

Modeliranje infiltracije vode u kišnim vrtovima primjenom Green-Ampt modela

Jakac, Stefan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:552403>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Stefan Jakac

**Modeliranje infiltracije vode u kišnim vrtovima
primjenom Green-Ampt modela**

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Sveučilišni prijediplomski studij građevinarstvo

Vodni resursi i sustavi

**Stefan Jakac
JMBAG: 0114033941**

**Modeliranje infiltracije vode u kišnim vrtovima
primjenom Green-Ampt modela**

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Stefan Jakac

U Rijeci 11. rujna 2024.

Modeliranje infiltracije vode u kišnim vrtovima primjenom Green-Ampt modela

Sažetak:

Cilj rada je prikazati jednostavan proračunski postupak za modeliranje pražnjenja kišnih vrtova, koji su zamjenski pristup odvodnji oborinskih voda u urbaniziranim sredinama jer privremeno zadržavaju oborinu i uz sporu infiltraciju je upuštaju u tlo. U općem slučaju za modeliranje infiltracije poroznog tla primjenjuje se Richardsova parcijalna diferencijalna jednačba, čija je numerička integracija izazov. Stoga su znanstvenici Green i Ampt uz nekoliko radnih pretpostavki razvili jednu nelinearnu algebarsku jednačbu kojom su pojednostavili proračun. U ovom radu objašnjeni su osnovni infiltracijski procesi i prikazan je proračunski postupak modela Green-Ampt, koji se svodi na integraciju Darcyjeva zakona i prikaz numeričkog primjera.

Ključne riječi: kišni vrtovi, infiltracija, kumulativna infiltracija, saturacija, Darcyjev zakon.

Modeling water infiltration in rain gardens using the Green-Ampt model

Abstract:

The aim of this paper is to present a simple calculation procedure for modelling the drainage of rain gardens, which is an alternative approach to the drainage of rainwater in urbanized environments because they temporarily retain precipitation and release it into the soil with slow infiltration. In the general case, the Richards partial differential equation is used to model the infiltration of porous soil, the numerical integration of which is a challenge to solve. Therefore, with several working assumptions, scientists Green and Ampt developed a nonlinear algebraic equation that simplified the calculation. In this paper, the basic infiltration processes are explained and the calculation procedure of the Green-Ampt model is presented, which boils down to the integration of Darcy's law and the presentation of a numerical example.

Keywords: Rain Gardens, Infiltration, Cumulative Infiltration, Saturation, Darcy's Law.

Sadržaj

1. Uvod	7
1.1. Općenito o kišnim vrtovima.....	8
1.2. Dimenzioniranje kišnih vrtova	9
1.3. Gradnja kišnih vrtova	12
1.4. Održavanje kišnih vrtova	16
1.5. Primjeri iz prakse.....	17
2. Infiltracijski procesi.....	18
2.1. Stupanj saturacije	18
2.2. Infiltracija	19
2.3. Kumulativna infiltracija.....	20
2.4. Darcyjev zakon	20
2.5. Green-Ampt model	22
3. Numerički primjeri	31
4. Zaključak.....	36
5. Literatura.....	37

Popis tablica

Tablica 1: Mineraloški sastav za bioretencijski sloj tla [5].

Tablica 2: Prikaz Green-Ampt infiltracijskih parametara za različite vrste tla [16].

Tablica 3: Proračunske vrijednosti kumulativne infiltracije $F(t)$ i stope infiltracije $f(t)$.

Popis slika

Slika 1: Primjer kišnog vrta koji prikuplja oborinsku vodu s ceste [1].

Slika 2: Primjer propusnih i nepropusnih površina [3].

Slika 3: Primjer provedbe terenskih mjerenja stope infiltracije [4].

Slika 4: Poprečni presjek kišnog vrta [5].

Slika 5: Tipične vrste biljaka za kišni vrt (gore lijevo: mahonija, dolje lijevo: brnistra, gore desno: lavanda, dolje desno: perunika) [6,7,8,9].

Slika 6: Kišni vrt u Nazorovoj Ulici, Pula [11].

Slika 7: Promjena stupnja saturacije tijekom infiltracije u tlu [13].

Slika 8: Prikaz Darcyjeva eksperimenta koristeći se živinim manometrom za mjerenje tlaka vode (lijevo) i s pomoću piezometarskih cjevčica (desno) [14].

Slika 9: Karakteristični presjek tla za slučaj infiltracije s jasnom granicom saturiranog i nesaturiranog djela tla (lijevo) te pripadajući volumen vode (desno) [15].

Slika 10: Brooks-Corey relacija između usisnog potencijala i efektivne saturacije [16].

Slika 11: Dijagram kumulativne infiltracije $F(t)$.

Slika 12: Dijagram stope infiltracije $f(t)$.

1. Uvod

Rast i razvoj urbaniziranih područja uzrokovali su smanjivanje zelenih površina, odnosno zelene infrastrukture, te povećanje sive infrastrukture koju čine konstrukcije od betonskih, asfaltnih i drugih materijala (npr. ceste, pločnici, građevine, itd.). Negativne posljedice u većim gradovima mogu se očitovati u pojavi urbanih toplinskih otoka odnosno povećanja temperature u gradovima i u neučinkovitim urbanim oborinskim odvodnjama pri padu većih količina oborina. Zelena infrastruktura upotrebljava pristup za stvaranje održivih i atraktivnih gradova i ostalih područja primjenom različitih mogućnosti i prirodnih resursa. Zelena infrastruktura kao što su parkovi, zeleni krovovi, zeleni zidovi ili zeleni vrtovi se u urbanim sredinama može upotrebljavati na različite načine.

Pojave ekstremnih vremenskih događaja sve su češće i nepredvidljivije, a uzrokuju i poplave u urbanim sredinama zbog nepropusnih podloga koje otežavaju infiltraciju oborina u tlo. Jedan od načina rješavanja tog problema je gradnja održive zelene infrastrukture odnosno kišnih vrtova, gdje će tlo privremeno zadržati oborinsku vodu i uz infiltraciju vode u tlo, ponovno uspostaviti prirodni ciklus u urbanim sredinama gdje se oborinska voda infiltrira u tlo – čime će se ublažiti štete od poplava.

Infiltracija, kao jedna od najvažnijih sastavnica hidrološkog ciklusa, jest upuštanje vode u tlo. Postoji više proračunskih modela infiltracije vode u tlo, kao što su: Green-Ampt model, Philipov model, Hortonov model, Kostiaikov model itd. U sklopu ovog završnog rada će se primijeniti Green-Ampt model.

U prvom dijelu završnog rada objasnit će se namjena, osnove projektiranja, građenje i održavanje kišnih vrtova. Zatim će se obraditi osnove infiltracijskih procesa koje uključuju definiranje pojmova: saturacije, infiltracije, kumulativne infiltracije, Darcyjeva zakona i u konačnici ishoditi izvod Green-Ampt modela infiltracije, gdje će se na temelju dobivene nelinearne jednadžbe izraditi algoritam u programu Excel te izraditi numerički primjer.



Slika 1: Primjer kišnog vrta koji prikuplja oborinsku vodu s ceste [1].

1.1. Općenito o kišnim vrtovima

Prirodni procesi u okolišu su pod utjecajem povećanja razvoja nepropusnih površina u urbaniziranim sredinama. To je zato što prirodni krajolik, koji je nekada bio sposoban upijati i čistiti oborinsku vodu, sada prekriven nepropusnim površinama koje ne mogu upiti vodu. Prilazi, ceste i krovovi samo su neki od primjera nepropusnih površina. Više nepropusnih površina povećava količinu oborinske vode koja otječe i povećava mogućnost da zagađivači dopiju u vodotokove kroz sustave oborinske kanalizacije. Ova vrsta onečišćenja koja je posljedica otjecanja oborinskih voda naziva se onečišćenje iz ne-točkastih izvora. Prema istraživanjima, otjecanje iz vlastitih dvorišta i vrtova doprinosi do 70 % zagađivača u potocima, rijekama i jezerima. Neki od uobičajenih onečišćujućih tvari iz dvorišta koji završavaju u lokalnim vodotocima uključuju tlo, gnojiva, pesticide, izmet kućnih ljubimaca, pokošenu travu i drugi otpad iz dvorišta [2].

Kišni vrtovi (Slika 1) zadržavaju kišnicu i puštaju je da prodre u zemlju umjesto da otječe sa zemlje. Tako se može smanjiti količina otjecanja i onečišćenja koja dopijeva u vodna tijela. Kišni vrtovi služe za: filtriranje otjecanja oborinske vode prije nego što uđe u obližnja vodna tijela, obnavljanje zaliha podzemne vode, ublažavanje problema s odvodnjom i poplavama, osiguravanje hrane i staništa za divlje životinje [2].



Slika 2: Primjer propusnih i nepropusnih površina [3].

1.2. Dimenzioniranje kišnih vrtova

Prvi korak kod projektiranja kišnih vrtova je odabir primjerene lokacije za gradnju, te određivanja veličine kišnog vrta. Postoje lokacije koje su primjerenije za izgradnju i lokacije koje je potrebno izbjegavati. Dobre karakteristike lokacija su ravne i neiskorištene površine travnjaka, područja s dobrom drenažom, popločene površine s nagibom ili krovni odvod. Lokacije koje treba izbjegavati jesu: unutar tri metra od temelja zgrade, u blizini strmih padina (višim od 10 %), niska područja s lošom drenažom, u blizini ili iznad komunalnih objekata kao što su električne kutije ili septičke jame, ispod velikih stabala, područja s postojećom izvornom vegetacijom i područja s podzemnom vodom iznad 1,3 m. Većina kišnih vrtova izvodi se na blažim nagibima i nagnuti su od zgrada kako bi se lakše preuredilo tlo i stvorio ravan sloj, što bi kod strmijih nagiba (viših od 10 %) bilo teže izvedivo i zahtijevalo bi dodatne potporne strukture. Moguće je također kišni vrt smjestiti u sjenu velikih stabala, međutim, odabir biljaka bit će ograničen na one koje su tolerantne na nedostatak sunčevog svjetla, a mogući su i dodatni problemi s korijenjem stabala. Pri planiranju lokacije smještanja kišnog vrta potrebno je uvidjeti kako će se on uklopiti u postojeću i planiranu infrastrukturu [4].

