

UDK/UDC: 502.131.1:711.4

Prejeto/Received: 26.01.2017

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 04.04.2017

VPLIV SONARAVNIH UKREPOV NA HIDROGRAM ODTOKA Z URBANIZIRANEGA PRISPEVNEGA OBMOČJA

THE INFLUENCE OF SUSTAINABLE MEASURES ON RUNOFF HYDROGRAPH FROM AN URBANIZED DRAINAGE AREA

Maja Štajdohar^{1,2}, Mitja Brilly¹, Mojca Šraj^{1,*}

¹Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

²JP Vodovod - Kanalizacija d.o.o., Vodovodna cesta 90, 1000 Ljubljana

Izvleček

Urbanizacija spremeni lastnosti prispevnega območja in vpliva na posamezne komponente hidrološkega kroga. Povečajo se volumni površinskega odtoka, padavinska voda odteče hitreje, posledično pa se povečajo tudi konice pretokov. V raziskavi smo s pomočjo hidrološkega modela, ki smo ga vzpostavili s programskim orodjem HEC-HMS, preverili, za koliko lahko s sonaravnimi ukrepi, ki zadržijo površinski odtok čim bližje mestu nastanka, zmanjšamo volumne odtoka in konice pretokov na manjšem prispevnem območju v širšem središču mesta Ljubljane. Ugotovili smo, da so sonaravni ukrepi v tem pogledu učinkovitejši v primeru manjših padavinskih dogodkov s krajšo povratno dobo. S kombinacijo različnih ukrepov lahko v primeru dogodkov s povratno dobo, krajšo od enega leta, volumne odtoka in konice pretokov z obravnavanega območja zmanjšamo do 45 %, v primeru dogodka s 100-letno povratno pa lahko volumen odtoka zmanjšamo za 12 %, konico pretoka pa za 10 %.

Ključne besede: sonaravni ukrepi, površinski odtok, urbanizacija, ponikanje, zelene strehe, programsko orodje HEC-HMS.

Abstract

Urbanization changes the characteristics of a drainage area and alters the components of the natural hydrologic cycle. Runoff volumes increase, storm water runs off more quickly and consequently peak flows increase. The hydrological modelling system HEC-HMS was used to evaluate the effectiveness of different sustainable measures that manage rainfall where it falls, in reducing runoff volumes and peak flows on a small drainage area in the city center of Ljubljana. The results demonstrate that sustainable measures are more effective in reducing runoff volumes and peak flows for smaller and more frequent rainfall events. In the case of events with a return period of one year or less, the runoff volumes and peak flows reduction was approximately 45 %. On the other hand, in the case of an event with 100-year return period, the reduction of runoff volume and peak flow was only 12 % and 10 %, respectively.

Keywords: sustainable measures, runoff, urbanization, infiltration, green roofs, hydrological modelling system HEC-HMS.

* Stik / Correspondence: mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

© Štajdohar M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Štajdohar M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence](#).

1. Uvod

Človek že od nekdaj posega v naravo in vpliva na njeno ravnovesje. Tak proces je tudi urbanizacija, ki bistveno zmanjša delež vegetacije in število nedreniranih depresij na prispevnih območjih vodotokov, objekti in prometna infrastruktura, ki so zgrajeni v tem procesu, pa povečajo delež neprepustnih površin. Zaradi okrnjene vegetacije se zmanjšata količina prestreženih padavin in evapotranspiracija, zaradi večjega deleža neprepustnih površin in zbijanja tal v času gradnje pa je manjša tudi infiltracija padavinske vode v tla. Ker se zmanjša infiltracija, je manjše bogatenje podtalnice, posledično pa so v sušnem obdobju nižji tudi bazni odtoki. Skladiščna kapaciteta prispevnega območja je po urbanizaciji zaradi vseh omenjenih sprememb tako bistveno manjša kot prej, zato večina padavin z urbanih površin odteče v obliki površinskega odtoka (Chow, 1964). Poleg tega površinski odtok odteče veliko hitreje kot pri naravnih razmerah, saj so neprepustne površine precej bolj gladke od naravnih, jarki in kanali, ki so urejeni v procesu urbanizacije, pa bistveno zgostijo mrežo odvodnikov na prispevnem območju (Hollis, 1975). Ker se povečajo volumni odtoka in ker padavinska voda odteče hitreje, se povečajo tudi konice pretokov, čas do nastopa konice pretoka pa je krajši (Huang et al., 2012). Tovrstna sprememba hidrološkega režima v končni fazi vodi v degradacijo življenjskega prostora rečnih in obrežnih organizmov, poleg tega pa vpliva tudi na povečan transport onesnažil (Gilroy in McCuen, 2009) in prepogosto prelivanje mešane odpadne vode preko razbremenilnikov mešanih kanalizacijskih sistemov v končne odvodnike.

V preteklosti so se strokovnjaki na področju upravljanja s padavinsko vodo osredotočali predvsem na odpravljanje posledic povečanih konic pretokov. V ta namen so gradili zadrževalne bazene, ki padavinsko vodo začasno zadržijo na prispevnem območju, nato pa jo postopoma spuščajo v končni odvodnik. Ti objekti vplivajo le na časovno razporeditev pretokov v odvodniku, volumna površinskega odtoka pa ne zmanjšajo. Poleg tega so običajno dimenzionirani tako, da ne zadržijo odtokov, ki so posledica manjših in bolj pogostih neviht (Holman-Dodds et al., 2003;

National Research Council, 2009). Pogostokrat prihaja tudi do sinergijskega učinka več zadrževalnikov na širšem prispevnem območju, kar lahko privede do težav s poplavljanjem dolvodno (Emerson, 2005; Holman-Dodds et al., 2003).

