

METODOLOGIJA ZA PRORAČUN I ANALIZU INFILTRACIONIH POLJA ZA PRIHVATANJE OTICAJA SA SAOBRAĆAJNICA

Željko VASILIC, Filip STANIĆ, Anja RANĐELOVIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Infiltraciona polja predstavljaju jednu od mera koja se koristi za kontrolisano prihvatanje oticaja sa saobraćajnica. Svojim retenzionim prostorom ovi objekti obezbeđuju smanjenje maksimalne vrednosti oticaja, kao i poboljšanje njegovog kvaliteta filtracijom kroz filtarski sloj u okolno zemljište. Da bi se obezbedila efikasnost i održivo funkcionisanje infiltracionog polja, prilikom projektovanja se pažljivo moraju: 1) odabrati merodavne računске kiše i 2) razmotriti svi aspekti od značaja za infiltraciju. Inženjerima u Srbiji koji se bave projektovanjem odvodnjavanja saobraćajnica na raspolaganju je „Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji“, kojim objekti ovog tipa nisu obuhvaćeni. U stranoj literaturi se mogu naći osnovne smernice i preporuke za dimenzionisanje, ali takođe bez detaljnijeg opisa postupka dimenzionisanja i proračuna infiltracije. U ovom radu je prikazana sveobuhvatna metodologija za proračun i analizu infiltracionih polja namenjenih za prihvatanje oticaja sa saobraćajnica. Osnovna prednost predložene metodologije je objedinjavanje svih relevantnih hidroloških i hidrauličkih analiza, čime se nadomešćuju nedostaci prisutni u trenutno dostupnim pravilnicima i smernicama za projektovanje. Metodologija je primenjena na realnom primeru infiltracionog polja namenjenog za prihvatanje oticaja sa deonice trase železnice Novi Sad – Subotica. Implementacija metodologije u razvijeni softverski alat omogućava korisniku da na efikasan način vrši analize za različite ulazne podatke i ispita različita varijantna rešenja.

Ključne reči: Infiltraciona polja, infiltracija, oticaj

UVOD

Hidrološki proračuni i analize predstavljaju osnovu za određivanje kišnog oticaja merodavnog za

projektovanje sistema za odvodnjavanje saobraćajnica. Kišni oticaj sa kolovoza se prikuplja tako što se voda poprečnim i podužnim padom kolovoza usmerava da teče uz ivičnjak do slivnika, a zatim odvodi kolektorom ili kanalima do objekata za prečišćavanje, odakle se prečišćena voda dalje odvodi u recipijent. Posebno mesto u projektovanju sistema za odvodnjavanje saobraćajnica zauzima zaštita životne sredine, koja je implementirana u sisteme za odvodnjavanje tako da se pored kontrolisanog prikupljanja i odvođenja kišnog oticaja sa kolovoza sprovodi i njegovo prečišćavanje do propisima zahtevanog stepena. Savremena inženjerska praksa podrazumeva projektovanje održivih sistema za odvođenje oticaja koji pored primarnog cilja moraju biti projektovani tako da oponašaju prirodne uslove na slivu uz što manje narušavanje prirodnih procesa [1]. Jedna od mera koja se koristi u ove svrhe jeste upravo projektovanje i izgradnja infiltracionih polja.

Infiltraciona polja suštinski predstavljaju jednostavne objekte konstruisane i izvedene kao iskope sa odgovarajućim filtarskim slojem na dnu (šljunak ili lomljeni kamen) [2]. Suštinski, to su retenzioni prostori za trajno zadržavanje vode koji prihvataju oticaj i sporo ga ispuštaju. Infiltraciona polja svojim retenzionim prostorom obezbeđuju smanjenje maksimalne vrednosti oticaja [3], kao i poboljšanje njegovog kvaliteta filtracijom kroz filtarski sloj i zemljište, i predstavljaju samo jedan od tipova sličnih objekata koji se mogu primeniti u ovu svrhu. U literaturi se mogu pronaći različite vrste objekata ovog tipa, primenljivi za različite veličine i tipove namene površina (rezidencijalne, parkinzi, itd.) [4].

Prednosti infiltracionih polja se ogledaju u relativno jeftinoj ceni izgradnje, malom zauzeću prostora i mogućnosti primene u područjima gde ne postoji izvedena konvencionalna kanalizaciona mreža koja bi mogla služiti kao recipijent atmosferskog oticaja, zbog čega su naročito pogodna za izgradnju pored značajnih

saobraćajnica kao što su autoputevi [5]. Prednosti primene infiltracionih polja u zadržavanju zagađujućih materija sa kolovoza su dokazane kroz ispitivanja ovakvih objekata nakon višegodišnje upotrebe [6]. S druge strane, neefikasnost u radu infiltracionih polja može biti prouzrokovana izgradnjom na zemljištu slabe vodopropustljivosti i visokog nivoa podzemne vode. Stabilnost okolnih objekata takođe može biti ugrožena imajući u vidu da se infiltracijom povećava vlažnost okolnog zemljišta [7]. Vremenom može doći do smanjenja efikasnosti rada usled istaložavanja suspendovanih materija u filtarskom sloju [2].

U praksi projektovanja autoputeva u Republici Srbiji u upotrebi je „Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji“ u kome je sistem za odvodnjavanje definisan kao jedan od konstruktivnih elemenata puta [8], međutim u ovom dokumentu nije opisan način dimenzionisanja ovakvih objekata. U [9] je prikazan pojednostavljen proračun dinamike punjenja i pražnjenja infiltracionog polja, zasnovan na analitičkim izrazima, koji je pogodan za usvajanje osnovnih parametara i dimenzija infiltracionog polja. U stranoj literaturi se mogu naći osnovne smernice i preporuke za projektovanje objekata sličnog tipa koje mogu biti od koristi u inženjerskoj praksi ([4], [10]). Preporučuje se da rastojanje od nivoa podzemne vode bude bar 1 m, da zemljište ima koeficijent filtracije veći od 10^{-7} m/s i da udaljenost od okolnih objekata bude veća od 5 m. Međutim, ne postoji jasna regulativa ili priručnik koji bi obuhvatio sve aspekte bitne za efikasno funkcionisanje infiltracionih polja.

Za proračun bilansa voda u retenzionim prostorima neophodni su podaci o propusnosti zemljišta i druge hidrogeološke karakteristike tog zemljišta. Infiltracija je za nekoliko redova manja veličina od merodavnih dotoka. Zbog toga, ako je u pitanju retenzija za privremeno zadržavanje vode, infiltracija se zanemaruje. Međutim ako se radi o retenzijama za trajno zadržavanje vode kao što su infiltraciona polja, infiltracija je od velikog značaja. U tom slučaju sam proces određivanja infiltracije može biti složeniji, obzirom da infiltracija zavisi od više faktora kao što su: intenzitet i zapremina oticaja, karakteristike zemljišta kao što su poroznost i koeficijent filtracije, prethodna vlažnost zemljišta itd.

Česta greška koja se pravi u projektantskoj praksi jeste pogrešan izbor merodavne kiše za dimenzionisanje infiltracionih polja. Za dimenzionisanje sistema za odvođenje vode sa saobraćajnica merodavne su kiše kraćeg trajanja i većeg intenziteta koje rezultuju

maksimalnim vrednostima oticaja. Međutim, za dimenzionisanje infiltracionog polja merodavne su kiše dužeg trajanja koje će rezultovati većom zapreminom oticaja, koja je od suštinskog značaja prilikom izbora dimenzija infiltracionog polja.

U ovom radu je prikazana sveobuhvatna metodologija za proračun i analizu infiltracionih polja namenjenih za prihvatanje oticaja sa saobraćajnica. Osnovna prednost predložene metodologije je objedinjavanje svih relevantnih hidroloških i hidrauličkih analiza, neophodnih za sagledavanje svih aspekata prilikom projektovanja infiltracionih polja i njima sličnih objekata. Ovim se nadomešćuju nedostaci prisutni u trenutno dostupnim pravilnicima i smernicama za projektovanje. Dodatno, implementacija metodologije u razvijeni softverski alat omogućava korisniku da na efikasan način vrši analize za različite ulazne podatke i ispita različita varijantna rešenja.