Veličina kišnog vrta određuje se na osnovi nepropusnih površina s kojih oborina otječe u kišni vrt i površine samog kišnog vrta koji će primiti tu vodu (Slika 2). Na temelju propusnih površina (engl. pervious surface) koje prikupljaju vodu i nepropusnih površina (engl. impervious surface) koje odvede vodu, može se dobiti omjer odnosa nepropusnih površina prema površini kišnog vrta I/P prema Jed. 1. Navedeni izraz primjenjuje se u jednadžbama za dobivanje debljine slojeva kišnog vrta [4].

$$\frac{I}{P} = \frac{A_i}{A_g} \quad \text{Jed. 1}$$

gdje je:

I/P – odnos nepropusnih i propusnih površina

A_i – nepropusna površina

A_g – površina kišnog vrta.

Ovisno o tlu i lokaciji smještaja kišnog vrta, uz veličinu vrta potrebno je još odrediti i stopu njegove infiltracije. Kako bi se doznalo kojom brzinom će tlo upijati oborinu koja dotječe u kišni vrt, izvodi se infiltracijski test koji se sastoji od kopanja rupe kružnog oblika znanog promjera u tlu. Odstranjuje se približno 30 cm tla, gdje se stvara rupa s ravnim dnom koja daje bolji uvid u to kako određeno tlo zadržava vodu tijekom vremena. Nakon iskopavanja potrebno je rupu napuniti vodom, te koristeći se ravnalom, mjeriti početnu i krajnju razinu vode u rupi tijekom određenog razdoblja. Izračunavajući volumen vode prije i nakon mjerenja te dijeleći s ukupnim vremenom infiltracije, dobiva se stopa infiltracije [4]. Dobivena stopa infiltracije f , koja se može izmjeriti (kako je prikazano na Slici 3), može se odrediti prema modelu

$$f = \frac{(h_f - h_i) \cdot \pi \cdot r^2}{t_{in}} \quad \text{Jed. 2}$$

gdje je:

f – stopa infiltracije (mm/hr),

h_f – krajnja visina vode (mm),

h_i – početna visina vode (mm),

r – radijus rupe (mm) i

t_{in} – vrijeme infiltracije (hr).



Slika 3: Primjer provedbe terenskih mjerenja stope infiltracije [4].

Kako bi se omogućilo privremeno zadržavanje vode na površini kišnog vrta, potrebno je izračunati debljinu drenažnog sloja, koji se sastoji od čistog ispranog šljunka debljine otprilike 1 cm s malom količinom čestica prašine. Najduže preporučeno vrijeme zadržavanja vode na površini kišnog vrta iznosi tri dana, te se u tom razdoblju očekuje da se voda odvodnjava kroz tlo, gdje vrijeme predstavlja varijablu tijekom dimenzioniranja drenažnog sloja. Osim navedenoga, ograničenje vremena zadržavanja vode smanjuje mogućnost skupljanja raznih kukaca i onečišćenja same vode koja se drenira u tlo. Ovisno o tipu šljunka koji se upotrebljava, određuje se poroznost drenažnog sloja, koji obično iznosi $n=0,4$ za većinu šljunkovitog materijala. Poroznost je omjer volumena pora i ukupnog volumena materijala šljunka koji se ugrađuje u tlo, a upotrebljava se za proračun drenažnog sloja u Jed. 3.

U većini projekata kišnih vrtova drenažni sloj smatra se najskupljim dijelom projekta, te je moguća želja investitora za odabirom debljine drenažnog sloja, uz uvjet minimalne debljine sloja od 30 cm, koju preporučuje *Metro Vancouver Stormwater Source Control Guidelines 2012*, i maksimalne debljine proračunatog sloja D_R . Deblji drenažni sloj zahtijeva veću dubinu kišnog vrta i veću mogućnost za privremeno zadržavanje vode. Dakle, najčešće vrijedi [4]

$$D_R = \frac{f \cdot t_d \cdot 24}{n}$$

Jed. 3

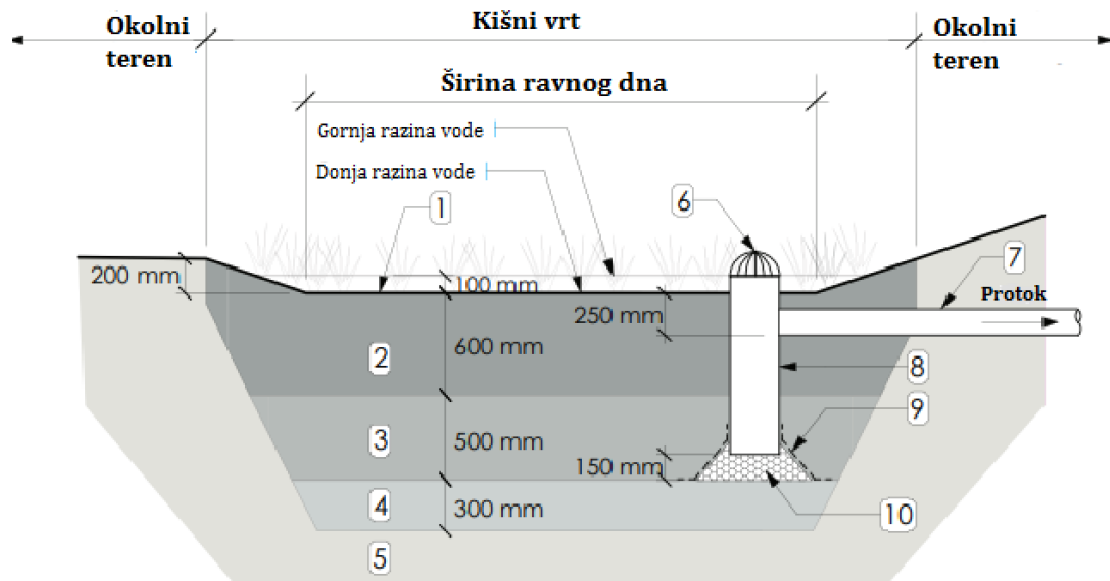
gdje je:

- D_R – maksimalna debljina drenažnog sloja (mm),
- f – stopa infiltracije (mm/hr),
- t_d – dopušteno vrijeme dreniranja (dani) i
- n – poroznost drenažnog sloja.

1.3. Gradnja kišnih vrtova

Prije gradnje kišnih vrtova potrebno je osigurati gradilište na odgovarajući način kako ne bi došlo do ozljede pješaka, oštećenja vozila na cesti te opreme i mehanizacije potrebne za gradnju. Kišni vrtovi sastoje se od različitih slojeva materijala koji omogućavaju zadržavanje i infiltraciju vode kroz tlo te se određuju dimenzije svakog sloja posebno. Dimenzije koje za kišni vrt preporučuje *District of Saanich Stormwater best management practices* : visina stupca vode iznad površine tla do razine prelijevanja je 10 cm, širina ravnog dna kišnog vrta preporučuje se u rasponu od 1,0 do 3,0 m, omjer duljine i širine kišnog vrta 2: 1 i nagib bočnih stranica kišnog vrta u maksimalnom omjeru od 3: 1 [5].

Potrebno je predvidjeti preljevni odvod s rešetkama, koji će štititi od prelijevanja vode u okolni teren pri višim razinama vode u vrtu, kao i od nastalog taloga te krhotina koje mogu dospjeti u odvod. Odvodna cijev je od PVC materijala, minimalnog promjera od 300 mm, na koju je spojena izlazna cijev manjeg promjera od 100 mm, koja je izvedena pod nagibom od 2 % te odvodi vodu na predviđeno mjesto ili može biti spojena na javni odvodni sustav. Okolne nepropusne površine potrebno je izvesti u nagibu prema kišnom vrtu kako bi se voda mogla preusmjeriti direktno u kišni vrt putem za to predviđenih ulaza. Mjesta gdje voda izravno ulazi s nepropusnih površina u kišni vrt mogu sadržavati riječni kamen kako bi se spriječilo prskanje vode, te se oni izvode u nagibu i ostavlja se minimalno 10 cm prostora između kote ulaza i donje kote zadnjeg sloja kišnog vrta [5].



Slika 4: Poprečni presjek kišnog vrta [5].

Dimenzije sa Slike 4 pretpostavljene su, a numeracija predstavlja:

1. organski malč,
2. bioretencijski sloj,
3. drenažni sloj,
4. posteljicu,
5. neuređeno postojeće tlo,
6. preljevni odvod s rešetkama,
7. izlaznu cijev promjera 100 mm,
8. odvodnu cijev promjera 300 mm,
9. geotekstil,
10. riječni kamen promjera zrna 2,5 cm.

Organski sloj malča nanosi se na dubinu od 5 cm, koji štiti biljke od isušivanja i rasta korova. Kao malč mogu se upotrebljavati: usitnjeni vrtni otpad, lisna plijesan, kompost, dobro kompostirana kora i dobro kompostirano gnojivo. Piljevina, malč od svježe kore i ostali proizvodi od drva ograničavaju razvoj tla i iscrpljuju njegove hranjive tvari tijekom razgradnje, te kao takvi, nisu prikladni za upotrebu. Prije nanošenja malča potrebno ga je očistiti od korova [5].

U bioretencijskom sloju nalazi se korijenje biljaka, stoga tlo mora biti pogodno za njihov rast i razvoj. Bioretencijski sloj još se naziva i medij za uzgoj, a pogodan je za infiltraciju vode u dublje slojeve tla i mora se oduprijeti zbijanju. Bioretencijski sloj sadrži organsko i pjeskovito tlo s minimalnim udjelom gline i prahova, gdje je mineraloški sastav tla od suhe mase u postotku prikazan u Tablici 1.

Tablica 1: Mineraloški sastav za bioretencijski sloj tla [5].

