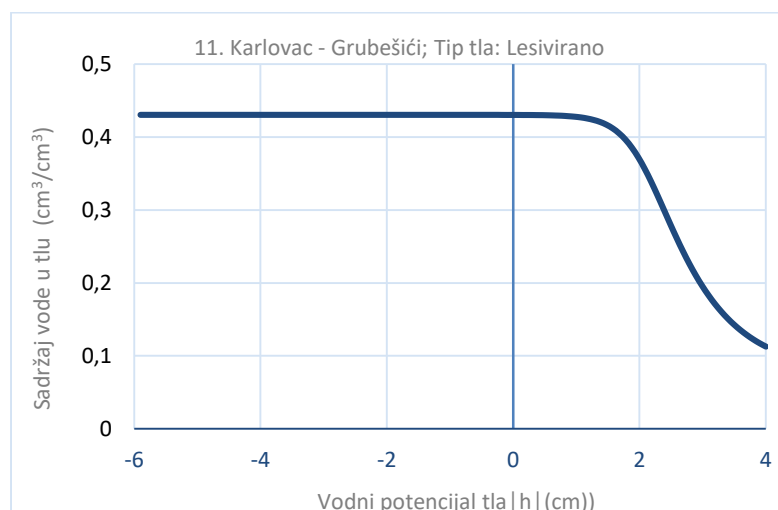
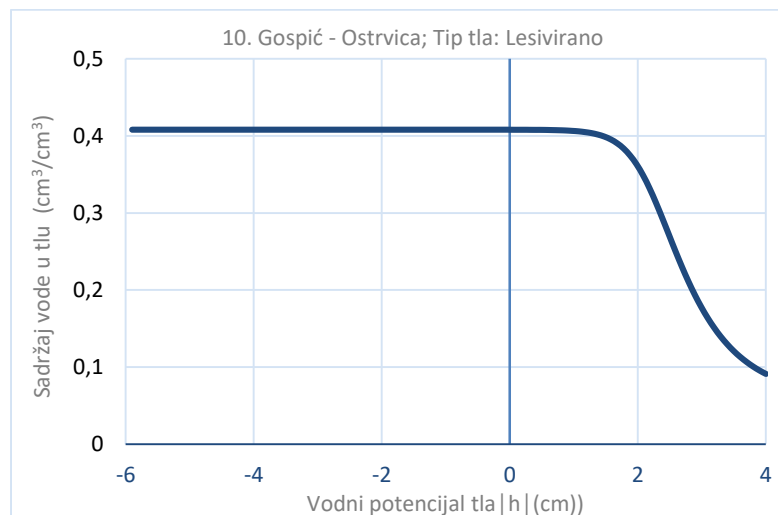


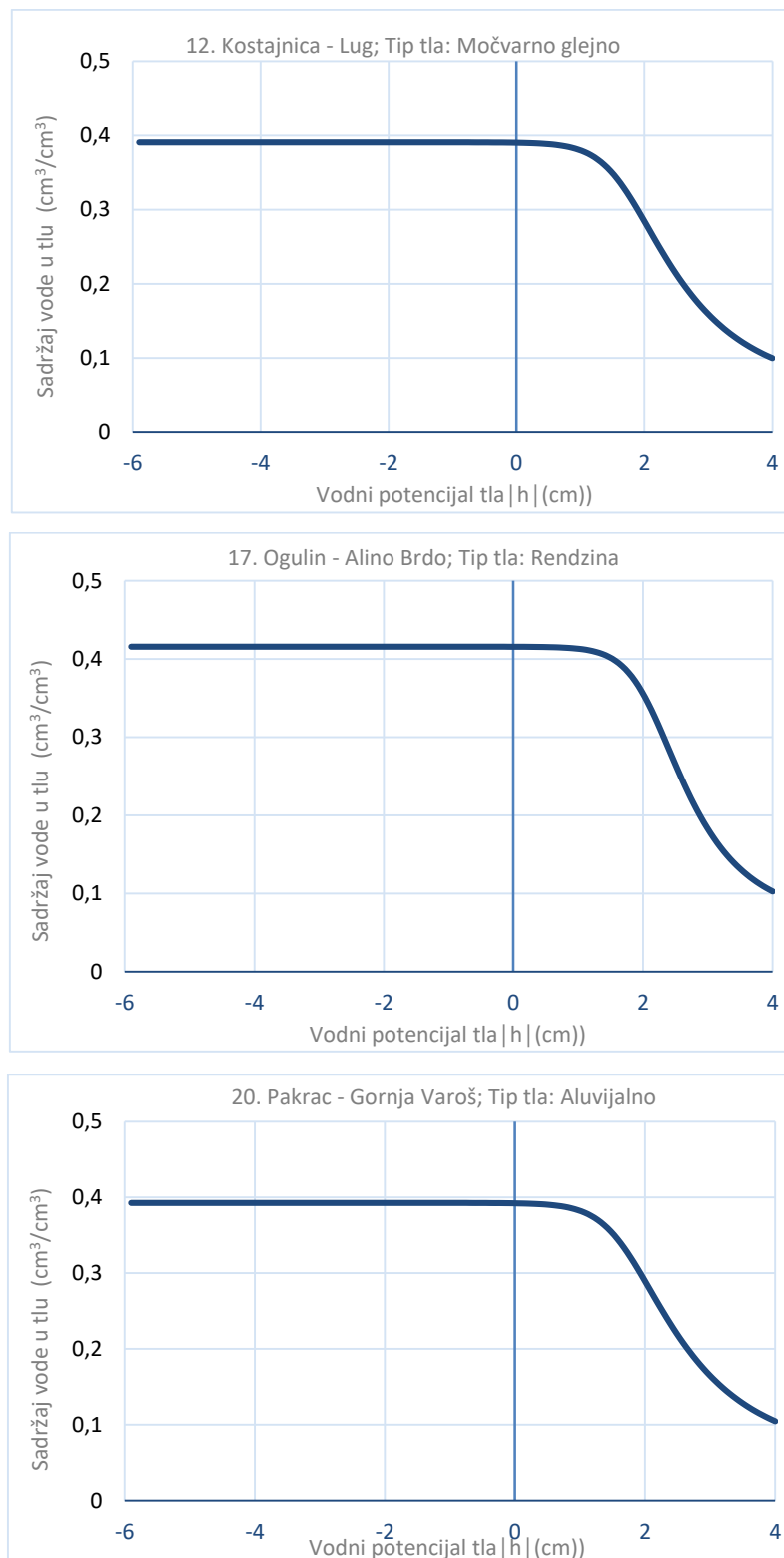
**Slika 4.3.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Zagreba

Treća meteorološka postaja Zagreb obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sijanje sunca, jačina vjetra,

temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.3. navedene su lokacije u blizini Zagreba i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: pseudoglej, rendzina i lesivirano tlo. Na lokaciji 2. najviša količina vode u tlu iznosi 0,40 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,07 % pri točki venuća. Na lokaciji 4. najviša količina vode u tlu iznosi 0,40 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,10 % pri točki venuća. Na lokaciji 5. najviša količina vode u tlu iznosi 0,39 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,07 % pri točki venuća. Na lokaciji 27. najviša količina vode u tlu iznosi 0,43 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,13 % pri točki venuća. Na lokaciji 35. najviša količina vode u tlu iznosi 0,39 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,10 % pri točki venuća.