METODOLOGIJA

Metodologija za proračun infiltracionih polja predstavljena u ovom radu je podeljena u tri celine:

1. Kreiranje merodavnih računskih kiša;
2. Proračun merodavnog hidrograma dotoka u infiltraciono polje;
3. Proračun infiltracije i promene nivoa u infiltracionom polju.

U nastavku teksta je detaljno opisana svaka od pomenutih celina, kao i algoritam za simulaciju promene nivoa vode u infiltracionom polju.

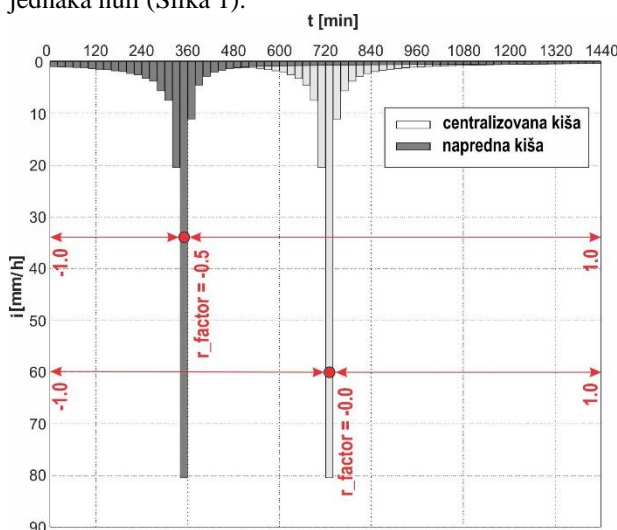
Merodavna računska kiša

Primena računskih kiša konstantnog intenziteta za duža trajanja nije preporučljiva pri projektovanju, jer to može dovesti do ozbiljnog podcenjivanja računskih protoka. Zbog toga je neophodno da se definišu računski hijetogrami koji bi omogućili konstrukciju pouzdanih računskih hidrograma.

U metodologiji usvojenoj ovde, za kreiranje računskih kiša primenjuje se metod naizmeničnih blokova. Metod je zasnovan na prethodno definisanoj zavisnosti visina-trajanje-povratni period kiše (HTP kriva) [11] i omogućava definisanje računskih kiša za sva trajanja manja od 24h. Metoda naizmeničnih blokova podrazumeva da se neravnomerna računska kiša formira na osnovu visina računskih kiša različitih trajanja. Najpre se izabere pogodan vremenski interval ($\Delta t_{kiše}$ = 15, 20, 30, 60... min). Da bi se odredile visine računskih kiša za sva trajanja u usvojenim koracima od

po Δt_{kise} minuta, potrebno je interpolovati zadatu zavisnost HTP za razmatrani povratni period. Zbog prirode ove zavisnosti, linearna interpolacija se sprovodi u odnosu na logaritmovano trajanje kiše ($x = \log tk$). Kada su formirane visine kiše trajanja Δt_{kise} , $2\Delta t_{kise}$, $3\Delta t_{kise}$, $4\Delta t_{kise}$... minuta, „blok“ najkraće kiše postavlja se centralno, dok se razlika visina najkraće kiše (ovde Δt_{kise} minuta) i kiše sledećeg trajanja (ovde $2\Delta t_{kise}$ minuta) raspoređuje desno od centralnog bloka. Postupak se zatim ponavlja i za razlike između visina kiše svih ostalih trajanja tako što se njihovi blokovi raspoređuju naizmenično sa leve i desne strane prethodno postavljenih blokova.

Pozicija najvećeg bloka se definiše faktorom naprednosti kiše (r_factor), koji se kreće u granicama od -1 do 1. Ukoliko se želi kreirati potpuno centralizovana kiša, tj. kiša u kojoj se maksimalni intenzitet javlja u sredini trajanja kišne epizode, vrednost $r_factora$ će biti jednaka nuli (Slika 1).



Slika 1. Centralizovana i napredna kiša

Ukoliko se u formiranju naizmeničnih blokova ne krene od sredine perioda trajanja kiše, naizmenično slaganje blokova kiše se usklađuje sa izabranim položajem maksimuma (vrednosti $r_factora$), pa se na taj način dobija tzv. napredna ($r_factor < 0$, Slika 1) ili zakasnela kiša ($r_factor > 0$).

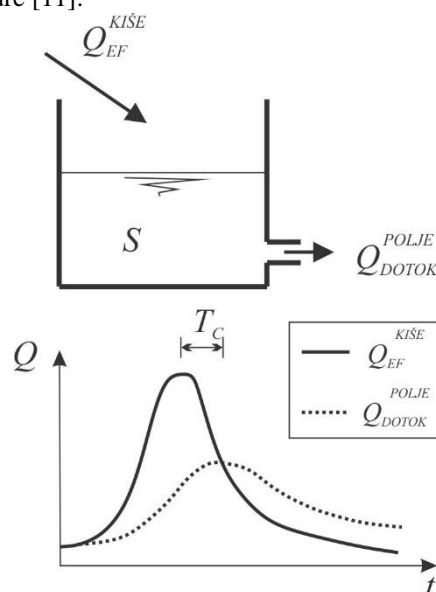
Merodavni hidrogram dotoka u infiltraciono polje

Ulazni hidrogram u infiltraciono polje nastaje transformacijom padavina u oticaj sa sliva, odnosno dela saobraćajnice u ovom slučaju. Postoje različiti modeli za transformaciju padavina u oticaj, manje ili

više složeni, a u ovde opisanoj metodologiji je usvojen model linearnog rezervoara (Slika 2). Ovaj tip rezervoara pretpostavlja linearnu vezu između zapremine vode u rezervoaru S i isticanja iz istog, koje predstavlja dotok u infiltraciono polje – $Q_{ul} = Q_{DOTOK}^{POLJE}$:

$$Q_{ul}(t) = \frac{S(t)}{T_c} \quad (1)$$

gde T_c predstavlja vreme koncentracije za razmatrani sliv, do uliva u infiltraciono polje. Za procenu vremena koncentracije mogu se koristiti razne jednačine iz literature [11].



Slika 2. Linearni rezervoar

Bilansna jednačina za linearni rezervoar se može predstaviti na sledeći način:

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= Q_{kiša}(t) - Q_{ul}(t) = \\ &= A_{sl}C_{ot}I - \frac{S(t)}{T_c} \end{aligned} \quad (2)$$

gde je $Q_{kiša}(t)$ oticaj efektivne kiše (dotok u linearni rezervoar) jednak proizvodu intenziteta kiše I , površine sliva A_{sl} i bezdimenzionalnog koeficijenta oticaja C_{ot} . Jednačina (2) je obična diferencijalna jednačina prvog reda koja se rešava po nepoznatoj $S(t)$ i čije je rešenje dato u sledećem obliku:

$$\frac{S(t)}{T_c} = \frac{S_0}{T_c} e^{-\frac{t}{T_c}} + A_{sl}C_{ot}I \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right) \quad (3)$$

Gde je S_0 početno stanje (zapremina vode) u rezervoaru. Budući da su za dalji proračun potrebne uprosečene

vrednosti ulaznog hidrograma na intervalu Δt , jednačina (3) se prvo integriše od 0 do Δt a zatim se deli sa vrednošću Δt ($\bar{Q}_{ul} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \frac{S(t)}{T_c} dt$), pri čemu se dobija sledeći izraz:

$$\bar{Q}_{ul} = \frac{S(t - \Delta t)}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/T_c}) + A_{st} C_{ot} I \left(1 - \frac{1 - e^{-\Delta t/T_c}}{\Delta t/T_c} \right) \quad (4)$$

Jednačina (4) se dalje koristi za proračun kompletnog ulaznog hidrograma u infiltraciono polje, pri čemu se za početno stanje S_0 uzima stanje iz prethodnog vremenskog koraka $S(t - \Delta t)$.

