

DIMENZIONISANJE I KALIBRACIJA SISTEMA ZA INFILTRACIJU KIŠNICE NA URBANOM SLIVU U BEOGRADU

Veljko PRODANOVIĆ*, Anja RANĐELOVIĆ, Željko VASILIC,
Nenad JAČIMOVIĆ, Miloš STANIĆ

Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

REZIME

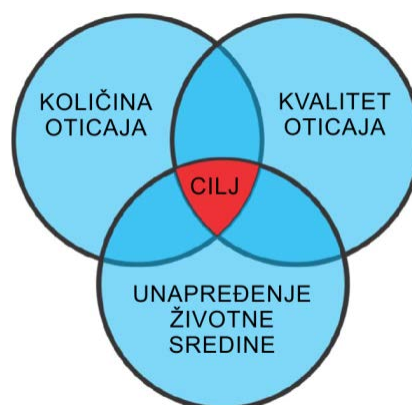
U radu se prikazuje dimenzionisanje i kalibracija parametara infiltracionog sistema za prikupljanje i tretman kišnice sa urbanog sliva. Sistem je dimenzionisan tako da prihvati kritične kišne epizode povratnog perioda od 2 godine i da ih infiltrira za period manji od razmaka dva uzastopna kritična kišna događaja. Funkcionisanje sistema je provereno probnim opterećenjem sa čistom vodom i ovi rezultati su iskorišćeni za kalibraciju preliminarnog hidrodinamičkog modela. Model sadrži deo koji prati bilans vode u infiltracionom sistemu i deo koji modelira infiltraciju uprošćenim Grin-Emptovim (Green-Ampt) jednačinama. Kalibracija je odrađena PEST metodologijom, a dobijene vrednosti parametara su proverene analizom osetljivosti modela. Zaključci dobijeni sa modela su iskorišćeni za projektovanje sistema za monitoring infiltracionog bazena, koji će omogućiti kontinualno merenje performansi sistema.

Ključne reči: infiltracija, kalibracija, dimenzionisanje, analiza osetljivosti, hidrodinamika

1. UVOD

Ubrzani razvoj gradova i urbanizacija ruralnih područja je neminovnost. Smatra se da će do polovine 21. veka ubrzana urbanizacija dovesti do toga da u gradovima živi 75% svetske populacije. Ovakav razvoj, osim niza povoljnosti, sa sobom donosi i određene probleme. Urbanizacija utiče na povećanje urbanog oticaja i povećanje količine otpadnih voda. Tradicionalni sistemi, koji su ranije projektovani u cilju odvođenja kišnog oticaja, imali su osnovni kriterijum da što brže oticaj sprovedu do recipijenta [1]. Pri tome, nisu vodili računa o eventualnom poboljšanju kvaliteta toga oticaja

pre njegovog ispuštanja u recipijent. U poslednjih petnaest, dvadeset godina javila se potreba za razvojem sistema koji će se baviti kako kontrolom i smanjenjem količine urbanog oticaja, tako i poboljšanjem njegovog kvaliteta uz minimalno narušavanje životne sredine i ekosistema (Slika 1) [2] [3].



Slika 1. Zahtevi koje treba da ispune novi sistemi

U okviru naučnog projekta „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture” u dvorištu Građevinskog fakulteta u Beogradu je napravljen eksperimentalni sliv. Sliv se sastoji od dve vrste nepropusnih površina - parkinga ispred zgrade i manjeg dela krovne površine i delom od travnate površine. Predviđeno je da se na ovom slivu ispituju mogućnosti za smanjenje količine oticaja sa urbanih površina kao i poboljšanje njegovog kvaliteta pre ispusta u kanalizacioni sistem. Za potrebe ispitivanja ovih mogućnosti u sklopu sliva je izgrađen infiltracioni sistem. Cilj ovog rada je da se prikaže metodologija dimenzionisanja infiltracionog sistema i kalibracija prema realnim podacima merenja rada takvog sistema.

