

Primljen / Received: 6.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 22.6.2018.

Prihvaćen / Accepted: 20.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.9.2018.

Metodologija definiranja mjerodavne oborine za dimenzioniranje infiltracijskih sustava

Autori:



Dr.sc. **Nino Kravica**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
nino.kravica@gradri.uniri.hr



Krešimir Jaredić, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
jaredic.kresimir@gmail.com



Doc.dr.sc. **Josip Rubinić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
[jrubic@gradri.uniri.hr](mailto:jrubinic@gradri.uniri.hr)

Prethodno priopćenje

Nino Kravica, Krešimir Jaredić, Josip Rubinić

Metodologija definiranja mjerodavne oborine za dimenzioniranje infiltracijskih sustava

U radu je predstavljena metodologija definiranja mjerodavne oborine za dimenzioniranje infiltracijskih sustava za odvodnju oborinskih voda prema integralnom pristupu. Predloženi proračuni temelje se na numeričkim modelima za proračun otjecanja i infiltracije oborine u upojnim građevinama. Definirane su preliminarnе krivulje mjerodavne oborine za područje Rijeke, te su prikazani rezultati analize osjetljivosti numeričkog modela. Također, dan je primjer dimenzioniranja infiltracijske građevine. Naglašena je važnost sukcesivnog proračuna na oborine različitih trajanja, kako bi se sustav dimenzionirao na kritični slučaj.

Ključne riječi:

LID, BMP, odvodnja oborinskih voda, mjerodavna oborina, kinematički val, trajanje oborine

Preliminary report

Nino Kravica, Krešimir Jaredić, Josip Rubinić

Methodology for defining the design storm for sizing the infiltration system

A methodology aimed at defining design storm for sizing infiltration systems, as a part of the stormwater management according to the low impact development approach, is presented in the paper. The proposed analyses are based on numerical models for simulating the runoff and discharge of rainfall into infiltration systems. Preliminary design-storm curves for Rijeka are developed, and results of the numerical model sensitivity analysis are presented. An example of the infiltration system design is also shown. The importance of successive analysis of different durations of rainfall, so as to define a critical design situation, is emphasized.

Key words:

LID; BMP, stormwater management, design storm, kinematic wave, rainfall duration

Vorherige Mitteilung

Nino Kravica, Krešimir Jaredić, Josip Rubinić

Methodologie zur Bestimmung relevanter Niederschläge für die Dimensionierung von Infiltrationssystemen

In der Abhandlung wird die Methodologie zur Bestimmung relevanter Niederschläge für die Dimensionierung von Infiltrationssystemen für die Ableitung von Niederschlägen nach dem integralen Ansatz vorgestellt. Die vorgeschlagenen Berechnungen basieren auf den numerischen Modellen für die Berechnung des Abflusses und der Infiltration der Niederschläge in saugfähigen Objekten. Definiert werden vorläufige Kurven relevanter Niederschläge für das Gebiet von Rijeka und es werden die Ergebnisse der Analyse der Empfindlichkeit des numerischen Modells präsentiert. Darüber hinaus wird ein Beispiel der Dimensionierung des Infiltrationsobjektes dargestellt. Betont wird die Wichtigkeit der sukzessiven Berechnung für Niederschläge von unterschiedlicher Dauer, um das System für einen kritischen Fall zu dimensionieren.

Schlüsselwörter:

LID, BMP, Ableitung von Niederschlägen, relevanter Niederschlag, kinematische Welle, Niederschlagsdauer

1. Uvod

Posljednjih nekoliko desetljeća sve se češće pojavljuju ekstremne oborine i poplave na području Republike Hrvatske, s najizraženijim ekstremima na jadranskoj obali [1, 2]. Posebno su ugrožene urbane sredine u kojima poplave nastaju kao kombinacija nagle i neplanske urbanizacije, neodržavanja sustava odvodnje te sve češćih kratkotrajnih jakih oborina [3]. Rezultati provedenih analiza trenda pojava kratkotrajnih jakih oborina za Split i Varaždin, kao pokazatelja maritimnog i kontinentalnog režima oborina, pokazali su statistički neznatnu prisutnost pojačanja kratkotrajnih jakih oborina na analiziranim lokalitetima [4]. Stoga je zaključeno da se uzroci sve učestalijih problema koji se javljaju s oborinskom odvodnjom moraju tražiti izvan domene mogućih vremenskih promjena značajki kratkotrajnih jakih oborina.

Okvirni plan za umanjene rizika od nepogoda iz Sendaia za razdoblje 2015. - 2030. godine naglašava važnost sprječavanja nepovoljnog utjecaja urbanizacije i jačanja otpornosti urbanih sredina na rizik od poplava [5]. Negativni aspekti urbanizacije i tradicionalnog pristupa odvodnji oborinskih voda već su odavno poznati i detaljno dokumentirani u literaturi: povećava se volumen i brzina otjecanja oborina [6], skraćuje se vrijeme koncentracije [7] te se narušava kvaliteta vode [8]. Alternativa tradicionalnim sustavima odvodnje je integralni pristup - tzv. *Low Impact Development* (LID) ili *Best Management Practice* (BMP) - koji se temelji na principu manjih intervencija u prostoru kojima se hidrološke karakteristike, ponajprije propusnost podloge, približavaju prirodnom stanju [9].

Dobrobiti LID pristupa detaljno su istražene u različitim okolnostima i na različitim područjima [7, 9-11]. Konstrukcijska rješenja najčešće se temelje na izgradnji infiltracijskih sustava, kao što su bioretencije [12], propusni kolnici [13] te upojni bunari i infiltracijski jarci [14]. U većem dijelu Europe, a posebice u SAD-u i Australiji, LID je već dulje vremena prvi odabir kod planiranja i projektiranja sustava odvodnje oborinskih voda. S druge strane, u Hrvatskoj se tek pred desetak godina počelo razmišljati o integralnom pristupu odvodnji i tretmanu oborinskih voda [15-18], pa i provoditi takva rješenja [19].

Kako bi se što preciznije predvidjeli i spriječili negativni učinci ekstremnih oborina, LID pristup moraju pratiti pouzdane metode hidroloških i hidrauličkih proračuna, a izračunane vrijednosti moraju biti precizno kvantificirane. S jedne strane, predimenzionirani sustavi imaju negativan ekonomski učinak, a ponegdje i neprimjereno koncentriraju prevelike ispuste oborinskih voda, dok s druge strane, poddimenzionirani sustavi ne samo da ugrožavaju urbane sredine nekontroliranim otjecanjem oborina, već mogu imati i štetan utjecaj na ekosustav. U slučaju ekstremnih oborina te kada je sustav nepropisno održavan ili potkapacitiran, onečišćene oborinske vode se neposredno, bez ikakva tretmana, prelijevaju i otječu u okoliš [20]. Opasnost od onečišćenja posebno je prisutna u

priobalnim krškim sredinama [21]. Uz to, europska Okvirna direktiva o vodama (WFD) sugerira kako bi sve europske države trebale aktivno raditi na sprječavanju najčešćih uzroka zagađenja voda, što uključuje i onečišćenje oborinskim vodama [22].

U inženjerskoj praksi, pogotovo u Hrvatskoj, još uvijek prevladavaju zastarjele i neodgovarajuće metode proračuna sustava odvodnje oborinskih voda, posebice infiltracijskih građevina, ključnih objekata prema LID pristupu. Vrlo često se može naići na proračune upojnih bunara prema Pönningeru [23], koji se temelji na jednostavnoj empirijskoj formuli i potpuno zanemaruje značajke oborine kao ulaznog parametra. Također, prisutni su i proračuni koji se sastoje od racionalne formule za proračun otjecanja oborine [24] te jednostavne formule za procjenu potrebnog volumena infiltracijskog sustava (npr. [25]). Takvi proračuni temelje se na bilanci ukupnih vremenski uprosječenih volumena čime se zanemaruje vremenska raspodjela oborina, dotoka i razina voda u infiltracijskom sustavu. Osim toga, uglavnom se provode za kratka trajanja koja vrlo često ne odgovaraju kritičnim situacijama. U novije vrijeme, za montažne ispune infiltracijskih sustava, počeli su se primjenjivati proračuni prema njemačkoj normi *DWA-A 138E* [26], koja zahtijeva da se proračun provede za različita trajanja oborine kako bi se pronašao kritični slučaj, ali također predlaže jednostavni proračun bilance vremenski uprosječenih volumena.

U ovome je radu razvijena i predstavljena metodologija optimalnog dimenzioniranja infiltracijskih sustava kao integralnog dijela sustava za odvodnju oborinskih voda. Predloženi pristup temelji se na kombinaciji numeričkih modela uz ulazni parametar definiran vremenski promjenjivom oborinom, tzv. *mjerodavnom oborinom*. Uz to, metoda uključuje sukcesivni proračun različitih trajanja oborine, kako bi se infiltracijski sustav dimenzionirao na kritični slučaj. Spomenuti je pristup testiran na primjeru infiltracijskog sustava na području Rijeke, koju karakteriziraju iznimno veliki intenziteti oborina za sva trajanja u rasponu do 24 sata [27]. U tom kontekstu, glavni ciljevi ovoga rada su:

- definirati preliminarne krivulje mjerodavne oborine za područje Rijeke
- usporediti razlike između tradicionalnog pristupa ravnomjernog intenziteta (HTP krivulje) i pristupa vremenski promjenjive mjerodavne oborine te istražiti njezin utjecaj na hidrogram otjecanja i promjenu volumena infiltracijskog sustava
- provesti analizu osjetljivosti modela na mjerodavne ulazne parametre (trajanje oborine, duljina sliva, vrijeme infiltracije)
- prikazati primjer dimenzioniranja infiltracijskog sustava prema predloženoj metodi.

