

MODELIRANJE DINAMIKE PRAŽNENJA KIŠNIH VRTOVA PRIMJENOM GREEN-AMPT MODELA

RAIN GARDEN DRAINAGE DYNAMICS MODELING BY USING THE GREEN-AMPT MODEL

Stefan Jakac*, Vanja Travaš*

Sažetak

U radu je prikazan relativno jednostavan proračunski postupak za modeliranje dinamike pražnjenja kišnih vrtova, odnosno adekvatno dizajniranih infiltracijskih površina koje se u urbaniziranim sredinama koriste za privremeno zadržavanje oborinske vode. U tu je svrhu neophodno kvantificirati infiltraciju vode u porozno tlo, što u općem slučaju može biti itekako zahtjevno jer je predmetni hidraulički proces opisan Richardsovom parcijalnom diferencijalnom jednačbom čija numerička integracija tvori vrlo izazovni zadatak (radi nelinearnosti između hidrauličke vodljivosti i volumetrijskog sadržaja vode koji je određen rješenjem Richardsove jednačbe). Pritom, oslanjajući se na nekoliko radnih pretpostavki koje su navedene u radu, matematički opis predmetnog procesa može se svesti na rješavanje jedne nelinearne algebarske jednačbe, čime se onda tvori relativno jednostavan proračunski postupak koji se može primijeniti u svakodnevnom stručnom radu (ukoliko se uvedene pretpostavke mogu opravdati). Proračunski postupak se svodi na integraciju Darcyjevog zakona koja vodi u Green-Ampt model. U radu je prikazana argumentacija za prethodno navedeno, proračunski postupak namijenjen za praktični rad te je prikazan i numerički primjer.

Ključne riječi: kišni vrt, volumetrijski sadržaj vode u tlu, infiltracija, Darcyjev zakon, Green-Ampt model

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: {sjakac@student.uniri.hr , vanja.travas@uniri.hr}

Abstract

The paper presents a relatively simple calculation procedure for modeling the drainage dynamics of rain gardens, i.e. adequately designed infiltration surfaces that are used in urbanized areas for the temporary retention of rainwater. To that end, it is necessary to quantify the infiltration of water into the porous soil, which in general can be very demanding because the hydraulic process in question is described by Richards' partial differential equation, the numerical integration of which is a very challenging task (due to the nonlinearity between the hydraulic conductivity and the degree of saturation determined by its solution). At the same time, relying on several working assumptions stated in the paper, the mathematical description of the subject process can be reduced to the solution of one non-linear algebraic equation, which then creates a relatively simple calculation procedure that can be applied in everyday professional work (if the introduced assumptions can be justified). The calculation procedure is reduced to the integration of Darcy's law, which leads to the Green-Ampt model. The paper presents the argumentation for the aforementioned, calculation procedure intended for practical work, and also offers a numerical example.

Key words: rain garden, saturation, infiltration, Darcy's law, Green-Ampt model

1. Uvod

U svrhu ublažavanja nepoželjnih posljedica koje uzrokuju kiše relativno velikih intenziteta, naročito u kontekstu izazova koji su klimatskim promjenama nametnuti postojećim tradicionalnim sustavima oborinske odvodnje, privremeno zadržavanje tj. retencioniranje oborinske vode na tzv. zelenim površinama urbanih sredina se pokazalo izuzetno efikasnim [1,2]. Jedna od takvih mjera suvremenog pristupa odvodnje oborinskih voda je i tzv. kišni vrt (engl. rain garden), tj. depresijska površina unutar urbanizirane sredine koja se u suhom razdoblju može koristiti za rekreaciju i druge svrhe, a u vrijeme relativno „jakih“ oborina se koristi kako bi se prikupio dio oborinske vode s lokalnih slivnih površina, s ciljem rastećenja okolnog postojećeg sustava oborinske odvodnje i sprječavanja formiranja plavljenih površina (što se pokazalo vrlo atraktivnim i za očuvanje prometne povezanosti [3]). Dakle, kišni vrtovi imaju ulogu privremenog zadržavanja oborinske vode, čime se smanjuju iznosi protoka na nizvodnim slivnim područjima urbanih sredina, odnosno postiže povoljna transformacija vodnih valova. Pritom, kako bi se navedeno moglo postići, iste treba pažljivo dizajnirati, odnosno dimenzionirati, što najčešće predstavlja vrlo izazovan inženjerski zadatak. Naime, za odabrani hidrološki scenarij (intenzitet oborine) u tu je svrhu u prvom redu prikladno aproksimirati retencijske sposobnosti odabrane depresijske površine koja će se koristiti kao kišni vrt te zatim na temelju navedenoga utvrditi i slivno područje unutar kojeg se time može