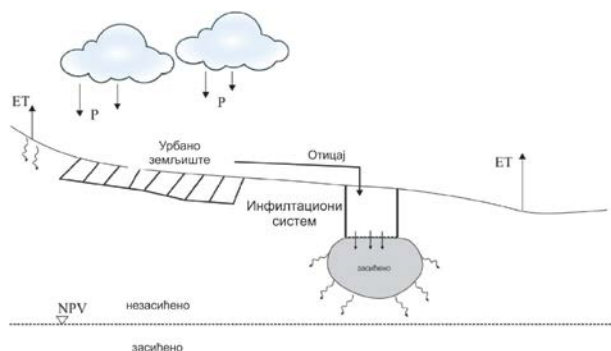
* Dobitnik nagrade iz fondacije “Dr Vujica Jevđević” za 2013. godinu.

2. METODE

2.1 Metoda infiltracije

Postoji veliki izbor metoda i tehnika koje se mogu upotrebiti u svrhu kontrole oticaja i poboljšanja njegovog kvaliteta. Na ovom eksperimentalnom slivu izabrana je metoda infiltracije. Ujedno, ovo je metod koji treba primeniti kada god je to moguće jer on najbolje oponaša prirodne hidrološke procese u slivu.

Da bi se primenila metoda infiltracije (Slika 2) postoji nekoliko ograničenja koja treba razmotriti: kvalitet oticaja ne sme da ugrozi kvalitet podzemne vode koju prihranjuje, infiltracione karakteristike zemljišta moraju biti odgovarajuće, nivo podzemne vode ne sme biti visok, i infiltracija ne sme ugrožavati stabilnost zemljišta i okolnih objekata. Preporučuje se da rastojanje od nivoa podzemne vode bude bar 1 metar. Smatra se da sistemi sa koeficijentom filtracije manjim od 0,36 mm/h (10^{-7} m/s) nisu pogodni za infiltraciju.



Slika 2. Šematski prikaz rada infiltracionog bazena [4]

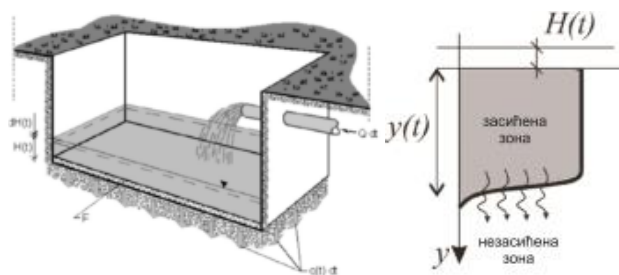
Proračun infiltracije projektovanog sistema izvršava se prema metodama zasnovanim na uprošćenoj Green-Ampt teoriji.

Korišćenjem Darsijevoj zakona filtracije i bilansne jednačine dolazi se do opšteg oblika jednačine punjenja i pražnjenja infiltracionog bazena (Jednačina 1) [4].

$$H(t) = H_0 e^{-\frac{t-t_0}{R}} + R \frac{Q}{F} \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{R}} \right) - K_f R \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{R}} \right) \quad (1)$$

U jednačini 1, $H(t)$ predstavlja nivo vode u bazenu u trenutku t , H_0 predstavlja nivo vode u početnom

trenutku (na početku ciklusa punjenja ili pražnjenja), t_0 je početni vremenski trenutak ciklusa (punjenja ili pražnjenja), R predstavlja otpor upijanju (ima dimenziju vremena) i jednak je $R=y(t)/K_f$, gde je $y(t)$ položaj vlažnog fronta (Slika 3), a K_f koeficijent filtracije. Član Q/F , u Jednačini 1, predstavlja proticaj po jedinici površine.



Slika 3. Šematski prikaz infiltracionog bazena

Jednačina 1 je osnovna jednačina primenjenog modela vertikalne infiltracije. Međutim, treba paziti na smenu procesa punjenja i pražnjenja jer je jednačina rešavana u intervalu ciklusa punjenja ili pražnjenja, pa za kontinualnu simulaciju ovih ciklusa treba voditi računa o definisanju uslova početka punjenja i početka pražnjenja.