Klasifikacija zrna tla	Postotak mineralnog sastava od suhe mase
Šljunak (veće od 2,5 mm)	0
Pijesak (veće od 0,05 mm i manje od 2,5 mm)	70 – 80
Prah (veće od 0,002 mm i manje od 0,05 mm)	5 – 15
Glina (manje od 0,002 mm)	2 – 5
Organsko tlo (% suhe mase)	10 – 15

Bioretencijski sloj se zatrpava i uređuje u slojevima od 20 do 30 cm debljine koristeći se lakšom mehanizacijom kao što je kompaktni utovarivač ili manji dozer na gusjenicama. Potrebno je spriječiti prekomjernu zbijenost bioretencijskog sloja tako da se dopusti proces konsolidacije i slijeganja materijala, u kojem se nadoda više materijala negoli je potrebno kako bi se tijekom vremena tlo prirodno slegnulo na željenu razinu, te ne zahtijeva nikakvo dodatno zbijanje. Kako bi se ubrzao proces konsolidacije i slijeganja materijala, moguće je navlažiti ugrađeni materijal. Najznatnije slijeganje vidi se već nakon prvog vlaženja materijala, a svako sljedeće vidljivo je učestalim vlaženjem, no tamo gdje kiša vlaži tlo preporučuje se proces prirodnog slijeganja. Veliku količinu materijala u bioretencijskom sloju čini pijesak, koji mora biti tvrd, zrnat, dobro opran i bez nečistoća, kemikalija ili organskih tvari. Granulometrijski sadržaj pijeska: preporučuje se da 90 – 100 % od ukupne mase prolazi kroz sito promjera od 2,50 mm, 0 – 65 % kroz sito promjera 0,50 mm i 0 – 5 % kroz sito od 0,05 mm [5].

Drenažni sloj sastoji se od čistog ispranog šljunka, koji mora biti okruglog oblika, izdržljiv, dobro opran i bez nečistoća, kemikalija ili organskih tvari, te maksimalne veličine čestice zrna šljunka od 2 cm i najmanje od 1 cm. Geotekstil je materijal bio-nerazgradive folije ili druge filtracijske membrane, koji dopušta protok vode, ali ne i čestica materijala tla. Postavlja se na nagnutim stranicama kišnog vrta kako bi ga stabilizirao, te preusmjerio i zadržao vodu zbog svoje niske propusnosti [5].



Slika 5: Tipične vrste biljaka za kišni vrt (gore lijevo: mahagonij, dolje lijevo: brnistra, gore desno: lavanda, dolje desno: perunika) [6,7,8,9].

Odabir biljaka za kišni vrt ponajprije ovisi o njihovu položaju u vrtu – zbog toga što će na različitim pozicijama biti drugačiji stupanj saturacije tla. Tako će stupanj saturacije, odnosno vlažnost tla na najnižoj koti kišnog vrta, biti najveći, a na višim kotama i zakošenim stranicama vrta nešto manji. Radi jednostavnije selekcije sadnica, *District of Saanich Stormwater best management practices* razdvaja kišni vrt na tri zone, gdje je najniža vlažna zona, potom bočni dio kišnog vrta pod nagibom (vlažno-suha zona) te najviša, suha zona kišnog vrta. Vlažna zona je tijekom zime duže poplavljena, suho-vlažna zona koja je pod nagibom može imati veće oscilacije stupnja saturacije zbog više razine vode zimi i niže razine ljeti, a gornja suha zona ostaje relativno suha tijekom cijele godine. Posadene biljke morat će biti dugotrajne i otporne na štetne utjecaje da bi izdržale duža razdoblja plavljenja i suše. Za hrvatsko podneblje najbolje je birati domaće autohtono bilje i mediteranske sadnice koje će biti izdržljive u svim vremenskim prilikama, što će pridonijeti manjoj potrebi za učestalim održavanjem tijekom godine. U kišnom vrtu prednjačit će zimzelene vrste grmlja kao što su šaš i rogoz s otprilike 80 – 90 %, te vrste drveća koje se mogu oduprijeti raznim vremenskim utjecajima [5]. Neke od najučestalije sađenih biljaka u Republici Hrvatskoj jesu sadnice planike, mahagonija, brnistra, lavande, smilja,

ružmarina, lovora, pljuskavice, tobirovca, drijena, jaglaca, perunike, mente, veprine, kozlaca, bršljana itd [10].

1.4. Održavanje kišnih vrtova

Kišni vrtovi trebali bi se projektirati tako da zahtijevaju minimalno održavanje. Vrste vegetacije koje su posađene moraju tolerirati sušna i hladna razdoblja tijekom godine, te ne zahtijevati navodnjavanje, osim u situacijama ekstremnih sušnih razdoblja gdje je potrebno ograničiti zalijevanje na jednom tjedno. Potrebno je povremeno pregledavanje i čišćenje ulaznih područja gdje se voda ulijeva u kišni vrt, te ostalih preljavnih odvoda, odvoda s rešetkama, područja koja su natopljena vodom; kao i njihovo redovito održavanje – kako ne bi došlo do začepjenja sustava [5].

Moguća je pojava erozije slojeva tla zbog utjecaja vode, vjetra i ostalih čimbenika, što zahtijeva zamjenu tla i biljnog materijala. Ispravno projektiranje kišnih vrtova trebalo bi spriječiti pojavu erozije tla i ograničiti njezinu pojavu samo u slučaju ekstremnih uvjeta. Ako se erozija tla učestalo pojavljuje, potrebno je pronaći izvor problema, gdje se najčešće razmatraju: protok vode iz drenažnog područja, veličina kišnog vrta, brzina strujanja vode u kišnom vrtu i metode zaštite kišnog vrta od pojava erozije. Ako se neželjeni materijal taloži u kišnom vrtu, potrebno je odrediti izvor taloženja i ukloniti talog. Ovisno o odabranim biljkama i njihovoj estetici, potrebno je povremeno obrezivanje, uklanjanje i zamjena mrtvog biljnog materijala [5].

Zamjena površinskog organskog tla odnosno malča preporučuje se svake dvije godine zbog taloženja teških metala u kišnom vrtu. Najčešće pogođena odvodna područja su u blizini većih komercijalnih ili industrijskih središta i u blizini prometnica ili parkirališta. U stambenim ili drugim područjima gdje ne dolazi do prekomjernog taloženja teških metala, preporučuje se dodavanje ili zamjena 5 – 10 cm malča po potrebi, barem jednom svake dvije godine. Zamjenom malča osigurava se sigurno i djelotvornije djelovanje bioretencijskog sloja u mjestima koja imaju veći rizik za taloženje metala, a ako zamjena materijala ne djeluje, potrebno je analizirati tlo na plodnost i razinu zagađivača u tlu [5].



Slika 6: Kišni vrt u Nazorovoj Ulici, Pula [11].

1.5. Primjeri iz prakse

Jedan primjer kišnog vrta, koji se nalazi u Puli, prikazan je na Slici 6. Kako bi se riješio problem čestih poplava na toj dionici, pri rekonstrukciji Nazorove ulice je umjesto klasične odvodnje oborinske vode upotrijebljen alternativni pristup s kišnim vrtovima. I prije rekonstrukcije postojale su zelene površine uz cestu, a ujedno je voda dolazila s drugih ulica, čime bi se na kraju poplavio Trg Republike. Stoga se došlo na ideju iskorištavanja zelenih površina te su izgrađena tri kišna vrta uz cestu. Umjesto da se oborinska voda odvodi kroz cijev, upotrijebljena je zemlja, koja je ekonomski isplativija za izgradnju kišnih vrtova. Voda se što dulje nastoji zadržati na slivu. Ona se filtrira i pročišćava, čime se rasterećuje uređaj za pročišćavanje koji bi u klasičnoj gradnji (kroz cijev) bio preopterećen tijekom ekstremnih vremenskih pojava te uzrokovao poplave [11].

2. Infiltracijski procesi

Infiltracija je dio prirodnog mehanizma hidrološkog ciklusa, gdje dolazi do poniranja vode u tlo. U slučaju kišnog vrta, uz proces evapotranspiracije (do isparavanja dolazi preko životnih procesa biljaka), još dolazi do procesa infiltracije, odnosno pražnjenja takvih retencija. Tijekom infiltracije dolazi do snižavanja razine vode u kišnom vrtu h_v te se time smanjuje i volumen retencionirane vode. Provjera učinkovitosti kišnog vrta za mjerodavni hidrološki scenarij slijedit će iz načela očuvanja mase koja se svodi na

$$\pm \left\{ \begin{array}{l} \text{promjena} \\ \text{volumena vode} \\ \text{u jedinici vremena} \end{array} \right\} = Q_{ul}(t) - Q_{iz}(h_v(t)) \quad \text{Jed. 4}$$

gdje je:

- $Q_{ul}(t)$ – ulazni hidrogram, kojim se kišni vrt puni
 $Q_{iz}(h_v(t))$ – izlazni hidrogram, kojim se kišni vrt prazni.

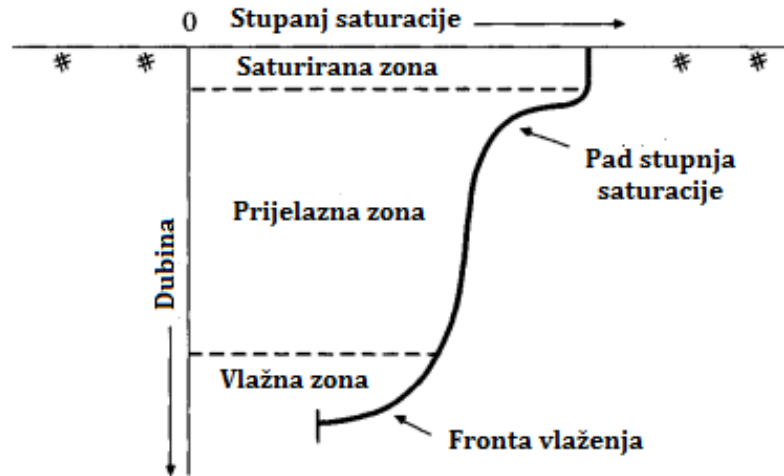
Rješenje prethodne Jed. 4 zahtijeva mjerenje protoka vode u određenom vremenu infiltracije, koja ovisi o rješenju jednadžbe $h_v(t)$, kao i o parametrima tla.

2.1. Stupanj saturacije

Infiltracijom vode kroz porozno, nesaturirano tlo – koje se sastoji od čestica tla, zraka i vode – dolazi do popunjavanja međuprostora između čestica tla vodom i podizanja vodnog lica u tlu. Kako se pore pune vodom, tako tlo postaje saturirano, odnosno zasićeno vodom. Očituje se u stupnju saturacije ili stupnju zasićenosti. Stupanj saturacije θ izražava se u postotku i prikazuje omjer volumena vode u porama (V_w) i volumena pora u uzorku tla (V_p), gdje je [12]

$$\theta = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 \% \quad \text{Jed. 5}$$

Potpuno saturirano tlo je ono kod kojeg su sve pore ispunjene vodom i gdje stupanj saturacije iznosi 100 % $\theta = 1$, dok u porama nesaturiranog tla prevladava zrak i stupanj saturacije je tada $\theta = 0$. Djelomično saturirano ili djelomično nesaturirano tlo je ono kod kojega voda ne ispunjava sve njegove pore, te ima stupanj saturacije u rasponu od $0 < \theta < 100 \%$ [12].