Zaradi omejitev konvencionalnega pristopa k upravljanju s padavinsko vodo oziroma novih ciljev, ki so se v preteklosti pojavili na tem področju, kot sta na primer rehabilitacija rečnih ekosistemov in zaščita podzemnih vodnih virov, se je sredi devetdesetih let prejšnjega stoletja v svetu začel uveljavljati nov pristop k urejanju urbanega odvodnjavanja, ki temelji na posnemanju naravnih hidroloških procesov s pomočjo sonaravnih ukrepov, ki površinski odtok zadržijo čim bližje mestu nastanka (Coffman, 2000; Damodaram et al., 2010). K tovrstnim ukrepom štejemo na primer ureditev ponikalnih jarkov in ponikalnih jaškov, prepustnih asfaltov, bioretenzijskih površin in bioretenzijskih jarkov, zelenih streh, zasaditev dreves, ureditev bioinfiltracijskih jarkov, cistern za zbiranje deževnice idr. (Coffman, 2000; Low Impact Development Center, 2014; National Research Council, 2009).

V kolikšni meri bodo sonaravni ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom hidrološki režim na urbaniziranem prispevnem območju približali naravnemu hidrološkemu režimu, je odvisno od številnih dejavnikov, kot so prepustnost tal na obravnavanem območju, nivo gladine podtalnice, razgibanosti terena ipd. Najbolj vprašljiv je njihov učinek na območjih z visoko stopnjo urbanizacije (Coffman, 2000). Pogostokrat uporabo sonaravnih ukrepov ovirajo tudi lokalni predpisi, standardi, coniranje prostora in odziv širše javnosti (strah pred preplavitvijo kleti, nestrinjanje z ožjimi voznimi pasovi in parkirnimi mesti ipd.), ki omejujejo uporabo inovativnih tehnik (EPA, 2000).

Številne raziskave so potrdile, da so sonaravni ukrepi pri zmanjševanju negativnih posledic urbanizacije na površinski odtok bolj učinkoviti pri manjših in bolj pogostih nevihtah (Holman-Dodds et al., 2003; Brander et al., 2004; Damodaram et al., 2010; Rose in Hodges, 2010; Williams in Wise, 2006; Ellis in Vivattene, 2013; Juan et al., 2013; Jeon et al., 2010; Gilroy in McCuen, 2009) in da je

učinek sonaravnih ukrepov v primeru padavinskih dogodkov z večjimi povratnimi dobami v tem pogledu omejen. Pri odpravljanju negativnih posledic v primeru večjih dogodkov je zato pogostokrat potrebno uporabiti tudi konvencionalne strategije za upravljanje s površinskim odtokom (Damodaram et al., 2010; Ellis in Viavattene, 2013; Holman-Dodds et al., 2003; Rose in Hodges, 2010; Williams in Wise, 2006).

V raziskavi smo poskušali ugotoviti, katere sonaravne ukrepe za upravljanje s površinskim odtokom bi bilo glede na obstoječo zakonodajo, prostorske danosti in tehnične omejitve najbolj smiselno uporabiti na manjšem urbaniziranem prispevnem območju, ki je glede na tip pozidave reprezentativno za širše mestno središče Ljubljane. Poleg tega smo s pomočjo hidrološkega modela, ki smo ga za izbrano prispevno območje vzpostavili na podlagi prostorskih podatkov in meritev padavin in pretokov, poskušali ugotoviti, za koliko odstotkov lahko z različnimi ukrepi in njihovimi kombinacijami zmanjšamo volumne odtoka in konice pretokov ter kako lahko vplivamo na čase do nastopa konice pretoka v primeru dogodkov z različnimi povratnimi dobami.

2. Podatki in metode dela

2.1 Predstavitev obravnavanega območja

Na območju širšega središča mesta Ljubljane je odvajanje padavinske odpadne vode urejeno z mešanim kanalizacijskim sistemom, ki odvaja komunalno in padavinsko odpadno vodo. Pri takem sistemu se večji del mešane odpadne vode preliva preko razbremenilnih objektov v površinski odvodnik, preostali del pa odteka naprej po kanalizacijskem sistemu do čistilne naprave. Ker so iztoki površinskega odtoka na mešanih sistemih urejeni preko razbremenilnikov, smo v prvem koraku identificirali vse razbremenilnike v širšem središču mesta Ljubljane (tj. od Prul do Vodmata) in pripadajoča prispevna območja. Za modeliranje površinskega odtoka in nadaljnje analize smo nato v ožji izbor vključili prispevna območja, pri katerih je bilo meje mogoče dovolj jasno opredeliti, pri