2.2 Postupak dimenzionisanja bazena

U postupku dimenzionisanja bazena potrebno je odrediti njegovu površinu, kao i maksimalnu dubinu vode. Ove dve dimenzije treba da obezbede da se zapremina koja se javlja kao razlika između intenziteta kiše i intenziteta upijanja zemljišta (koji je mnogo manji) postupno upusti u podzemlje.

Analiza za razmatrano područje sprovedena je sa kišama povratnog perioda 2 godine, različitog trajanja i intenziteta. Smatra se da je povratni period od 2 godine dovoljan, jer se sistem ne dimenzioniše da prihvati cele zapremine kiša, već samo prvi oticaj (first flush) koji nosi najveću količinu zagađenja [5]. Protok merodavnog hidrograma za dimenzionisanje je određen na osnovu racionalne metode:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (2)$$

Gde su Q – merodavni protok [L^3/T], C – koeficijent oticaja [-] (usvojena vrednost $C=0.9$) i i – intenzitet kiše [L/T], A – površina sliva [L^2].

Dinamika upijanja zemljišta, koja takođe mora da se razmotri u okviru ovog postupka dimenzionisanja, opisana je uprošćenom Green-Ampt teorijom. Jednačinama 3 i 4, izvedenim iz Jednačine 1, pokazan je proračun karakterističnih veličina – maksimalne dubine H_{max} i vremena pražnjenja t_p , koje opisuju dinamiku kojom sistem može da prihvata i prerađuje kišne oticaje.

$$H_{max} = R \left(\frac{Q}{F} - K_f \right) \left(1 - e^{-\frac{t_k}{R}} \right) \quad (3)$$

$$t_p = R \ln \left(\frac{H_{max} + K_f R}{K_f R} \right) \quad (4)$$

2.3 Merenja izvršena na sistemu

Na datom sistemu izvršene su 3 serije merenja. Jedno merenje uključuje ručno punjenje infiltracionog bazena i pražnjenje bazena infiltracijom. Merenja su izvršena u 3 dana („Utorak“, „Četvrtak“ i „Petak“).

Nivo vode u bazenu je meren sa dve sonde za pritisak, koje su bile postavljene par centimetara iznad filterskog sloja. Kontrola nad merenjima je vršena pomoću metra zalepljenog na zid bazena.

Tokom eksperimenta, meren je i protok vode (elektromagnetnim meračem) i budući da se isparavanje tokom trajanja eksperimenta smatra zanemarljivim, smatra se da je na ovaj način obuhvaćen ukupni bilans i da se sva voda iz sistema „gubi“ kroz infiltraciju u podzemlje.

3 REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Dimenzionisanje sistema

Razmatrane su površine dna bazena 6, 8 i 10 m², shodno raspoloživom prostoru na eksperimentalnom slivu. Intenzitet i trajanje kiše (povratnog perioda 2 godine) su preuzeti sa HTP krive za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar (period obrade 1925 – 1989) i racionalnom metodom je određen merodavni protok (Jednačina 2). Karakteristike zemljišta su određene prema prethodnim hidrogeološkim istražnim radovima, i utvrđen je koeficijent filtracije: $K_f = 10^{-5}$ m/s, dok je položaj vlažnog fronta usvojen $y = 20$ cm [4].

Usvojeno je rešenje sa površinom dna od $F = 6$ m². Maksimalna dubina bazena koji je napravljen je svega

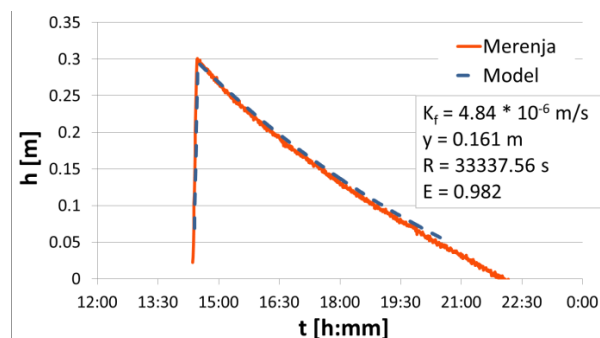
$H_{max} = 0.5$ m, što daje efikasnost sistema oko 50% (efikasnost se definiše kao odnos ukupne količine infiltrirane vode i ukupnog oticaja). Detaljan prikaz rezultata nalazi se u [4].