Modeliranje infiltracionog polja

Na promenu stanja u infiltracionom polju pored ulaznog hidrograma \bar{Q}_{ul} utiču još i tri komponente isticanja, kao što je ilustrovano na sledećoj slici (Slika 3):

- a) Infiltracija kroz dno infiltracionog polja Q_{inf}
- b) Isticanje kroz bušotine Q_b koje povezuju nadsloj vode u infiltracionom polju $H(t)$ sa nivoom podzemne vode ($-NPV$)
- c) Isticanje preko preliva / kroz kolektor (Q_{pr}) koji se nadovezuje na postojeću mrežu.

Kako bi se sračunala (simulirala) promena $H(t)$, potrebno je numerički rešiti sledeću bilansnu jednačinu za infiltraciono polje:

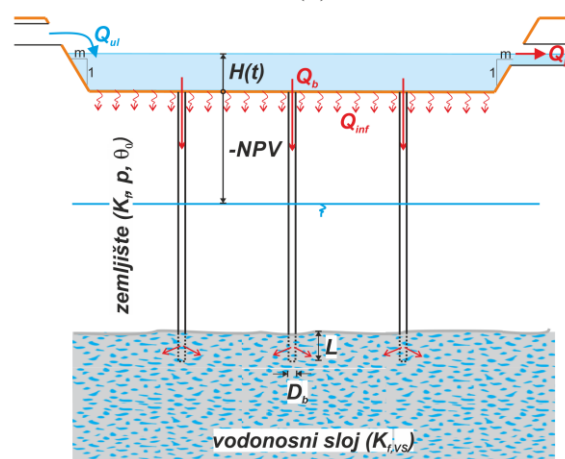
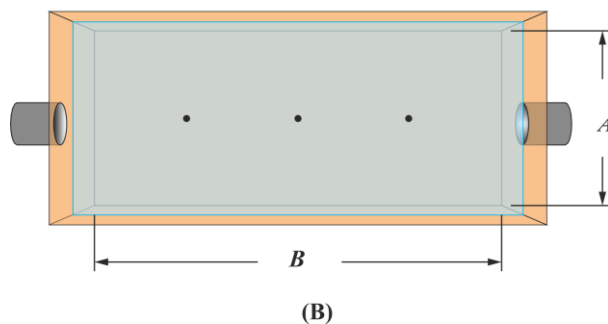
$$\bar{F} \frac{H(t) - H(t - \Delta t)}{\Delta t} = \bar{Q}_{ul} - [Q_{inf}(\bar{H}) + Q_b(\bar{H}) + Q_{pr}(\bar{H})] \quad (5)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{3} [a_1 b_1 + a_2 b_2] + \frac{1}{6} [a_1 b_2 + a_2 b_1] \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= A + 2mH(t) \\ b_1 &= B + 2mH(t) \\ a_2 &= A + 2mH(t - \Delta t) \\ b_2 &= B + 2mH(t - \Delta t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

pri čemu je \bar{F} karakteristična (osrednjena) površina vodenog ogledala u osnovi koja zavisi od $H(t)$ u slučaju trapeznog poprečnog preseka polja, m označava nagib kosine bočnih strana polja ($m = 0$ za pravougaoni poprečni presek), dok su A i B dužina i širina polja u

osnovi. Treba napomenuti da se sve tri komponente isticanja računaju za srednju vrednost nadsloja vode $\bar{H} = \frac{H(t) + H(t - \Delta t)}{2}$ tokom računskog intervala Δt . (A)



Slika 3. Infiltraciono polje trapeznog poprečnog preseka sa svim komponentama bilansa prikazano u: (A) osnovi; (B) poprečnom profilu

Da bi se iz jednačine (5) odredila vrednost $H(t)$, neophodno je matematički opisati sva tri tipa isticanja, što je prikazano u narednim potpoglavljima.

Infiltracija kroz dno infiltracionog polja

Infiltracija kroz dno infiltracionog polja se prema metodologiji računa pomoću modifikovane metode Green Ampt-a [12] koja uzima u obzir uticaj nadsloja vode $H(t)$ na promenu položaja strmog vlažnog fronta $y(t)$ (Slika 4). Ova metoda se zasniva na modifikaciji originalne metode Green Ampt-a [13] i podrazumeva inicijalno zasićen površinski sloj zemljišta, što je na strani sigurnosti jer bi se u suprotnom deo ulaznog hidrograma koristio za zasićavanje ovog sloja.

Infiltracija $Q_{inf}(\bar{H})$ se matematički opisuje sa tri osnovne jednačine. Prema prvoj, brzina infiltracije kroz infiltraciono polje $q_{inf}(t)$ odgovara brzini snižavanja nivoa vode u polju:

$$q_{inf}(t) = - \frac{dH(t)}{dt} \tag{8}$$

Prema drugoj, jednačini bilansa za vlažni front, razlika između trenutne vrednosti $H(t)$ i početne vrednosti H_0 odgovara promeni položaja vlažnog fronta $y(t)$ u odnosu na njegov početni položaj y_0 :

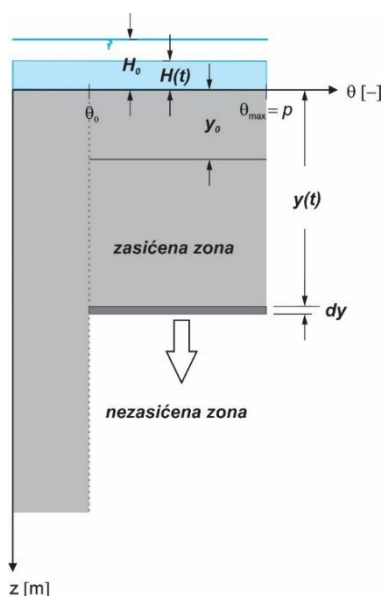
$$H(t) = H_0 - (y(t) - y_0)(p - \theta_0) \tag{9}$$

pri čemu je p poroznost (maksimalna vlažnost) [-], θ_0 je početna vlažnost [-] (manja ili jednaka poroznosti), dok razlika $(p - \theta_0)$ predstavlja raspoloživi retenzioni kapacitet zemljišta.

Treća, dinamička jednačina, opisuje fluks $q_{inf}(t)$ pomoću Darcy-jeve jednačine postavljene između preseka na površini dna infiltracionog polja i preseka na granici između zasićene i nezasićene zone:

$$q_{inf}(t) = K_f \left(1 + \frac{H_k + H(t)}{y(t)} \right) \tag{10}$$

gde je K_f koeficijent filtracije zemljišta infiltracionog polja [m/s], dok je H_k karakteristična vrednost kapilarnog potencijala [m] na prelazu između zasićene i nezasićene zone (karakteristika zemljišta).



Slika 4. Modifikovana metoda Green Ampt-a

Kombinovanjem jednačina (8), (9) i (10) dobija se obična diferencijalna jednačina koja se razdvajanjem promenljivih i integraljenjem u granicama od $(t - \Delta t)$ do t rešava po položaju vlažnog fronta $y(t)$:

$$\frac{c^2 K_f \Delta t}{(1 - c)d} = \frac{c(y(t) - y(t - \Delta t))}{d} - \ln \left(\frac{cy(t) + d}{cy(t - \Delta t) + d} \right) \tag{11}$$

S obzirom da se jednačina (5) rešava u diskretnoj formi, u jednačini (11) su vrednosti H_0 i y_0 zamenjene vrednostima iz prethodnog vremenskog koraka $H(t - \Delta t)$ i $y(t - \Delta t)$, pri čemu je takođe korišćena smena $c = 1 - (p - \theta_0)$ i $d = H_k + H(t - \Delta t) + y(t - t)(p - \theta_0)$. S obzirom da se promenljiva $y(t)$ ne može eksplicitno izraziti iz jednačine (11), primenjuje se iterativni postupak koristeći Newton-Raphson metodu za rešavanje nelinearnih jednačina [14].