#### 4. Meteo postaja - GOSPIĆ:





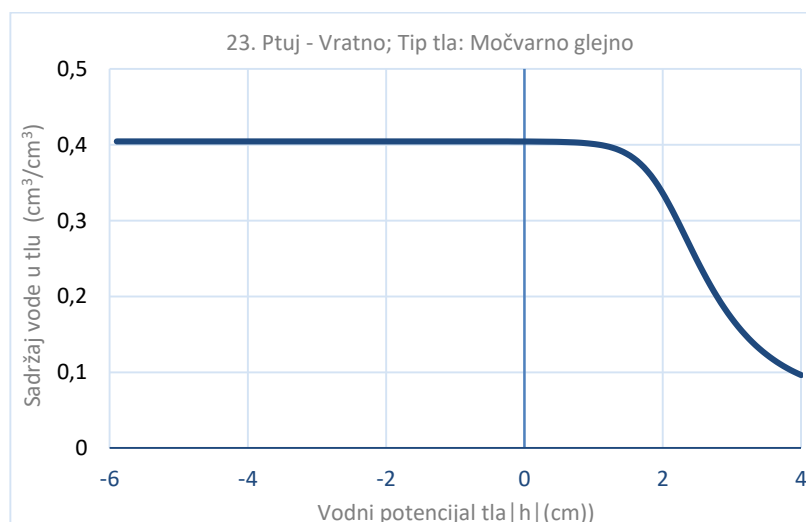
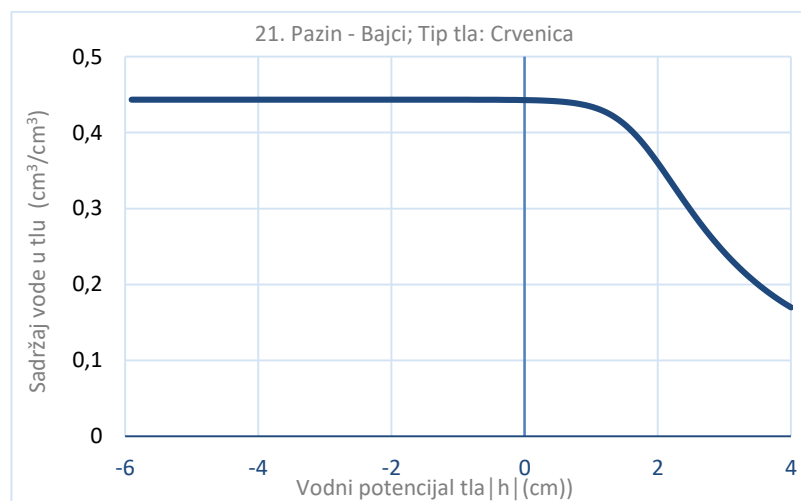
**Slika 4.4.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Gospića

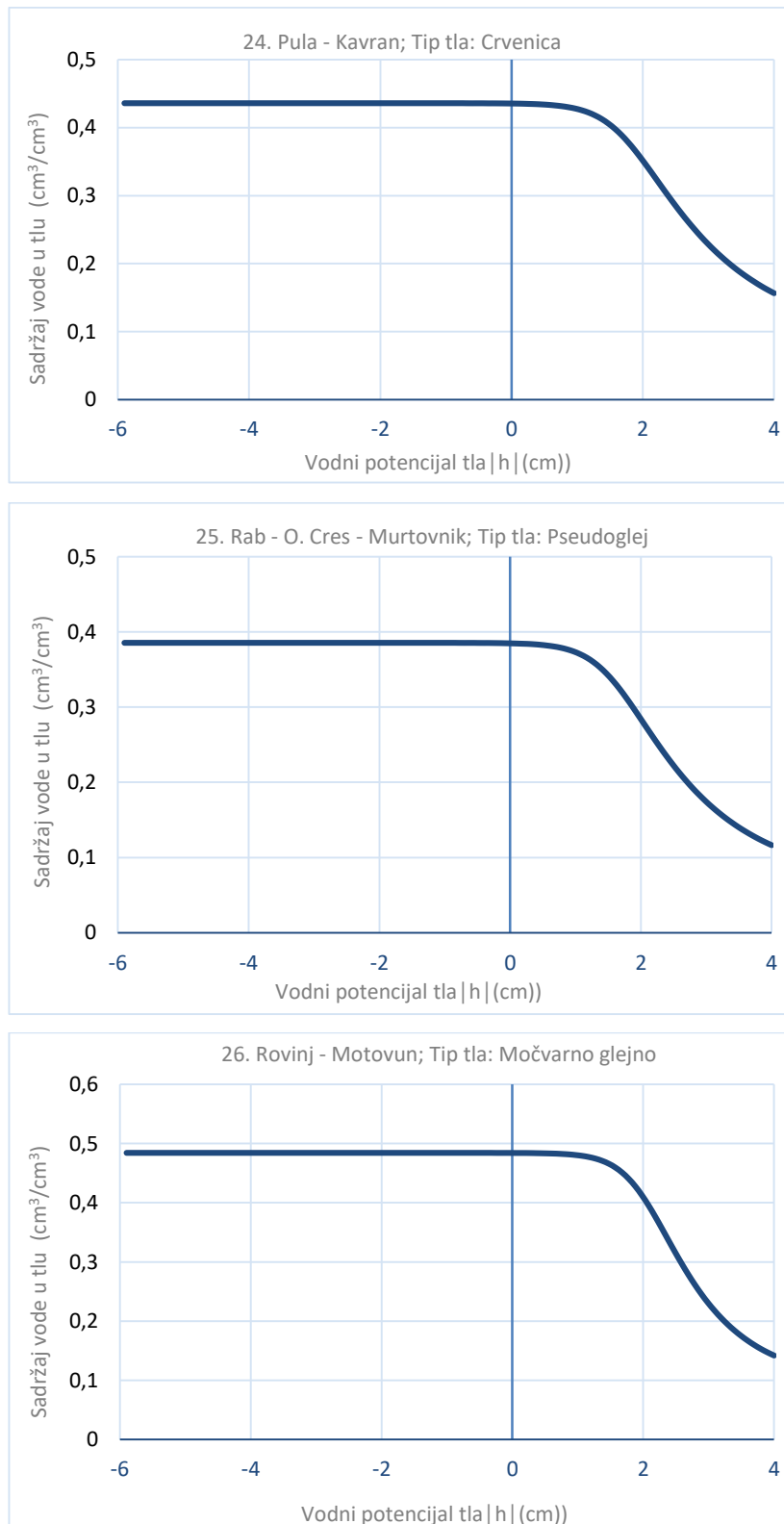
Četvrta meteorološka postaja Gospić obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sijanje sunca, jačina vjetra,



temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.4. navedene su lokacije u blizini Gospića i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: rendzina, aluvijalno, lesivirano i močvarno glejno tlo. Na lokaciji 10. najviša količina vode u tlu iznosi 0,41 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,09 % pri točki venuća. Na lokaciji 11. najviša količina vode u tlu iznosi 0,43 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,11 % pri točki venuća. Na lokaciji 12. najviša količina vode u tlu iznosi 0,39 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,10 % pri točki venuća. Na lokaciji 17. najviša količina vode u tlu iznosi 0,42 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,10 % pri točki venuća. Na lokaciji 20. najviša količina vode u tlu iznosi 0,39 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,10 % pri točki venuća.