Slika 7: Promjena stupnja saturacije tijekom infiltracije u tlu [13].

2.2. Infiltracija

Brzina kojom će voda ponirati u tlo ovisit će o uvjetima na površini tla, vegetaciji koja se nalazi na samom tlu, karakteristikama tla i parametrima tla kao što su: hidraulična provodljivost K_s , poroznost tla n i stupanj saturacije θ . Poniranjem vode u tlo dolazi do promjene sadržaja saturacije, stoga se mogu razlikovati četiri zone saturacije – vidljive na Slici 7, koja prikazuje dijagram promjene stupnja saturacije s dubinom tla. Na osi apscisi prikazan je stupanj saturacije, a dubina tla prikazana je na osi ordinati. Neposredno ispod površine tla nalazi se potpuno saturirana zona, gdje stupanj saturacije iznosi 100 % i čije su sve pore ispunjene vodom. Nakon saturirane zone dolazi do naglog pada stupnja saturacije – u porama tla se uz vodu nalazi i zrak, pa je tlo djelomično saturirano te stupanj saturacije iznosi negdje između $0 < \theta < 100$ %. U prijelaznoj zoni je stupanj saturacije približno ujednačen. Iz toga slijedi vlažna zona, gdje se stupanj saturacije smanjuje s dubinom do fiktivne linije odnosno fronte vlaženja koja odvaja saturirano, ili vlažno tlo iznad i nesaturirano, ili suho tlo ispod linije.

Mnogi infiltracijski modeli mjere stopu infiltracije f u cm/sat, koja označava brzinu poniranja vode u tlo. Ako se u model ulazi s pretpostavkom da postoji stupac vode iznad površine tla h_0 (kao u slučaju kišnih vrtova), tada će postojati infiltracijski potencijal koji se očekuje za zadani hidrološki događaj opisan stopom infiltracije f u vremenu t . U slučaju manjeg intenziteta oborina i stvarna stopa infiltracije bit će manja od proračunatog modela.

2.3. Kumulativna infiltracija

Kumulativna infiltracija je ukupni volumen vode koji se akumulirao u porozno tlo po jedinici površine tijekom infiltracije u određenom vremenu t , mjerena od nekog poznatog referentnog stanja [13]. Funkcija kumulativne infiltracije $F(t)$ će kasnije biti primjenjivana u infiltracijskom modelu te je određena sa

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad \text{Jed. 6}$$

gdje će funkcija ovisiti o vremenskoj promjeni akumulirane vode i stopi infiltracije f , koja se u ovom slučaju može zapisati kao:

$$f(t) = \frac{dF}{dt} \quad \text{Jed. 7}$$

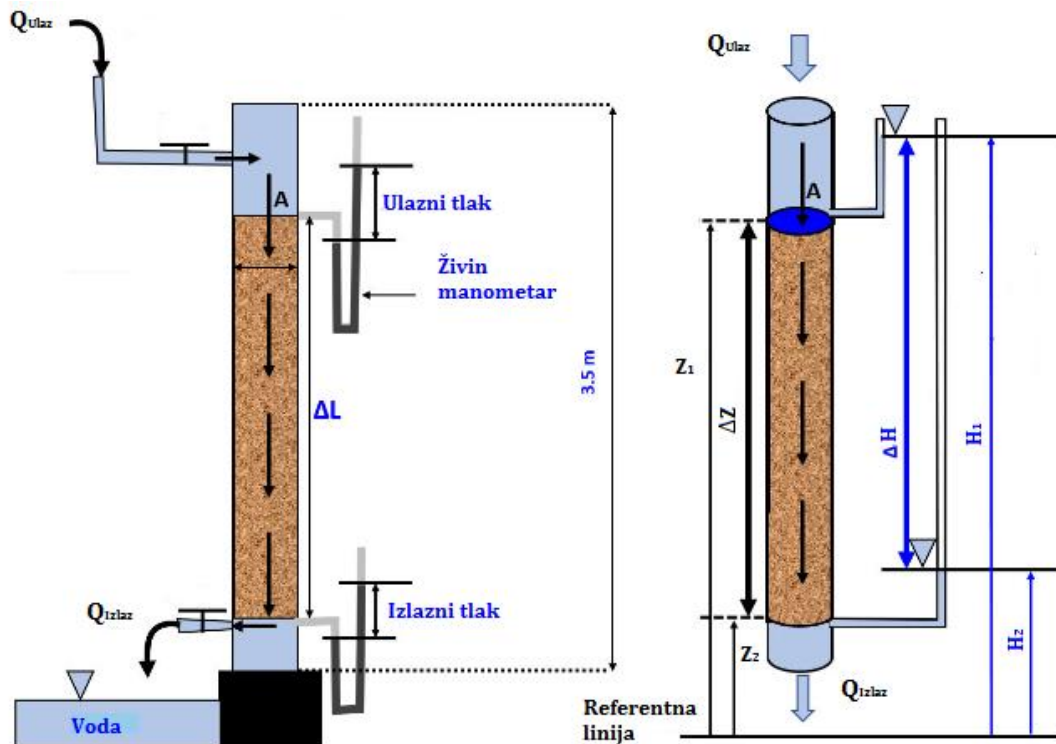
2.4. Darcyjev zakon

Protok vode kroz porozno tlo jednadžbom je odredio francuski inženjer Henry Darcy 1856. godine. Eksperimentalnim postupkom ustanovio je protok vode koristeći se cijevi ispunjenom pijeskom, tako da je količina vode koja protječe kroz cijev bila proporcionalna s površinom cijevi A i hidrauličkim gradijentom $\Delta H/\Delta Z$. Da bi dobio volumen vode potreban da prođe kroz cijev u određenom vremenu, provodio je niz pokusa koji su uključivali promjenu tipa pijeska, promjera cijevi, te duljinu uzorka pijeska i brzinu vode kroz filtarski sloj. Izvorno su upotrijebljeni živini tlakomjeri koji su se nalazili na početku i na kraju pješčanog filtra (vidljivo na Slici 8 [lijevo]), te bi voda tekla nepromijenjenom brzinom u vrhu stupca i izlazila na dnu [14]. Nakon Darcyja, u praksi su se upotrebljavale piezometarske cjevčice za dobivanje tlaka, koje bi se punile vodom smještene na krajevima filtra (prikazano na Slici 8 [desno]), od kuda proizlazi odnos

$$Q \propto -\frac{\Delta H}{\Delta Z} \cdot A \quad \text{Jed. 8}$$

gdje je:

- Q – volumni protok (m^3/sek),
- ΔH – razlika potencijala između dviju mjernih razina iznad referentne linije (H_1 je gornja razina, a H_2 donja razina) (m),
- ΔZ – duljina uzorka tla kroz koje prolazi voda (m),
- A – površina poprečnog presjeka cijevi (m^2).



Slika 8: Prikaz Darcyjeva eksperimenta, koji primjenjuje živin manometar za mjerenje tlaka vode (lijevo) i s pomoću piezometarskih cjevčica (desno) [14].

Eksperimentirajući sa sitno zrnatim i krupno zrnatim pijeskom, zaključio je da je protok proporcionalan s karakteristikama pijeska odnosno hidrauličkom provodljivošću K_s . [14] Matematički odnos naziva se Darcyjev zakon i osnovna je jednačba za protok vode kroz porozni medij, koja glasi

$$Q = -K_s \frac{\Delta H}{\Delta Z} \cdot A$$

Jed. 9

gdje je:

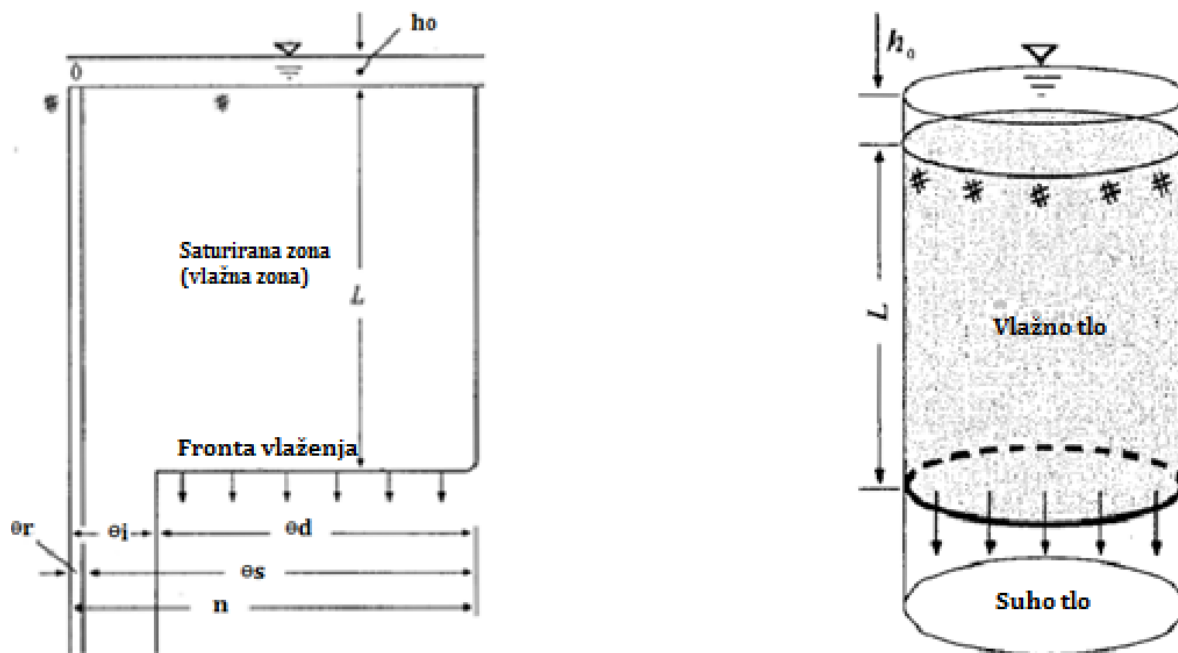
Q – volumni protok (m^3/sek),

ΔH – razlika potencijala između dviju mjernih razina iznad referentne linije (H_1 je gornja razina, a H_2 donja razina) (m),

ΔZ – duljina uzorka tla kroz koje prolazi voda (m),

A – površina poprečnog presjeka cijevi (m^2),

K_s – hidraulička provodljivost tla.