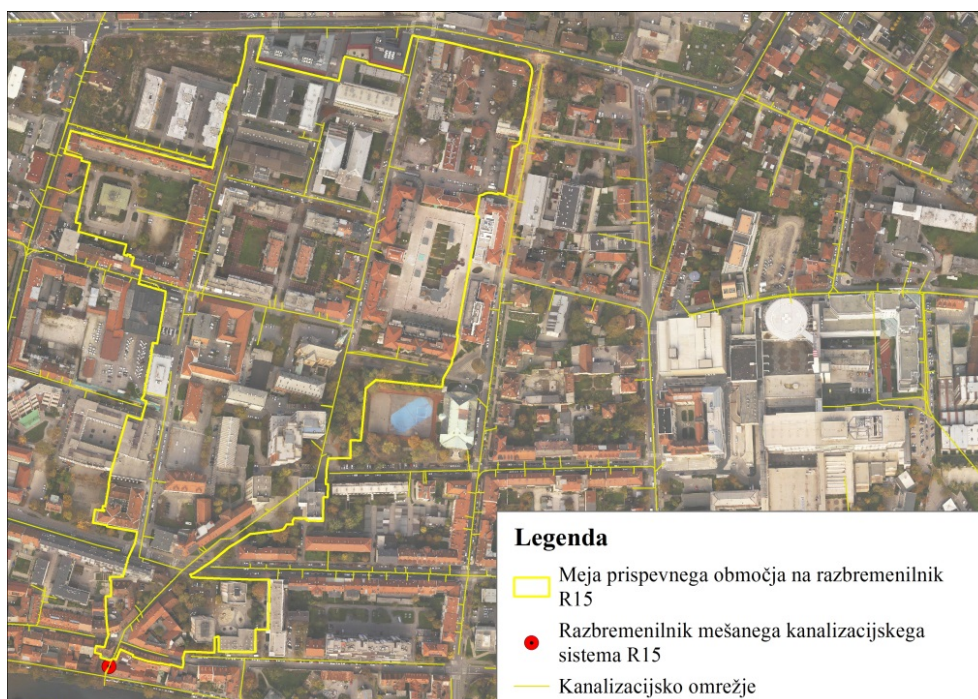
katerih je pozidava reprezentativna za širše mestno središče in pri katerih je bilo na iztoku mogoče namestiti merilnik pretokov. Izbrali smo prispevno območje razbremenilnika z oznako R15 (slika 1), ki obsega območje ob Kotnikovi in Metelkovi ulici in katerega površina znaša 145.519,7 m².

Na splošno je pozidava na obravnavanem območju precej raznolika in izhaja iz različnih zgodovinskih obdobj. Nekateri objekti sežejo že v leto 1800, najnovejši pa so bili zgrajeni po letu 2000 (GURS, 2016). Za objekte zgrajene po letu 1990 je značilno, da imajo pod nivojem terena zgrajene podzemne garaže, katerih tlorisi segajo povsem do roba zemljišča, ki pripada posameznemu objektu (IBE d.d., 2003; LUZ d.d., 1999; LUZ d.d., 1996; Medvešček in Grmek, 2002; Progres Slovenj Gradec, 1990; Projektiva Gorica d.o.o., 1992; Projektivno konstrukcijski biro SGP Stavbenik Koper, 1983), strehe pa imajo ravne. Pri starejših objektih so strehe večinoma poševne, na zemljiščih, ki jim pripadajo, pa se nahajajo zelenice in/ali parkirišča.

Na obravnavanem prispevnem območju smo identificirali 5 različnih vrst pokrovnosti tal oziroma tipov površin (slika 2), katerih deleži so prikazani v preglednici 1. Zelenice nad podzemnimi garažami smo opredelili kot poseben tip površine, ker na teh površinah ponikanje padavinskih vod ni možno.

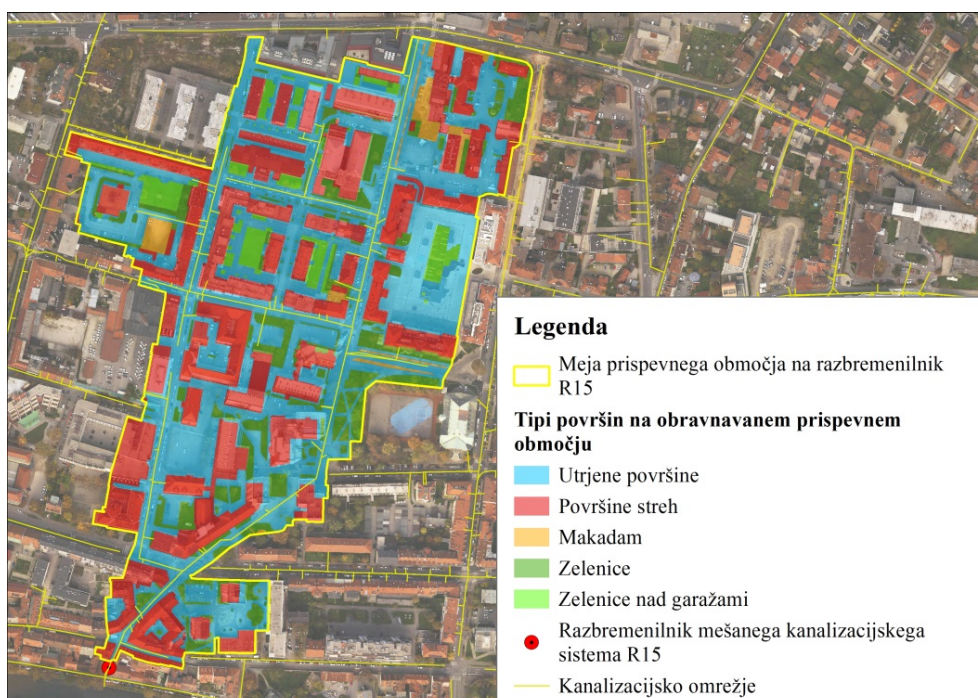
Nekateri objekti in utrjene površine na obravnavanem območju imajo ponikanje padavinske vode že urejeno s ponikalnimi jaški (slika 3).