### 5. Meteo postaja - RIJEKA:



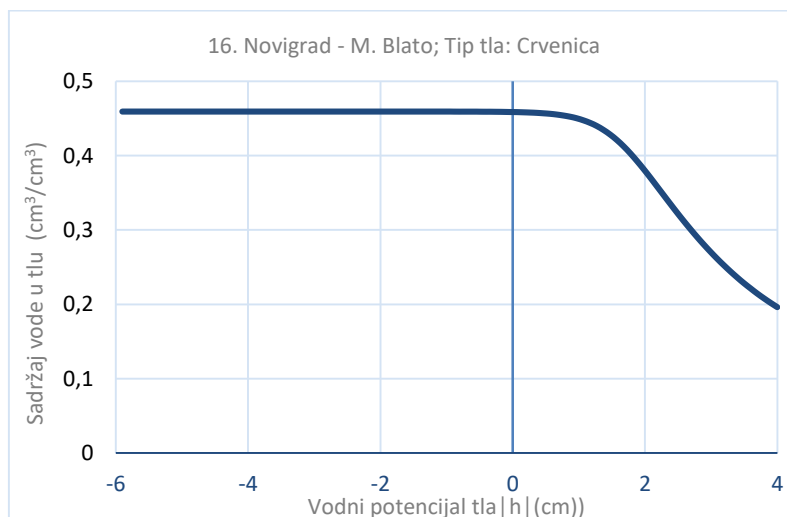
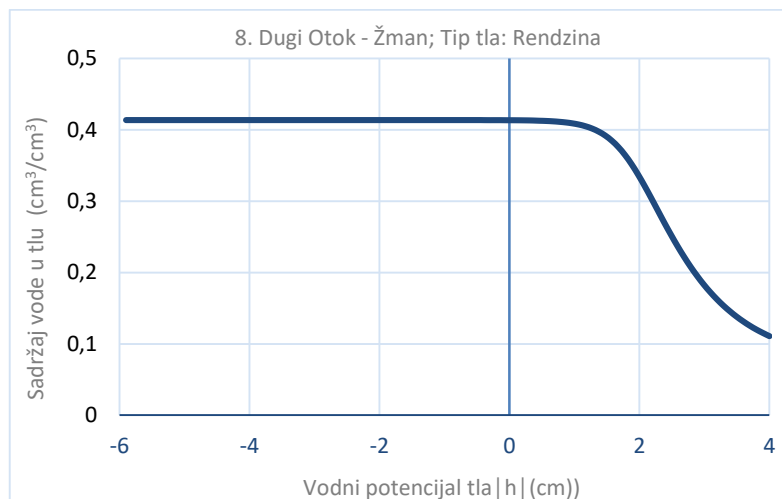


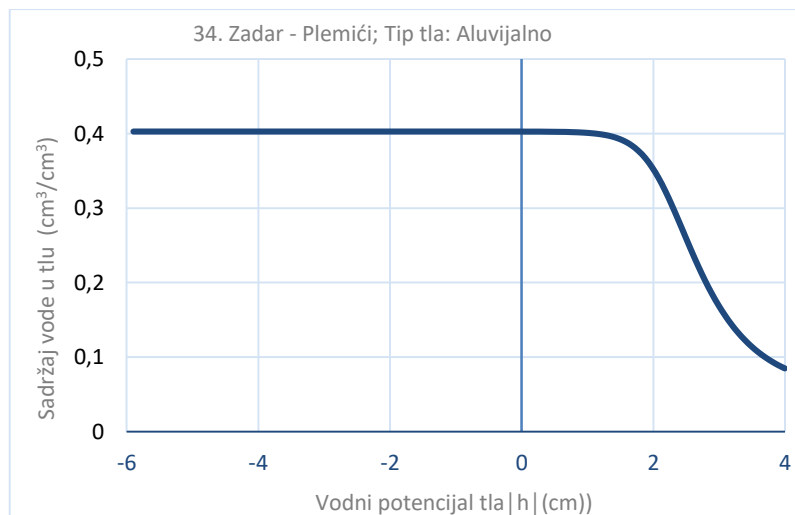
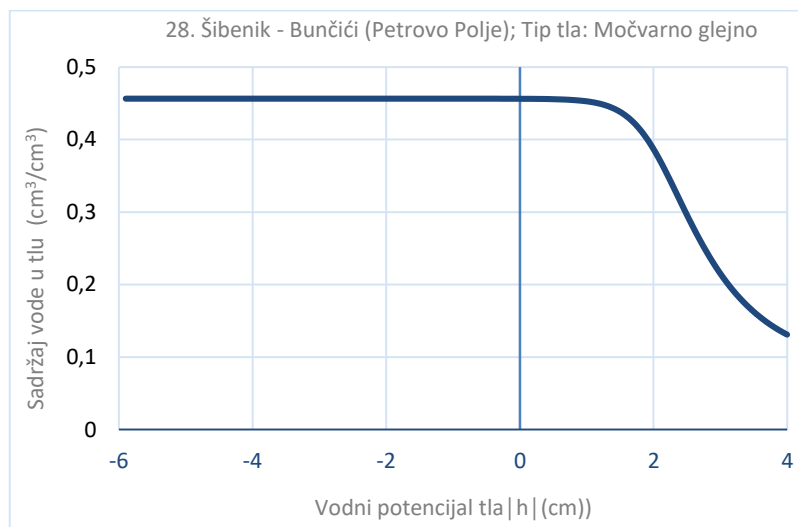
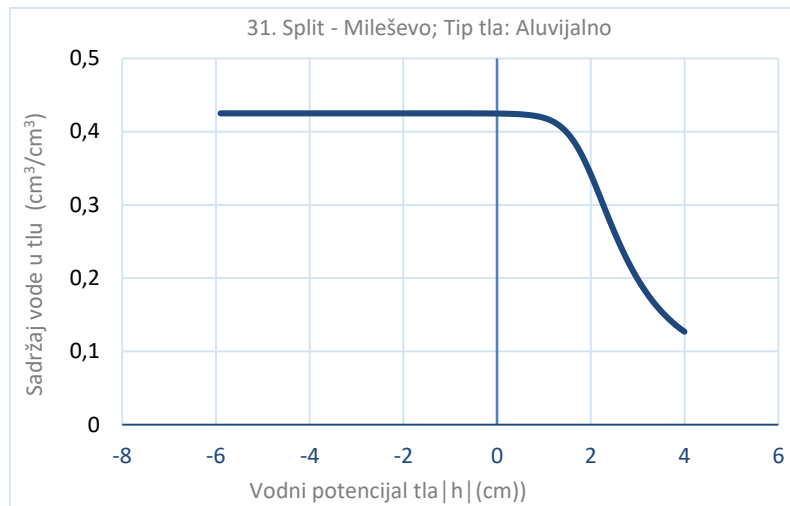
**Slika 4.5.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Rijeke

Peta meteorološka postaja Rijeka obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sijanje sunca, jačina vjetra,

temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.5. navedene su lokacije u blizini Rijeke i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: crvenica, pseudoglej i močvarno glejno tlo. Na lokaciji 21. najviša količina vode u tlu iznosi 0,45 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,17 % pri točki venuća. Na lokaciji 23. najviša količina vode u tlu iznosi 0,40 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,09 % pri točki venuća. Na lokaciji 24. najviša količina vode u tlu iznosi 0,44 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,15 % pri točki venuća. Na lokaciji 25. najviša količina vode u tlu iznosi 0,44 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,13 % pri točki venuća. Na lokaciji 26. najviša količina vode u tlu iznosi 0,49 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,15 % pri točki venuća.