Slika 9: Karakteristični presjek tla za slučaj infiltracije s jasnom granicom saturiranog i nesaturiranog djela tla (lijevo) te pripadajući volumen vode (desno) [15].

2.5. Green-Ampt model

Stopa infiltracije f može se odrediti rješavanjem jednodimenzionalne Richardsove jednadžbe, koja je osnovna diferencijalna jednadžba za tok vode kroz nesaturiranu poroznu sredinu. Prije Richardsove jednadžbe postojali su empirijski izrazi, npr. Hortonova infiltracijska jednadžba [16], a kasnije su uvedena analitička pojednostavljena mehanizma infiltracije. Znanstvenici Green i Ampt bili su zainteresirani za analizu mehanizma infiltracije, te su izvodom Darcyjeva zakona dobili izraze za stopu infiltracije f i kumulativnu infiltraciju F . Oba su izraza u međuzavisnosti jer se derivacijom prvog reda kumulativne infiltracije u vremenu t dobiva stopa infiltracije.

Kumulativna infiltracija je akumulirana dubina infiltrirane vode od razine tla do fronte vlaženja u tlu, a stopa infiltracije označava brzinu kojom voda prodire u tlo. Green-Ampt model pojednostavljuje Richardsovu jednadžbu infiltracije, pretpostavljajući da je tlo homogeno i da voda protječe s oštrom frontom vlaženja. Također se pretpostavlja da se tlo sastoji od ujednačenog početnog stupnja saturacije θ_i , konstantnog sadržaja saturacije tla θ_s , te da je u vremenu t fronta vlaženja prodrila do dubine L [16].

Na Slici 9 okomita os dijagrama označava udaljenost od površine tla, a horizontalna os stupanj saturacije tla. Oznake na slici su:

- h_0 – početna visina stupca vode iznad površine tla
- L – udaljenost od površine tla do fronte vlaženja
- K_s – hidraulička provodljivost tla
- θ_r – stupanj rezidualne saturacije
- θ_i – početna saturacija tla
- θ_s – stupanj potpune saturacije
- θ_d – razlika stupnja saturacije
- n – poroznost tla.

U početku, prije nego što se voda infiltrira kroz površinu tla, sadržaj vode u tlu je θ_i što označava početnu saturaciju. Nakon što je započeo proces infiltracije vode u tlo u određenom vremenu, pore tla postupno se pune vodom i vlažna se fronta spušta, čime se dobiva kontrolni volumen $L \cdot \theta_d$. Stupanj saturacije povećava se do trenutka kada su sve pore ispunjene vodom n , te razlika stupnja saturacije tada iznosi $\theta_d = (n - \theta_i)$. Kontrolni volumen smatra se vlažnim dijelom u koloni, koji polazi od površine tla do vlažne fronte L , te je taj volumen prodrle vode po jedinici površine jednak kumulativnoj infiltraciji $F(t)$, prikazan jednadžbom [16]

$$F(t) = L(n - \theta_i) = L \cdot \theta_d \quad \text{Jed. 10}$$

Tok vode kroz porozno tlo opisuje se Darcyjevom brzinom q u Jed. 11., što zapravo predstavlja negativnu stopu infiltracije $-f$. Razlika u predznaku očituje se zbog toga što pozitivno djelovanje q djeluje prema gore, dok pozitivni predznak f djeluje prema dolje [16]. Tako će se Darcyjev zakon svesti na

$$q = -K_s \frac{\partial H}{\partial z} \approx -K_s \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad \text{Jed. 11}$$

gdje je:

- K_s – hidraulička provodljivost
- $\frac{\Delta H}{\Delta z}$ – hidraulički gradijent
- Z_1 – na površini tla = 0
- Z_2 – na položaju neposredno ispod fronte vlaženja u suhom tlu = $-L$,
- $H_1 = h_0$

h_0 – visina stupca vode iznad površine tla

$$H_2 = -|\psi| - L.$$

Darcyjeva brzina će tako biti

$$q = -K_s \left(\frac{H_1 - H_2}{Z_1 - Z_2} \right) \quad \text{Jed. 12}$$

Na fronti vlaženja, koja se smatra nesaturiranom, djelovat će negativni pritisak, stoga će usisni potencijal biti $-\psi$ i udaljenost od površine tla do fronte vlaženja $-L$. Koristeći se ranije uvedenim oznakama, prethodna jednadžba može se napisati u obliku

$$q = -K_s \left(\frac{h_0 - (-|\psi| - L)}{0 - (-L)} \right) \quad \text{Jed. 13}$$

odnosno u obliku

$$q = -K_s \left(\frac{|\psi| + L + h_0}{L} \right) \quad \text{Jed. 14}$$

iz čega proizlazi stopa infiltracije, gdje se mijenja predznak jednadžbe jer (kako je ranije navedeno) stopa infiltracije djeluje u suprotnom smjeru od Darcyjeve brzine. Tako vrijedi

$$f = K_s \left(\frac{|\psi| + L + h_0}{L} \right) \quad \text{Jed. 15}$$

Iz izraza za kumulativnu infiltraciju $F(t)$ u Jed. 10. koja opisuje akumuliranu dubinu infiltrirane vode, može se izraziti veličina L za koju će vrijediti

$$L = \frac{F(t)}{\theta_d} \quad \text{Jed. 16}$$

pa će time Jed. 15. poprimiti oblik

$$f = K_s \left(\frac{|\psi| + \frac{F(t)}{\theta_d} + h_0}{\frac{F(t)}{\theta_d}} \right) \quad \text{Jed. 17}$$

Vrijednosti u brojniku i nazivniku Jed. 17. moguće je pomnožiti s razlikom stupnja saturacije θ_d , te je tada

$$f = K_s \left(\frac{|\psi|\theta_d + F(t) + h_0\theta_d}{F(t)} \right) \quad \text{Jed. 18}$$

odnosno nakon faktorizacije

$$f = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_0)\theta_d + F(t)}{F(t)} \right) \quad \text{Jed. 19}$$

Jednadžba 19. sadrži dvije nepoznanice, f i F , pa je u proračun potrebno uvesti još jednu jednadžbu kako bi sustav bio rješiv. Stopa infiltracije f izražava se kao prva derivacija kumulativne infiltracije F u vremenu t , odnosno vrijedi

$$f = \frac{dF}{dt} \quad \text{Jed. 20}$$

Lijeva strana prethodne jednadžbe može se napisati u obliku

$$\frac{dF}{dt} = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_0)\theta_d + F}{F} \right) \quad \text{Jed. 21}$$

Jednadžba 21. je obična diferencijalna jednadžba prvog reda, čije je rješenje $F(t)$. Kako bi se predmetna diferencijalna jednadžba integrirala, primijenit će se metoda separacije varijabli. U tu se svrhu ona može napisati u obliku

$$\left(\frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F} \right) dF = K_s dt \quad \text{Jed. 22}$$

Kako bi se lijeva strana prethodne jednadžbe integrirala, prikladno ju je napisati u obliku

$$\left(\frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F} \right) = \left(\frac{(|\psi| + h_0)\theta_d + F - (|\psi| + h_0)\theta_d}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F} \right) \quad \text{Jed. 23}$$

iz kojeg slijedi

$$\left(\underbrace{\frac{(|\psi| + h_0)\theta_d + F}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F}}_1 - \frac{(|\psi| + h_0)\theta_d}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F} \right) dF = K_s dt \quad \text{Jed. 24}$$

odnosno

$$\left(1 - \frac{(|\psi| + h_0)\theta_d}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F} \right) dF = K_s dt \quad \text{Jed. 25}$$

Lijeva strana prethodne jednadžbe može se integrirati u granicama od 0 do $F(t)$, a desna strana u granicama od nekog početnog vremena 0 do t , čime poprima oblik

$$\int_0^{F(t)} \left(1 - \frac{(|\psi| + h_0)\theta_d}{(|\psi| + h_0)\theta_d + F} \right) dF = \int_0^t K_s dt \quad \text{Jed. 26}$$

U prethodnoj jednadžbi izraz u razlomku može se preoblikovati tako da se brojnik i nazivnik podijele s $(|\psi| + h_0)\theta_d$ i tada jednadžba poprima oblik

$$\int_0^{F(t)} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d}} \right) dF = \int_0^t K_s dt \quad \text{Jed. 27}$$

Integraciju na lijevoj strani Jed. 27. moguće je odvojiti na dvije integracije zbog jednostavnijeg postupka integriranja, tako da jedinicu u uglatoj zagradi prije razlomka izrazimo kao dF i jednadžba tada izgleda

$$\int_0^{F(t)} dF - \int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d}} \right) dF = \int_0^t K_s dt \quad \text{Jed. 28}$$

U Jed. 28. su dobivena tri izraza integracije, dva na lijevoj i jedan na desnoj strani jednadžbe. Prvo se rješavaju prva i treća integracija zbog jednostavnosti proračuna, a kasnije druga, što će dovesti do jednakosti

$$[F(t) - 0] - \int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d}} \right) dF = K_s(t - 0) \quad \text{Jed. 29}$$

Rješenje drugog integrala dobiva se s pomoću pravila integriranja

$$\int_0^x \frac{a}{a+x} dx = a \ln(x+a) + C \quad \text{Jed. 30}$$

što će dovesti do

$$\int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d}} \right) dF = \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d} \right) \frac{1}{\left(\frac{1}{(|\psi| + h_0)\theta_d} \right)} \quad \text{Jed. 31}$$

Desna strana prethodne jednadžbe može se napisati u obliku

$$\int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d}} \right) dF = (|\psi| + h_0)\theta_d \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d} \right) \quad \text{Jed. 32}$$