„rasteretiti“ postojeći sustav odvodnje oborinske vode. Valja primijetiti da se rezultatom ovakve analize postavlja inženjerska zadaća osiguranja tehničkog rješenja punjenja ovakve retencijske površine i to na način da se njome zahvati prognozirana količina oborinske vode (čime se onda minimizira nepoželjan scenarij prelijevanja ovakvih građevina). Osim navedenoga, posebno je važno primijetiti da se kišnim vrtovima prikuplja voda koja je prethodno otjecala po slivnim površinama unutar urbanizirane sredine te da je tako vrlo vjerojatno zagađena teško razgradivim spojevima kao što su mineralna ulja i teški metali [4]. S druge strane, kako je infiltracija primarni mehanizam pražnjenja ovakvih površina, u procesu njihova dizajniranja posebnu pažnju treba posvetiti tehničkom rješenju pročišćavanja vode koje se u predmetnom slučaju najčešće ostvaruje koristeći fitoremedijaciju, tj. tehnike ekstrakcije nepoželjnih supstanci putem bioloških procesa koji zahtijevaju prisustvo korijenja odgovarajućih biljaka i dovoljno vremena izloženosti ovakve vode istima. U skladu s navedenim, jedna od zadaća koja se stavlja pred inženjere u praktičnome radu se očituje i u tome da se odabirom odgovarajućih propusnih slojeva može osigurati potrebno vrijeme izloženosti vode korijenju biljaka te će stoga dimenzioniranje predmetnih građevina zahtijevati modeliranje procesa infiltracije.

Modeliranje infiltracijskih procesa može biti vrlo složen zadatak, što se lako prepoznaje uvidom u Richardsovu parcijalnu diferencijalnu jednadžbu [5,6] kojom se modelira vremenska i prostorna raspodjela volumetrijskog sadržaja vode kojim se uvodi mjera ispunjenosti pora tla vodom. Naime, predmetna diferencijalna jednadžba je nelinearna te će njena numerička integracija za opće uvjete toka zahtijevati sofisticirani matematički aparat kojim se nerijetko i ne može jamčiti numerička stabilnost (naročito u području relativno malog stupnja ispunjenosti pora vodom). S druge strane, treba i primijetiti da će kapacitet retencioniranja predmetnih infiltracijskih površina jednim djelom i zavisiti o njihovom infiltracijskom kapacitetu, što će onda i zahtijevati modeliranje takvih procesa. Kako bi se izbjeglo njihovo modeliranje primjenom Richardsove jednadžbe, razvijeno je mnogo alternativnih pristupa te će se u ovom radu za predmetnu svrhu razmotriti primjena Green-Ampt modela.

2. Elementi infiltracijskih procesa

Infiltracija predstavlja jedan od osnovnih mehanizama razmijene vode u hidrološkom ciklusu te se očituje u poniranju vode u tlo. U slučaju kišnog vrta, infiltracijom se najčešće ostvaruje jedini mehanizam pražnjenja takvih retencijskih površina, čime se i ostvaruje vremenska promjena razine vode h_v u kišnom vrtu, a time i volumena retencioniranja vode. Na

taj će način dinamika promjene razine vode u kišnom vrtu dh_v/dt , koja je posebno važna kako bi se provjerila učinkovitost odabranog kišnog vrta u retencioniranju oborinske vode za mjerodavan hidrološki scenarij, slijediti iz principa očuvanja mase koji će se svesti na

$$\pm \left\{ \begin{array}{l} \text{promjena} \\ \text{volumena vode} \\ \text{u jedinici vremena} \end{array} \right\} = Q_{ul}(t) - Q_{iz}(h_v(t)) \quad (1)$$

gdje je $Q_{ul}(t)$ prognozirani tj. poznati hidrogram kojim se kišni vrt puni te $Q_{iz}(h_v(t))$ hidrogram kojim se kišni vrt prazni uslijed infiltracije oborinske vode. Posebno je važno prepoznati da rješavanje prethodne jednadžbe (1) zahtijeva kvantificiranje protoka vode koji se u jedinici vremena infiltrira u tlo, što zavisi o samom rješenju jednadžbe $h_v(t)$, ali isto tako i o parametrima tla. Kako rješavanje ovakve zadaće primjenom Richardsove jednadžbe može biti vrlo složeno [7], u tu svrhu razvijeni su različiti aproksimacijski modeli (npr. Philipov model [8], Hortonov model [9], Kostiakov model [10]), od kojih će se u nastavku pažnja posvetiti Green-Ampt modelu [11]. Na taj način, kako bi se odabrano tehničko rješenje kišnog vrta moglo provjeriti, za zadani ulazni hidrogram $Q_{ul}(t)$ treba odrediti vremensku promjenu dubine vode h_v , što znači i kvantificirati protok $Q_{iz}(h_v(t))$, čemu će se u nastavku pridati pažnja.