Konačno, metoda optimalnog dimenzioniranja analiziranog infiltracijskog sustava dodatno je istražena kroz proračun funkcionalnosti infiltracijske građevine tijekom jednog zabilježenog izrazito jakog kišnog događaja.

2. Metodologija

Metodologija optimalnog proračuna infiltracijskih sustava sastoji se od definiranja odgovarajućih numeričkih modela za proračun površinskog otjecanja oborina te promjene volumena vode u infiltracijskom sustavu uz odgovarajuće definiranu mjerodavnu oborinu za određeno područje. Cjelokupni model, odnosno svi proračunski algoritmi, implementirani su u programskom jeziku Python [28].

2.1. Mjerodavna oborina za projektiranje

Mjerodavna oborina (eng. *design storm*), za razliku od ravnomjernog intenziteta oborine dobivenog iz HTP ili ITP krivulja, definirana je vremenski varijabilnim intenzitetom kako bi se što realnije prikazala stvarna oborina [9]. Vrlo detaljan i aktualan pregled mogućnosti korištenja mjerodavne oborine dali su Watt i Marsalek [29]. U Hrvatskoj je do sada bilo samo nekoliko pokušaja definiranja mjerodavne oborine (ponekad nazvane i projektni pljusak) u koji se ubraja i ovaj rad. Prema Bonacciju [30], prvi je takav pokušaj napravljen u radu Bonaccija i Stupala iz 1979. za Dalmaciju na osnovi, kako sam autor ističe, "predmetnom nevelikog broja uzoraka oborina" s ombrografskih postaja Split-Marijan, Sinj, Zadar i Knin, pri čemu su analizirana trajanja samo do 60 minuta, a rezultati dobiveni osrednjavanjem registriranih jakih oborina. Dulja trajanja su analizirana u studiji [31], za trajanja od 20 minuta do 24 sata, pri čemu su provedene obrade postaja Split - Marijan i Split - Aerodrom na jedan jednostavan način - osrednjavanjem svih analiziranih oborina 8 do 24 sata. Problematikom definiranja oblika mjerodavne oborine za Osijek bavili su se Maričić i sur. [32], ali također temeljeno na osrednjavanju značajki odabranih značajnijih oborina. Stoga još uvijek ne postoje definirane krivulje mjerodavne oborine niti za jedan grad u Hrvatskoj.

U ovom je radu prikazana metodologija i preliminarni rezultati proračuna mjerodavne oborine za grad Rijeku. U tu je svrhu primijenjena metoda prosječne varijabilnosti oborinskog intenziteta [33], jer se pomoću nje definiraju determinističke vrijednosti mjerodavne oborine određenog trajanja i povratnog perioda. Te su vrijednosti jednostavnije za primjenu u praksi u usporedbi s probabilističkim pristupom metode kvartilnih krivulja [34], vrlo čestim u novije vrijeme, a daju prihvatljivu aproksimaciju karakterističnog oblika kišnog pljuska. Odabrana metodologija obrade kratkotrajnih jakih oborina prema metodi prosječne varijabilnosti provodi se na sljedeći način [33]:

- Svaki pojedini kišni događaj određenog trajanja (u ovom radu odabrana trajanja u rasponu između 10 minuta i 24 sata) najprije se podijeli na konačan broj jednakih dijelova (vremenskih razdoblja).
- Navedene se količine oborina u svakom razdoblju rangiraju te se za svaki rang dodijele postotne vrijednosti od ukupne visine oborine tog događaja.
- Nakon toga se svakom razdoblju dodijeli novi rang s obzirom na prosječnu vrijednost svake oborine te se svakom rangu pridruži prosječna postotna vrijednost oborine.

Proračun i odabir mjerodavne oborine u ovom radu temelji se na ograničenom uzorku oborina u kombinaciji s HTP krivuljama za grad Rijeku [27]. Kako navedena metoda preporuča uzeti u proračun samo reprezentativne oborine, za ovu preliminarnu analizu, izdvojeno je deset godina ombrografskih opažanja s postaje Rijeka u razdoblju od 1961. do 1990. godine [35]. Unutar odabranih deset godina izdvojeno je ukupno 230 pojedinačnih oborina različitih trajanja koja premašuju donje granice intenziteta [30]. Sve oborine su kategorizirane u četiri razreda trajanja $t < 1h$, $1h \leq t < 3h$, $3h \leq t < 6h$ te $6h \leq t < 24h$. Rezultat metode prosječne varijabilnosti je bezdimenzijski oblik krivulje mjerodavne oborine za svaki od četiri definirana razreda, kojem se onda dodjeljuje ukupna visina oborine određenog trajanja i povratnog perioda iz poznatih HTP krivulja.

Unatoč činjenici da mjerodavna oborina znatno realnije opisuju vremensku raspodjelu oborine u odnosu na ravnomjerni intenzitet te da se već duži niz godina koristi u svijetu, određeni elementi ovog pristupa i dalje su nedovoljno dobro definirani. Jedan od tih elemenata, a možda i najvažniji kod proračuna i dimenzioniranja infiltracijskih sustava, jest trajanje oborine [36]. Treba naglasiti kako je ovaj problem prisutan u inženjerskoj praksi neovisno o tome koristi li se ravnomjerni intenzitet ili mjerodavna oborina vremenski varijabilnog intenziteta. Naime, otjecanje oborina u urbanim sredinama najčešće se računa za trajanje oborine jednako vremenu koncentracije sliva, koje daje maksimalni vršni protok [24]. Međutim, za određene dijelove sustava, kao što su infiltracijski sustavi, mjerodavni parametar je volumen oborine. U tom slučaju nije jasno definirano kritično trajanje oborine na koje treba dimenzionirati retencijski prostor, s obzirom na to da je vrlo teško unaprijed procijeniti nelinearnu interakciju između svih utjecajnih parametara, kao što su vremenska raspodjela oborine, vrijeme koncentracije sliva, volumen retencijskog prostora i brzina infiltracije [37]. Zbog toga je nužno provesti sukcesivni proračun za niz različitih trajanja oborine i odabrati najkritičniji slučaj.

2.2. Površinsko otjecanje oborina

Hidraulički modeli otjecanja oborine temelje se na matematičkim jednadžbama očuvanja mase i količine gibanja koje opisuju stvarne fizikalne procese nestacionarnog tečenja plitkih voda [24]. Metoda kinematičkog vala [38] je najčešći odabir za hidraulički proračun otjecanja s malih slivova ($< 2,5 \text{ km}^2$), a posebice u slučaju površinskog otjecanja oborine kada nisu dostupna mjerenja protoka [39]. Općenito se smatra da je metoda kinematičkog vala dovoljno precizna za proračun površinskog otjecanja sa slivova većih nagiba pod uvjetom mirnog toka [40].

Navedena metoda izvedena je iz Saint-Venantovih jednadžbi za nestacionarni tok plitkih voda u kojima su zanemarene inercijalne i tlačne sile, odnosno pretpostavlja se da je pad energetske linije jednak padu dna kanala [38]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$S_f - S_0 = 0 \tag{2}$$

gdje je A (m²) površina omočenog poprečnog presjeka kanala, Q (m³/s) protok vode, $q = r_{eff} B$ (m²/s) izvorni član definiran intenzitetom oborine, r_{eff} (m/s) efektivni intenzitet oborine, B (m) širina kanala, x (m) koordinata duž osi kanala, t (s) vrijeme, S_f (-) pad energetske linije te S_0 (-) pad dna kanala. Brzinu vode moguće je odrediti iz Manningove jednačbe [41]:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \tag{3}$$

gdje je R (m) hidraulički radijus, a n (s m^{-1/3}) Manningov koeficijent hrapavosti. Kombinacijom Manningove jednačbe (3) i jednačbe (2), može se zapisati:

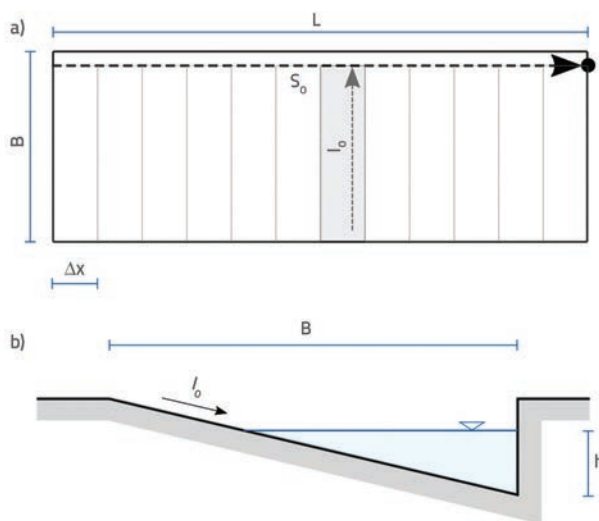
$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} A \tag{4}$$

odnosno, za konstantnu geometriju odabranog poprečnog presjeka kanala, pojednostaviti do oblika:

$$Q = \alpha A^m \tag{5}$$

gdje koeficijenti α i m ovise o geometriji kanala. U ovome je radu analizirani testni sliv definiran nepropusnom podlogom izduženog pravokutnog oblika s uzdužnim padom S_0 i poprečnim padom l_0 (slika 1.), pa se α i m mogu zapisati u sljedećem obliku:

$$\alpha = \frac{1}{n} \left(\frac{l_0}{2} \right)^{1/3} S_0^{1/2}, \quad m = \frac{4}{3} \tag{6}$$



Slika 1. Shematski prikaz: a) tlocrtna površina izduženog pravokutnog sliva; b) karakterističnog poprečnog presjeka u smjeru otjecanja oborine

Konačno, uvrštavanjem izraza (6) i (5) u izraz očuvanja mase (1), otjecanje oborine potpuno je definirano sljedećom procesnom jednačbom:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha mA^{m-1} \frac{\partial A}{\partial x} = q \tag{7}$$

S obzirom na to da su α i m koeficijenti koji ovise jedino o geometriji kanala, otjecanje oborine svodi se na proračun površine poprečnog presjeka na lokacijama duž sliva u različitim vremenskim trenucima. Izraz (7) može se riješiti pomoću metode konačnih razlika (MKR) koje aproksimiraju parcijalne derivacije. Iako, postoji više eksplicitnih i implicitnih numeričkih shema, u ovome je radu primijenjena metoda *Forward-time Backward-space* (FTBS) [42], koja izraz (7) svodi na niz algebarskih jednačbi sljedećeg oblika:

$$\frac{A_i^{j+1} - A_i^j}{\Delta t} + \alpha m \left(\frac{A_i^j + A_{i-1}^j}{2} \right)^{m-1} \frac{A_i^j - A_{i-1}^j}{\Delta x} = \frac{q_i^{j+1} + q_i^j}{2} \tag{8}$$

gdje indeks i označava položaj u prostoru, indeks j položaj u vremenu, Δt (s) je vremenski korak, a Δx (m) prostorni korak.