#### 6. Meteo postaja - ZADAR:



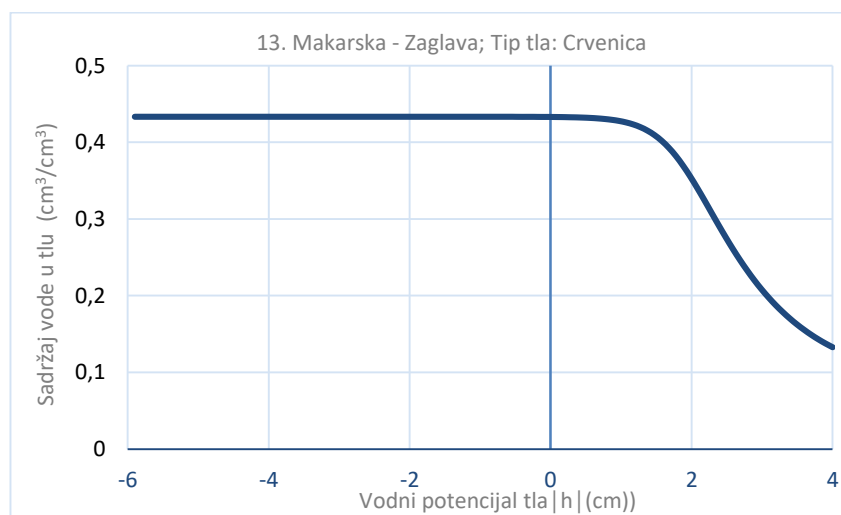
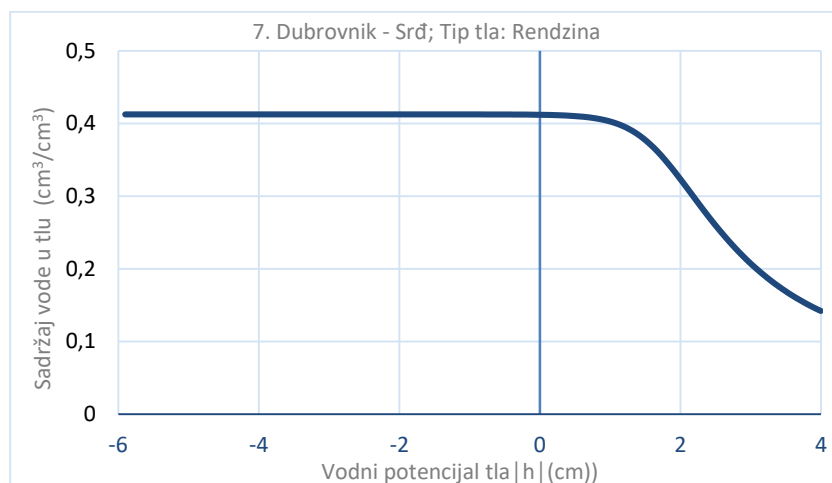


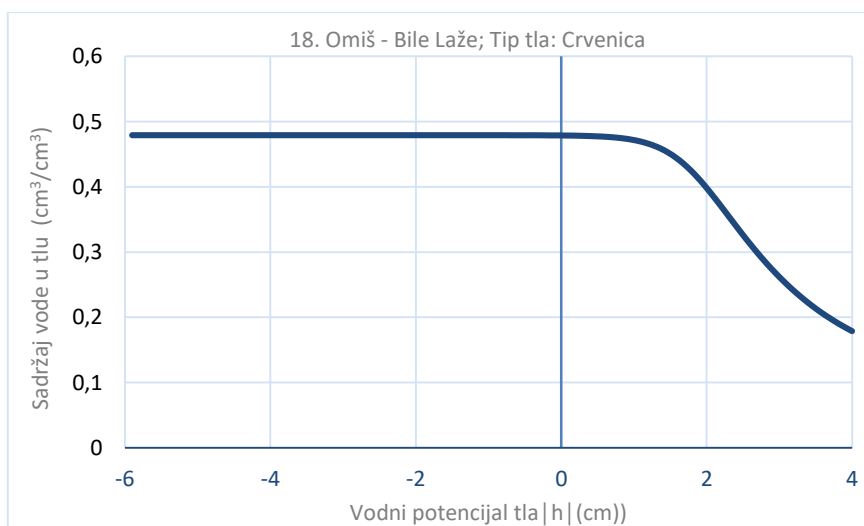
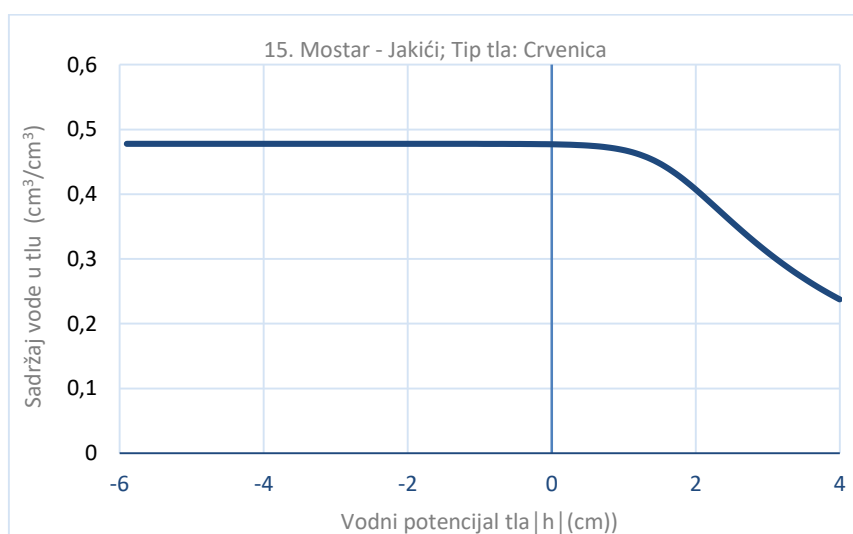
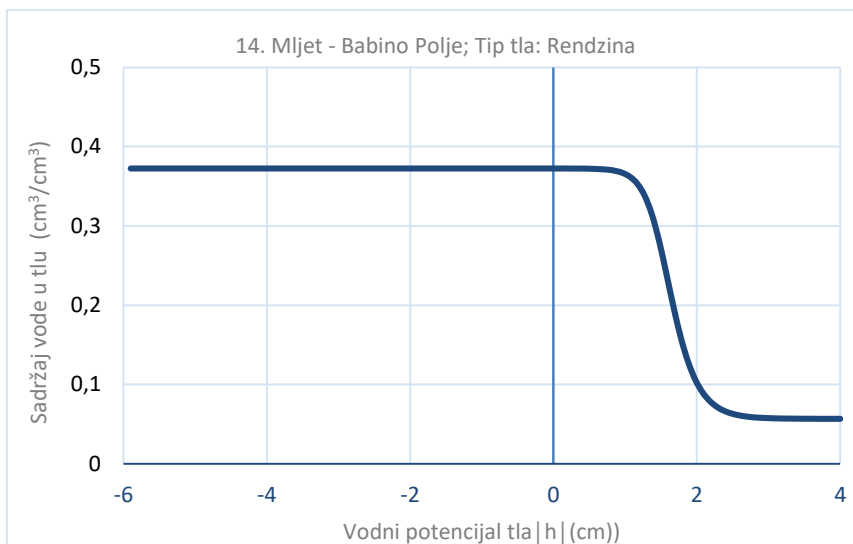
**Slika 4.6.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Zadra

Šesta meteorološka postaja Zadar obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sisanje sunca, jačina vjetra,

temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.6. navedene su lokacije u blizini Zadra i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: crvenica, rendzina, aluvijalno i močvarno glejno tlo. Na lokaciji 8. najviša količina vode u tlu iznosi 0,42 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,11 % pri točki venuća. Na lokaciji 16. najviša količina vode u tlu iznosi 0,46 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,19 % pri točki venuća. Na lokaciji 31. najviša količina vode u tlu iznosi 0,43 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,13 % pri točki venuća. Na lokaciji 28. najviša količina vode u tlu iznosi 0,46 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,13 % pri točki venuća. Na lokaciji 34. najviša količina vode u tlu iznosi 0,40 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,08 % pri točki venuća.