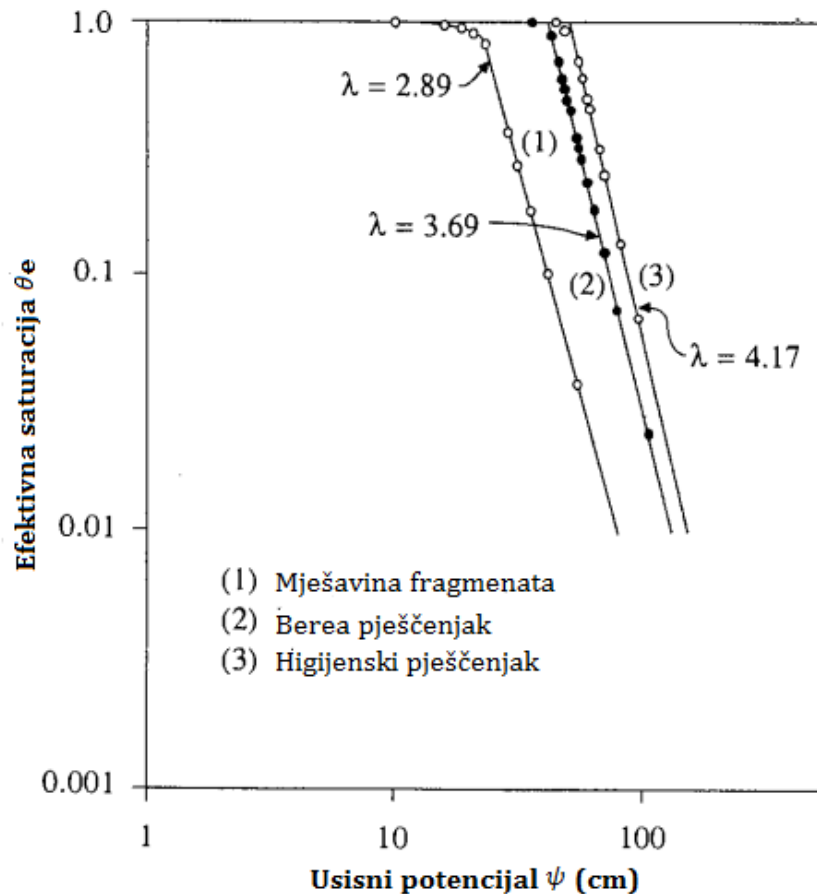
Koristeći se dobivenim zaključkom, Jed. 32. poprimiti će oblik

$$F - (|\psi| + h_0)\theta_d \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d} \right) = K_s t \quad \text{Jed. 33}$$

Valja primijetiti da je ovim određena implicitna jednadžba, jer se nepoznanica F pojavljuje u dvama članovima i ne može se eksplicitno izolirati. Zato ju je potrebno riješiti koristeći se iteracijskim postupkom za koji je pogodan oblik

$$F(t) = K_s t + (|\psi| + h_0)\theta_d \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0)\theta_d} \right) \quad \text{Jed. 34}$$

Jednadžba 34. predstavlja jednadžbu za kumulativnu infiltraciju Green-Ampt modela. Izraz je nelinearan i zahtijeva metode za pronalaženje korijena nelinearnih jednadžbi, poput metode bisekcije, Newton-Raphsonove metode, metode pokušaja i pogrešaka itd. [15].



Slika 10: Brooks-Corey relacija između usisnog potencijala i efektivne saturacije [16].

Nakon dobivanja rješenja kumulativne infiltracije $F(t)$, moguće je izračunati stopu infiltracije $f(t)$ s pomoću izraza

$$f(t) = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_0)\theta_d + F(t)}{F(t)} \right) \quad \text{Jed. 35}$$

U slučaju intenzivnih oborina, kada je kišni intenzitet veći od kapaciteta infiltracije tla, voda se zadržava na površini i pore u tlu su potpuno saturirane i tada tlo ima visinu stupca vode iznad površine tla h_0 , što se događa u slučaju kišnih vrtova. Visinu stupca vode iznad površine tla h_0 u prethodnim jednadžbama moguće je zanemariti u slučaju kada je njezina vrijednost mala, odnosno kada tlo ima veći kapacitet infiltracije od kišnog intenziteta, zbog toga što neće doprinijeti rezultatu kumulativne infiltracije i stope infiltracije tla [16].

U konkretnim problemima proračuna, primjena Green-Ampt modela infiltracije nije moguća bez parametara s kojima se ulazi u proračun. Najvažniji ulazni parametri jesu: hidraulička provodljivost tla K_s , poroznost n i usisni potencijal ψ [16]. Hidraulička provodljivost definira se

kao mjera prolaska vode kroz porozno tlo izražena u cm/sat, te veće vrijednosti potenciraju na tlo veće propusnosti – npr. pijesak, šljunak – dok niže vrijednosti označavaju tla manjeg propusnog kapaciteta, npr. prahovi i gline. Usisni potencijal je mjera slobodne energije vode sadržane u porama tla i u općem slučaju definiran je sumom ostalih potencijala koji izravno proizlaze iz veze između čestica tla i vode.

Odnos saturacije tla θ , usisnog potencijala ψ i hidrauličke provodljivosti K_s istraživali su znanstvenici Brooks i Corey (1964.), te su nakon laboratorijskih ispitivanja različitih vrsta tala zaključili da je usisni potencijal ψ moguće izraziti kao logaritamsku funkciju od efektivne saturacije θ_e (prikazano na Slici 10) [16]. Efektivna saturacija je odnos između trenutne saturacije $\theta - \theta_r$ i maksimalne moguće saturacije $n - \theta_r$, prema izrazu

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{n - \theta_r} \quad \text{Jed. 36}$$

gdje je raspon efektivne saturacije $0 \leq \theta_e \leq 1$. Izraz $n - \theta_r$ naziva se još i saturacijski raspon $\Delta\theta$, te je u ovom slučaju porozitet n stupanj potpune saturacije θ_s , pa izraz tada glasi $\theta_s - \theta_r$.

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Jed. 37}$$

U početnim uvjetima je $\theta = \theta_i$, te se u Jed. 37. obavlja postupak križnog množenja i dobiva se $\theta_i - \theta_r = \theta_e \cdot \Delta\theta$. Kako se vlažnost mijenja u vremenu, tako se fronta vlaženja spušta i tada razlika vlažnosti θ_d iznosi

$$\theta_d = n - \theta_i = n - (\theta_e \cdot \Delta\theta + \theta_r) \quad \text{Jed. 38}$$

odnosno

$$\theta_d = (1 - \theta_e) \cdot \Delta\theta \quad \text{Jed. 39}$$

Jednadžba Brooks-Corey opisuje logaritamsku relaciju između usisnog potencijala i efektivne saturacije, prikazanu na Slici 10, iz čega proizlazi

$$\theta_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \quad \text{Jed. 40}$$

u kojoj su parametri ψ_b i λ konstantne vrijednosti dobivene dreniranjem uzorka tla u segmentima, te se na svakom segmentu mjeri efektivna saturacija θ_e i ψ , a vrijednosti se uvrštavaju u Jed. 40.

Tablica 2: Prikaz infiltracijskih parametara Green-Ampt za različita vrsta tla [16].

Klasifikacija tla	Porozitet n	Efektivna poroznost θ_e	Usisni potencijal ψ (cm)	Hidraulička provodljivost K_s (cm/sat)
Pijesak	0.437 (0.374-0.500)	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78
Ilovasti pijesak	0.437 (0.363-0.506)	0.401 (0.329-0.473)	6.13 (1.35-27.94)	2.99
Pjeskovita ilovača	0.453 (0.351-0.555)	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09
Ilovača	0.463 (0.375-0.551)	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34
Muljevita ilovača	0.501 (0.420-0.582)	0.486 (0.394-0.578)	16.68 (2.92-95.39)	0.65
Pjeskovito glinasta ilovača	0.398 (0.332-0.464)	0.330 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.0)	0.15
Glinasta ilovača	0.464 (0.409-0.519)	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.10
Muljevito glinasta ilovača	0.471 (0.418-0.524)	0.432 (0.347-0.517)	27.30 (5.67-131.50)	0.10
Pjeskovita glina	0.430 (0.370-0.490)	0.321 (0.207-0.435)	23.90 (4.08-140.2)	0.06
Muljevita glina	0.479 (0.425-0.533)	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.4)	0.05
Glina	0.475 (0.427-0.523)	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.5)	0.03

Znanstvenici Brakensiek, Engleman, i Rawls (1981.) razvili su metodu kojom se Green-Ampt parametri izravno dovode u vezu s jednadžbom Brook-Corey i time pojednostavljuje dobivanje parametara. Analizirajući više od 5000 uzoraka različitih vrsta tla diljem Sjedinjenih Američkih Država, dobivene su prosječne vrijednosti parametara poroznosti n , efektivne poroznosti ili saturacijskog raspona $\Delta\theta$, usisnog potencijala ψ i hidrauličke provodljivosti K_s prikazane u Tablici 2. Tablicom je prikazana klasifikacija tla u rasponu od pijeska do gline, s materijalima miješanih čestica između tih dvaju raspona kako bi se dobile što preciznije vrijednosti. Kako klasificirani materijal sadržava više sitnijih čestica gledajući od pijeska nadalje, tako se može uočiti porast usisnog potencijala ψ i pad hidrauličke provodljivosti K_s , gdje je najveći porast usisnog potencijala odnosno pad hidrauličke provodljivosti uočen kod gline, a najveći pad usisnog potencijala i porast hidrauličke provodljivosti kod pijeska. Rasponi poroznosti n i efektivne poroznosti $\Delta\theta$ nisu veliki među različitim vrstama tala, no raspon usisnog potencijala može uvelike varirati. Brojevi u zagradama označavaju minimalnu i maksimalnu vrijednost parametara [16].

3. Numerički primjeri

Koristeći se Green-Ampt modelom, potrebno je modelirati i dijagramom prikazati kumulativnu infiltraciju $F(t)$ i stopu infiltracije $f(t)$ za $t_1 = 0$, $t_2 = 0,125$ sata, $t_3 = 0,25$ sata, $t_4 = 0,375$ sata, $t_5 = 0,5$ sata, $t_6 = 0,625$ sata, $t_7 = 0,75$ sata, $t_8 = 0,875$ sata, $t_9 = 1,00$ sata, $t_{10} = 1,125$ sata, $t_{11} = 1,25$ sata za tlo muljevite gline (engl. Silty clay), uzimajući da je usisni potencijal $\psi = 29,22$ cm i hidraulička provodljivost $K_s = 0,05$ cm/sat. Pretpostavka je da početna efektivna saturacija θ_e iznosi 30 %, a visina stupca vode iznad tla h_0 iznosi 2 cm. Saturacijski raspon $\Delta\theta$ za muljevite gline iznosi 0,423.