3.2 Kalibracija hidrauličkog modela

Na ovako projektovanom i izgrađenom bazenu, izvršena je kalibracija dva parametra, koeficijent filtracije (K_f) i dubina vlažnog fronta (y). Kalibracija modela je obavljena u softverskom paketu PEST [6] [7].

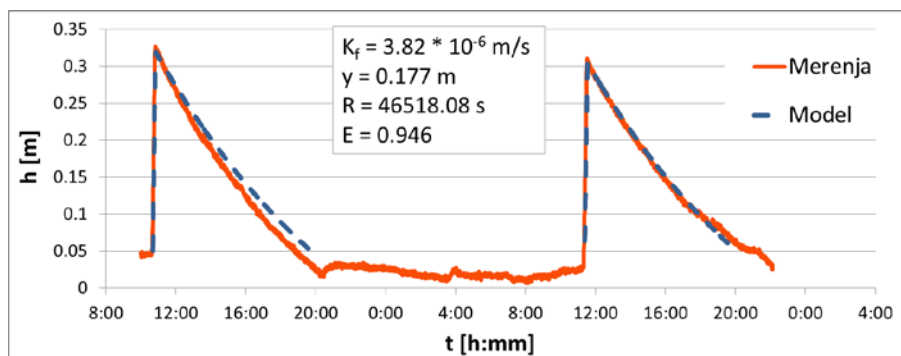
Vrednosti dubina, dobijene iz modela korišćenjem optimalnih vrednosti parametara za događaje „Utorak“ i „Četvrtak-Petak“, su upoređene sa vrednostima dobijenim iz merenja za te iste događaje (Slika 4 i Slika 5).

Na slikama je, pored kalibrisanih vrednosti parametara prikazana i vrednost Nash-Sutcliffe kriterijumske funkcije ($E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (H_o^t - H_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (H_o^t - \bar{H}_o)^2}$, gde su H_o vrednosti izmerenih dubina, a H_m vrednosti dubina dobijene iz modela), koja prikazuje stepen saglasnost modeliranih i mernih podataka. Sa grafika (a i kroz visoku vrednost kriterijumske funkcije, $E=0.982$) se vidi da se modelirane vrednosti dobro prilagođavaju merenjima za svaki događaj posebno. Optimalne vrednosti koeficijenta infiltracije i položaja vlažnog fronta su prikazane na slici.

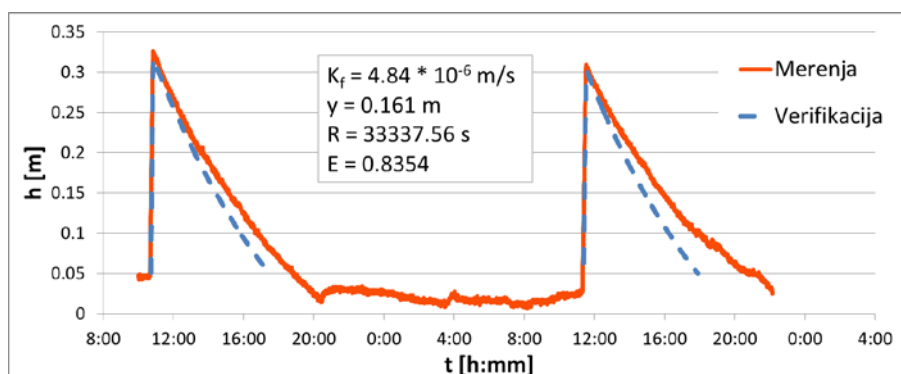


Slika 4. Rezultat PEST kalibracije na merenjima „Utorak“

Slika 5 pokazuje da su modelirane vrednosti za „Četvrtak“ malo precenjene, dok se „Petak“ odlično uklapa. Pretpostavka je da se to dešava jer se koeficijent filtracije promenio od četvrtka do petka, usled zadržavanja vlažnosti zemljišta. Veća vlažnost zemljišta u petak bi prouzrokovala i manji koeficijent filtracije, odnosno povećala bi vreme infiltracije vode, što je i