### 7. Meteo postaja - DUBROVNIK:





**Slika 4.7.** Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Dubrovnika

Sedma meteorološka postaja Dubrovnik obuhvaća 5 lokacija pri čijem su se izračunavanju hidrauličkih podataka koristili klimatski parametri (oborine, sijanje sunca, jačina vjetera, temperatura, vlažnost) s navedene postaje. Na slici 4.7. navedene su lokacije u blizini Dubrovnika i navedeni su tipovi tala koji prevladavaju na istraživanim lokacijama: rendzina i crvenica. Na lokaciji 7. najviša količina vode u tlu iznosi 0,41 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,14 % pri točki venuća. Na lokaciji 13. najviša količina vode u tlu iznosi 0,44 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,14 % pri točki venuća. Na lokaciji 14. najviša količina vode u tlu iznosi 0,37 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,05 % pri točki venuća. Na lokaciji 15. najviša količina vode u tlu iznosi 0,49 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 0,24 % pri točki venuća. Na lokaciji 18. najviša količina vode u tlu iznosi 0,49 % pri potpunoj saturaciji, a najniža 18 % pri točki venuća.

U tablici 4.2. prikazane su maksimalne, minimalne i prosječne vrijednosti vlage u tlu na istraživanim lokacijama u RH. Aluvijalno tlo se nalazi na sedam lokacija gdje maksimalna vrijednost vlage u tlu iznosi 0,44 %, minimalna vrijednost 0,08 %, a prosječna vrijednost 0,26 %. Crvenica se nalazi na šest lokacija gdje maksimalna vrijednost vlage u tlu iznosi 0,49 %, minimalna vrijednost 0,15 %, a prosječna vrijednost 0,33 %. Černoziem se nalazi na samo jednoj lokaciji gdje maksimalna vrijednost vlage u tlu iznosi 0,44 %, minimalna vrijednost iznosi 0,13 %, a prosječna vrijednost 0,29 %. Lesivirano tlo nalazi se na pet lokacija gdje maksimalna vrijednost iznosi 0,43 %, minimalna vrijednost iznosi 0,09 %, a prosječna vrijednost 0,25 %. Močvarno glejno tlo nalazi se na sedam lokacija gdje maksimalna vrijednost iznosi 0,49 %, minimalna vrijednost iznosi 0,06%, a prosječna vrijednost iznosi 0,27%. Pseudoglej se nalazi na pet lokacija gdje maksimalna vrijednost iznosi 0,44 %, minimalna vrijednost iznosi 0,07 %, a prosječna vrijednost iznosi 0,26 %. Rendzina se nalazi na šest lokacija gdje maksimalna vrijednost iznosi 0,42 %, minimalna vrijednost iznosi 0,05 %, a prosječna iznosi 0,26 %. Najveća odnosno maksimalna vrijednost vlage u tlu nalazi se u crvenici i močvarnom glejnom tlu te iznosi 0,49 %, a najniža odnosno minimalna vrijednost vlage u tlu nalazi se u rendzini te iznosi 0,05 %.

**Tablica 4.2.** Prosječne, minimalne i maksimalne vrijednosti vlage u tlu prema tipu tla

Tip tla	Maksimalna vrijednost (%)	Minimalna vrijednost (%)	Prosječna vrijednost (%)
Aluvijalno tlo	0,44	0,08	0,26
Crvenica	0,49	0,15	0,33
Černoziem	0,44	0,13	0,29
Lesivirano tlo	0,43	0,09	0,25
Močvarno glejno tlo	0,49	0,06	0,27
Pseudoglej	0,44	0,07	0,26
Rendzina	0,42	0,05	0,36
Ukupno	0,49	0,05	0,27

Retencijske krivulje tla i hidraulička vodljivost u prošlosti su korištene za formulaciju analitičkih modela hidrauličkih svojstava tla (*Brooks i Corey, 1964; van Genuchten, 1980 .; Vogel i Císlerová, 1988 .; Kosugi, 1996 .; Durner, 1994.; Groenevelt i Grant, 2004.*). Retencijske krivulje tla presudne su za karakterizaciju dinamike vlažnosti tla, ali posebno relevantne u kontekstu upravljanja navodnjavanjem. Ona je jedan od glavnih instrumenata za procjenu fizičke kvalitete tla i poboljšanja upravljanja tlom. Inverzno modeliranje jedno je važnijih metoda korištenih za parametarizaciju modela koji predstavljaju ove krivulje koje su najbliže stvarnosti površine polja.

U istraživanju *Periarda i sur. (2015.)*, izrađene su retencijske krivulje tla u histosolu pri uzgoju povrća i zelene salate, na području južnog Quebec-a u Kanadi. Kao što je već ranije navedeno, hidrauličke značajke tla prijeko su potrebne u istraživanjima i primjenama, ali je njihovo mjerenje dugotrajno i skupo pa su se mnogi istraživači usredotočili na metode koje omogućavaju njihovu neizravnu procjenu. *Matula i sur. (2007.)*, izveli su istraživanje na odabranom lokalitetu Tišice u Češkoj gdje se skup podataka sastojao od čak 140 izmjerenih retencijskih krivulja tla, strukturi i teksturi tla te udjelu organske tvari. Uz navedene podatke izvedene su vlastite pedotransferne funkcije prema metodologiji PTF, odnosno prema van Genuchtenovim parametrima. Uspoređujući istraživanja u Češkoj i Hrvatskoj, oba imaju veliki broj podataka prikupljen kroz dulje vremensko razdoblje te su kod oba korištene kontinuirane PTF koje pružaju relativno precizne procjene sadržaja vode u određenim tipovima tla.



*Libardi i suradnici (2018.)*, prikupljali su podatke i uzorke iz horizonta dvaju tipova tala sa područja Piracicaba u Sao Paulu. Tla su klasificirali *Cooper i sur. (2002.)* prema taksonomiji tla (*Soil Survey Staff, 2014.*), a uspoređeni su uzorci pjeskovitog tla jednostavne strukture i glinovitog tla s dobro razvijenom strukturom. S obzirom da su uzorci uzeti na tri različite dubine, 25 mm, 50 mm i 75 mm, izmjerene su i uspoređene vrijednosti raspona tlaka te izrađene retencijske krivulje zadržavanja vode u tlu. Rezultati govore da se preporučuje korištenje uzoraka uzetih sa dubine 25 mm gdje je najbolje vidljiva količina vode koja se zadržava u tlu. Također glinovito tlo iako ima bolju strukturu od pjeskovitog, raspodjele su pora puno različitije i voda se dulje zadržava u tlu što je problematično za navedeno područje istraživanja.

*Ket i suradnici (2018.)*, radili su na mjerenju i usporedbi hidrauličkih svojstava na pokusnim poljima različitih tipova tala (ilovasti pijesak, pijesak, ilovasto tlo) u Chrey Bak slivu u Kambodži. Mjerenje se kao i u ranije navedenim istraživanjima kao i u ovom radu odvija putem HYDRUS-1D programa koji se temelji na van Genuchtenovim parametrima. Izmjereni hidraulički podaci korišteni su kao ulazni podaci za hidrauličku vodljivost, evapotranspiraciju i ostale vrijednosti. Ograničenja su zabilježena u mjerenju najsušeg i najvlažnijeg područja, ali je cijeli model rezultirao dobrim simulacijskim performansima za predviđanje sadržaja vode u tlu u svim ispitivanim tipovima tla. Prema dobivenim rezultatima istraživanja zaključeno je da se hidraulička svojstva tla mogu vrlo brzo i vrlo učinkovito procijeniti inverznim modeliranjem ukoliko su podaci precizni. Isto tako, za daljnji rad na tom području preporučuje se više istražiti skup podataka odnosno dinamika polja i lokaliteta s obzirom na količinu vode u tlu i tip tla.