Imajući u vidu da je $Q_{inf}(\bar{H}) = q_{inf}(t)\bar{F}$, pri čemu se q_{inf} izražava preko jednačine (8) u diskretnom obliku dok se razlika $H(t - \Delta t) - H(t)$ predstavlja preko $y(t)$ (jednačina 9), konačna forma za proračun $Q_{inf}(\bar{H})$ je sledeća:

$$Q_{inf}(\bar{H}) = (y(t) - y(t - \Delta t))(p - \theta_0) \frac{\bar{F}}{\Delta t} \tag{12}$$

Može se zaključiti da na vrednost $Q_{inf}(\bar{H})$, pored vrednosti \bar{H} , utiču i karakteristike zemljišta (K_f , p i θ_0).

Isticanje kroz bušotine

Ukoliko infiltraciono polje nema dovoljnu vodoprovodljivost (mala vrednost K_f), zbog čega se voda ne drenira dovoljno brzo kroz dno polja, mogu se izvesti duboke bušotine koje prodiru u vodonosni sloj većeg koeficijenta filtracije ($K_{f,VS} > K_f$). Jednačina isticanja kroz bušotinu prečnika D_b se izvodi pod pretpostavkom stacionarnih uslova (nepromenljiv nadsloj vode), pri čemu se podrazumeva isticanje kroz idealnu polusferu na kontaktu bušotine i vodonosnog sloja (Slika 5).

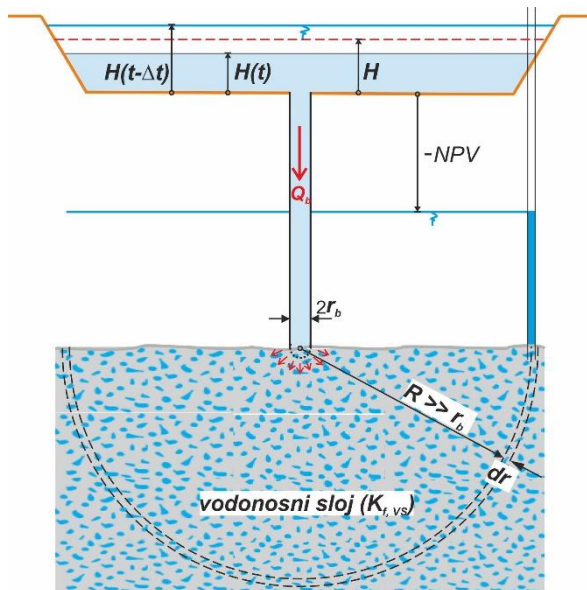
Ukoliko se za nadsloj vode usvoji vrednost \bar{H} koja je uprosečena na intervalu Δt , isticanje iz bušotine se može izraziti preko Darcy-jevog zakona:

$$Q_b(\bar{H}) = - K_{f,VS} \frac{dh}{dr} 2r^2 \pi \tag{13}$$

gde je h visina vodenog stuba iznad nivoa podzemne vode (NPV) na različitim udaljenostima r od bušotine.

Razdvajanjem promenljivih i integraljenjem jednačine od poluprečnika bušotine $r_b = D_b/2$, gde je $h = \bar{H} - NPV$, do dovoljno velikog radijusa $R \gg r_b$ gde je $h = 0$ (uticaj bušotine je zanemarljiv), dobija se sledeći izraz za isticanje (Slika 5):

$$Q_b(\bar{H}) = K_{f,vs} \pi D_b (\bar{H} - NPV) \quad (14)$$



Slika 5. Isticanje kroz bušotinu

Treba imati na umu da se nivo podzemne vode izražava kao negativno rastojanje od dna infiltracionog polja (Slika 5), tako da niži nivo podzemne vode daje veće vrednosti pritiska $\bar{H} - NPV$, a samim tim i veće $Q_b(\bar{H})$. Ukoliko postoji veći broj bušotina ($N_B > 1$ – Slika 3) koje su utisnute dublje u vodonosni sloj ($L > 0$), jednačina isticanja se izražava na sledeći način:

$$Q_b(\bar{H}) = \frac{N_B K_{f,vs} \pi D_b (\bar{H} - NPV)}{C\left(\frac{L}{D_b}\right)} \quad (15)$$

$$C\left(\frac{L}{D_b}\right) = \frac{\ln\left(2\frac{L}{D_b} + \sqrt{1 + \left(2\frac{L}{D_b}\right)^2}\right)}{2\frac{L}{D_b}} \quad (16)$$

gde je $C\left(\frac{L}{D_b}\right)$ korekcija isticanja usled dubljeg ukopavanja u vodonosni sloj (veće L odgovara manjem $C\left(\frac{L}{D_b}\right)$, dakle većem $Q_b(\bar{H})$, dok za $L \rightarrow 0$, $C\left(\frac{L}{D_b}\right) \rightarrow 1$).

Zbog potencijalno nerealnih protoka kroz bušotine koji se mogu dobiti za veće gradijenta u jednačini 15, za proračun isticanja kroz bušotinu se uvodi ograničenje prema kojem brzina isticanja ne može biti veća od $\frac{\sqrt{K_f}}{15}$ što je empirijski kriterijum za maksimalnu brzinu na obodu bunara [15]. Prema tome, ukupni kapacitet svih N_B bušotina je:

$$Q_{b,max} = N_B \left(D_b \pi L + \frac{D_b^2 \pi}{4} \right) \frac{\sqrt{K_{f,vs}}}{15} \quad (17)$$

gde vrednost u zagradi predstavlja ukupnu površinu perforiranog dela cilindrične bušotine kroz koji voda ističe (omotač + baza). Ukoliko je vrednost sračunata pomoću jednačine (15) veća od $Q_{b,max}$, usvaja se $Q_b(\bar{H}) = Q_{b,max}$.

Na osnovu jednačine (15) može se zaključiti da $Q_b(\bar{H})$ zavisi od karakteristika vodonosnog sloja ($K_{f,vs}$, NPV), geometrije (L , D_b) i broja bušotina (N_B).

Isticanje preko preliva

Ukoliko postoji preliv, kao sigurnosni element kojim se “višak” vode iz infiltracionog polja evakuise i sprovodi dalje u mrežu, za proračun stanja u infiltracionom polju neophodno je uzeti u obzir i isticanje preko preliva $Q_{pr}(\bar{H})$. Ova komponenta isticanja se jednostavno određuje na osnovu zadate karakteristične Q-H krive preliva koja daje vezu između dubine vode u infiltracionom polju i protoka preko preliva (npr. kriva Tomphson-ovog, kružnog, ili pravougaonog oštrovičnog preliva). Dakle, za svaku dobijenu vrednost \bar{H} sa unapred definisane Q-H krive se očitava odgovarajuća vrednost $Q_{pr}(\bar{H})$ koja predstavlja srednji protok preliivanja na intervalu Δt . Ukoliko je vrednost \bar{H} manja od kote dna prelivne ivice Z_{dpr} , ne dolazi do preliivanja.