Slika 5. Rezultati PEST kalibracije na dva uzastopna događaja (dana), gde prvi pik predstavlja merenja „Četvrtak“, a drugi pik merenja „Petak“



Slika 6. Verifikacija rezultata sa parametrima dobijenim kalibracijom događaja „Utorak“, na merenja „Četvrtak-Petak“

ilustrovano na Slika 5. Iako postoje mala neslaganja, kriterijumska funkcija ima visoku vrednost, $E=0.946$.

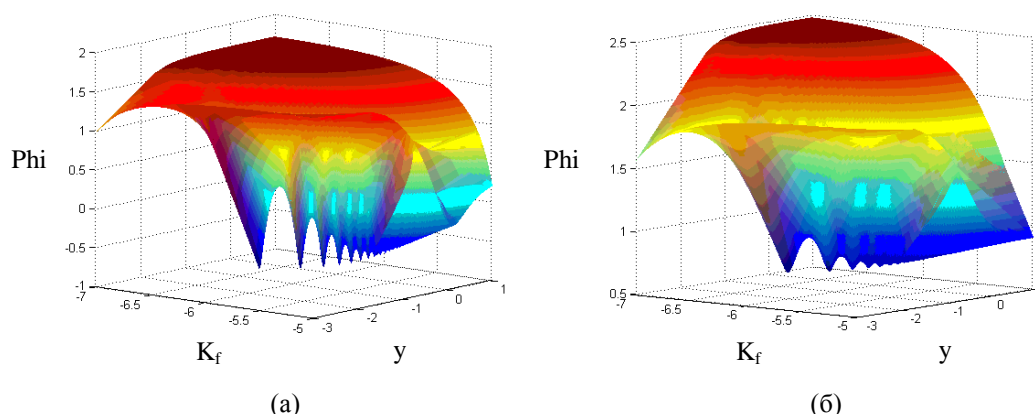
Pošto se optimalne vrednosti za događaje „Utorak“ i „Četvrtak-Petak“ razlikuju, potrebno je verifikacijom (primenom parametara jednog događaja na predikciju drugog događaja) utvrditi da li će ova razlika parametara uticati na izlaze iz modela i koliko. Na Slika 6 primećuje se podcenjivanje vrednosti nivoa duž celog događaja. Ovo podcenjivanje može biti prouzrokovano nizom neodređenosti u samim merenjima, kao i u postavci i kalibraciji modela. Vrednost kriterijumske funkcije je i dalje zadovoljavajuća ($E=0.835$), međutim, tek kroz analizu osetljivosti parametara modela moći će na pravi način da se sagleda rezultat optimizacije parametara.

3.3 Analiza osetljivosti modela

Za analizu osetljivosti modela na različite vrednosti parametara, puštene su Monte Carlo simulacije sa

rasponom koeficijenta filtracije (K_f) od 10^{-7} do 10^{-5} m/s i rasponom dubine vlažnog fronta (y) od 10^{-3} do 10 m. Simulacije su puštene za kriterijumsku funkciju metoda najmanjih kvadrata i rezultati, koji su dati u obliku kriterijumske površi, su prikazani na Slika 7.

Kao što se vidi sa Slika 7 u zadatom rasponu parametara se nalazi veliki broj lokalnih optimuma i mnogo različitih skupova parametara koji daju, manje-više iste vrednosti kriterijumskih funkcija. Ovo je delom rezultat različitih vrednosti parametara u modelu koje se kombinuju na kompleksan, nelinearan način da daju bliske vrednosti kriterijumskih funkcija, a delom zbog toga što kriterijumske funkcije nisu osetljive na promene u vrednostima parametara. Iako je moguće da se odredi globalni optimum parametara modela, postoji i mogućnost da rezultujući parametri zavise od kalibracionog dela podataka, strukture modela, kriterijumske funkcije, pa čak i od početnih vrednosti parametara koji se koriste u optimizaciji [7].