## 5. ZAKLJUČAK

Provedeno istraživanje obuhvaća kombinaciju terenskih, laboratorijskih i numeričkih metoda koje su potrebne u svrhu predviđanja potencijalne količine vode odnosno vlage u tlu putem numeričkog toka vode za istraživana područja. Korištenje HYDRUS programa temelji se samo na mjerenju hidrauličkih svojstava tla koja su korištena za procjenu van Genuchtenovih parametara na različitim tipovima tla. Cilj ovog istraživanja je procijeniti hidraulička svojstva tla inverznim modeliranjem koristeći HYDRUS-1D program zasnovan na vlažnosti tla i potencijalnim podacima prikupljenim na terenu.

Hidraulički parametri tla ukazuju na veliku varijabilnost unutar istraživanog područja s obzirom na 35 lokacija profila. Svaka od navedenih lokacija međusobno se razlikuje po fizikalnim i kemijskim svojstvima što uvjetuje različitu hidrauličku provodljivost i sadržaj vode u tlu. Provedena mjerenja hidrauličkih parametara tla pokazala su visoku podudarnost procijenjenih retencijskih krivulja temeljenih na van Genuchtenovom modelu i Richardsovoj jednadžbi.

Rezultati predlažu da se hidraulička svojstva tla mogu učinkovito i brzo procijeniti navedenim inverznim modeliranjem koristeći samo podatke iz terenskog hidrauličkog mjerenja tla bez potrebnih laboratorijskih podataka. Zabilježeni su podaci hidrauličke vodljivosti ( $K_s$ ) koja je najveća na području Mljeta gdje se nalazi rendzina i iznosi čak 431,81 cm/dan, a najmanja je na području Samobora gdje se nalazi pseudoglej i iznosi 5,43 cm/dan. Navedeni podaci pokazuju vrlo veliki raspon vrijednosti kao i velike razlike u količini vlage u promatranim tipovima tala. Rezultati mjerenja ukazuju na najveću količinu vlage u tipovima tla crvenica koje pripada „težim zbijenim tlima“ s malom količinom humusa te lako infiltrira vodu i močvarno glejnom tlu koje se sastoji od „lakših“ teksturnih nanosa, ali ovisno o teksturnom sastavu dobro upija vodu. Najmanja količina vlage u tlu zabilježena je u tipu tla rendzina koja se većinom sastoji od pijeska te upija jako sporo i jako malu količinu vode.

Istraživanja bazirana na procjeni hidrauličkih svojstava i količini vode u određenom tipu tla, trebala bi se temeljiti na još većem korištenju HYDRUS programa i preciznijoj provjeri podataka. Iz navedenih znanstvenih istraživanja diljem svijeta vidljivo je da se radi na tom

području i da su rezultati efikasni što govori da se treba nastaviti u tom smjeru. Kako bi rezultati bili još bolji potrebno je razvijati i koristiti nove tehnike i metode te više uključivati inverzijski pristup rada te primjenu PTF modela.

## 6. LITERATURA

1. Acutis, M., Donatelli, M. (2003.): SOILPAR 2.00: softver za procjenu hidroloških parametara i funkcija tla. *Europski časopis za agronomiju*. 18 (3-4): 373-377. DOI: 10.1016/S1161-0301(02) 00128-4.
2. Bačani, A., Posavec, K. (2011.): *Metode operacijskih istraživanja u hidrogeologiji*. Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
3. Baker, F. G. (1978.): Variability of hydraulic conductivity within and between nine Wisconsin soil series. *Water Resources Research*, 14(1), 103-108. <https://doi.org/10.1029/WR014i001p00103>
4. Baker, F. G., & Bouma, J. (1975.): Variability of hydraulic conductivity in two subsurface horizons of two siltloam soils. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 219–222.
5. Barry, D. A. (1992.): Modelling contaminant transport in the subsurface: theory and computer programs. In: Ghadiri H., Rose C.W., (Eds.), *Modelling Chemical Transport in Soil: Natural and Applied Contaminants*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 105-144.
6. Bethune, M. G., Selle, B., Wang, Q. J. (2008.): Understanding and predicting deep percolation under surface irrigation. *Water Resources Research*. 44: 1–16.
7. Bouma, J., van Lanen, H. A. J. (1987.): Transfer functions and threshold values, from soil characteristics to land qualities. In: Beek, K.J., Burrough, P.A., McCormack, D.E.(Eds.), *Proceedings of the International Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures*, Publication 6. ITC, Enschede, the Netherlands, pp. 106–110.
8. Bouma, J. (1989.): Using soil survey data for quantitative land evaluation. In B. A. Stewart (Ed.), *Advances in soil science* (Vol. 9, pp. 177–213). New York: Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4)
9. Briggs, L., McLane, J. W. (1907.): The moisture equivalents of soils. U.S. Department of Agriculture, Bureau of soils-Bulletin, No.5.
10. Brooks, R. H., Corey, A. T. (1964.): Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3. Colorado State Univ., Fort Collins.
11. Carsel, R. F., Parrish, R. S. (1988.): Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24: 755-769.

12. Cooper, M., Vidal-Torrado, P., Lepsh, I. F. (2002.): Stratigraphical discontinuities, tropical landscape evolution and soil distribution relationships in a case study in SE-Brazil. *Rev Bras Cienc Solo.*;26:673-83. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300012>
13. Darcy, H. (1856.): *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Editeur, Paris. str. 587.
14. Deng, H., Ye, M., Schaap, M. G., & Khaleel, R. (2009.): Quantification of uncertainty in pedotransfer function-based parameter estimation for unsaturated flow modeling. *Water Resources Research*. 45. (4) Doi: 10.1029/2008WR007477.
15. Dirksen, C. (1998.): *Soil physics measurements*. Catena Verl. GeoEcology paperback.
16. Durner, W. (1994.): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* 30:211–223. doi:10.1029/93WR02676
17. Durner, W., Flühler, H. (2005): *Soil Hydraulic Properties*. Braunschweig Technical University, Germany.
18. Filipović, V. (2012.): Procjena numeričkog modeliranja u procjeni kretanja vode i koncentracije nitrata u uvjetima hidromorfnih tala (Doktorski rad). Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
19. Filipović, V. (2015.): Modeliranje pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla. Voda u agroekosustavima, Ondrašek, G. (ur.), Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, 303-319.
20. Filipović, V., Coquet, Y., Pot, V., Houot, S., Benoit, P. (2016.): Modeling water and isoproturon dynamics in a heterogeneous soil profile under different urban waste compost applications. *Geoderma* 268: 29-40.
21. Gnatowski, T., Szatyłowicz, J., Brandyk, T. (2002.): Effect of peat decomposition on the capillary rise in peat-moorsh soils from the Biebrza River Valley. *Int. Agrophys.* 16(2):97–102
22. Gogolev, M. (2002.): Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. *Environmental Geology* 42: 248–258
23. Groenevelt, P. H., Grant, C. D. (2004.): A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. *Eur. J. Soil Sci.* 55:479–485. doi:10.1111/j.1365-2389.2004.00617.x