Tla na obravnavanem območju so sestavljena iz savskega proda s peskom in meljem in so za vodo dobro prepustna, koeficient prepustnosti k_f znaša med $1 \cdot 10^{-4}$ m/s in $5 \cdot 10^{-4}$ m/s (GeoZS, 1995). Podtalnica se, po znanih hidrogeoloških razmerah centra Ljubljane, nahaja v starejšem savskem nanosu v globini med 17 in 23 metri pod površino (GeoZS, 1992). Glede na Uredbo o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja (Uradni list RS št. 43/2015) se obravnava območje nahaja na podobmočju z milejšim vodovarstvenim režimom z oznako IIIA.



Slika 1: Obravnavano prispevno območje (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 1: Studied drainage area (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).



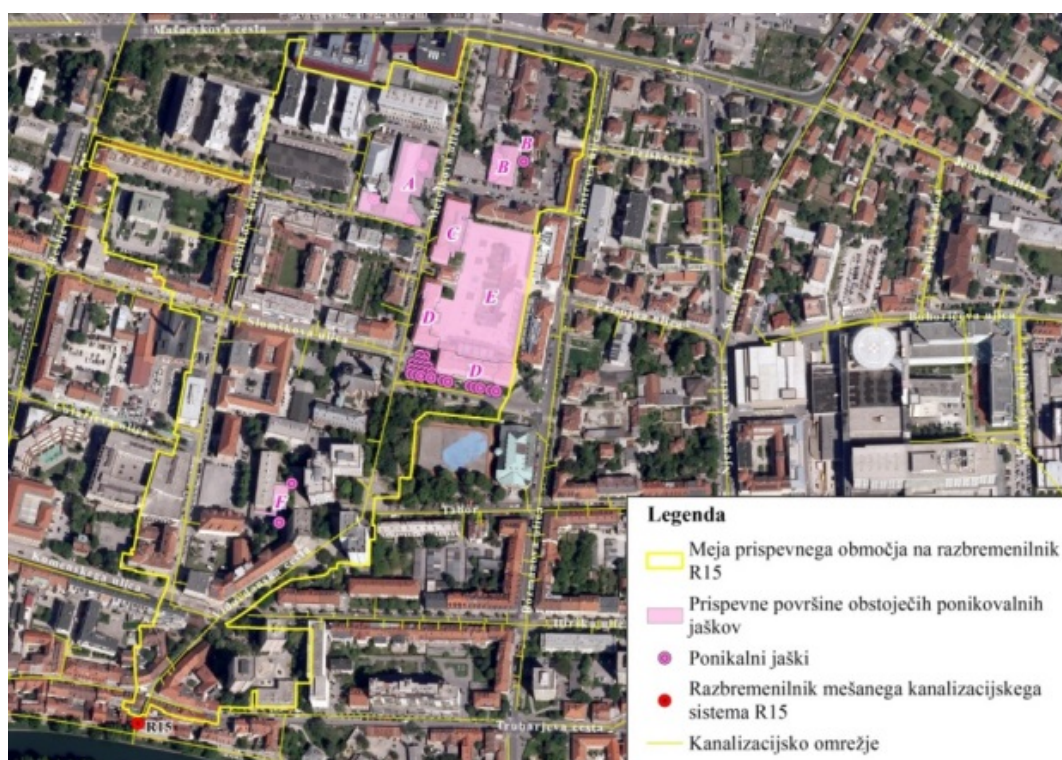
Slika 2: Pokrovnost tal na obravnavanem prispevnem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 2: Land cover types on the studied drainage area (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Preglednica 1: Deleži posameznih tipov pokrovnosti tal na obravnavanem prispevnem območju.

Table 1: Percentage of individual land cover type on the studied drainage area.

	Površina A [m ²]	Delež celotne površine prispevnega območja [%]
Utrjene površine	69.142,8	47,5
Strehe	52.631,5	36,2
Makadam	2.842,1	2,0
Zelenice	15.157,3	10,4
Zelenice nad garažami	5.746,0	3,9
Skupaj	145.519,7	100,0



Slika 3: Prispevne površine obstoječih ponikalnih jaškov (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 3: Drainage areas connected to existing infiltration shafts (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Preglednica 2: Velikost prispevnih površin obstoječih ponikalnih jaškov.

Table 2: Drainage areas of existing infiltration shafts.

Oznaka površine	Površina A [m ²]
A	2459,3
B	851,1
C	1209,0
D	2248,1
E	7895,6
F	355,0



Slika 4: Lokacija dežemera in merilno mesto za meritve pretoka.

Figure 4: Raingauge location and discharge measurement site.