2.1. Infiltracija i kumulativna infiltracija

Ukupni volumen vode (od oborina, navodnjavanja ili bilo kojeg drugog površinskog izvora natapanja) koji je porozna sredina po jedinici površine apsorbirala u određenom vremenu t (mjerenom od nekog poznatog referentnog stanja) je definiran funkcijom $F(t)$ tzv. kumulativne infiltracije, dok brzina kojom se voda u jedinici vremena infiltrira u porozno tlo zavisi o mnogo različitih parametara i određena je funkcijom infiltracije $f(t)$. Obzirom na navedeno, vremenska promjena količine apsorbirane vode tj. kumulativne infiltracije će biti jednaka samoj infiltraciji, odnosno vrijedi:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad \rightarrow \quad f = \frac{dF}{dt} \quad (2)$$

što će se koristiti u kasnijem infiltracijskom modelu.

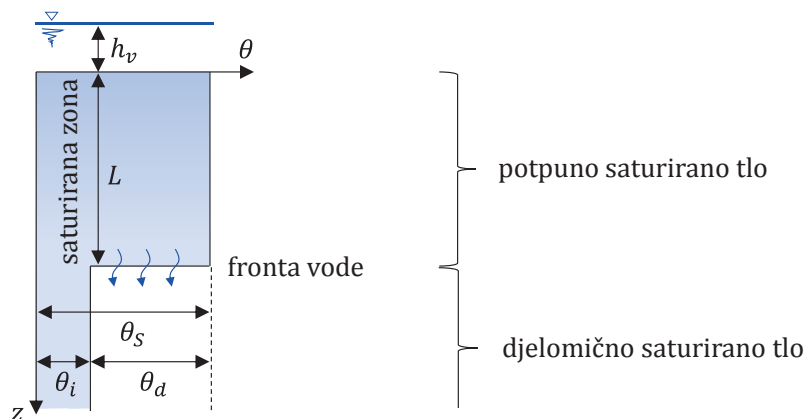
2.2. Parametri tla

Osim dubine vode h_v unutar infiltracijske površine tj. kišnog vrta, koja utječe na gradijent tlaka, a time i na infiltraciju f , odnosno brzinu poniranja vode, na infiltraciju će utjecati i količina vode koja se već nalazi u porama tla te se ona mjeri volumetrijskim sadržajem vode u tlu θ koji

predstavlja omjer volumena vode u poroznom uzorku i volumena samog uzorka. Taj se omjer može kretati u rasponu od rezidualnog volumetrijskog sadržaja vode θ_r , koji uključuje vodu apsorbiranu na stijenkama čestica tla, do maksimalnog volumetrijskog sadržaja vode u tlu θ_s za koji su sve pore ispunjene vodom. Pritom, valja prepoznati da je stupanj infiltracija funkcija koordinata te da tako gornji sloj tla može biti saturiran, dok su ispod njega pore tla relativno prazne te se tako može ostvariti infiltracija. U krajnjem slučaju, tj. u slučaju da su sve pore tla po dubini u potpunosti saturirane ($\theta = \theta_s$), kumulativna infiltracije je dosegla svoji maksimum pa će i prema (2) infiltracija biti jednaka 0 (što slijedi iz prvog uvjeta za ekstrem funkcije). Osim navedenoga, važno je napomenuti kako će infiltracija biti zavisna i o tzv. hidrauličkoj vodljivosti porozne sredine K_s tj. mjeri propusne moći porozne sredine koja slijedi iz definicije Darcyjevog zakona:

$$v_d = -K_s \frac{\partial H}{\partial z} \quad (3)$$

gdje je v_d Darcyjeva brzina filtracijskog toka, H piezometarska kota koja se odnosi na neku odabranu točku prostorne domene toka i koja je zavisna o referentnoj ravnini za koju je visinska koordinata $z = 0$ (što se uobičajeno odnosi na površinu tla) i piezometarskoj visini mjerenoj u toj točki. U slučaju da se prethodna jednadžba primjenjuje na jediničnu protočnu površinu, što će biti slučaj u nastavku, lijeva strana jednadžbe će se odnositi na specifični protok q .



Slika 1. Geometrijske i hidrauličke veličine karakteristične za generički presjek tla i relevantne za modeliranje infiltracije primjenom Green-Ampt modela

3. Green-Ampt model infiltracije

U nastavku će se prikazati teorijska osnova Green-Ampt modela te će se njenom primjenom izvesti i pripadajući proračunski algoritam koji će se u svrhu izrade numeričkog primjera i implementirati u zasebnu funkciju programa Excel kako bi se prikazala jednostavna praktična upotreba ovakvog pristupa modeliranja infiltracije.