Slika 7. Rezultati Monte Carlo simulacija na (a) događaju „Utorak“ i (b) događaju „Četvrtak-Petak“, sa kriterijumskom funkcijom najmanjih kvadrata

4. ZAKLJUČCI I DALJA ISTRAŽIVANJA

Infiltracioni sistem predstavljen u ovom radu je dimenzionisan korišćenjem racionalne metode za određivanje merodavnog protoka i uprošćene teorije Green-Ampt-a za proračun infiltracije. Merenja na izvedenom sistemu su pokazala da je opravdano koristiti uprošćenu teoriju za modeliranje procesa infiltracije.

Analiza osetljivosti sistema je pokazala da postoji velika međusobna zavisnost parametara. U takvim uslovima PEST metodologija ne daje najbolje rezultate parametara jer nalazi samo lokalne optimume, a ne i globalne [8]. Radi dobijanja pouzdanijih vrednosti parametara, zahteva se uvođenje kompleksnijeg modela, koji će obuhvatiti više fizičkih procesa koji se odijaju prilikom infiltracije.

Kako je opadanje infiltracionog kapaciteta jedna od glavnih mana ovakvih sistema, dalja istraživanja će obuhvatati upravo taj fenomen. Posebna pažnja će biti poklonjena i uspešnosti ovog sistema u redukciji polutanata iz kišnog oticaja, odnosno, potencijalu njegovog korišćenja za upravljanje kvalitetom kišnog oticaja na urbanim slivovima.

LITERATURA

[1] Chocat, B. i drugi, Urban Drainage – Out of sight out of mind?, IAHR/IWA Joint Committee On Urban Drainage, Novatech, 1659-1690, 2004.

- [2] Edwards, Findlay G, Steven J. Burian. (n.d.), Historical Perspectives of Urban Drainage, Dept. Of Civil Engineering, University of Arkansas
- [3] Geerse, Johannes M.U., Arnold H. Lobbrecht, Assessing the performance of urban drainage systems: 'general approach to the city of Rotterdam', Urban Water, 199-209, 2002.
- [4] Vasilić, Ž., Održivi sistemi za kontrolu urbanog oticaja; dimenzionisanje i analiza funkcionisanja infiltracionog bazena na eksperimentalnom slivu, Seminarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija, 2013.
- [5] Ana, Delečić, The First Flush Load of Urban Surface Runoff, Water Resources 32, 8, 2462-2470, 1998.
- [6] Doherty, J., PEST—Model-Independent Parameter Estimation—User Manual, Watermark Numerical Computing, 2012.
- [7] Beven, K., Environmental Modelling: An Uncertain Future? An introduction to techniques for uncertainty estimation in environmental prediction, Routledge, 2009., ISBN 0-203-93248-X
- [8] Prodanović, V., Procena neodređenosti kod kalibracije matematičkih modela infiltracionih sistema, Master rad, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija, 2013.

SIZING AND CALIBRATION OF URBAN STORMWATER INFILTRATION SYSTEM IN BELGRADE

by

Veljko PRODANOVIĆ, Anja RANĐELOVIĆ, Željko VASILIC,
Nenad JACIMOVIĆ, Miloš STANIĆ

University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Summary

This work shows a way to size and calibrate parameters of urban stormwater collection and treatment infiltration system. Its design allows collection of stormwater runoff events for a 2 year return period and infiltration time of less than a period between two critical stormwater events. Functioning of this system has been trialed with chaleng tests, loading the system with clean water, and results obtained have been used to calibrate preliminary hydrodynamic model. This model consists of two parts, one that follows water balanse in infiltration system, and second part which models the

infiltration by using simplified Green-Ampt equations. Calibration of the model has been performed by using PEST methodology, and acquired parameter values have been subjected to sensitivity analysis. Conslusions obtained from the model have been used to design monitoring sollution for infitration system, which enables continues performance measurements of the system.

Key words: infiltration, sizing, calibration, sensitivity analysis, hydrodynamics

Redigovano 08.11.2016.