Meritve padavin in pretokov smo izvajali v obdobju od 22. 11. 2012 12:50 do 5. 6. 2013 9:00 z zajemom podatkov na 5 minut. Pretoke smo merili na iztoku z obravnavanega prispevnega območja oziroma v razbremenilniku mešanih odpadnih vod v Znamenjski ulici s pomočjo Dopplerjevega merilnika pretočnih hitrosti, globine in temperature vode Starflow Unidata model 6526-21 (slika 4), padavine pa približno 500 m vzhodno od omenjenega razbremenilnika, v bližini Ambroževega trga, s pomočjo avtomatskega dežemera Onset RG3-M (slika 4).

2.2 Modeliranje odtoka

2.2.1 Metode za izračun posameznih komponent hidrološkega kroga

Za modeliranje odtoka z obravnavanega prispevnega območja smo izbrali programsko orodje HEC-HMS (USACE, 2015). Za izračun neposrednega odtoka s prispevnega območja smo izbrali metodo uporabniško določenega hidrograma enote, saj smo imeli na voljo meritve padavin in pretokov, za izračun baznega odtoka pa metodo konstantnega mesečnega baznega odtoka. Za izračun vpliva vegetacije na odtok smo uporabili t. i. enostavno metodo prestrežanja (ang. *Simple Canopy Method*), ki simulira prestrežanje padavin in evapotranspiracijo. Padavinske izgube smo simulirali z metodo SCS, ki smo jo v

nadaljevanju uporabili tudi za modeliranje vpliva sonaravnih ukrepov na površinski odtok (USACE, 2015):

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}, \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{CN_{komp}} - 254, \quad (2)$$

kjer je Q površinski odtok [mm], P padavine [mm], S maksimalna potencialna retenzija prispevne površine [mm] in CN_{komp} kompozitni brezdimenzijski koeficient, ki ga določimo glede na delež posameznega tipa rabe tal, ki površinskega odtoka nima odvedenega neposredno v kanalizacijski sistem, in pripadajočo vrednost CN . Pri tej metodi je programu potrebno podati tudi delež neprepustnih površin, kjer je površinski odtok neposredno odveden v kanalizacijski sistem, saj na teh površinah program ne izračunava izgub.

Koeficiente CN za površine z enotno rabo tal in enotnim tipom zemljine običajno določimo s pomočjo ustreznih preglednic (USDA, 1986) glede na hidrološko skupino zemljine, rabo tal in hidrološke razmere. Upoštevali smo, da tla na obravnavanem območju spadajo v hidrološko skupino D, saj je bila zemljina v procesu urbanizacije podvržena zbijanju (Lim et al., 2006). Ker koeficienti CN za območja z obstoječimi ponikalnimi jaški v omenjenih preglednicah niso podani, smo te izračunali s pomočjo enačbe (MDE, 1983):

$$CN = \frac{25400}{5 \cdot (P + 2 \cdot Q - \sqrt{4 \cdot Q^2 + 5 \cdot P \cdot Q}) + 254} \quad (3)$$

Enačbo (3) za izračun koeficientov CN , ki so značilni za območja z objekti za ponikanje padavinske vode, priporočajo tudi številni priročniki za upravljanje s padavinsko vodo in različni avtorji (Comprehensive Environmental Inc., 2012; MDE, 2012; State of Delaware, 2015; Whithers in Ravenel, 2006; Zomorodi, 2015). V tem primeru lahko pri izračunu koeficienta CN parameter Q pojasnimo kot razliko med višino površinskega odtoka s prispevnega območja objekta $Q_{dot,pon}$ [mm] pri izbranem nalivu P , ki ga izračunamo s pomočjo enačb (1) in (2) in višino površinskega odtoka Q_{skl} [mm], ki ga ponikalni jaški na posameznem območju lahko uskladišijo (MDE, 1983). Q_{skl} [mm] smo določili na podlagi velikosti posameznega območja s ponikalnimi jaški, odtočnih koeficientov za posamezno območje glede na standard DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005) ter jakosti in trajanja nalirov, na katere so glede na projekte priključkov ponikalni jaški dimenzionirani.

Z uporabo enačbe (3) dobimo pri različnih vrednostih padavin P različne vrednosti koeficienta CN . Z večanjem količine padavin se vrednost koeficienta CN približuje določeni konstantni vrednosti, ki jo lahko privzamemo kot vrednost, ki je reprezentativna za obravnavano prispevno območje (Hawkins, 1993). Na podlagi podatkov o nalivih z različnimi povratnimi dobami za postajo

Preglednica 3: Vrednosti koeficientov CN za površine, ki niso neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom in CN_{komp} .

Table 3: CN coefficients for areas disconnected from sewer system and CN_{komp} .

Tip površine	Površina A [m ²]	Delež od vsote površin, ki niso neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom [%]	CN	CN_{komp}
Zelenice (razen tistih, ki imajo odtok odveden v obstoječe ponikalnice)	13.932,6	38	80	
Zelenice nad garažami (razen tistih nad garažami, ki imajo odtok odveden v obstoječe ponikalnice)	4.715,0	13	89	88
Makadam	2.842,2	8	96	
Območja z obstoječimi ponikalnimi jaški	15.018,1	41	94	

Ljubljana – Bežigrad (ARSO, 2009) smo za vsako območje s ponikalnimi jaški (slika 3 in preglednica 2) in vsak naliv določili ustrezno vrednost koeficienta CN . Ugotovili smo, da koeficienti CN v teh primerih z naraščanjem padavin najprej upadajo, nato pa pri določeni količini padavin začnejo strmo naraščati in se približevati konstantni vrednosti. Te vrednosti smo tako privzeli kot reprezentativne vrednosti koeficientov CN za posamezna prispevna območja z obstoječimi ponikalnimi jaški. Kompozitna vrednost CN na teh območjih znaša 94 (preglednica 3).