3.1. Pretpostavke filtracijskog toka

Osim nekih uobičajenih radnih pretpostavki na koje se analitički modeli infiltracije oslanjaju (homogena porozna sredina, konstantni iznos hidrauličke vodljivost K_s te poznati iznosi početnog uvjeta volumetrijskog sadržaja vode u tlu i dubine vode h_v), opravdana primjena Green-Ampt modela zahtijeva i oštru granicu između saturiranog i nesaturiranog djela porozne sredine, odnosno tzv. horizontalnu frontu vode (engl. wetting front) koja je prikazana na Slici 1. Ovakvi uvjeti toka mogu se ostvariti ukoliko su ispunjene navedene pretpostavke te uz to mora i vrijediti da je predmetna porozna sredina takva da su kapilarni efekti relativno mali, odnosno da je sredina okarakterizirana relativno malom kapilarnom difuzijom (što će vrijediti za slučaj kad je porozno dno kišnog vrta izgrađeno od relativno poroznih materijala kao npr. grubog pijeska). U ovakvim okolnostima se funkcija kumulativne infiltracije može izraziti u obliku

$$F(t) = L \cdot \theta_d \quad (4)$$

gdje je L visina saturiranog djela tla, a θ_d razlika između θ_s i početnog volumetrijskog sadržaja vode u tlu je θ_i , kako je prikazano na Slici 1.

Određivanje funkcije $F(t)$ će zahtijevati kvantifikaciju toka vode u poroznoj sredini te će se u tu svrhu koristiti Darcyjev zakon (3). Pritom, u tu svrhu će se prethodna parcijalna derivacija zamijeniti njenom numeričkom aproksimacijom, pa će se specifični protok aproksimirati algebarskom jednadžbom [12]:

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{\Delta Z} \quad (5)$$

koja se može napisati u obliku

$$q = -K_s \left(\frac{H_1 - H_2}{z_1 - z_2} \right) \quad (6)$$

gdje je piezometarska kota H_1 određena na koordinati z_1 , koja prolazi kroz površinu tla i koja je jednaka nuli ($z_1 = 0$) i predstavlja dubinu vode h_v , a piezometarska kota H_2 na koti $z_2 = -L$ će u tom slučaju biti $-|\psi| - L$ gdje je ψ tzv. usisna visina kojom se modeliraju kapilarni efekti usisa vode u tlo

koji su prisutni ispod same fronte vode. Kako u predmetnom algebarskom modelu (6) nije važan smjer sile usisa vode već samo njen intenzitet (jer je smjer toka unaprijed pretpostavljen), usisna visina ψ će imati negativnu vrijednost (radi negativnog predznaka kapilarnog tlaka), pa se stoga postavlja unutar znaka apsolutne vrijednosti. Na temelju prethodno navedenoga, (6) se može napisati u obliku:

$$q = -K_s \left(\frac{h_v - (-|\psi| - L)}{0 - (-L)} \right) \quad (7)$$

odnosno, nakon uređivanja, u obliku:

$$q = -K_s \left(\frac{|\psi| + L + h_v}{L} \right) \quad (8)$$

te će za jediničnu infiltracijsku površinu tada vrijediti:

$$f = K_s \left(\frac{|\psi| + L + h_v}{L} \right) \quad (9)$$

Prethodna jednadžba se može dovesti u vezu s kumulativnom infiltracijom koristeći jednakost:

$$L = \frac{F(t)}{\theta_d} \quad (10)$$

koja slijedi iz (4), pa se tako (9) može napisati u obliku:

$$f = K_s \left(\frac{|\psi| + \frac{F(t)}{\theta_d} + h_v}{\frac{F(t)}{\theta_d}} \right) \quad (11)$$

odnosno, nakon množenja brojnika i nazivnika sa θ_d , u obliku:

$$f = K_s \left(\frac{|\psi|\theta_d + F(t) + h_v\theta_d}{F(t)} \right) \quad (12)$$

Grupiranjem zajedničkih faktora u brojniku, prethodna jednakost postaje:

$$f = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_v)\theta_d + F(t)}{F(t)} \right) \quad (13)$$

te će se primjenom (2) dobiti obična diferencijalna jednadžba prvog reda:

$$\frac{dF}{dt} = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_v)\theta_d + F}{F} \right) \quad (14)$$