24. Guber, A. K., Pachepsky, YA. A., van Genuchten, M. TH., Rawls, W. J., Jacques, D., Šimůnek, J., Cady, R. E., Nicholson, T. J. (2005.): Field-scale water flow simulations using ensembles of pedotransfer functions for soil water retention. *Vadose Zone Journal*. 5. 234–247.
25. Guber, A. K., Pachepsky, Y. A., van Genuchten, M. T., Šimůnek, J., Jacques, D., Nemes, A., ... Cady, R. E. (2009.): Multimodel simulation of water flow in a field soil using pedotransfer functions. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 1–10.
26. Gupta, S.C., Larson, W. E. (1979.): Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15:1633–1635. doi:10.1029/WR015i006p01633
27. Hanson, B.R., Šimunek, J., Hopmans, J.W. (2006.): Numerical modelling of ureaammonium-nitrate fertigation under microirrigation. *Agricultural Water Management* 86: 102-113.
28. Husnjak, S. (2014.): *Sistematika tala Hrvatske*. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu. Hrvatska sveučilišna naklada, SBN 978-953-169-267-0. Zagreb.
29. Jacques, D., Šimůnek, J., Langergraber, G., Bradford, S. A., Šejna, M., van Genuchten, M. Th. (2013.): Numerical Modeling of Contaminant Transport Using HYDRUS and its Specialized Modules. *Journal of the Indian Institute of Science*. 93 (2): 265-284.
30. Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T. H., van Genuchten, M. T., Candela, L. (2009.): A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal Hydrology*. 367: 138–149.
31. Kavur, B., Vrkljan, I., Kovačević Zelić, B. (2010.): Procjena hidrauličkih značajki nezasićenog ekspanzivnog tla. Znanstveni rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu, UDK 624.131.54:522.5. Zagreb.
32. Ket, P., Oeurng, C., Degre, A. (2018.): Estimating Soil Water Retention Curve by Inverse Modelling from Combination of In Situ Dynamic Soil Water Content and Soil Potential Dana.
33. Kosugi, K. (1996.): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32:2697–2703. doi:10.1029/96WR01776
34. Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice (2005.): A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1015, DOI:10.1029/2003GB002199.

35. Kumar, C. P. (2001): Common Ground Water Modeling Errors and Remediation. *Journal of Indian Water Resources Society*. 21(4): 149-156.
36. Lamp, J., Kneib, W. (1981.) Zur quantitativen Erfassung und Bewertung von Pedofunktionen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 32, 695-711.
37. Liao, K., Xua, F., Zheng, J., Zhu, Q., Yang, G. (2014.): Using different multimodel ensemble approaches to simulate soil moisture in a forest site with six traditional pedotransfer functions. *Environmental Modelling and Software*. 57. 27–32.
38. Libardi, P. L., do Nascimento Silva, M. L., Setti Gimenes, F. H. (2018.): Soil Water Retention Curve as Affected by Sample Height.
39. Lu, N., Likos, J.(2004.): *Unsaturated soil mechanics*. Wiley, New York, 2004.
40. Lu, X.H., Jin, M.G., van Genuchten, M. T., Wang, B. G. (2011.): Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China. *Ground Water*. 49: 286–294.
41. Mailhol, J. C., Ruelle, P., Nemeth, I. (2001.): Impact of fertilization practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science* 20: 139-147.
42. Maloić, M. (2018.): Modeliranje toka vode i pronosa nitrata u nesaturiranoj zoni tla. *Diplomski rad*. Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
43. Mateković, V. (2018.): Modeliranje sezonske dinamike toka vode u nesaturiranoj zoni hidromorfni tala. *Diplomski rad*. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb.
44. Mattern, S., Vanclooster, M. (2010.): Estimating travel time of recharge water through a deep vadose zone using a transfer function model. *Environmental Fluid Mechanics* 10: 121–135.
45. Matula, S., Mojrova, M., Špongrova, K. (2007.): Estimation of the Soil Water Retention Curve (SWRC) Using Pedotransfer Functions (PTFs), Department of Soil Science and Geology, Faculty of Agrobiological Sciences, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences in Prague, Prague, Czech Republic.
46. McBratney, A. B., Minasny, B., Cattle, S. R., & Vervoort, R. (2002.): From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1-2), 41–73. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8)
47. Mualem, Y. (1976.): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3): 513-522.

48. Ondrašek, G., Petošić, D., Tomić, F., Mustačić, I., Filipović, V., Petek, M., Lazarević, B., Bubalo, M. (2015.): Svojstva vode i fiziološka uloga vode u sustavu tlo - biljka - atmosfera (Voda u agroekosustavima), udžbenik. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb. 281-302.
49. Pachepsky, YA., Rajkai, K., Toth, B. (2015.): Pedotransfer in soil physics: trends and outlook, A review. Department of Soil Science. Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry, Centre for Agricultural Research, Budapest. *Agrokemia es Talajtan*, 339-360.
50. Périard, Y., Hallema, D. W., Lafond, J. A., Gumiere, S. J., Caron, J. (2015.): Characterization of Water Retention Curves for a Series of Cultivated Histosols.
51. Radcliffe, D. E., Šimunek, J. (2010.): *Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications*. CRC Press, 373 str.
52. Ružičić, S., Mileusnić, M., Posavec, K. (2012.): Building conceptual and mathematical model for water flow and solute transport in the unsaturated zone at Kosnica site. University of Zagreb. Faculty of mining, geology and petroleum engineering.
53. Qiu, J. (2014.): Land models put to climate test. *Nature*, 510(7503), 16–17.  
<https://doi.org/10.1038/510016a>
54. Richards, L.A. (1931.): Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1: 318-333.
55. Saxton, K. E., Rawls, W. J. (2006.): Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*. Vol:70, No: 5.
56. Schaap, M. G., Leij, F. J., van Genuchten, M. Th. (1998.): Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:847–855. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200040001x
57. Schaap, M. G. (1999.): Rosetta: 1.0 version,  
<https://www.usss.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm>
58. Schaap, M. G., Leij, F. J. (1999): Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten, Submitted to *Soil Sci. Soc. Am. J.*
59. Schaap, M. G., Leij, F. J., van Genuchten, M. Th. (1999.): A bootstrap-neural network approach to predict soil hydraulic parameters. In: van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L. Wu (eds), *Proc. Int. Workshop, Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, pp 1237-1250, University of California, Riverside, CA.



60. Schaap, M. G., Leij, F. J., van Genuchten, M. Th. (2001.): ROSETTA: računalni program za procjenu hidrauličkih parametara tla s hijerarhijskim funkcijama pedotransfera. *Journal of Hydrology*. 251 (3): 163-176. DOI: 10.1016/S0022-1694 (01) 00466-8.
61. Schwärzel, K., Šimůnek, J., Stoffregen, H., Wessolek, G., van Genuchten M. Th. (2006.): Estimation of the unsaturated hydraulic conductivity of peat soils. *Vadose Zone J.* 5:628–640. doi:10.2136/vzj2005.0061
62. Scott, R. L., Shuttleworth, W. J., Keefer, T. O., Warrick, A. W. (2000.): Modeling multiyear observations of soil moisture recharge in the semiarid American Southwest. *Water Research*. 36: 2233–2247.
63. Shan G., Sun Y., Zhou H., Lammers P.S., Grantz D.A., Xue X., Wang Z. (2019.): A horizontal mobile dielectric sensor to assess dynamic soil water content and flows: Direct measurements under drip irrigation compared with HYDRUS-2D model simulation. *Biosystems Engineering* 179: 13-21.
64. Suarez, D. L., Šimunek, J. (1997.): UNSATCHEM: Unsaturated Water and Solute Transport Model with Equilibrium and Kinetic Chemistry.
65. 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.
66. Šimunek, J., Šejna, M., van Genuchten, M.Th. (1999.): The HYDRUS software package for simulating twodimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
67. Šimunek, J., van Genuchten, M. Th., Šejna, M., Toride, N., Leij, F. J. (1999.): The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation. Versions 1.0 and 2.0, IGWMC - TPS - 71, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
68. Šimunek, J., Hanson, B. R., Hopman, J. W. (2006.): Numerical modeling of urea-ammonium-nitrate fertigation under microirrigation. *Agricultural Water Management* 86, 102-113.