2.3. Infiltracijska građevina

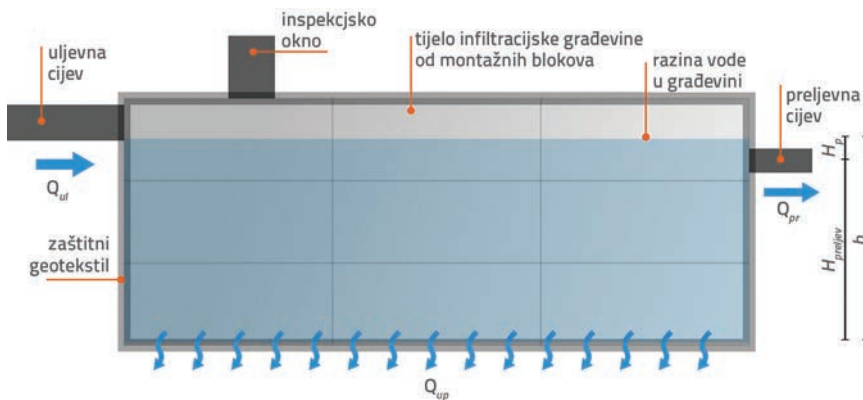
Promjene razine vode u odabranom infiltracijskom sustavu – upojnoj građevini od montažnih blokova (slika 2.), opisane su jednačbom očuvanja mase, koja se može zapisati sljedećim izrazom [24]:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{ul} - Q_{iz} \tag{9}$$

gdje je V (m³) volumen vode u građevini, Q_{ul} (m³/s) ulazni protok vode i Q_{iz} (m³/s) izlazni protok vode. Volumen vode u infiltracijskoj građevini V se može odrediti kao umnožak tlocrtna površine A_b (m²) i ukupne razine vode h (m). Pritom, zbroj visine preljeva $H_{preljev}$ (vertikalna udaljenost između dna građevine i osi preljevne cijevi) te tlačne visine H_p (vertikalne udaljenosti između osi preljeva i razine vode) jednaka je ukupnoj razini vode $h = H_{preljev} + H_p$ (slika 2.). Ulazni protok vode Q_{ul} definiran je hidrogramom otjecanja oborine dobivenim pomoću modela kinematičkog vala, dok su izlazni protoci definirani upojnim protokom kroz dno građevine Q_{up} (m³/s) te preljevnim protokom Q_{pr} (m³/s). Upojni protok računa se prema izrazu

$$Q_{up} = q_{up} A_b \tag{10}$$

gdje je q_{up} (m/s) brzina infiltracije, a A_b (m²) tlocrtna površina infiltracijske građevine. Brzina infiltracije ovisi o karakteristikama stijene i tla u kojima se infiltracijska građevina nalazi, a svakako ju treba izmjeriti na terenu i to u različitim uvjetima zasićenosti tla vodom. Okvirne veličine moguće je odrediti iz poznatih raspona



Slika 2. Shema infiltracijske građevine izgrađene od montažnih blokova

vrijednosti hidrauličke provodljivosti K (tablica 1.). Pritom treba napomenuti da se odnos q_{up} i K najjednostavnije može opisati Darcyevim zakonom za jednodimenzijnsko i stacionarno tečenje vode kroz zasićene i porozne sredine [24]:

$$q_{up} = K \cdot I \quad (11)$$

gdje je $I = dh/dz$ hidraulički gradijent, h je tlačna visina vode u infiltracijskoj građevini, a z koordinata u smjeru djelovanja gravitacije. Kod vertikalne infiltracije u zasićenim i dobro propusnim sredinama može se pretpostaviti da je hidraulički gradijent konstantan i približno jednak 1 [43].

Tablica 1. Raspon vrijednosti hidrauličke provodljivosti (prema [44])

Tip podloge	Naziv	Hidraulička provodljivost K [m/s]
Tlo	Sitnozrnati pijesak	10^{-5} do 10^{-4}
	Krupnozrnati pijesak	10^{-4} do 10^{-3}
	Sitnozrnati šljunak	10^{-3} do 5×10^{-1}
	Krupnozrnati šljunak	10^{-2} do 5×10^{-1}
Stijena	Svježi vapnenac	10^{-9} do 10^{-7}
	Okršeni vapnenac	10^{-5} do 10^{-3}

Dakako, u realnim uvjetima podloga nije uvijek zasićena, pa je problem preciznijeg određivanja hidrauličkog gradijenta nestacionaran i zahtijeva upotrebu složenijih modela. Međutim, u većini slučajeva I dosegne vrijednost 1 relativno brzo nakon početka infiltracije u usporedbi s ukupnim trajanjem mjerodavne oborine, pa je za kritični slučaj ova pretpostavka opravdana [43]. Za realniji opis infiltracije u tlo, koji uključuje nezasićene i nestacionarne uvjete, mogu se koristiti primjerice Green-Amptov aproksimativni model ili Hortonov empirijski izraz [24], ili se

čak može razmišljati o numeričkom rješavanju Richardsove jednačbe [24].

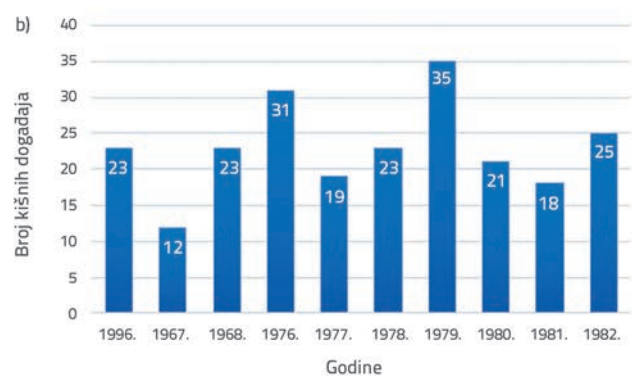
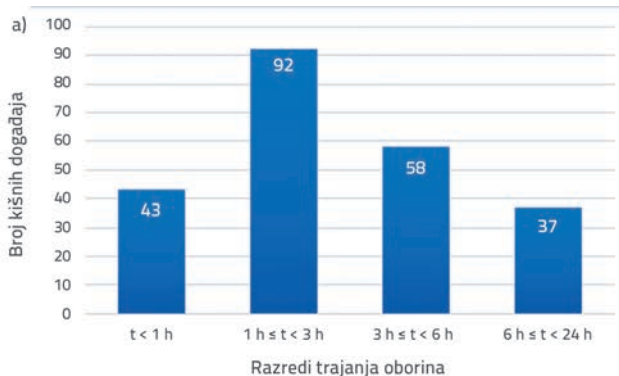
U hrvatskoj se praksi, u krškim područjima, u fazi planiranja najčešće koriste vrijednosti hidrauličke provodljivosti u rasponu od 10^{-4} do 10^{-3} m/s, što i odgovara dobro vodopropusnim stijenama, odnosno gornjem razredu provodljivosti okršenih vapnenaca (tablica 1.) [44]. U skladu s time, i u ovoj će se analizi koristiti vrijednosti u navedenom rasponu.

Protok kroz sigurnosni cijevni preljev određuje se prema izrazu za istjecanje kroz male otvore [45]:

$$Q_{pr} = \mu A_p \sqrt{2gH_p} \quad (12)$$

gdje je μ koeficijent istjecanja, A_p površina poprečnog presjeka cijevi, g ubrzanje gravitacije, a H_p tlačna visina (slika 2.). Za okrugle otvore oštih rubova te pri duljini cijevnog preljeva od tri do četiri promjera cijevi, koeficijent prelijevanja iznosi $\mu = 0,62$ [45]. Pritom, kota preljeva se obično nalazi pri vrhu infiltracijske građevine, čija se dubina dimenzionira na projektne vrijednosti, što znači da se voda prelijeva jedino tijekom ekstremnih događaja.