Vrednosti koeficientov CN za površine, ki niso neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom in končna kompozitna vrednost koeficienta CN_{komp} za te površine, so prikazane v preglednici 3.

2.2.2 Umerjanje in preverjanje hidrološkega modela odtoka

Najprej smo na podlagi razpoložljivih podatkov o padavinah in pretokih iz obdobja meritev v letih 2012 in 2013 določili posamezne dogodke. V nadaljnji analizi smo uporabili samo dogodke, pri katerih so bile temperature zraka nad 0 °C in pri katerih na obravnavanem območju pred tem ni bilo snežne odeje. Za umerjanje modela smo izbrali štiri padavinske dogodke različnih velikosti, za preverjanje modela pa še pet dogodkov (preglednici 4 in 5).

Preglednica 4: Značilnosti dogodkov, ki smo jih uporabili za umerjanje modela.

Table 4: Characteristics of rainfall events used for model calibration.

Datum	Čas začetka padavin	Čas trajanja padavin [min]	Količina padavin [mm]	Povpr. bazni odtok [m ³ /s]	Maks. sklad. kapaciteta vegetacije [mm]	Konica pretoka [m ³ /s]	Čas nastopa konice pretoka [hh:mm]
feb.13	13:00	100	20,40	0,015	0,55	0,411	13:45
13.mar.13	12:50	180	14,20	0,020	0,55	0,359	14:10
6.-7.maj.13	22:50	130	8,60	0,011	1,00	0,178	00:50
29.maj.13	12:35	40	1,80	0,012	1,45	0,050	13:25

Preglednica 5: Značilnosti dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela.

Table 5: Characteristics of rainfall events used for model verification.

Datum	Čas začetka padavin	Čas trajanja padavin [min]	Količina padavin [mm]	Povpr. bazni odtok [m ³ /s]	Maks. sklad. kapaciteta vegetacije [mm]	Konica pretoka [m ³ /s]	Čas nastopa konice pretoka [hh:mm]
10.mar.13	2:35	245	10,0	0,0070	0,55	0,2647	04:55
6.maj.13	2:10	145	6,8	0,0069	1,00	0,2118	03:10
21.maj.13	0:50	105	5,4	0,0108	1,45	0,3590	01:40
6.feb.13	7:35	70	5,4	0,0124	0,55	0,1791	08:45
19.maj.13	15:15	10	2,0	0,0067	1,40	0,0832	15:35

Model smo umerjali ročno. Preverjali smo razlike med merjenimi in izračunanimi konicami pretokov, volumni odtoka, časi nastopa konice ter za pretoke računali tudi koren povprečne kvadratne napake (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{izr,i} - Q_{izm,i})^2}{n}}, \quad (4)$$

kjer je $Q_{izr,i} - Q_{izm,i}$ razlika med izračunanimi in izmerjenimi pretoki [m³/s] v določenem časovnem intervalu i in n število časovnih intervalov

2.3 Izhodišča za izbor sonaravnih ukrepov

Krovni zakon, ki v Sloveniji ureja varstvo, urejanje in rabo vode je Zakon o vodah (Uradni list RS št. 67/2002, 57/2008, 57/2012, 100/2013, 40/2014, 56/2015), ki v 92. členu navaja, da je za ukrepe za zmanjševanje odtoka padavinskih voda z urbanih površin v ureditvenih območjih naselij zadolžena

lokalna skupnost. V Izvedbenem prostorskem načrtu (IPN) Mestne občine Ljubljana (Uradni list RS št. 78/2010) je navedeno, da je pri gradnji objektov potrebno zagotoviti ponikanje čim večjega dela padavinske vode s pozidanih in tlakovanih površin. Na območjih, kjer ponikanje zaradi značilnosti tal ni možno, je čim večji delež padavinske vode pred odvodom v kanalizacijsko omrežje potrebno začasno zadržati na lokaciji.

Pri preverjanju prostorske razpoložljivosti za ponikanje površinskega odtoka na obravnavanem območju in izbiri ustrezne vrste objektov za ponikanje smo se oprli na nemški standard DWA-A-138E, ki obravnava načrtovanje, gradnjo in obratovanje ponikalnih objektov in naprav. Poleg tega smo pri izbiri ustreznih objektov upoštevali tudi zahtevo Uredbe o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja (Uradni list RS št. 43/2015), da je pred iztokom

površinskega odtoka z utrjenih površin v ponikanje potrebno namestiti lovilec olj, kadar se objekt nahaja znotraj vodovarstvenih območij z oznako IIIA.