čije će partikularno rješenje za neke zadane početne uvjete $F(0)$ definirati vremensku promjenu kumulativne infiltracije, tj. funkciju $F(t)$, a time onda i samu infiltraciju $f(t)$. Njeno analitičko rješenje se može odrediti

primjenom metode separacije varijabli, tj. tako da se jednađba u prvom redu napiše u obliku:

$$\frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} dF = K_s dt \quad (15)$$

te se u svrhu integriranja lijeve strane u brojniku može provesti manipulacija koja se svodi na zbrajanje i oduzimanje jedne te iste vrijednosti (koja se pojavljuje i u nazivniku):

$$\frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} = \left(\frac{(|\psi| + h_v)\theta_d + F - (|\psi| + h_v)\theta_d}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} \right) \quad (16)$$

pa se lijeva strana (15) može napisati u obliku:

$$\left(\frac{(|\psi| + h_v)\theta_d + F}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} - \frac{(|\psi| + h_v)\theta_d}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} \right) dF = K_s dt \quad (17)$$

odnosno, nakon skraćenja, u obliku:

$$\left(1 - \frac{(|\psi| + h_v)\theta_d}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} \right) dF = K_s dt \quad (18)$$

Lijeva strana prethodne diferencijalne jednađbe može se integrirati u granicama od 0 do $F(t)$, a desna u granicama od 0 do t , odnosno, vrijedi:

$$\int_0^{F(t)} \left(1 - \frac{(|\psi| + h_v)\theta_d}{(|\psi| + h_v)\theta_d + F} \right) dF = \int_0^t K_s dt \quad (19)$$

Prethodno provedbi integracije, lijevu stranu prethodne jednađbe je korisno napisati u odgovarajućem obliku za koji je unaprijed poznat analitički oblik integrala podintegralne funkcije. U tu svrhu se integral lijeve strane (19) može izraziti u obliku:

$$\int_0^x \frac{a}{a+x} dx = a \ln \ln(x+a) + C \quad (20)$$

gdje je C konstanta integracije. Naime, i brojnik i nazivnik lijeve strane (19) može se podijeliti sa $(|\psi| + h_v)\theta_d$ te se nakon manjeg uređivanja može dobiti jednakost:

$$\int_0^{F(t)} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d}} \right) dF = \int_0^t K_s dt \quad (21)$$

u kojoj se lijeva strana može rastaviti na dva integrala:

$$\int_0^{F(t)} dF - \int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d}} \right) dF = \int_0^t K_s dt \quad (22)$$

pa će integracijom prvog člana na lijevoj strani i integracijom desne strane slijediti jednakost:

$$[F(t) - 0] - \int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d}} \right) dF = K_s(t - 0) \quad (23)$$

dok će primjenom (20) drugi član lijeve strane biti:

$$\int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d}} \right) dF = \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d} \right) \frac{1}{\left(\frac{1}{(|\psi| + h_v)\theta_d} \right)} \quad (24)$$

Odnosno:

$$\int_0^{F(t)} \left(\frac{1}{1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d}} \right) dF = (|\psi| + h_v)\theta_d \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d} \right) \quad (25)$$

pa će (23) poprimiti oblik:

$$F - (|\psi| + h_v)\theta_d \ln \ln \left(1 + \frac{F}{(|\psi| + h_v)\theta_d} \right) = K_s t \quad (26)$$

koji se može preurediti kako bi se dobila jednadžba:

$$F(t) = K_s t + (|\psi| + h_v)\theta_d \ln \ln \left(1 + \frac{F(t)}{(|\psi| + h_v)\theta_d} \right) \quad (27)$$

iz koje se prepoznaje da je modeliranje kumulativne infiltracije svedeno na rješavanje nelinearne algebarske jednadžbe te će se u tu svrhu u nastavku prikazati odabrani iterativni algoritam koji je jednostavan za upotrebu te tako i atraktivan za rješavanje pripadajućih problema iz inženjerske prakse (ukoliko su ispunjene prethodno navedene radne pretpostavke). Nakon što je za zadane početne uvjete i neko proteklo vrijeme t određena kumulativna infiltracija $F(t)$, koristeći (2) može se odrediti i infiltracija:

$$f(t) = K_s \left(\frac{(|\psi| + h_v)\theta_d + F(t)}{F(t)} \right) \quad (28)$$

te onda i protok kojim se kišni vrt prazni:

$$Q_{iz}(h_v(t)) = f(t) \cdot A_v \quad (29)$$

gdje je A_v površina infiltracijske površine.