Kako bi se riješio izraz (9), ponovo se može primijeniti MKR da se aproksimira vremenska derivacija volumena. Za relativno male korake, aproksimacija derivacije unaprijed dovoljno je precizna i pouzdana, a može se zapisati na sljedeći način:



Slika 3. Broj kišnih događaja koji premašuju donje granice za sekundarne analize: a) prema razredu trajanja oborine, b) prema godini pojavljivanja

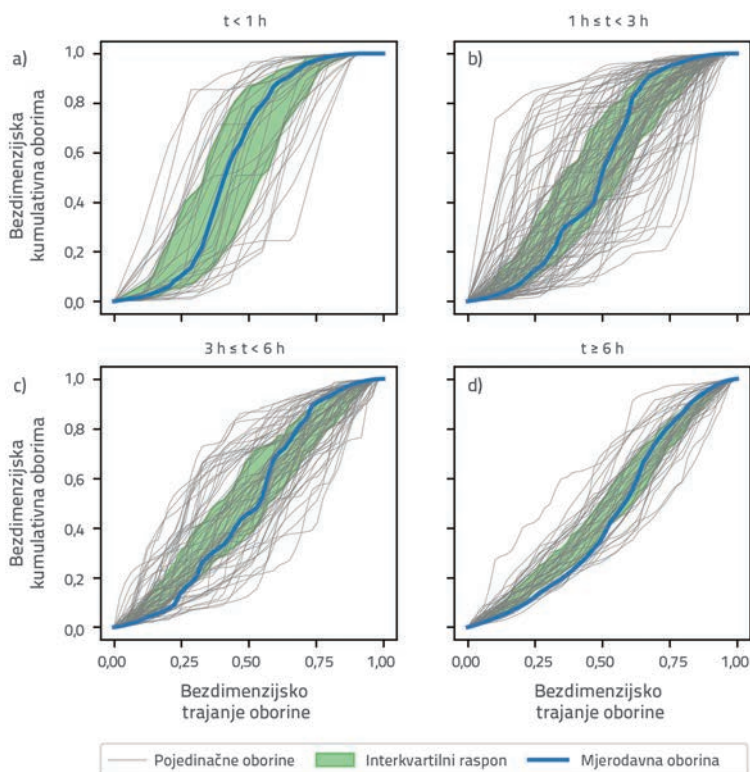
$$\frac{V^{j+1} - V^j}{\Delta t} = Q_{ul}^j - Q_{up}^j - Q_{pr}^j \quad (13)$$

gdje je, kao i u prethodnoj numeričkoj shemi, indeks j položaj u vremenu, a Δt vremenski korak.

3. Rezultati

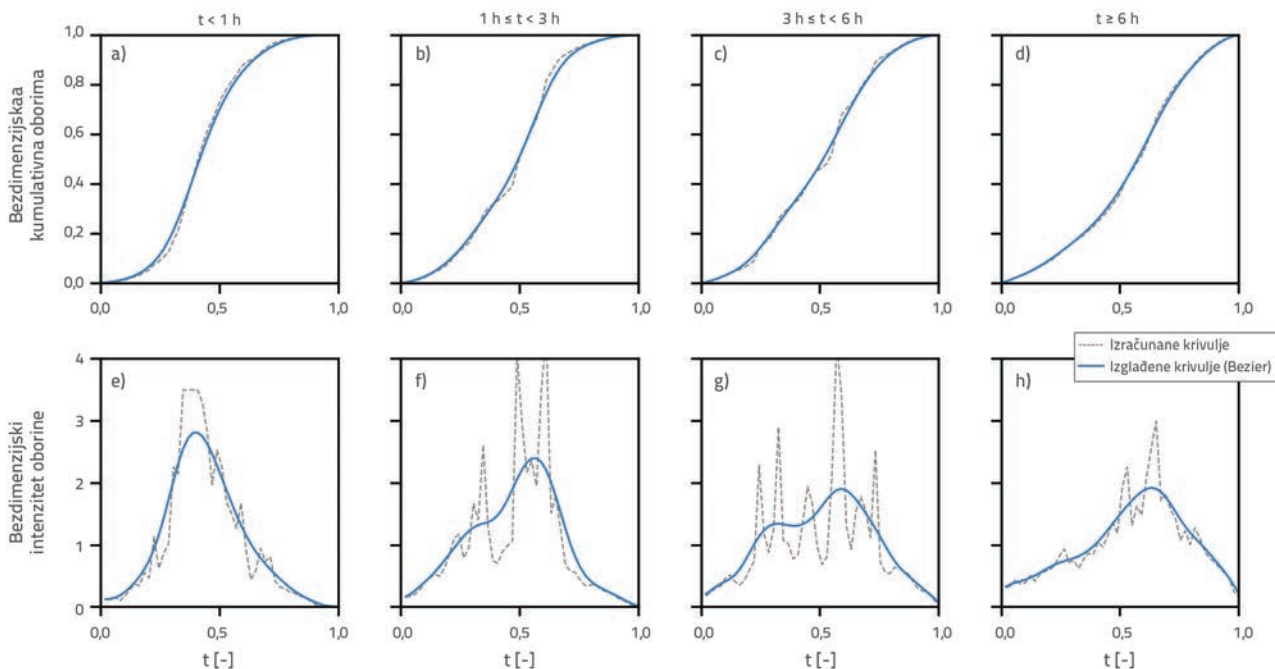
3.1. Krivulje mjerodavne oborine za područje Rijeke

Na slici 3. prikazan je ukupan broj kišnih događaja zabilježenih na postaji Rijeka za odabranih deset godina u razdoblju od 1961. do 1990. koji premašuju donje granice za sekundarne analize, prema godini pojavljivanja te prema razredu trajanja. Može se primijetiti kako je najveći broj reprezentativnih kišnih događaja zabilježen 1979. godine, kada je izmjerena najveća ukupna količina godišnjih oborina u navedenom razdoblju ($H_{god} = 1973,4$ mm), dok je najmanji broj kišnih događaja zabilježen 1967. kada je izmjerena jedna od najnižih godišnja količina oborina ($H_{god} = 1476,9$ mm). Također je primjetno kako najveći broj kišnih događaja odgovara razredu trajanja između sat i 3 sata, dok najmanje kišnih događaja odgovara razredu trajanja duljem od 6 sati. Dobilene bezdimenzijske kumulativne krivulje mjerodavne oborine zajedno sa statističkim kvartilnim pokazateljima (interkvartilni raspon) te krivuljama pojedinih kišnih



Slika 4. Kumulativne krivulje pojedinačnih kišnih događaja, interkvartilni raspon te odabrana krivulja mjerodavne oborine za odabrane razrede trajanja oborine: a) manje od 1 sata, b) između jednog i tri sata c) između 3 i 6 sati, d) između 6 i 24 sata

događaja, prikazani su na slici 4., i to zasebno za svaki razred trajanja. Može se primijetiti kako krivulja trajanja kraćeg od 1 sata



Slika 5. Bezdimenzijski oblik krivulja mjerodavne oborine za područje Rijeke prije i nakon izjednačavanja Bezierovim krivuljama, prikazanih kao: a) – d) kumulativna oborina, i e) – h) trenutni intenzitet oborine

ima najizraženiji S-oblik (slika 4.a), dok je krivulja za trajanja veća od 6 sati najbliža ravnomjernom intenzitetu (slika 4.d). Ovakav rezultat je i očekivan, zato što je vremenska varijabilnost intenziteta oborina znatnije izražena kod kratkotrajnih, u pravilu konvektivnih oborina, u usporedbi s dugotrajnim ciklonalno uvjetovanim oborinama. Također, iz slike 4. razvidno je da su dobivene krivulje "neglatkog" oblika, što može rezultirati nerealnim skokovima intenziteta oborine. Zbog toga je primijenjena metoda izjednačavanja Bezierovim krivuljama [46]. Dijagram intenziteta oborine dobiven je diskretnom derivacijom dijagrama kumulativne oborine po vremenu. Na slici 5. prikazane su konačne krivulje mjerodavne oborine za različite razrede trajanja oborine u bezdimenzijskom obliku kumulativnih oborina i trenutačnog intenziteta oborina.

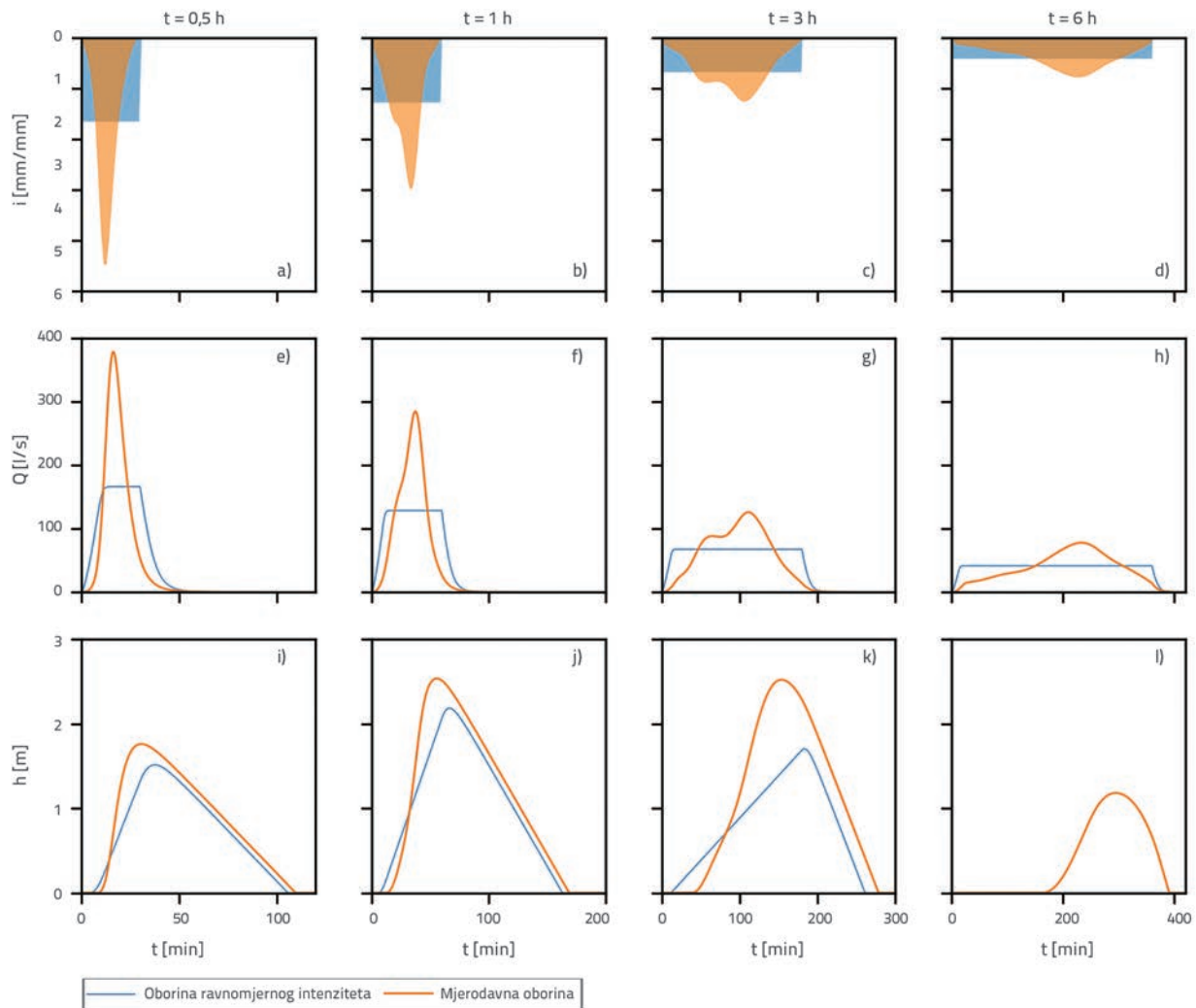
3.2. Usporedba mjerodavne oborine i oborine ravnomjernog intenziteta