69. Šimunek, J., van Genuchten M. Th., Šejna, M. (2006.): The HYDRUS softwater package for simulating the two and three - dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Technical manual. PC Progress, Prague, Czech Republic.
70. Šimunek, J., Bradford, S. A. (2008.): Vadose zone modeling: Introduction and importance. *Vadose Zone Journal* 7: (2), 581-586.
71. Šimunić, I. (2013.): Uređenje voda, sveučilišni udžbenik. Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb.
72. Tomić, F (1988.): Navodnjavanje, Fakultet poljoprivrednih znanosti i Društvo inženjera i tehničara Hrvatske, Zagreb.
73. van Dijk (2003.): Eco – Hydrogeology, Interna skripta. Vrije University, Amsterdam, Nizozemska (neobjavljeno).
74. 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.
75. van Genuchten, M. Th., Wagenet, R. J. (1989.): Two-Site/Two-Region Models for Pesticide Transport and Degradation: Theoretical Development and Analytical Solutions. *Soil Science Society of America, Journal. Division S-1-Soil Physics. Vol. 53, No. 5.*
76. van Genuchten, M. Th., Leij, F. J., Yates, S. R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, Riverside, California.
77. Veichmeyer, F. J., Hendrickson, A. H. (1927.): The relation of soilmoisture to cultivation and plant growth. *Proc. 1th intern.Congress of Soil Science*, 3, 498–513.
78. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & Van Genuchten, M. T. (2010.): Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 795. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045>
79. Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., ... Young, I. M. (2016.): Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5). <https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>
80. Vogel, T., Císlerová, M. (1988.): On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transp. Porous Media* 3:1–15. doi:10.1007/BF00222683

81. Weiss, R., Alm, J., Laiho, R. Laine, J. (1998.): Modeling moisture retention in peat soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:305–313. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200020002x
82. Wösten, J. H. M., Bannink, M. H., de Gruijter, J. J., & Bouma, J. (1986.): A procedure to identify different groups of hydraulic conductivity and moisture retention curves for soil horizons. Journal of Hydrology, 86(133), 145.
83. Wösten, J. H. M., Schuren, C. H. E. J., Bouma, J., & Stein, A. (1990.): Functional sensitivity analysis of four methods to generate soil hydraulic functions. Soil Science Society of America Journal, 54, 827–832.
84. Young, H. D., Freedman, R. (2000.): University physics. With modern physics. 10th ed. San Francisco and Reading (MA).
85. [https://hr.abadqar-q.com/wiki/Hydrus\\_\(software\)](https://hr.abadqar-q.com/wiki/Hydrus_(software)).

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 3.1.</b> Popis lokacija uzorkovanja tla, tipova tla te biljnih zajednica koje se nalaze na tim područjima diljem RH .....	23
<b>Tablica 3.2.</b> Broj lokacija na kojima se nalazi koji tip tla te red kojemu tla pripadaju .....	25
<b>Tablica 3.3.</b> Karakteristike tla, sistematska pripadnost i fizikalna svojstva tla na lokacijama Istraživanja .....	29
<b>Tablica 3.4.</b> Popis istraživanih lokacija podijeljenih prema najbližim meteorološkim postajama .....	32
<b>Tablica 4.1.</b> Hidraulički parametri izmjereni pomoću HYDRUS programa .....	43
<b>Tablica 4.2.</b> Prosječne, minimalne i maksimalne vrijednosti vlage u tlu prema tipu tla .....	59

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2.1.</b> Primjer odnosa hidrauličke provodljivosti i vodnog potencijala tla te odnos hidrauličke provodljivosti i relativne količine vode u tlu za teksturno različita tla ....	3
<b>Slika 2.2.</b> Primjer retencijske krivulje tla za pijesak, ilovaču i glinu .....	4
<b>Slika 2.3.</b> Vrste i oblici vode u tlu, vodne konstante i sile držanja vode .....	6
<b>Slika 2.4.</b> Korištenje podataka o varijabilnosti hidrauličkih svojstava tla i sadržaja vode u tlu .....	10
<b>Slika 2.5.</b> Programi dostupni za rad pedotransfernih funkcija; SOILPAR (lijevo); ROSETTA (desno) .....	12
<b>Slika 2.6.</b> Povijest razvoja modela HYDRUS-1D .....	19
<b>Slika 2.7.</b> Prikaz rada modela HYDRUS-1D .....	20
<b>Slika 2.8.</b> Prikaz izgleda programa Rosetta .....	21
<b>Slika 3.1.</b> Terenska karta Republike Hrvatske s lokacijama istraživanja .....	22
<b>Slika 3.2.</b> Prikaz pedoloških profila tipova tla koja se istražuju: a) aluvijalno tlo; b) crvenica; c) černozem; d) lesivirano tlo; e) močvarno glejno tlo; f) pseudoglej; g) rendzina .....	28
<b>Slika 3.3.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	34
<b>Slika 3.4.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	34
<b>Slika 3.5.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	35
<b>Slika 3.6.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	35
<b>Slika 3.7.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	36
<b>Slika 3.8.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	36
<b>Slika 3.9.</b> Prikaz vrijednosti oborina i temperature tijekom istraživnog razdoblja (2020. godina) .....	37
<b>Slika 3.10.</b> Unos podataka o sadržaju mehaničkih čestica na 1. lokaciji istraživanja (Bačka	

Palanka - Smitovac) u programu HYDRUS .....	40
<b>Slika 3.11.</b> Prikaz retencijske krivulje toka vode na 1. lokaciji istraživanja (Bačka Palanka - Smitovac) u programu HYDRUS .....	41
<b>Slika 4.1.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Osijeka .....	45
<b>Slika 4.2.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Slavonskog Broda .....	47
<b>Slika 4.3.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Zagreba .....	49
<b>Slika 4.4.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Gospića .....	51
<b>Slika 4.5.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Rijeke .....	53
<b>Slika 4.6.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Zadra .....	55
<b>Slika 4.7.</b> Retencijske krivulje količine vode u tlu (vlage u tlu) u programu HYDRUS na istraživanim lokacijama u blizini Dubrovnika .....	57

## ŽIVOTOPIS

Paula Krsnik rođena je 27. prosinca 1997. godine u Zagrebu, gdje je završila osnovnu školu te od 2012. do 2016. godine pohađala XII. Gimnaziju. Preddiplomski studij na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Agroekologija upisuje u akademskoj godini 2016./2017., a završava u akademskoj godini 2019./2020. Iste godine upisuje Diplomski studij na istom Fakultetu, smjer Poljoprivredna tehnika - Melioracije te završava u akademskoj godini 2020./2021.

Kroz srednjoškolsko obrazovanje stekla je stupanj B2 razine engleskog jezika te A2 razine njemačkog jezika. Vrlo se dobro služi Microsoft Office paketom, programima za crtanje i modeliranje (AutoCad, Hydrus, HEC - RAS, i sl.) te programima za analizu fotografija i hidrauličkih karakteristika tla.