Algoritam proračuna i implementacija metodologije

Algoritam proračuna za infiltraciono polje, kojim se računa nivo vode i sve komponente bilansa, je prikazan na narednoj slici (Slika 6). Ulazni podaci za proračun stanja u infiltracionom polju su prethodno određeni merodavni hidrogram dotoka u polje ($\overline{Q_{ul}}$), početni nivo u infiltracionom polju ($H(t=0)$) i dužina simulacije (t_{sim}). Najpre se proverava da li je prekoračena definisana dužina simulacije, što je uslov za završetak proračuna. U suprotnom se proračun nastavlja usvajanjem pretpostavljene vrednosti za nivo vode u

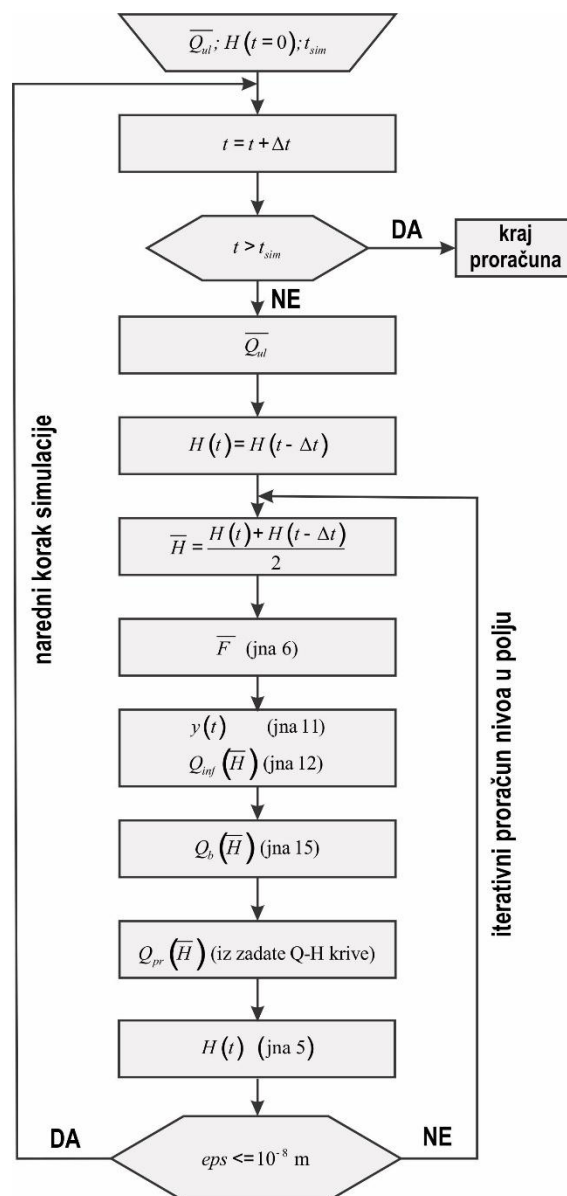
narednom vremenskom trenutku koji je jednak vrednosti nivoa iz prethodnog vremenskog trenutka tj. $H(t) = H(t - \Delta t)$.

Iz prethodno prikazanog opisa metodologije jasno je da sve komponente bilansa u infiltracionom polju, infiltracija $Q_{inf}(\bar{H})$, isticanje kroz bušotine $Q_b(\bar{H})$ i isticanje preko preliva $Q_{pr}(\bar{H})$, zavise od nivoa vode u infiltracionom polju. Osnovna jednačina koja se rešava je jednačine bilansa za infiltraciono polje (jednačina 5), koja se rešava po nepoznatom nivou vode u infiltracionom polju $H(t)$. Da bi se sračunala vrednost $H(t)$ iz jednačine (5), neophodno je primeniti iterativni algoritam proračuna jer promenljiva $H(t)$ figuriše u različitim komponentama bilansne jednačine i ne može se eksplicitno izraziti (u pitanju je (polu)implicitna numerička shema). Objašnjenje iterativnog proračuna nivoa u polju $H(t)$ je dato u nastavku.

Za svaki vremenski korak Δt koristi se sledeći algoritam proračuna:

- 1) Sračuna se $\bar{H} = 0.5(H(t) + H(t - \Delta t))$.
- 2) Sračuna se \bar{F} (jednačina 6).
- 3) Odredi se $y(t)$ (jednačina 11), a zatim se sračuna $Q_{inf}(\bar{H})$ (jednačina 12).
- 4) Sračuna se $Q_b(\bar{H})$ (jednačina 15).
- 5) Za odgovarajuće \bar{H} iz koraka 1, odredi se $Q_{pr}(\bar{H})$ (linearna interpolacija zadate Q-H krive).
- 6) Odredi se nova vrednost $H(t)$ (jednačina 5) i poredi se sa vrednošću iz prethodne iteracije (sa inicijalno pretpostavljenom vrednošću u slučaju prve iteracije).
- 7) Ukoliko se vrednosti razlikuju, algoritam se vraća na proračun \bar{H} sve dok se u dve uzastopne iteracije ne zadovolji kriterijum konvergencije za vrednosti $H(t)$.
- 8) Ukoliko je zadovoljen kriterijum konvergencije za vrednosti $H(t)$ ($< 10^{-8} m$), prelazi se na naredni vremenski korak.

Od prikazanog algoritma se odstupa samo kada se proračunom u tački 6 dobije negativna vrednost nadsloja vode ($H(t) < 0$). U tom slučaju se usvaja $H(t) = 0$, a vrednosti isticanja $Q_{inf}(\bar{H})$, $Q_b(\bar{H})$, $Q_{pr}(\bar{H})$ se preraspodeljuju tako da jednačina bilansa ostane zadovoljena. Fiksiranjem vrednosti $H(t)$ na nulu pretpostavlja se da su bušotine uvek napunjene vodom do kote dna infiltracionog polja (Slika 5), što je na strani sigurnosti jer bi se u suprotnom deo dotoka "utrošio" na njihovo punjenje.



Slika 6. Algoritam proračuna za infiltraciono polje

U slučaju $H(t) \leq 0$ preraspodela protoka se obavlja na sledeći način. Nakon usvajanja vrednosti $H(t) = 0$, $Q_b(\bar{H})$ se preračunava za vrednost $\bar{H} = 0.5H(t - \Delta t)$ pomoću jednačine (15), dok se $Q_{inf}(\bar{H})$ računa iz jednačine (12). Ukoliko je $Q_b(\bar{H}) > \bar{Q}_{ul}$, usvaja se $Q_b(\bar{H}) = \bar{Q}_{ul}$, dok je $Q_{inf}(\bar{H}) = 0$. U suprotnom, ispituje se da li je $Q_{inf}(\bar{H}) + Q_b(\bar{H}) > \bar{Q}_{ul}$. Ukoliko jeste, $Q_b(\bar{H})$ zadržava sračunatu vrednost a preostala razlika se na osnovu jednačine (5) dodeljuje infiltraciji $Q_{inf}(\bar{H}) = H(t - \Delta t) \frac{F}{\Delta t} + \bar{Q}_{ul} - Q_b(\bar{H})$. Na kraju,

ukoliko je $Q_{inf}(\bar{H}) + Q_b(\bar{H}) < \bar{Q}_{ul}$, $Q_b(\bar{H})$ i $Q_{inf}(\bar{H})$ zadržavaju sračunate vrednosti a preostala razlika se dodeljuje prelivanju $Q_{pr}(\bar{H}) = H(t - \Delta t) \frac{\bar{F}}{\Delta t} + \bar{Q}_{ul} - Q_b(\bar{H}) - Q_{inf}(\bar{H})$.

Prethodno opisana metodologija za proračun i analizu infiltracionog polja je implementirana u integrisani softverski alat koji koristi:

- funktionalnost MATLAB softverskog paketa za sve neophodne proračune i
- njegovu integraciju u EXCEL softverski paket za interakciju sa korisnikom, unos ulaznih podataka i pregled rezultata.