Kako bi se usporedili različiti pristupi dimenzioniranju infiltracijske građevine, analizirane su oborine različitog trajanja

$t_k = 30$ min, 1, 3 i 6 h ravnomjernog intenziteta i mjerodavne oborine te izračunani hidrogrami površinskog otjecanja, odnosno promjene volumena u građevini. U oba slučaja, ukupne količine oborine izračunane su iz HTP krivulja 20-godišnjeg povratnog perioda za Rijeku [27]:

$$H_{20g} = \begin{cases} 76,876 \cdot t_k^{0,6288} & \text{za } t_k < 1,52h \\ 88,307 \cdot t_k^{0,2982} & \text{za } t_k \geq 1,52h \end{cases} \quad (14)$$

Proračun hidrograma otjecanja proveden je za hipotetski sliv duljine $L = 600$ m, širine $B = 10$ m, konstantnog uzdužnog pada $S_o = 1,0\%$, konstantnog poprečnog nagiba $l_p = 3,5\%$ te hrapavosti definirane Manningovim koeficijentom hrapavosti $n = 0,015$ s $m^{-1/3}$. Taj sliv može odgovarati različitim urbanim površinama, kao što su ravni krovovi većih objekata, parkirališta, određene dionice lokalnih prometnica, popločeni trgovi i sl. Zanemareni su svi gubici u procesu otjecanja oborina, odnosno pretpostavljeno je da vrijedi $r_{eff} = i$. Infiltracijska građevina definirana je tlocrtnom



Slika 6. Usporedba pristupa s oborinom ravnomjernog intenziteta i mjerodavnom oborinom za različita trajanja: a) - d) intenzitet oborine, e) - h) hidrogram otjecanja te i) - l) razina vode u infiltracijskoj građevini

površinom jednakom 2% površine sliva $A_b = 120 \text{ m}^2$, visinom preljeva $H_{\text{preljev}} = 3,0 \text{ m}$ te srednjom brzinom infiltracije $q_{\text{up}} = 0,4 \text{ mm/s}$.

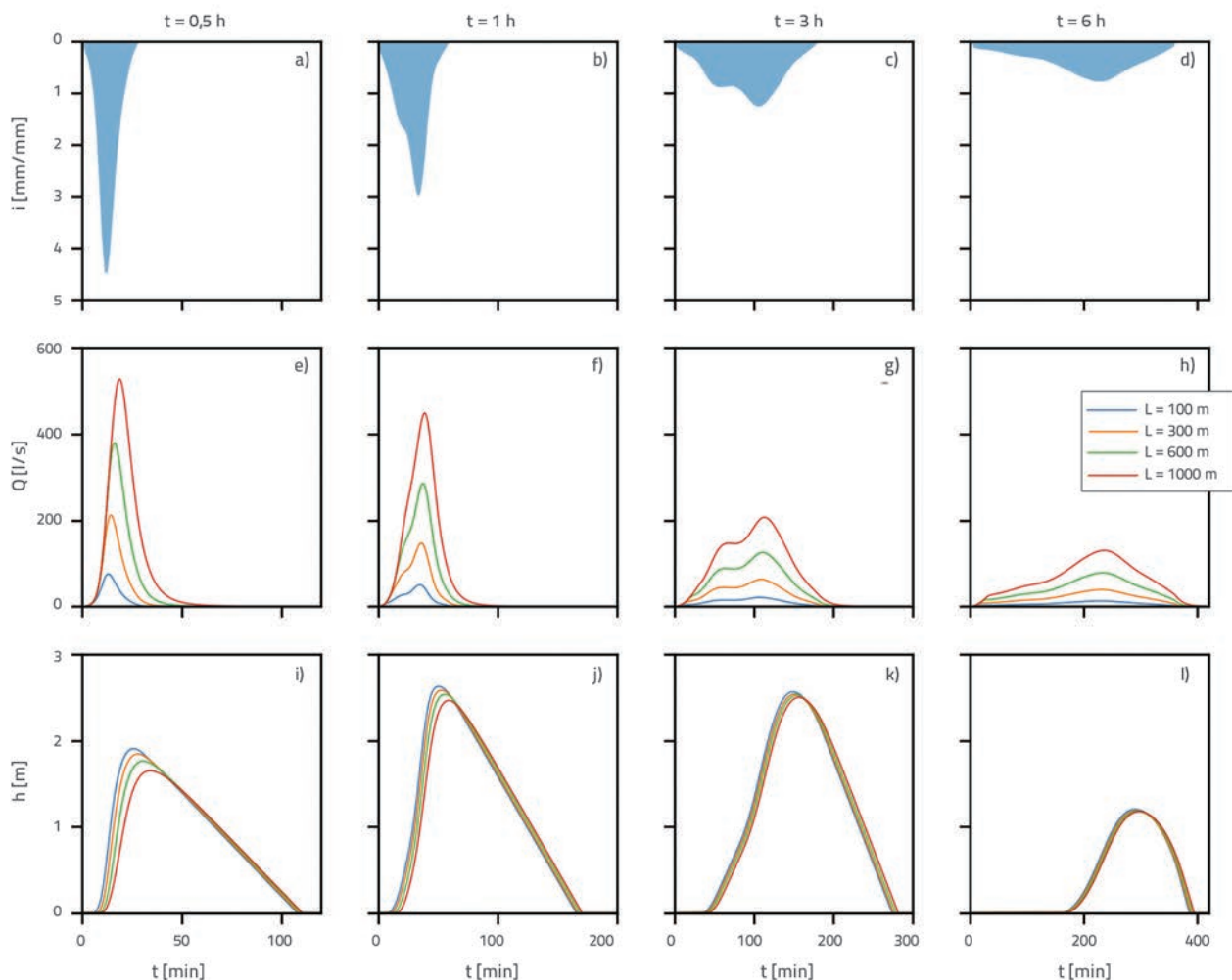
Rezultati proračuna prema obje metode prikazani su na slici 6. Razlike između dva pristupa evidentne su već kod prikaza vremenske raspodjele intenziteta oborine, s time da su razlike izraženije kod kraćih trajanja oborine (slike 6.a do 6.d). Primjerice, za trajanje od 30 min, vršni intenzitet mjerodavne oborine je više nego dva puta veći od intenziteta ravnomjerne oborine (slika 6.a). Otjecanje mjerodavne oborine (slike 6.e do 6.h) također karakterizira gotovo dvostruko veći vršni protok u usporedbi s otjecanjem ravnomjernog intenziteta. Očekivano, maksimalni se protok u oba slučaju javlja za najkraće trajanje oborine (slika 6.e) jer vrijeme koncentracije sliva iznosi $t_c = 13 \text{ min}$. U oba pristupa i za svako trajanje oborine, pala je i otekla ista količina oborine, te posljedično isti volumen oborine ulazi u infiltracijsku građevinu. Međutim, zbog različite vremenske raspodjele, maksimalna razina vode u infiltracijskoj građevini veća je u slučaju mjerodavne oborine u usporedbi s oborinom ravnomjernog intenziteta (slike 6.i. do 6.l). Razlika je najizraženija za trajanja oborine od 3 i 6 sati (slike 6.k i 6.l). Također, zanimljivo

je primijetiti da za ravnomjernu oborinu kritično trajanje oborine, definirano maksimalnom razinom vode u bunaru, iznosi jedan sat, a za mjerodavnu oborinu kritični je slučaj podjednako definiran trajanjima od jednog i tri sata. Razvidno je kako proračun s ravnomjernom oborinom podcjenjuje ne samo vršni protok već i potrebni volumen infiltracijske građevine.