3.2. Iterativni proračunski algoritam

Rješenje jednadžbe (27) će se iterativno aproksimirati te će se pripadajući iterativni algoritam implementirati u program Excel koji je

odabran zato što ga inženjeri često koriste za izradu analiza od praktičnog značaja, pa će se stoga i ovom radom nastojati obogatiti fond uobičajenih proračunskih „alata“. U tu je svrhu neophodno definirati vlastiti funkciju, pa će se stoga otvorena radna datoteka u prvom redu spremi s ekstenzijom xls kako bi se mogle memorirati makronaredbe koje će se definirati izvan programa Excel koristeći programski interpreter Visual Basic for Applications, odnosno u kojem će se upisati tzv. VBA skripta. Sučelje za unos VBA skripte se može otvoriti tako da se iz izbornika File odabere opcija Options koja će otvoriti sučelje u kojem se odabire izbornik Customize Ribbon u kojem je potrebno označiti opciju Developer i izbor potvrditi naredbom OK. Ovime će se u gornjoj alatnoj traci pojaviti izbornik Developer u kojem ikona Visual Basic otvara urednik u koji će se unijeti skripta te zatim pozivati unutar programa Excel u obliku funkcije. Dakle, izborom ikone Visual Basic otvorit će se novo radno sučelje u kojem će se iz izbornika Insert odabrati opcija Module, čime se na desnoj strani VBA urednika otvara prazna radna površina unutar koje će se unijeti tekst, odnosno programska sintaksa predmetne skripte koja je prikazana u nastavku [13]. Za pozivanje skripte je važno očuvati redosljed argumenata: (i) h_v , (ii) t , (iii) K_s , (iv) ψ , (v) θ_s i (vi) θ_i .

Public Function Ft(hr As Double, t As Double, Ks As Double, psi As Double, thetas As Double, thetai As Double) As Double

```
dtheta = thetas - thetai
clanA = dtheta * (psi + hr)
clanB = Ks * t
F_old = 0.001
rezidual = 1
```

```
While rezidual > 0.00000001
```

```
Logaritam = (Log(1 + (F_old / clanA))) / (Log(2.71828))
```

```
F_new = clanB + clanA * Logaritam
```

```
rezidual = F_new - F_old
```

```
F_old = F_new
```

```
Wend
```

```
Ft = F_new
```

End Function

Prikazana VBA skripta koristi uobičajenu programsku sintaksu unutar koje treba prepoznati da se iterativna petlja ponavlja sve dok varijabla rezidual ne postane manja od neke unaprijed zadane vrijednosti (kriterij konvergencije). Kako bi se postigla zadovoljavajuća točnost, treba napomenuti da se za kriterij konvergencija predlaže vrijednost manja od 10^{-6} .

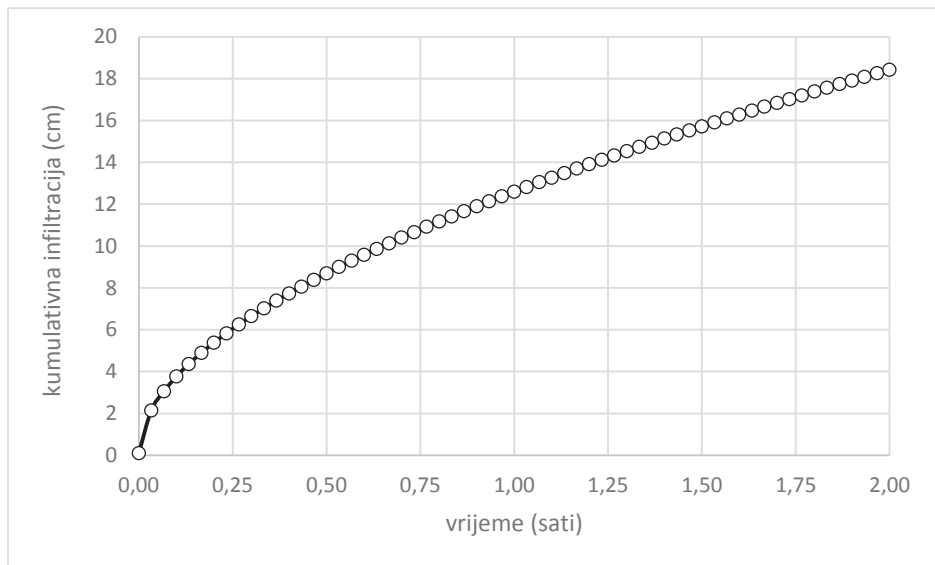
4. Numerički primjer

Prethodno prikazani proračunski algoritam će se u nastavku primijeniti kako bi se modelirao proces infiltracije oborinske vode unutar kišnog vrta površine 16 m^2 . Pretpostavit će se da je propusna podloga kišnog vrta homogena i izgrađena od pijeska, pa će se stoga hidraulička vodljivost K_s zadati u iznosu od $4,14 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$, maksimalni volumetrijski sadržaj vode u tlu θ_s u iznosu od 0,448 te usisni potencijal kapilarnog tlaka ψ u iznosu od 0,29 m. S druge strane, početni volumetrijski sadržaj vode u tlu θ_i će se zadati u iznosu od 0,1 te dubina vode h_v u iznosu od 1 m (čime će se modelirati potpuno ispunjeni kišni vrt). Vremenska promjena dubine vode h_v slijedi iz numeričke integracije jednadžbe (1).