Neophodni ulazni podaci za primenu metodologije su:

- podaci za kreiranje merodavne sintetičke kiše:
 - trajanje kiše – t_K [min]
 - korak diskretizacije – Δt_K [min]
 - faktor naprednosti – r_factor [-]
- podaci za generisanje hidrograma dotoka:
 - površina sliva koji pripada polju – A_{SL} [m²]
 - koeficijent oticaja – C_{OT} [-]
 - vreme koncentracije T_{CONC} [min]
- podaci za simulaciju infiltracionog polja:
 - karakteristike zemljišta:
 - koeficijent filtracije – K_f [m/s]
 - poroznost – p [-]
 - početna vlažnost – θ_0 [-]
 - geometrija infiltracionog polja:
 - širina u osnovi – A [m]
 - dužina u osnovi – B [m]
 - nagib bočnih strana – m [-]
 - maksimalna dubina – H_{MAX} [m]
 - karakteristike bušotina u infiltracionom polju:
 - broj bušotina – N_b [-]
 - prečnik bušotina – D_b [m]
 - dužina penetracije vod.sloja – L [m]
 - koef. fil. vod. sloja – $K_{f,VS}$ [m/s]
 - nivo podzemne vode – NPV [m]
 - parametri simulacije:
 - početni nivo vode – H_0 [m]
 - trajanje simulacije – t_{SIM} [h]
 - Q-H kriva preliva (opciono)

PRIMER PRIMENE

Predstavljena metodologija prikazana je na praktičnom primeru, izabranom od niza infiltracionih polja

projektovanih za prikupljanje oticaja sa železnice Novi Sad – Subotica na dvadeset km dugačkoj deonici Zobnatica – Naumovićevo. U ovom radu analizirano je infiltraciono polje koje se nalazi na sredini pomenute deonice, a analiza promene nivoa u njemu urađena je za tri vrste sintetičkih kišnih epizoda kreiranih metodom alternativnih blokova (napredna, centralna i zakasnela kiša). Dobijeni rezultati terenskih istraživanja kao i ulazni podaci korišćeni za proračun prikazani su u nastavku.

Ulazni podaci

Imajući u vidu da se sistemi za odvodnjavanje autoputeva i aerodroma projektuju na računsku kišu desetogodišnjeg povratnog perioda ($T = 10$ god), isti povratni period usvojen je i u slučaju železnice. Kako bi analiza bila relevantna, usvojena je HTP kriva sa najbliže meteorološke stanice Palić (Slika 7). Metodom alternativnih blokova kreirana je dvadesetčetvorčasovna kiša ($t_K = 1440$ min) sa korakom diskretizacije od $\Delta t_K = 10$ min i tri različite vrednosti faktora naprednosti ($r = -0.9$, $r = 0$, $r = 0.9$) koje opisuju naprednu, centralizovanu i zakasnelu kišu. Za razliku od kiša konstantnog intenziteta, sintetičke kiše kreirane metodom alternativnih blokova uzimaju u obzir i značajne visine padavina kroz dugo trajanje kišne epizode t_K , ali i neuniformnu raspodelu intenziteta, od kojih su neki ekstremni, kroz sitnu diskretizaciju Δt_K . Zbog toga su ovako kreirane sintetičke kiše merodavne za projektovanje infiltracionih polja i drugih prirodom inspirisanih rešenja.



Slika 7. HTP kriva sa meteorološke stanice Palić za povratni period $T = 10$ god

Za transformaciju padavina u oticaj koji predstavlja dotok u infiltraciono polje koristi se model linearnog rezervoara koji koristi tri parametra: A_{SL} , T_{CONC} i C_{OT} . Površina sliva je $A_{SL} = 6630$ m², a vrednost

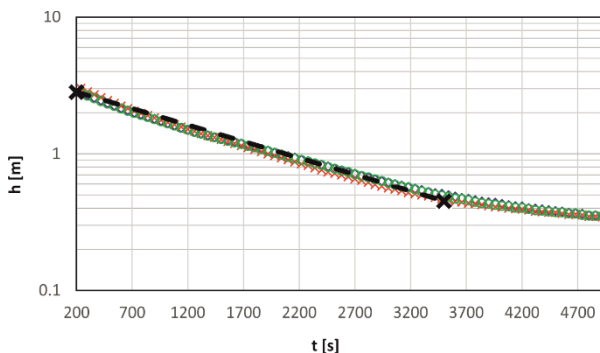
$T_{CONC} = 17.5$ min dobijena je primenom obrasca FAA [11] u kojem figurišu dužina sliva $L_{SL} = 430$ m (u ovom slučaju rastojanje između razmatranog i prvog uzvodnog infiltracionog polja), kao i prosečan podužni nagib terena $S = 0.5\%$ na slivu. Treba napomenuti da C_{OT} u ovom slučaju ne predstavlja koeficijent oticaja već zapreminski udeo padavina koji se prikuplja u drenažnim cevima koje vodu transportuju do infiltracionog polja. S obzirom da se ispod pruge nalazi sloj tucanika visoke vodoprovodljivosti na čijem dnu su postavljene drenažne cevi, vrednost $C_{OT} = 0.9$ usvojena je u ovom radu.

Konačno, kako bi se simulirala dinamika punjenja i pražnjenja infiltracionog polja usled definisane sintetičke kiše i zadatih karakteristika sliva, neophodno je definisati osnovne geometrijske i hidro-mehaničke karakteristike razmatranog polja. Projektovane dimenzije trapeznog polja, koje su korišćene i u ovom radu, su $A = 12$ m, $B = 20$ m, $H_{MAX} = 0.8$ m, sa nagibom stranica 1:1.5 ($m = 1.5$). Imajući u vidu da je infiltraciono polje ukopano u 15 m dubok sloj lesnog zemljišta, iz literature [16] je usvojena prosečna vrednost poroznosti za les $p = 0.45$, dok je za početnu vlažnost usvojeno $\theta_0 = 0.15$. Koeficijent filtracije K_f za pomenuto lesno zemljište određen je na osnovu Le Franc-ovog testa [17] koji podrazumeva nalivanje vode u istražnu bušotinu i merenje opadanja nivoa u vremenu. Na Slici 8 su prikazani osmotreni nivoi h u bušotini u funkciji vremena za tri uzastopna nalivanja. Koeficijent K_f se određuje pod pretpostavkom kvazi stacionarnog isticanja iz istražne bušotine na osnovu sledećeg izraza:

$$K_f = \frac{D_b \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)}{4(t_1 - t_0)} C \left(\frac{L}{D_b}\right) \quad (18)$$

gde je vrednost $C(L/D_b) = 0.0986$ sračunata na osnovu jednačine (16) za prečnik istražne bušotine $D_b = 0.131$ m i dubinu penetracije $L = 3$ m, dok su h_0 i h_1 nivoi vode u bušotini u trenucima t_0 i t_1 . Uz zanemarivanje merenih vrednosti h na samom početku testa, vrednosti h između $t_0 = 200$ s i $t_1 = 3500$ s mogu se aproksimirati pravom u $\log(h)$ razmeri (isprekidana linija na Slici 8). Na osnovu jednačine (18) dobija se vrednost $K_f = 1.5 \times 10^{-6}$ m/s. S obzirom na slabu vodoprovodljivost lesnog zemljišta u koje je ukopano infiltraciono polje, radi bržeg pražnjenja polja neophodno je predvideti i bušotine koje prodiru u vodonosni sloj (pesak) znatno većeg koeficijenta filtracije, $K_{f,VS} = 1 \times 10^{-4}$ m/s. Za analizu u ovom radu usvojeno je $N_b = 6$ bušotina prečnika $D_b = 0.4$ m i dužine penetracije vodonosnog sloja $L = 3$ m, pri

čemu se nivo podzemne vode nalazi na dva metra ispod dna infiltracionog polja ($NPV = -2.0$ m).