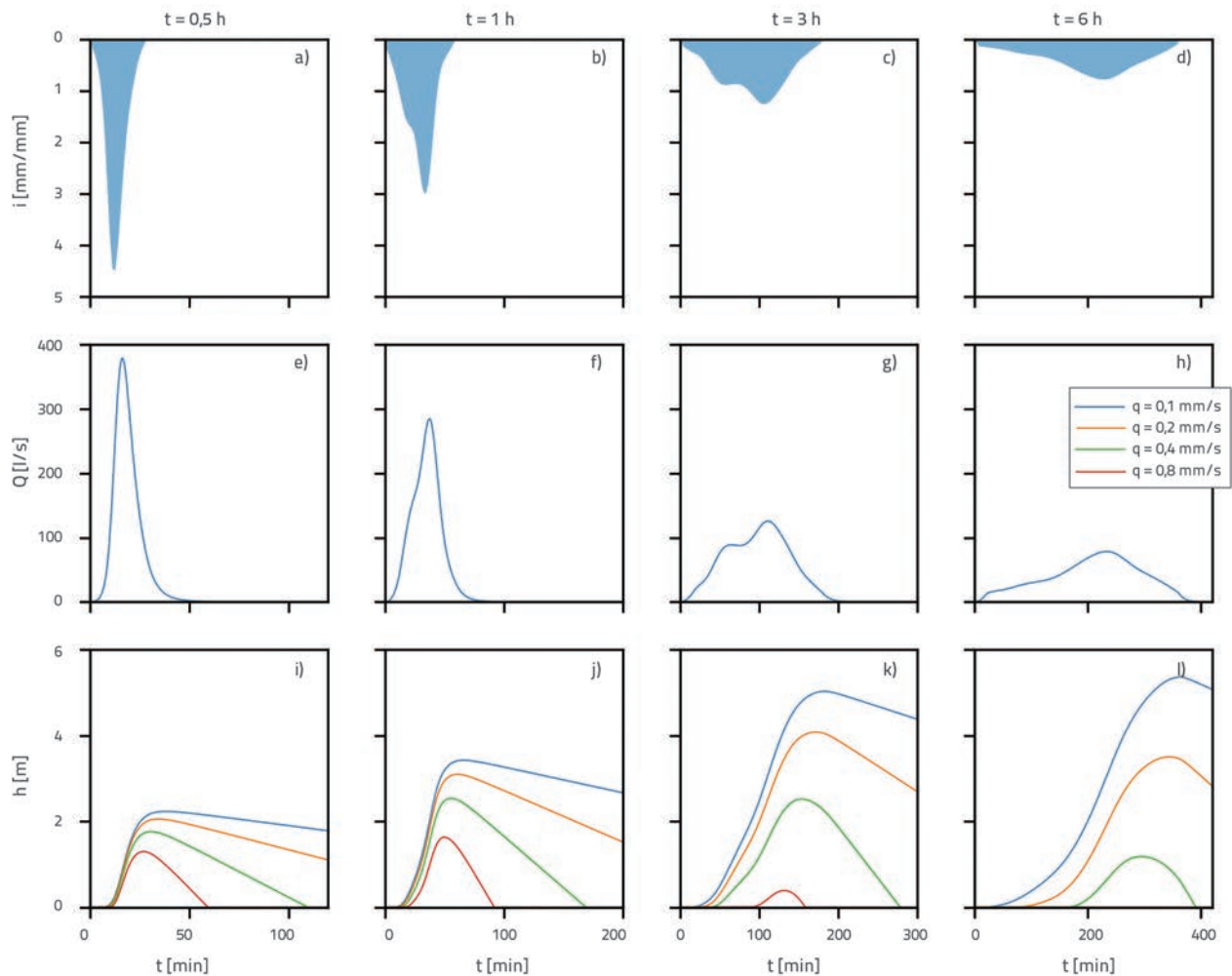
3.3. Analiza osjetljivosti modela

Analizirat će se osjetljivost modela za proračun infiltracijske građevine te kritično trajanje oborine s obzirom na glavne parametre otjecanja - površinu sliva koja utječe na ukupni volumen dotekle oborine te brzinu infiltracije koja utječe na upojni volumen. Kao i u prethodnom slučaju, analizirane su oborine trajanja $t = 30 \text{ min}$, 1, 3 i 6 h, vremenska raspodjela izračunana je iz krivulja mjerodavne oborine (slika 5.), a ukupne su količine oborine izračunane pomoću izraza (14).

U prvom je slučaju analiziran utjecaj duljine, odnosno površine sliva. Pri proračunu hidrograma otjecanja pretpostavljeni su jednaki parametri kao u prethodnom primjeru, ali je varirana duljina sliva $L = 100, 300, 600$ i 1000 m . Infiltracijska građevina



Slika 7. Utjecaj duljine sliva na: a) - d) odabranu raspodjelu intenziteta mjerodavne oborine, e) - h) hidrogram otjecanja te i) - l) promjene razine vode u infiltracijskoj građevini, za različita trajanja oborine



Slika 8. Utjecaj brzine infiltracije na: a) - d) odabranu raspodjelu intenziteta mjerodavne oborine, e) - h) hidrogram otjecanja te i) - l) promjene razine vode u infiltracijskoj građevini, za različita trajanja oborine

definirana je tlocrtnim površinama jednakim 2% površine sliva, dakle $A_b = 20, 60, 120$ i 200 m², visinom preljeva $H_{preljev} = 3,0$ m te srednjom brzinom infiltracije $q_{up} = 0,4$ mm/s.

Rezultati proračuna infiltracijske građevine za prihvata oborine sa sliva različitih duljina prikazani su na slici 7. Jasno je vidljiva ovisnost vršnog protoka otjecanja o površini sliva (slike 7.e do 7.h). Međutim, iako se i protoci i ukupni volumeni otekle oborine znatno razlikuju s obzirom na površinu slivnog područja, možemo zaključiti kako duljina sliva nema bitnog utjecaja na promjene volumena vode u infiltracijskoj građevini (slike 7.i do 7.l), uz pretpostavku da će se tlocrtna površina građevine dimenzionirati proporcionalno s površinom slivnog područja. Također, kritično trajanje oborine iznosi između jednog i tri sata, neovisno o duljini sliva.

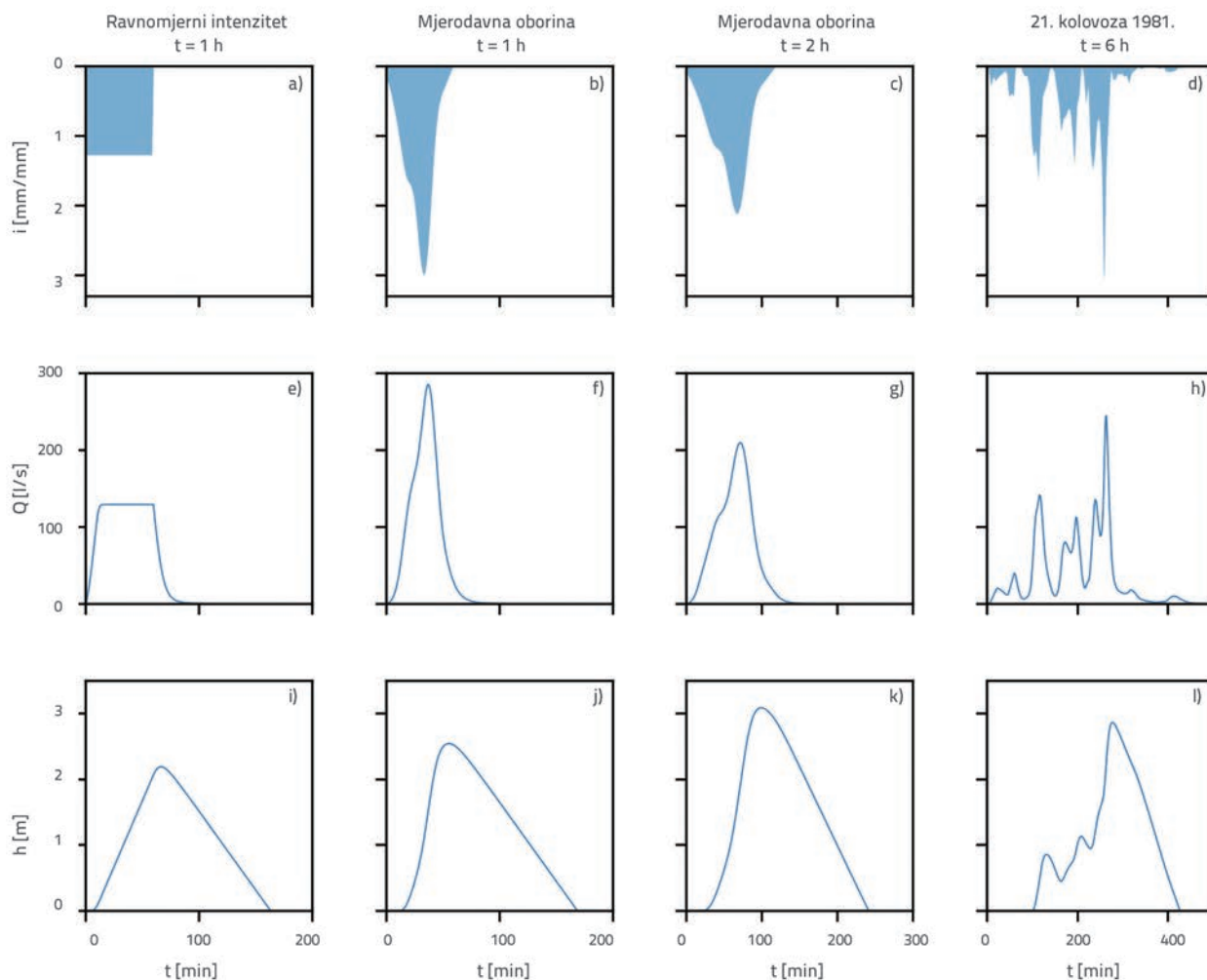
U drugom slučaju analiziran je utjecaj brzine infiltracije. Pri proračunu hidrograma otjecanja pretpostavljeni su jednaki uvjeti i parametri kao u prvom primjeru, ali su pri proračunu građevine varirane brzine infiltracije $q_{up} = 0,1; 0,2; 0,4$ i $0,8$ mm/s.

Rezultati proračuna infiltracijske građevine za prihvata otekle oborine s različitim brzinama infiltracije prikazani su na slici 8. Primjetno je kako brzina infiltracije ima vrlo izražen utjecaj na

maksimalne razine vode u infiltracijskoj građevini (slike 8.i do 8.l). Naravno, u građevinama s bržom infiltracijom, maksimalne razine vode su niže, neovisno o trajanju oborine. Pritom, kritično trajanje oborine ovisi o brzini infiltracije; za najmanji $q_{up} = 0,1$ mm/s kritično trajanje oborine je najdulje i iznosi 6 h (slika 8.l), dok za najveću brzinu infiltracije $q_{up} = 0,8$ mm/s kritično trajanje oborine je najkraće i iznosi jedan sat (slika 8.j). Očito, unaprijed definirati kritično trajanje oborine nije jednostavan zadatak, ali je zabilježen trend koji sugerira da manju brzinu infiltracije povezujemo s duljim kritičnim trajanjem oborine, što nadalje upućuje na važnost provedbe dimenzioniranja infiltracijske građevine za različita trajanja oborine kako bi se definirala kritična situacija koja definira potreban retencijski volumen takve građevine.