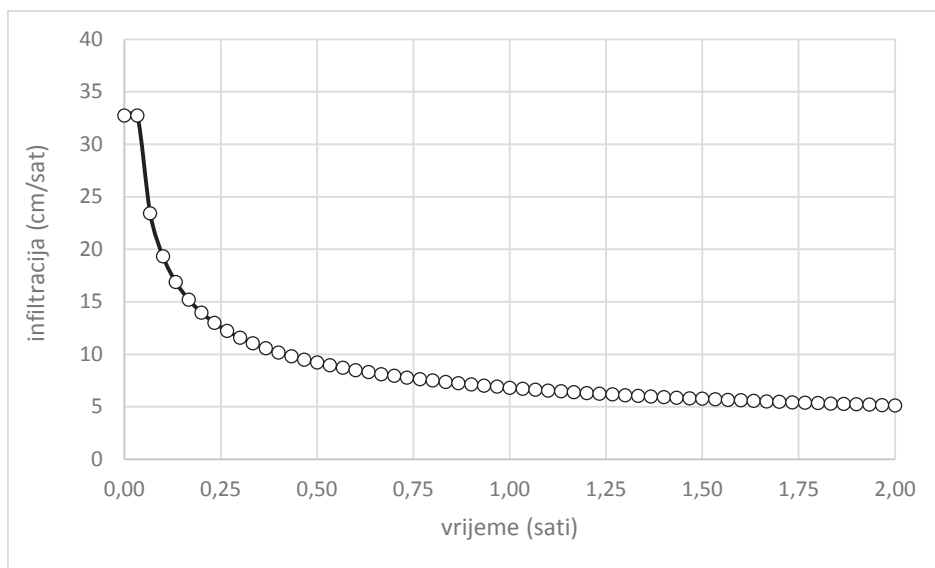
Proračunski korak Δt će se zadati u vrijednosti od 2 minute te će se tako vremenska domena, koja se proteže kroz 2 sata, unutar kojih će se modelirati dinamika pražnjenja kišnog vrta, prevaliti s ukupno 60 proračunska koraka. U tu svrhu će se u pripadajućem stupcu kreirane xlsx datoteke koristiti prethodno definirana funkcija, što će za prvu ćeliju predmetnog stupca rezultirati sintaksom:

=Ft(E1;C1;\$B\$1;\$B\$2;\$B\$3;\$B\$4)

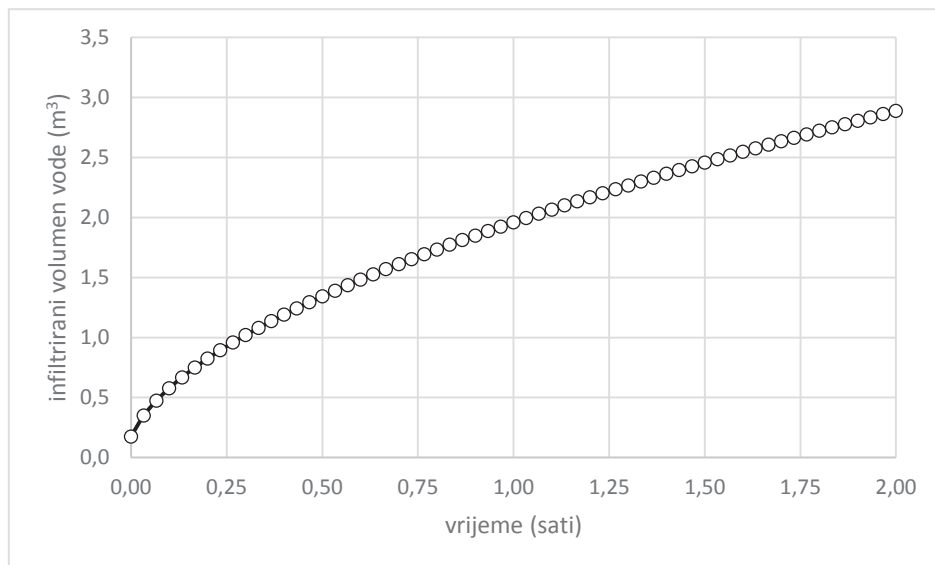
u kojoj adrese E1 i C1 odgovaraju ćelijama proteklog vremena (iskazanog u sekundama) i dubine vode h_r u kišnom vrtu (iskazane u metrima), dok se preostale ćelije odnose na parametre tla pa su stoga „zaključene“ sintaksom \$ \$. Slika 2 za navedene parametre prikazuje kumulativnu infiltraciju u vremenu, Slika 3 vremensku promjenu infiltracije te Slika 4 kumulativni volumen vode koji se infiltrirao u tlo. Za zadano inicijalno stanje tla kumulativna infiltracija će tijekom vremena rasti te će kao posljedica navedenoga rasti i volumetrijski sadržaj vode u tlu (količine vode u porama tla), a time onda i opadati infiltracija tj. infiltracijski kapacitet tla. Na taj način, infiltracija je najveća na početku vremenske domene (Slika 3) te tijekom vremena progresivno opada. Infiltrirani volumen vode slijedi iz (29), a kumulativni iznos u nekom vremenu t (Slika 4) iz sumacije svih prethodnih volumena infiltriranih u odgovarajućim vremenskim koracima.