Druge možnosti za sonaravno upravljanje s padavinskim odtokom na obravnavanem območju smo preverili na podlagi priporočil za urbana območja, ki so podana v priročniku za sonaravno upravljanje s površinskim odtokom neodvisne zveze za raziskovanje in informiranje na področju gradbeništva in industrije (ang. Construction Industry Research and Information Association – CIRIA) (CIRIA, 2015). V takih primerih je priporočljivo preveriti možnost namestitve zelenih streh (naklon strehe $< 1:3$), uporabe cistern za zbiranje deževnice, zamenjave neprepustnih površin s prepustnimi, uporabe majhnih retenzijskih površin ali vodnih elementov in zasaditve dreves.

Izkazalo se je, da je v primeru objektov, katerim pripada zemljišče, ki ga je možno nameniti za ponikanje padavinskih vod s streh, v 95 % možno uporabiti le ponikalne jaške. V primeru utrjenih površin pa so iz nabora objektov, ki jih obravnava standard DWA-A-138E, primerni le ponikalni jaški ali cevni ponikalni jarki, saj je le v teh primerih pred iztokom padavinske vode v ponikanje mogoče namestiti lovilce olj.

Pri preverjanju drugih možnosti za sonaravno upravljanje s površinskim odtokom na obravnavanem območju smo ugotovili, da bi bile zelene strehe edini smiseln ukrep, s katerim bi lahko dosegli opazne učinke. Uporaba cistern za zbiranje deževnice ni smiselna, saj je na obravnavanem območju razmeroma malo zelenic, ki bi prišle v poštev za zalivanje, za druge namene pa bi bila uporaba deževnice malo verjetna. Nadomestitev neprepustnih utrjenih površin s prepustnimi ni dovoljena, saj v tem primeru padavinske vode ni mogoče obdelati z lovilci olj. Na predelih, kjer bi potencialno lahko uporabili manjše bioretenzijske površine, je v večini primerov možna tudi uporaba objektov za ponikanje, ki so pri zmanjševanju volumna površinskega odtoka načeloma bistveno bolj učinkoviti, za zasaditev dreves pa na obravnavanem območju ni veliko možnosti.

Za ponikanje površinskega odtoka s streh smo v vseh primerih predvideli ponikalne jaške, za ponikanje površinskega odtoka z utrjenih površin pa cevne ponikalne jarke. Ponikalne jaške in cevne ponikalne jarke smo dimenzionirali s pomočjo standarda DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005). Za zelene strehe smo predpostavili, da je debelina substrata, ki predstavlja bistveno komponento zelene strehe, v vseh primerih najmanjša možna (80 mm), ki še omogoča zasaditev dovolj raznolike rastlinske združbe in je poleg tega tudi najbolj ekonomična (CIRIA, 2015; EPA, 2000).

2.4 Scenariji sonaravnih ukrepov in njihovo modeliranje

Vpliv posameznih sonaravnih ukrepov in njihovih kombinacij na hidrogram odtoka smo preverili za šest različnih scenarijev:

–Scenarij 1: na prispevnem območju ni nikakršnih sonaravnih ukrepov za upravljanje s padavinsko vodo (tudi obstoječih ponikalnih jaškov ne).

–Scenarij 2: predvideno je dodatno ponikanje padavinskih vod s streh, kjer je to mogoče glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve.

–Scenarij 3: predvideno je dodatno ponikanje padavinskih vod z vseh utrjenih površin, kjer je to mogoče glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve.

–Scenarij 4: predvidena je ureditev zelenih streh na objektih, kjer je naklon strehe manjši od 1:3.

–Scenarij 5: predvideno je dodatno ponikanje padavinskih vod s streh ter z vseh utrjenih površin, kjer je to mogoče glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve.

–Scenarij 6: predvidena je kombinacija ukrepov iz scenarijev 2, 3 in 4. V primeru, da je pri določeni strehi možno površinski odtok ali ponikati ali uporabiti zeleno streho, smo predvideli, da je odtok v takem primeru odveden v ponikanje.

Za vsakega od scenarijev smo na novo vzpostavili model za izračun padavinskih izgub, in sicer smo določili ustrezen delež neprepustnih površin, s katerih je padavinska voda odvedena neposredno v kanalizacijski sistem in vrednost $CN_{komp.}$.

Koeficiente CN površin s predvidenimi objekti za ponikanje padavinske vode smo določili po enakem postopku kot koeficiente CN za površine z obstoječimi ponikalnimi jaški, koeficiente CN za predvidene zelene strehe pa smo določili s pomočjo enačbe (2) (HydroCAD Software Solutions LLC., 2011). Pri tem smo predpostavili, da je parameter S enak skladiščni kapaciteti, ki jo zagotavljajo zelene strehe z izbrano debelino substrata.

Za vsak posamezni scenarij in vse dogodke, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje osnovnega modela ter za 6 sintetičnih neviht smo določili volumen odtoka, konico pretoka in čas do nastopa konice pretoka. Vsi dogodki, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje, razen dogodka 2. februarja 2013, imajo povratno dobo krajšo od enega leta, povratna doba v primeru tega dogodka pa znaša nekaj več kot eno leto. Izbrane sintetične nevihte imajo 2-, 5-, 10-, 25-, 50- in 100-letno povratno dobo in trajanje 1 uro.

3. Rezultati

3.1 Umerjanje in preverjanje modela

Na sliki 5 sta prikazana izmerjena in izračunana hidrograma odtoka za največji in najmanjši dogodek, ki smo ju uporabili za umerjanje modela, na sliki 6 pa hidrograma odtoka za največji in najmanjši dogodek, ki smo ju uporabili za preverjanje modela.