3.4. Primjer dimenzioniranja infiltracijske građevine i vrednovanja ekstremne oborine zabilježene 1981.

Također su analizirane i promjene volumena vode u infiltracijskoj građevini tijekom jednog vrlo intenzivnog kišnog događaja

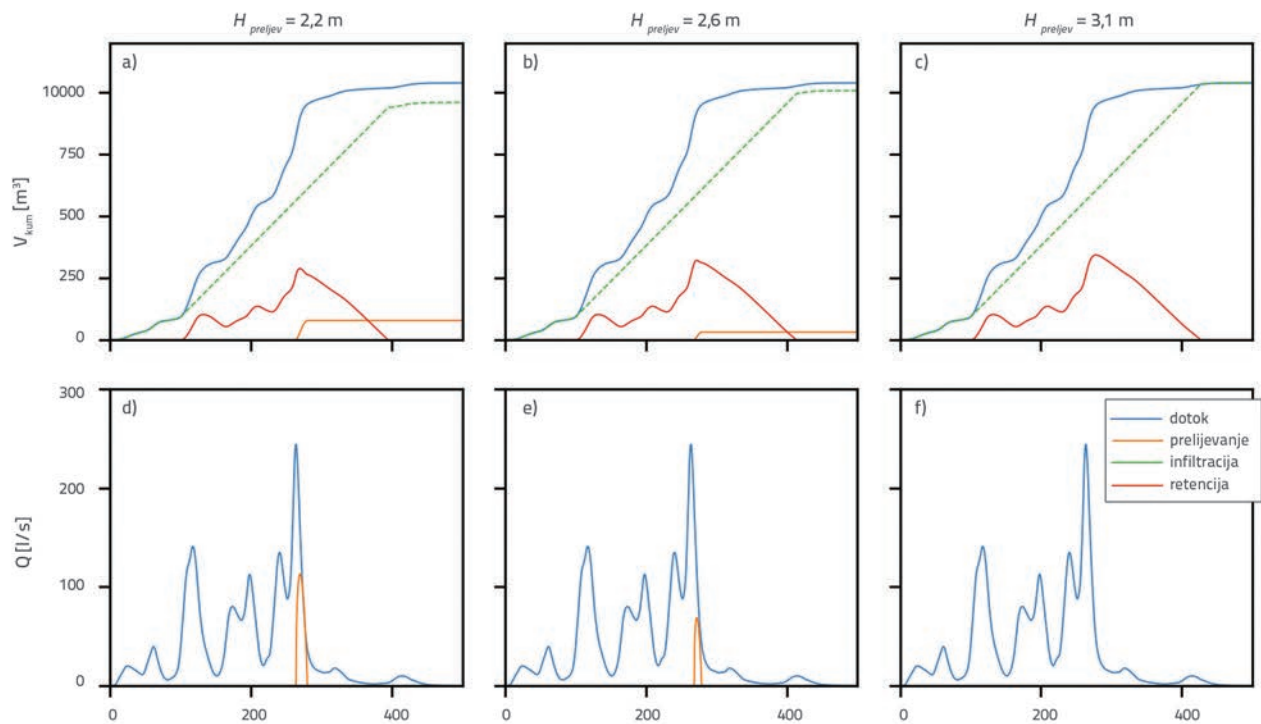


Slika 9. Dimenzioniranje infiltracijske građevine prema tri različita pristupa: a) ravnomjerni intenzitet trajanja 1 h, b) mjerodavna oborina trajanja 1 h, c) mjerodavna oborina kritičnog trajanja (2 h) te d) analiza ekstremne oborine iz kolovoza 1981. e) do h) rezultirajući hidrogrami otjecanja, i) do l) razina vode u infiltracijskoj građevini

izmjenog u kolovozu 1981. godine, kada su tijekom 7 i pol sati pala 173 milimetra oborine što približno odgovara 30-godišnjem povratnom periodu za Rijeku. Pritom, za vremenske intervale kraće od dva sata statistički pokazatelji upućuju na povratni period oborine između 10 i 20 godina. Dakle nije očekivano da ta oborina prelije građevinu dimenzioniranu na mjerodavnu oborinu 20-godišnjeg povratnog perioda, iako je količinski bila jedna od najobilnijih u razdoblju od 1961. do 1990. godine. Proračun hidrograma otjecanja proveden je na slivu istih karakteristika kao u prvom primjeru. S obzirom na to da se u hrvatskoj praksi infiltracijski sustavi, među kojima su najzastupljeniji upojni bunari, najčešće dimenzioniraju na jednosatnu oborinu, u ovom je primjeru dimenzioniranje provedeno prema tri različita pristupa: a) ravnomjerni intenzitet trajanja 1 h, b) mjerodavna oborina trajanja 1 h te c) mjerodavna oborina različitih trajanja u rasponu od 1 h do 6 h. Pritom, dimenzionirala se samo dubina infiltracijske građevine, odnosno kota preljeva, dok je tlocrtna površina iznosila konstantnih 2% površine sliva $A_b = 120 \text{ m}^2$, a brzina infiltracije $q_{up} = 0,4 \text{ mm/s}$.

Na slici 9. prikazani su rezultati analize hidrograma otjecanja i promjene razine vode u infiltracijskoj građevini za četiri različite situacije. Maksimalne izračunane razine vode iznose $h = 2,18 \text{ m}$ za oborinu ravnomjernog intenziteta i trajanja 1 h (slika 9.i), $h = 2,54 \text{ m}$ za mjerodavnu oborinu trajanja 1 h (slika 9.j), $h = 3,08 \text{ m}$ za mjerodavnu oborinu kritičnog trajanja od 2 h (slika 9.k) te konačno $h = 2,96 \text{ m}$ za realnu oborinu zabilježenu u kolovozu 1981. trajanja 7,5 h (slika 9.l). Treba primijetiti da iako se maksimalni protok javlja za trajanje oborine jedan sat (slika 9.f), maksimalna razina vode zabilježena je za kritično trajanje od dva sata (slika 9.k).

U sljedećem koraku analizirano je funkcioniranje odabrane infiltracijske građevine uslijed dotoka ekstremne oborine iz kolovoza 1981. Visina preljeva dimenzionirana je s obzirom na prethodno izračunane maksimalne razine vode u infiltracijskoj građevini: visine preljeva $H_{preljev} = 2,2 \text{ m}$, $2,6 \text{ m}$ i $3,1 \text{ m}$, uz tri preljevne cijevi od 200 mm kako bi se tlačna visina H_p zadržala ispod $0,3 \text{ m}$. Volumen građevine određen je s obzirom na visinu preljeva uz sigurnosnih $0,5 \text{ m}$, što rezultira potrebnim



Slika 10. Promjene volumena vode u infiltracijskoj građevini tijekom ekstremne oborine iz kolovoza 1981. godine, dimenzioniranog na: a) ravnomjernu oborinu trajanja 1 h ($H_{\text{prelejev}} = 2,2$ m), b) mjerodavnu oborinu trajanja 1 h ($H_{\text{prelejev}} = 2,6$ m); c) mjerodavna oborina kritičnog trajanja ($H_{\text{prelejev}} = 3,1$ m); d) do f) rezultirajuće promjene ulaznog i izlaznog protoka

volumenima građevine od $V = 324$ m³, 372 m³ i 432 m³. Na slici 10. prikazani su rezultati promjene volumena te ulaznog i prelijevnog protoka. Može se primijetiti kako u slučaju dimenzioniranja infiltracijske građevine na ravnomjernu oborinu trajanja 1 h, dolazi do prelijevanja ukupno $78,7$ m³ uz maksimalni prelijevni protok od $113,0$ l/s (slike 10.a-10.d), što je nešto više od 50 % vršnog ulaznog protoka. Za mjerodavnu oborinu trajanja 1 h, također dolazi do prelijevanja, ali u manjem opsegu, ukupno $31,1$ m³ s maksimalnim protokom $68,8$ l/s (slike 10.b-10.,e). U slučaju kada je infiltracijska građevina dimenzionirana na kritično trajanje mjerodavne oborine od 2 h, prelijevanja nema (slike 10.c do 10.f).

4. Zaključak

Prikazani rad tematizira je problematiku primjerenog dimenzioniranja infiltracijskih sustava kao ključnih objekata odvodnje, primjenjujući LID pristup u postupanju s oborinskim vodama. Utvrđeno je da unatoč sve široj upotrebi LID postupaka, na području Hrvatske, pa i šire, nema jasno definiranih primjerenih metodoloških pristupa za provedbu dimenzioniranja infiltracijskih sustava, pa čak ni oborinskih podloga koje bi bile primjenjive u tu svrhu. Dosadašnji konceptualni pristupi pri rješavanju oborinske odvodnje koji su bili temeljeni na što bržoj evakuaciji oborinskog otjecanja sa što većim kapacitetima odvodnih sustava pokazali su se ograničenima i nedjelotvornima. Oborinske podloge koje su se u takvim zastarjelim konceptima

koristile (HTP ili ITP krivulje) pokazale su se neprimjerene za primjenu pri dimenzioniranju sustava za infiltraciju oborinskih voda. Razloga je taj što u suvremenim konceptima odvodnje (LID) nije važna samo informacija o veličini maksimalnog protoka nego je važna informacija o cjelokupnoj dinamici otjecanja kao i o volumenu oborinskih voda.