Slika 8. Rezultati Le Franc-ovog testa nalivanja

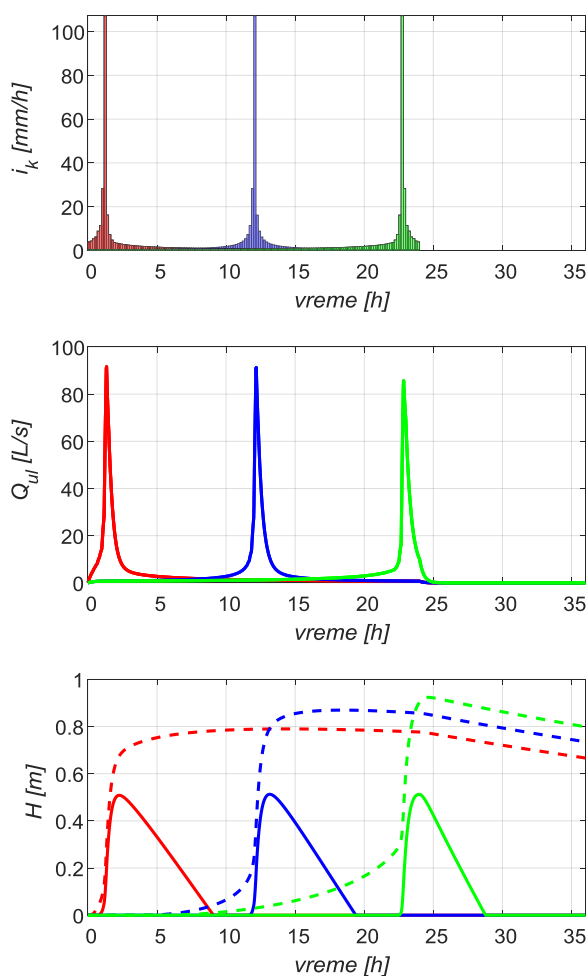
Rezultati i diskusija

Na Slici 9 su prikazani rezultati proračuna dobijeni predstavljenom metodologijom. Na gornjem grafiku su prikazane sintetičke kišne epizode za $r = -0.9$ (crveni hijetogram), $r = 0$ (plavi hijetogram) i $r = 0.9$ (zeleni hijetogram), na centralnom grafiku su predstavljeni odgovarajući transformisani hidrogrami dotoka u infiltraciono polje, dok su na donjem grafiku prikazane promene nivoa vode u polju. Isprekidanom linijom su prikazane promene nivoa kada nema bušotina ($N_b = 0$), dok su punom linijom prikazani nivoi kada je $N_b = 6$.

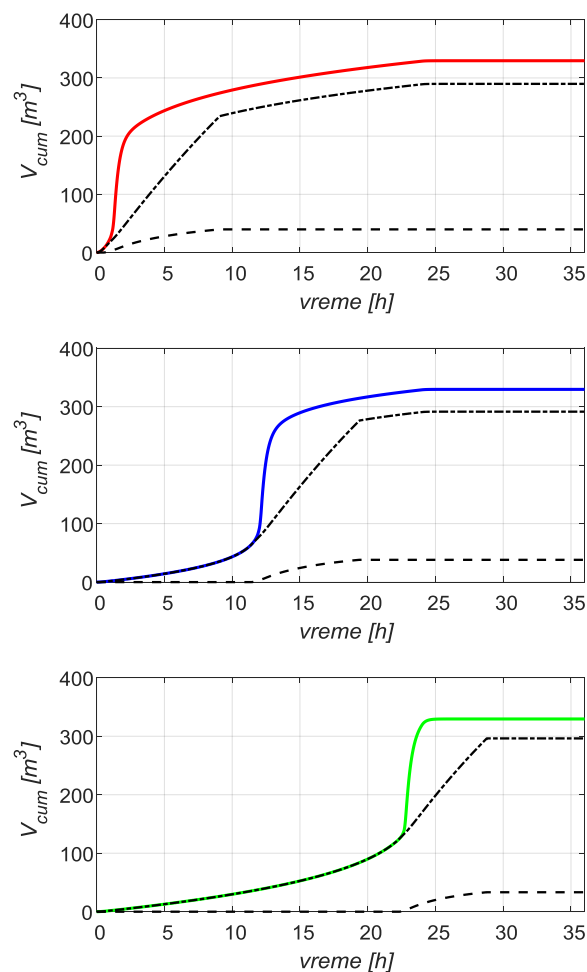
I pored činjenice da je ukupna zapremina padavina ista za sve tri vrednosti r i iznosi $P_{uk} = 55.23$ mm, dinamika punjenja i pražnjenja infiltracionog polja se menja u zavisnosti od faktora naprednosti kiše. Ako se posmatra slučaj bez bušotina ($N_b = 0$), u slučaju zakasnele kiše ($r = 0.9$) ostvaruje se najveća dubina punjenja polja ($H = 0.92$ m – zelena isprekidana linija), koja ubrzo nakon dostizanja pika počinje da opada. Ovakva dinamika promene nivoa u polju javlja se usled prvobitno manjih vrednosti dotoka koje dovode do postepenog porasta H , pa se nadolazeći pik ulaznog hidrograma javlja pri značajnijim dubinama ($H = 0.29$ m). Najmanja dubina punjenja ostvaruje se u slučaju napredne kiše ($r = -0.9$) za koju pik nivograma u infiltracionom polju nije jasno izražen ($H = 0.79$ m), već “razvučen“ u vremenu (crvena isprekidana linija). Razlog tome je rana pojava pika ulaznog hidrograma pri delimično praznom infiltracionom polju, čime se značajno povećava H ali samim tim i infiltraciju Q_{inf} , pa nadolazeće niže vrednosti dotoka Q_{ul} u najvećoj meri samo održavaju već dostignuti pik nivograma.

Slika 9 jasno pokazuje da simulirane vrednosti dubine u polju premašuju maksimalnu projektovanu dubinu polja

(H_{MAX}) u slučaju centralizovane i zakasnele kiše, usled čega će doći do izlivanja vode iz infiltracionog polja. U slučaju napredne kiše u polju se dostiže maksimalna dubina bliska vrednosti H_{MAX} . Dodatno, sa dijagrama promene dubine se može uočiti da je pražnjenje infiltracionog polja, putem infiltracije kroz slabo propusno lesno zemljište, izrazito sporo i da može potrajati i nekoliko dana. Posledično, dovodi se u pitanje efikasnost infiltracionog polja u pogledu prihvatanja uzastopnih kišnih epizoda. Iz priloženog proizilazi da razmatrano polje nije u stanju da prihvati merodavnu kišu povratnog perioda $T=10$ godina.



Slika 9. Gore – sintetičke kišne epizode za $r = -0.9$ (crveni hijetogram), $r = 0$ (plavi hijetogram) i $r = 0.9$ (zeleni hijetogram); Centar – hidrogrami dotoka Q_{ul} u infiltraciono polje za tri sintetičke kiše; Dole – odgovarajući nivoi vode H u infiltracionom polju sa i bez bušotina (pune i isprekidane linije, redno)



Slika 10. Kumulativne zapremine dotoka (V_{ul} – pune linije), infiltracije (V_{inf} – isprekidane linije) i isticanja kroz bušotine (V_b – tačka-crta linije) za naprednu (grafik gore), centralizovanu (grafik centar) i nazadnu (grafik dole) kišnu epizodu.

Da bi se prevazišli prethodno identifikovani problemi, u matematički model razmatranog infiltracionog polja je uvršćeno ukupno šest bušotina ($N_b = 6$), u cilju ubrzanja pražnjenja polja. Kao i u slučaju bez bušotina ($N_b = 0$), najveća vrednost simulirane dubine u polju se javlja u slučaju zakasnele kiše ($H = 0.52$ m), s tim što su sada razlike u pikovima za različite sintetičke kiše neznatne (do par cm). U poređenju sa slučajem bez bušotina, smanjenje pika je između 30 i 40 cm zavisno od faktora naprednosti kiše.

Na Slici 10 su prikazane kumulativne krive dotoka V_{ul} (pune linije), infiltracije V_{inf} (isprekidane linije) i isticanja kroz bušotine V_b (tačka-crta linije) za tri

analizirane kišne epizode. Rezultati jasno pokazuju dominantnu ulogu bušotina u odnosu na infiltraciju kroz dno infiltracionog polja, jer u sva tri slučaja kompletan dotok (puna linija) ističe kroz bušotine (tačka-crta linija) sve do pojave pika ulaznog hidrograma (najstrmiji deo krive V_{ul}) kada se manji deo dotoka (11% do 13%) infiltrira kroz dno polja (isprekidana linija). Razlog ovako neravnomernoj preraspodeli dotoka je za skoro dva reda veličine veća vrednost $K_{f,VS} = 1 \times 10^{-4}$ m/s u odnosu na $K_f = 1.5 \times 10^{-6}$ m/s.