Parametri za muljevituu glinu:

$$\psi = 29,220 \text{ (cm)}$$

$$K_s = 0,050 \text{ (cm/sat)}$$

$$\theta_e = 0,300$$

$$h_0 = 2 \text{ (cm)}$$

$$\Delta\theta = 0,423$$

Potrebno je dobiti nepoznanicu razlike vlažnosti θ_d u Jed. 34. kumulativne infiltracije $F(t)$ koristeći se Jed. 39., te umnožak razlike vlažnosti θ_d s zbrojem usisnog potencijala ψ i visine stupca vode iznad površine tla h_0 – radi jednostavnijeg proračuna i uvrštavanja vrijednosti u jednadžbu $F(t)$.

$$\begin{aligned}\theta_d &= (1 - \theta_e) \cdot \Delta\theta \\ &= (1 - 0,300) \cdot 0,423 \\ &= 0,2961\end{aligned}\quad \text{Jed. 39}$$

Ako se navedene vrijednosti uvrste u Jed. 41., slijedi

$$(|\psi| + h_0) \cdot \theta_d = (29,22 + 2) \cdot 0,2961 = 9,244 \quad \text{Jed. 41}$$

Analogno, za zadane vrijednosti će prema jednadžbi

$$F(t) = K_s t + (|\psi| + h_0) \theta_d \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_0) \theta_d} \right) \quad \text{Jed. 34}$$

vrijediti

$$F(t) = 0,05 \cdot t + 9,244 \cdot \ln \left(1 + \frac{F(t)}{9,244} \right)$$

Rješenje jednačbe kumulativne infiltracije potrebno je dobiti iterativnim postupkom vrijednosti $F(t)$, gdje se izjednačuju lijeva i desna strana jednačbe tako da se dobije približno jednaka vrijednost. Za vrijeme t uzimaju se vrijednosti za svaki interval zadan u zadatku. Proračunski postupak kumulativne infiltracije $F(t)$ izrađen je u programu Excel i prikazan je u Tablici 3.

Stopu infiltracije $f(t)$ moguće je dobiti nakon dobivene kumulativne infiltracije $F(t)$ izrazom

$$f(t) = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_0)\theta_d + F(t)}{F(t)} \right) \quad \text{Jed. 35}$$

gdje će uvrštavanjem vrijednosti vrijediti

$$f(t) = 0,05 \cdot \left(\frac{9,244 + F(t)}{F(t)} \right)$$

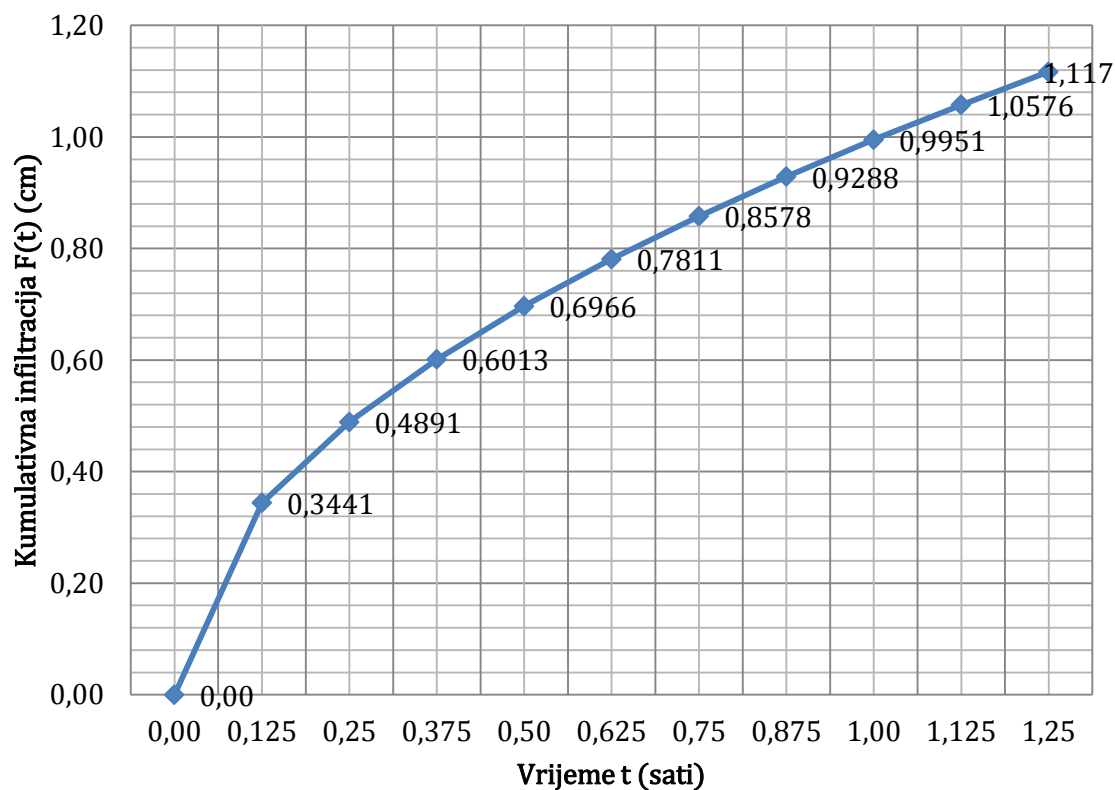
Tablica 3: Proračunske vrijednosti kumulativne infiltracije $F(t)$ i stope infiltracije $f(t)$.

Ostatak (približno nuli)	Vrijeme t (sat)	$F(t)$ (cm)	Desna strana jednačbe	Vrijeme t (sat)	$f(t)$ (cm/sat)
0	0,00	0,00	0,0000	0,00	1,393
0,020170757	0,125	0,20	0,2041	0,125	2,361
0,004925366	0,125	0,30	0,3015	0,125	1,591
-0,000609272	0,125	0,35	0,3498	0,125	1,371
0,000431172	0,125	0,34	0,3401	0,125	1,409
-0,000092676	0,125	0,35	0,3450	0,125	1,390
0,000011504	0,125	0,344	0,3440	0,125	1,394
-0,000113477	0,125	0,3452	0,3452	0,125	1,389
-0,000040623	0,125	0,3445	0,3445	0,125	1,392
-0,000009356	0,125	0,3442	0,3442	0,125	1,393
0,000001073	0,125	0,3441	0,3441	0,125	1,393
0,010116056	0,25	0,4	0,4041	0,25	1,206
-0,001107847	0,25	0,5	0,4994	0,25	0,974
0,004182854	0,25	0,45	0,4519	0,25	1,077
0,008867142	0,25	0,41	0,4137	0,25	1,177
0,003079796	0,25	0,46	0,4614	0,25	1,055
-0,000091964	0,25	0,49	0,4900	0,25	0,993
0,000010697	0,25	0,489	0,4890	0,25	0,995
-0,000040659	0,25	0,4895	0,4895	0,25	0,994
-0,000020122	0,25	0,4893	0,4893	0,25	0,995
0,000000422	0,25	0,4891	0,4891	0,25	0,995
0,011265032	0,375	0,5	0,5057	0,375	0,974

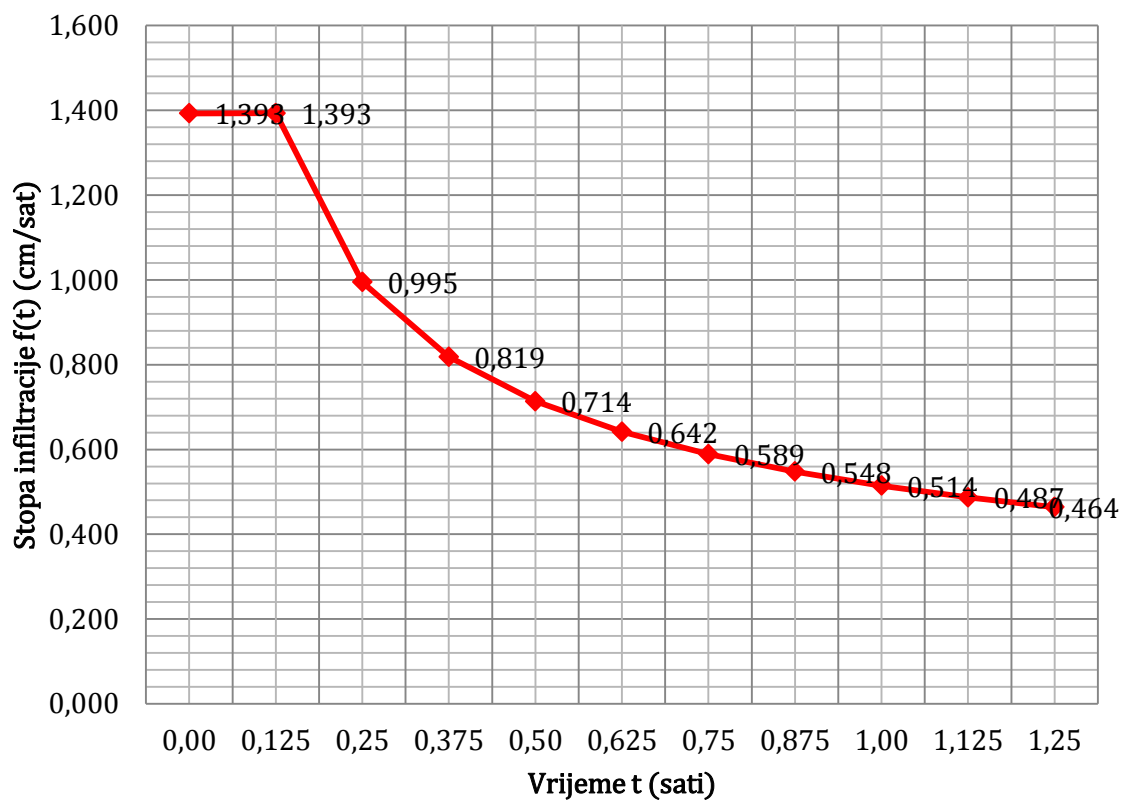
0,000136590	0,375	0,6	0,6001	0,375	0,820
-0,009353414	0,375	0,7	0,6935	0,375	0,710
-0,004767759	0,375	0,65	0,6469	0,375	0,761
-0,000873376	0,375	0,61	0,6095	0,375	0,808
0,001162521	0,375	0,59	0,5907	0,375	0,833
0,000647511	0,375	0,595	0,5954	0,375	0,827
-0,000370341	0,375	0,605	0,6048	0,375	0,814
-0,000015904	0,375	0,6015	0,6015	0,375	0,818
-0,000005749	0,375	0,6014	0,6014	0,375	0,819
0,000004408	0,375	0,6013	0,6013	0,375	0,819
-0,000338282	0,50	0,7	0,6998	0,50	0,710
-0,009769860	0,50	0,8	0,7923	0,50	0,628
0,004846645	0,50	0,65	0,6532	0,50	0,761
0,000669885	0,50	0,69	0,6905	0,50	0,720
0,000164112	0,50	0,695	0,6951	0,50	0,715
0,000063365	0,50	0,696	0,6960	0,50	0,714
-0,000037247	0,50	0,697	0,6970	0,50	0,713
0,000013042	0,50	0,6965	0,6965	0,50	0,714
-0,000007078	0,50	0,6967	0,6967	0,50	0,713
0,000002982	0,50	0,6966	0,6966	0,50	0,714
-0,001866310	0,625	0,8	0,7985	0,625	0,628
0,008517238	0,625	0,7	0,7060	0,625	0,710
-0,000884801	0,625	0,79	0,7893	0,625	0,635
0,000108111	0,625	0,78	0,7801	0,625	0,643
-0,000389796	0,625	0,785	0,7847	0,625	0,639
-0,000091403	0,625	0,782	0,7819	0,625	0,641
-0,000001680	0,625	0,7811	0,7811	0,625	0,642
0,005914478	0,75	0,8	0,8048	0,75	0,628
-0,004083451	0,75	0,9	0,8963	0,75	0,564
0,000779620	0,75	0,85	0,8507	0,75	0,594
0,000679845	0,75	0,851	0,8516	0,75	0,593
0,000281825	0,75	0,855	0,8552	0,75	0,591
-0,000015570	0,75	0,858	0,8580	0,75	0,589
-0,000065044	0,75	0,8585	0,8584	0,75	0,588
-0,000035363	0,75	0,8582	0,8582	0,75	0,589
-0,000025467	0,75	0,8581	0,8581	0,75	0,589
0,000043832	0,75	0,8574	0,8574	0,75	0,589
0,000073548	0,75	0,8571	0,8572	0,75	0,589
0,000004226	0,75	0,8578	0,8578	0,75	0,589
-0,000005673	0,75	0,8579	0,8579	0,75	0,589
0,000004226	0,75	0,8578	0,8578	0,75	0,589
0,002869344	0,875	0,9	0,9026	0,875	0,564
-0,006773997	0,875	1	0,9933	0,875	0,512
-0,002065411	0,875	0,95	0,9480	0,875	0,537
-0,001097638	0,875	0,94	0,9390	0,875	0,542
0,000866088	0,875	0,92	0,9208	0,875	0,552