U ovom je radu stoga napravljen prilog za prevladavanje tog stanja na način da je, na odabranom ispitnom primjeru na području Rijeke, analizirano i razmotreno nekoliko utjecajnih elemenata pri takvim hidrološkim proračunima suvremenih pristupa oborinskoj odvodnji, uključivo analizu oblika mjerodavne oborine, trajanja oborine i dotjecanja u infiltracijsku građevinu, njene geometrije te značajki podloge definirane brzinom infiltracije. Provedena je analiza vremenskog oblika mjerodavne oborine na području Rijeke iz desetogodišnjeg uzorka zabilježenih oborina u razdoblju od 1961. do 1990. pri čemu je kao najprikladniji preporučeni oblik dobiven na osnovi analize prosječne varijabilnosti, uz dodatno izjednačavanje oblika Bezierovim krivuljama.

Utvrđeno je da za dimenzioniranje geometrije infiltracijske građevine nije prikladno unaprijed određivati odgovarajuće trajanje mjerodavne oborine, već je nužno provesti sukcesivne proračune za različita trajanja i oblike mjerodavne oborine za projektiranje koji je definiran za dani lokalitet. Iz tako provedenih proračuna treba kao mjerodavan odabrati onaj slučaj koji za dane lokalne uvjete daje kritične vrijednosti – najveći retencijski volumen takvog objekta.

U radu se razmatra i utjecaj brzine infiltracije oborinskih voda u podlogu na dimenzioniranje infiltracijske građevine. Riječ je obično o najmanje poznatom ulaznom parametru, pogotovo u uvjetima nehomogenih krških sredina, s najmanje poznatih terenskih provjera i mjerenja njegovih stvarnih vrijednosti, a koji ima iznimno veliko značenje pri određivanju dimenzija evakuacijske građevine. Provedene su analize pokazale trend koji sugerira da manjim brzinama infiltracije odgovara dulje kritično vrijeme trajanja oborine.

Sve prikazane analize i na osnovi njih izvedeni zaključci nemaju svrhu biti isključivi i konačni u smislu definiranja niti oblika mjerodavne oborine (pogotovo ne oblika mjerodavna oborine za Rijeku izvedenog iz samo desetogodišnjih ulaznih podataka), a niti načina proračuna elemenata infiltracijskih sustava. No, razvojem rješavanja oborinske odvodnje prema postavkama LID pristupa nužno je unaprijediti ne samo praksu suvremenog korištenja elemenata oborinske odvodnje nego i njihova optimalnog dimenzioniranja, a ovaj rad u tome može biti primjerena metodološka osnova.

LITERATURA

- [1] Gajić-Čapka, M., Ožanić, N., Krvavica, N.: Estimation of maximum short-term precipitation over the Rijeka region, e-GFOS, 5 (2014) 9, pp. 49-59.
- [2] Ivančan-Picek, B., Horvath, K., Strelec Mahović, N., Gajić-Čapka, M.: Forcing mechanism of a heavy precipitation event in the southeastern Adriatic area, Natural Hazards, 72 (2014) 2, pp. 1231-1252.
- [3] IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ur. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer). IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151, 2014.
- [4] Cindrić, K., Nimac, I., Gajić-Čapka, M., Rubinić, J.: Vremenske promjene kratkotrajnih jakih oborina u razdoblju 1955.-2010. za Split i Varaždin. Hrvatske vode 22/89, pp. 239-250., 2014.
- [5] UNISDR: Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030. UNISDR, Geneva, Switzerland, pp. 37, 2015.
- [6] Jennings, D.B., Jarnagin, S.T.: Changes in anthropogenic impervious surfaces, precipitation and daily streamflow discharge: a historical perspective in a mid-Atlantic subwatershed. Landscape Ecology, 17 (2002) 5, pp. 471 – 489.
- [7] Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K.: Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. Journal of hydrology, 485 (2013), pp. 5-23.
- [8] Makepeace, D.K., Smith, D.W., Stanley, S.J.: Urban stormwater quality: summary of contaminant data. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 25 (1995) 2, pp. 93-139.
- [9] Dietz, M.E.: Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. Water, air, and soil pollution, 186 (2007) 1-4, pp. 351-363
- [10] Elliott, A.H., Trowsdale, S.A.: A review of models for low impact urban stormwater drainage. Environmental modelling & software, 22 (2007) 3, pp. 394-405.
- [11] Hu, M., Sayama, T., Zhang, X., Tanaka, K., Takara, K., Yang, H.: Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China. Journal of Environmental Management, 193 (2017), pp. 430-438.
- [12] Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G., Clar, M.: Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. Journal of Environmental Engineering, 135 (2009) 3, pp.109-117.
- [13] Scholz, M., Grabowiecki, P.: Review of permeable pavement systems. Building and Environment, 42 (2007) 11, pp. 3830-3836.
- [14] Li, F., Duan, H.F., Yan, H., Tao, T.: Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: framework development and case study. Water Resources Management, 29 (2015) 7, pp. 2125-2137.
- [15] Margeta, J.: Oborinske i otpadne vode: teret onečišćenja, mjere zaštite. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, 2007.
- [16] Rubinić, J., Zmaić, B. (ur.): Zbornik radova Konferencije s međunarodnim sudjelovanjem "Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2009.
- [17] Potočki, K., Vouk, D.: Zeleni gradovi i "gradovi spužve" - odgovor na ublažavanje poplava u urbanim područjima? Hrvatska vodoprivreda, 26 (2018) 222; pp. 14-18.
- [18] Vouk, D., Potočki, K.: Integralno upravljanje oborinskim vodama. Glasnik Hrvatskog društva za zaštitu voda, 13 (2018) 32, pp. 44-49.
- [19] Uzelac, T., Sošić, K., Rubinić, J., Prhat, D.: Integral approach to the design of stormwater drainage in the town of Pula. Ninth International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade, Serbia, pp. 1-14, 2012.
- [20] Borchardt, D., Sperling, F.: Urban stormwater discharges: ecological effects on receiving waters and consequences for technical measures. Water science and technology, 36 (1997) 8-9, pp.173-178.
- [21] Bonneau, J., Fletcher, T.D., Costelloe, J.F., Burns, M.J.: Stormwater infiltration and the 'urban karst'—A review. Journal of Hydrology, 552 (2017), pp.141-150.
- [22] European Commission: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000, Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Official Journal L 327/1. European Commission, Brussels, Belgium. 2000.
- [23] Radonić, M.: Vodovod i kanalizacija u zgradama, Croatia knjiga, Zagreb, 2003.
- [24] Chow, V.T.: Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill, 1964.

- [25] Klobučar, N., Stanišić, N., Travica, T.: Novi aspekti u rješavanju oborinske odvodnje na primjeru ceste 233 i 231 (Gornji zamet u Rijeci). U: Zborniku radova Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, Hrvatska, 2009.
- [26] German Association for Water, Wastewater and Waste: DWA-A 138E: Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of Precipitation Water, Germany, 2005.
- [27] Rubinić, J., Lukarić, S., Rukavina, J.: Engineering Analysis of Short-Term Heavy Rainfalls—Rijeka Area Case Study. U: Zborniku radova Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima. Hrvatsko društvo za zaštitu voda i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, Hrvatska, 2009.
- [28] Python Software Foundation, <https://www.python.org/>
- [29] Watt, E., Marsalek, J.: Critical review of the evolution of the design storm event concept. Canadian Journal of Civil Engineering, 40 (2013) 2, pp. 105-113.
- [30] Bonacci, O.: Oborine - glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus, sveučilišni udžbenik, Geing, Split, 1994.
- [31] Bonacci, O.: Oborine na području općina Split, Solin i Kaštela – studija. Fakultet građevinskih znanosti, Split, 1990., nepublicirano
- [32] Maričić, S.; Mijušković-Svetinović, T.; Patrčević, V.: Design storm for Osijek's urban drainage; Procc. XXII conference of danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Brno, Czech Republic, 30 August – 2 September, 2004.
- [33] Pilgrim, D.H.: Australian rainfall and runoff, a guide to flood estimation. The Institution of Engineers, ACT, 1987.
- [34] Huff, F.A.: Time distribution of rainfall in heavy storms, Water Resour. Res., 3 (1967) 4, pp. 1007–1019,
- [35] Jaredić, K.: Analiza oborina i njihove infiltracije na pilot području u Rijeci, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, diplomski rad, 2017.
- [36] Levy, B., McCuen, R.: Assessment of storm duration for hydrologic design. Journal of Hydrologic Engineering, 4 (1999) 3, pp. 209-213.
- [37] Schmid, B.H.: Critical rainfall duration for overland flow from an infiltrating plane surface. Journal of hydrology, 193 (1997) 1, pp. 45-60.
- [38] Lighthill, M.J., Whitham, G.B.: On kinematic waves. I. Flood movement in long rivers. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, pp. 281-316, 1955.
- [39] Ponce, V.M.: The kinematic wave controversy. Journal of Hydraulic Engineering, 117 (1991) 4, pp. 511-525.
- [40] Singh, V.P.: Kinematic wave modelling in water resources: a historical perspective. Hydrological processes, 15 (2001) 4, pp. 671-706.
- [41] Chanson, H.: Hydraulics of open channel flow. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [42] Leclerc, G., Schaake, J.C.: Methodology for assessing the potential impact of urban development on urban runoff and the relative efficiency of runoff control alternatives. Lab. Report 167. MIT, Cambridge, USA, 1973.
- [43] Massman, J.L.: A design manual for sizing infiltration ponds. Washington State Department of Transportation. Technical report. Washington, USA, 2003.
- [44] Spitz, K., Moreno, J.: A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley and Sons, 1996.
- [45] Agroskin, I.I., Dmitrijev, G.T., Pikalov, F.I.: Hidraulika. Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [46] Bartels, R.H., Beatty, J.C., Barsky, B.A.: Bézier curves. An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modelling, pp. 211-245, 1998.