Osnovna prednost infiltracionog polja sa bušotinama je znatno kraće vreme pražnjenja koje je svedeno na razumnih 4 – 7 h. Rezultati jasno pokazuju da najkraće vreme pražnjenja odgovara zakasneloj kiši jer dotok u polje Q_{ul} prestaje ubrzo nakon dostizanja pika ($Q_{ul} = 0$), pa se polje nesmetano prazni isticanjem kroz bušotine i infiltracijom kroz dno. U slučaju napredne kiše dijagram $H(t)$ je nešto “razvučeniji” jer je $Q_{ul} > 0$ i nakon dostizanja pika ulaznog hidrograma što produžava vreme pražnjenja.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena nova metodologija za proračun i analizu infiltracionih polja za prihvatanje oticaja sa saobraćajnica. Metodologijom su obuhvaćene hidrološke i hidrauličke analize neophodne za dimenzionisanje infiltracionih polja: 1) kreiranje merodavne računске kiše, 2) transformacija padavina u merodavni hidrogram dotoka u infiltraciono polje, 3) proračun infiltracije i promene nivoa u infiltracionom polju.

Računska kiša se kreira metodom alternativnih blokova uz definisanje odgovarajuće HTP krive, dužine trajanja kiše, dužine trajanja pojedinačnih blokova, kao i faktora naprednosti kiše. Sintetičke kiše definisane na ovaj način su merodavne za dimenzionisanje infiltracionih polja jer su njima, za razliku od kiša konstantnog intenziteta, u obzir uzeti veći intenziteti kraćeg trajanja i značajna ukupna količina padavina karakteristična za kiše dužeg trajanja. Računska kiša se analitičkom metodom linearnog rezervoara transformiše u hidrogram oticaja koji predstavlja ulazni hidrogram u infiltraciono polje. Proračun promene nivoa u infiltracionom polju se vrši pomoću analitičkih funkcija koje se sukcesivno primenjuju u svakom računskom koraku, a koje opisuju infiltraciju kroz polje i isticanje kroz bušotine koje se protežu do dubljeg vodonosnog sloja većeg koeficijenta filtracije. Infiltracija kroz polje se opisuje modifikovanom metodom Green-Ampt-a, dok se isticanje kroz bušotine opisuje formulom

zasnovanom na pretpostavkama Le Franc-ovog testa nalivanja. Pored tačnosti, glavna prednost prikazane metodologije su njena efikasnost i robusnost za šta su zaslužne pomenute analitičke funkcije. Metodologija je implementirana u integrisani softverski alat (aplikaciju) koji korisniku omogućava da na efikasan način izvrši simulacije za različite ulazne podatke.

Opisana metodologija je primenjena na realnom primeru projektovanog infiltracionog polja koje je ukopano u relativno slabo propusno lesno zemljište. Analize su sprovedene za tri tipa računskih kiša (napredna, centralizovana i zakasnela), trajanja 24 h i povratnog perioda 10 god. Rezultati pokazuju da razmatrano polje projektovanih gabarita nije u mogućnosti da prihvati i u razumnom vremenu infiltrira oticaj sa pripadajuće slivne površine. Međutim, ukoliko se u dnu polja izvede šest bušotina, koje se pružaju do dubljeg vodonosnog sloja značajno većeg koeficijenta filtracije od lesnog zemljišta, infiltraciono polje u potpunosti ispunjava svoju funkciju – ne dolazi do izlivanja vode u okolno zemljište a vreme pražnjenja se svodi na prihvatljivih nekoliko sati.

LITERATURA

- [1] M. E. Dietz, “Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions,” *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 186, no. 1–4, pp. 351–363, 2007.
- [2] N. R. Siriwardene, A. Deletic, and T. D. Fletcher, “Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study,” *Water Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 1433–1440, 2007.
- [3] L. Mohd Sidek, K. Treasure Takara, and A. Ab Ghani, “Evaluation of infiltration engineering and storage tank systems For improved stormwater management,” in *International Conference on Urban Hydrology for the 21st Century, Kuala Lumpur*, 2002, no. October, pp. 535–548.
- [4] CIRIA, *The SUDS manual*. London: CIRIA, 2015.
- [5] G. A. Burton Jr. and R. Pitt, *Stormwater Effects Handbook A Toolbox for Watershed Managers, Scientists, and Engineers*. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [6] P. S. Mikkelsen, M. Häfliger, M. Ochs, J. C. Tjell, P. Jacobsen, and M. Boller, “Experimental assessment of soil and groundwater contamination from two old infiltration systems for road run-off in Switzerland,” *Sci. Total Environ.*, vol. 189–190, no. 96, pp. 341–347, 1996.

- [7] E. Alfakih, S. Barraud, and I. Martinelli, "A study of stormwater infiltration system feasibility and design," *Water Sci. Technol.*, vol. 39, no. 2, pp. 225–231, 1999.
- [8] JP Putevi Srbije, "Konstruktivni elementi puteva - Sistem za odvodnjavanje," in *Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji*, Beograd: JP Putevi Srbije, 2012.
- [9] A. Đukić, M. Stanić, J. Plavšić, and J. Despotović, *Odvodnjavanje puteva*. Beograd: Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet; Međunarodni centar za istraživanje i obuku u oblasti urbanog odvodnjavanja, 2022.
- [10] New Jersey Department of Environmental Protection, "Chapter 10.2: Infiltration Basins (Large Scale)," in *New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual*, New Jersey Department of Environmental Protection, 2004.
- [11] V. Te Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [12] Z. Vasilić, A. Randjelović, M. Stanić, and D. Prodanović, "Faculty of Civil Engineering," in *Zbornik radova Građevinskog fakulteta međunarodne konferencije Savremena dostignuća u građevinarstvu*, 2014, pp. 633–640.
- [13] W. H. Green and G. A. Ampt, "Studies on Soil Physics," *J. Agric. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–14, 1911.
- [14] J. D. Hoffman, *Numerical methods for engineers and scientists*, Second. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [15] A. Randjelović, Ž. Vasilić, M. Stanić, and N. Jaćimović, "Kriterijumi za proračun i projektovanje izdašnosti bunara/Criteria for Water Well Design," *Voda i Sanit. Teh.*, no. 5, pp. 17–26, 2011.
- [16] R. H. Brooks, and A. T. Corey, *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Papers, vol. 3, pp. 1–27, 1964.
- [17] J. P. Powers, A. B. Crowin, P. C. Schmall, and W. E. Kaeck, *Construction dewatering and Groundwater Control*. John Wiley & Sons, 2007.

METHODOLOGY FOR OPERATIONAL ANALYSIS OF INFILTRATION FIELDS FOR ROAD RUNOFF

by

Željko VASILIĆ, Filip STANIĆ, Anja RANĐELOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

Stormwater infiltration fields are one of sustainable measures used for the control of road runoff. Field's retention space ensures a reduction in peak runoff values, while runoff quality is also improved as a result of infiltration to the surrounding soil. To ensure the efficiency and sustainable functioning of the infiltration field, design procedure should carefully address the following: 1) selection of the proper design storm and 2) all aspects relevant for soil infiltration. Document "Guidelines for the road design in the Republic of Serbia" is available to engineers dealing with the road drainage design in Serbia. However, it does not recognize this type of engineering objects. Basic guidelines and recommendations for the design can be found in literature, but also without a detailed description of the design procedure and infiltration

calculation. This paper presents a comprehensive methodology for the calculation and operational analysis of infiltration fields for road runoff. Presented methodology encompasses all relevant hydrological and hydraulic analyses in detail, which overcomes the shortcomings present in currently available regulations and design guidelines. The methodology was applied on a real example of an infiltration field intended for runoff control from the section of the railway Novi Sad - Subotica. Methodology is implemented in a software tool, allowing the user to efficiently perform analyses for different input data and investigate alternative designs.

Key words: Infiltration fields, stormwater infiltration, runoff