Slika 2. Vremenska promjena kumulativne infiltracije



Slika 3. Vremenska promjena infiltracije



Slika 4. Kumulativni infiltrirani volumen oborinske vode

5. Zaključak

U nastojanju da se skromno doprinese fondu uobičajenih proračunskih postupaka koji se za praktične potrebe mogu automatizirati u programu Excel, u radu je obrađen specifični oblik infiltracije oborinske vode koji je modeliran Green-Amptovim modelom i obrađen iz perspektive dimenzioniranja kišnih vrtova. Rezultirajući programski algoritam je implementiran u VBA skriptu i za potrebe izrade numeričkog primjera pozivan unutar programa Excel. Osim svega prethodno navedenog, za dizajn kišnih vrtova se znatizeljni čitaoci upućuju na literaturu [14].

Literatura

- [1] Burszta-Adamiak, E.; Biniak-Pieróg, M.; B. Dąbek, P.; Sternik, A. (2023.) Rain Garden Hydrological Performance – Responses to Real Rainfall Events. Science of The Total Environment, Vol. 887.
- [2] Kasprzyk, M.; Szpakowski, W.; Poznańska, E.; C. Boogaard, F.; Bobkowska, K.; Gajewska, M. (2022.) Technical Solutions and Benefits of Introducing Rain Gardens – Gdańsk case study. Science of The Total Environment, Vol. 835.
- [3] Singh, K.K. (2019.) Rain Garden – A Solution to Urban Flooding: A Review. Sustainable Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol 30.
- [4] Papafotiou, K.L. (2015.) Ecological Rainwater Management in Urban Areas. Preliminary Considerations for the city of Corinth, Greece. Agriculture and Agricultural Science Procedia.

- [5] Dussaillant-Jones, A.; Wu, C.; PotteR, K. (2004.) Richards Equation Model of a Rain Garden. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol 9.
- [6] Farthing, M.W.; Ogden, F.L. (2017.) Numerical Solution of Richards' Equation: A Review of Advances and Challenges. *Soil Science Society of America Journal*.
- [7] Deng, B.; Wang, J. (2017.) Saturated-Unsaturated Groundwater Modeling Using 3D Richards Equation with a Coordinate Transform of Nonorthogonal Grids. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 50.
- [8] Adindu, R.; Kelechi, I.; Ijeoma, I.D. (2015.) Philip Model Capability to Estimate Infiltration for Solis of Aba, Abia State. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, Vol. 5.
- [9] Bauer, S.W. (1974.) A Modified Horton Equation for Infiltration during Intermittent Rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 19.
- [10] Mekonen, A.G. (2022.) Simplified Approach for Determination of Parameters for Kostiakov's Infiltration Equation. *Water Practice and Technology*, Vol. 17.
- [11] Dussaillant, A.; Cozzetto, K.; Brander, K.; Potter, K. (2003.) Green-Ampt Model Of A Rain Garden And Comparison To Richards Equation Model. *Sustainable Planning & Development*, Vol 67.
- [12] Zelenakova, M.; Hudakova, G.; Stec, A. (2021.) *Rainwater Infiltration in Urban Areas*. Springer.
- [13] Travaš, V. (2024.) Upute za izradu seminarskog rada iz kolegija Hidrotehničke mjere prilagodbe klimatskim promjenama. Građevinski fakultet u Rijeci.
- [14] Brears, R. C. (2023.) *Urban Rain Gardens: A Comprehensive Planner's Guide to Design, Implement, and Sustain Green Spaces for Sustainable Cities*. Independently published.