0,000371545	0,875	0,925	0,9253	0,875	0,550
0,000766983	0,875	0,921	0,9217	0,875	0,552
0,000174411	0,875	0,927	0,9272	0,875	0,549
0,000075989	0,875	0,928	0,9281	0,875	0,548
0,000066152	0,875	0,9281	0,9282	0,875	0,548
-0,000002679	0,875	0,9288	0,9288	0,875	0,548
-0,000478648	1,00	1	0,9995	1,00	0,512
0,004497475	1,00	0,95	0,9543	1,00	0,537
0,001483772	1,00	0,98	0,9815	1,00	0,522
0,000498067	1,00	0,99	0,9905	1,00	0,517
-0,005235805	1,00	1,05	1,0445	1,00	0,490
0,000008602	1,00	0,995	0,9950	1,00	0,515
-0,000089024	1,00	0,996	0,9959	1,00	0,514
-0,000001165	1,00	0,9951	0,9951	1,00	0,514
0,005738461	1,125	1	1,0058	1,125	0,512
-0,004041348	1,125	1,1	1,0956	1,125	0,470
0,000743294	1,125	1,05	1,0508	1,125	0,490
-0,000712946	1,125	1,065	1,0642	1,125	0,484
-0,000132672	1,125	1,059	1,0589	1,125	0,486
-0,000084183	1,125	1,0585	1,0584	1,125	0,487
0,000003149	1,125	1,0576	1,0576	1,125	0,487
0,001653997	1,25	1,1	1,1018	1,25	0,470
-0,003142190	1,25	1,15	1,1464	1,25	0,452
0,000679448	1,25	1,11	1,1108	1,25	0,466
0,000195129	1,25	1,115	1,1152	1,25	0,465
-0,000094532	1,25	1,118	1,1179	1,25	0,463
-0,000075243	1,25	1,1178	1,1177	1,25	0,464
0,000001944	1,25	1,117	1,1170	1,25	0,464

Prikazani iterativni postupak također se može automatizirati tako da se u prvom koraku pretpostavi vrijednost kumulativne infiltracije, a zatim odredi desna strana jednadžbe. Dobivenom novom kumulativnom infiltracijom ponavlja se isti postupak i to sve dok razlika između pretpostavljene i izračunate kumulativne infiltracije ne postane manja od neke zadane vrijednosti. U nastavku će biti prikazani dijagrami kumulativne infiltracije $F(t)$ (Slika 11) i stope infiltracije $f(t)$ (Slika 12), koji su dobiveni na osnovi podataka iz Tablice 3, gdje su rješenja označena crvenom bojom.



Slika 11: Dijagram kumulativne infiltracije F(t).



Slika 12: Dijagram stope infiltracije f(t).

4. Zaključak

U radu je prikazana primjena Green-Ampt modela za modeliranje infiltracije vode u kišnom vrtu. Uzimajući u obzir početne pretpostavke homogenog tla, tečenja vode s oštrom frontom vlaženja, ujednačenog početnog stupnja saturacije θ_i i konstantnog sadržaja saturiranog tla θ_s , gdje u vremenu t fronta vlaženja prodire do dubine L , dobivene su jednadžbe kumulativne infiltracije $F(t)$ i stope infiltracije $f(t)$. Navedene jednadžbe primjenjene su u numeričkom primjeru, gdje se u jednadžbi kumulativne infiltracije uzima u obzir visina stupca vode iznad tla h_0 , koja se u općem slučaju izostavlja zbog njene male vrijednosti, ali kod kišnih vrtova njena vrijednost može utjecati na rezultat. Riješenja za zadane vremenske intervale dobivena su iteracijskim postupkom (Tablica 3), te su prikazana dijagramima kumulativne infiltracije $F(t)$ (Slika 11) i stope infiltracije $f(t)$ (Slika 12). Dobiveni dijagrami su u međuovisnosti zato što se derivacijom prvog reda kumulativne infiltracije $F(t)$ u vremenu t dobiva stopa infiltracije $f(t)$, što je vidljivo u rastu i padu krivulja. U početnom vremenu od $t_1 = 0$ do $t_2 = 0,125$ sata je krivulja stope infiltracije konstantna zato što tada još nije započeo proces infiltracije, koji počinje tek od vremena $t_2 = 0,125$ sata. Pretpostavlja se da je stopa infiltracije tada najviša i da s vremenom opada, dok krivulja kumulativne infiltracije u početnom vremenu do $t_2 = 0,125$ sata ima linearan rast, koji se nastavlja sve do završetka infiltracije. Točna riješenja prikazanog Green-Ampt modela, dobivena su uzimajući u obzir navedena početna pretpostavljenja, uprotivnom bi se u stvarnoj situaciji dobila netočna riješenja.

5. Literatura

- [1] URL: <https://extension.umn.edu/landscape-design/rain-gardens>, pristup 18. 4. 2024.
- [2] URL: <https://www.aucklandcouncil.govt.nz/UnitaryPlanDocuments/mir-stormwater-management-devices-auckland-region.pdf>, pristup 18. 4. 2024.
- [3] URL: <https://www.stormwatershepherds.org.au/stormwater-utility-charge/what-is-an-impervious-surface/>, pristup 20. 4. 2024.
- [4] Jaeckel, L.; McLaren, E.; Linsangan, M.; Luu, K.; Themmen, P. (2023.): Flora, User Manual: Surrey Rain Garden Project, https://www.sfu.ca/content/sfu/pwrc/resources-list/how-to-build-a-rain-garden/jcr_content/main_content/download/file.res/Rain%20Garden%20Design%20Guide.pdf, pristup 22. 4. 2024.
- [5] Stormwater best management practices, rain gardens, <https://www.saanich.ca/assets/Community/Documents/Rain%20Garden.pdf>, pristup 25. 4. 2024.
- [6] URL: <https://www.plantea.com.hr/mahonija/>, pristup 25. 4. 2024.
- [7] URL: <https://moj-otok.com/wp/blog/brnistra/>, pristup 25. 4. 2024.
- [8] URL: <https://planthouse.hr/proizvod/sjeme/sjeme-ukrasnog-bilja/lavanda-angustifolia>, pristup 25. 4. 2024.
- [9] URL: <https://punkufer.dnevnik.hr/clanak/zanimljivosti/perunika-hrvatski-nacionalni-cvijet---842455.html>, pristup 25. 4. 2024.
- [10] URL: <https://www.antenazadar.hr/clanak/2023/04/novi-kisni-vrt-u-vruljici-umanjit-ce-mogucnost-steta-od-velikih-urbanih-poplava/>, pristup 29. 4. 2024.
- [11] URL: <https://www.glasistre.hr/pula/tatjana-uzelac-moji-kisni-vrtovi-su-jeftiniji-od-klasicnih-sustava-odvodnje-za-novac-koji-je-grad-ustedio-na-odvodnji-zaobilaznice-napravljeni-su-i-trg-kralja-tomislava-i-gradski-bazeni-701867>, pristup 29. 4. 2024.
- [12] Szavits-Nossan, V.: Voda u tlu, https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Voda_u_tlu.pdf, pristup 5. 5. 2024.
- [13] URL: <https://www.iitg.ac.in/kartha/CE551/Lectures/Lecture12.pdf>, pristup 8. 5. 2024.
- [14] URL: <https://books.gw-project.org/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/chapter/darcys-law/>, pristup 12. 5. 2024.
- [15] URL: <https://www.iitg.ac.in/kartha/CE551/Lectures/Lecture13.pdf>, pristup 12. 5. 2024.
- [16] Chow, W. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1988.): Applied hydrology, McGraw Hill-inc., Singapore.