Rezultati umerjanja so prikazani v preglednici 6, rezultati preverjanja pa v preglednici 7.

Razlike med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka so znašale manj kot 7 %, razen pri dveh dogodkih (preglednica 7). Razlike med merjenimi in simuliranimi konicami pretokov so znašale manj kot 16 %, razen pri dveh dogodkih, pri katerih sta razliki znašali 23,8 % oziroma 24,5 %. Do odstopanja v času nastopa konice pretoka pri merjenih in simuliranih hidrogrameh odtoka v večini primerov ni prišlo. Največja razlika je znašala 10 minut (preglednici 6 in 7). Največja razlika med merjenimi in simuliranimi hidrogrameh odtoka, izražena kot $RMSE$, je znašala $0,034 \text{ m}^3/\text{s}$,

kar kaže na visoko učinkovitost modela (Štajdohar, 2016).

3.2 Umestitev sonaravnih ukrepov v prostor in rezultati modeliranja površinskega odtoka pri posameznih scenarijih

Izkazalo se je, da je na obravnavanem območju možno dodatno ponikati padavinsko vodo s streh s skupno površino $18.826,3 \text{ m}^2$, kar predstavlja 12,9 % celotne površine prispevnega območja, s $16.185,0 \text{ m}^2$ utrjenih površin, kar predstavlja 11,6 % celotnega območja in urediti $18.398,5 \text{ m}^2$ zelenih streh, kar predstavlja 12,6 % celotnega območja. Razporeditve ukrepov pri posameznih scenarijih so prikazane na sliki 7. V primeru scenarija 1 je delež neprepustnih površin, ki imajo površinski odtok odveden neposredno v kanalizacijski sistem (DNP , ang. *proportion of impervious area – PIA*) 83,5 %, $CN_{komp.}$ pa 87. Za preostale scenarije sta prametra DNP in $CN_{komp.}$ pripisana pri posamezni sliki (slika 7).

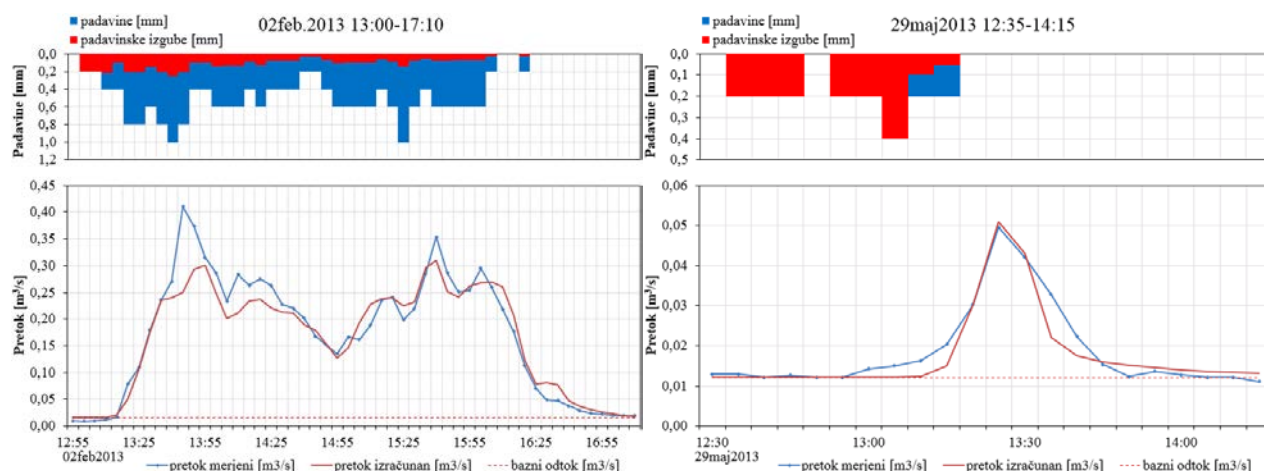
Na sliki 8 so prikazani histogrami skupne količine padavin in hidrograme površinskega odtoka za različne scenarije uporabe sonaravnih ukrepov na obravnavanem območju, in sicer v primeru dveh realnih dogodkov (slika 8 zgoraj) in treh sintetičnih neviht s povratnimi dobami 2, 10 in 100 let (slika 8 spodaj). Pri večini dogodkov se časi do nastopa konice pretoka pri posameznih scenarijih uporabe sonaravnih ukrepov glede na obstoječe stanje na prispevnem območju niso spremenili. Razlike v časih do nastopa konice pretokov smo opazili le pri scenarijih 4, 5 in 6 v primeru dogodka 13. marca 2013. V teh primerih se je konica pretoka pojavila 5 minut kasneje kot pri obstoječem stanju na obravnavanem območju.

4. Analiza in razprava

Ugotovili smo, da so zaradi visoke stopnje pozidanosti in majhnega deleža zelenih površin ter zaradi omejitev, ki izhajajo iz zakonodaje, možnosti za uporabo posameznih sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom na obravnavanem območju precej omejene. Kljub temu lahko s kombinacijami posameznih ukrepov znatno vplivamo na površinski odtok z razmeroma

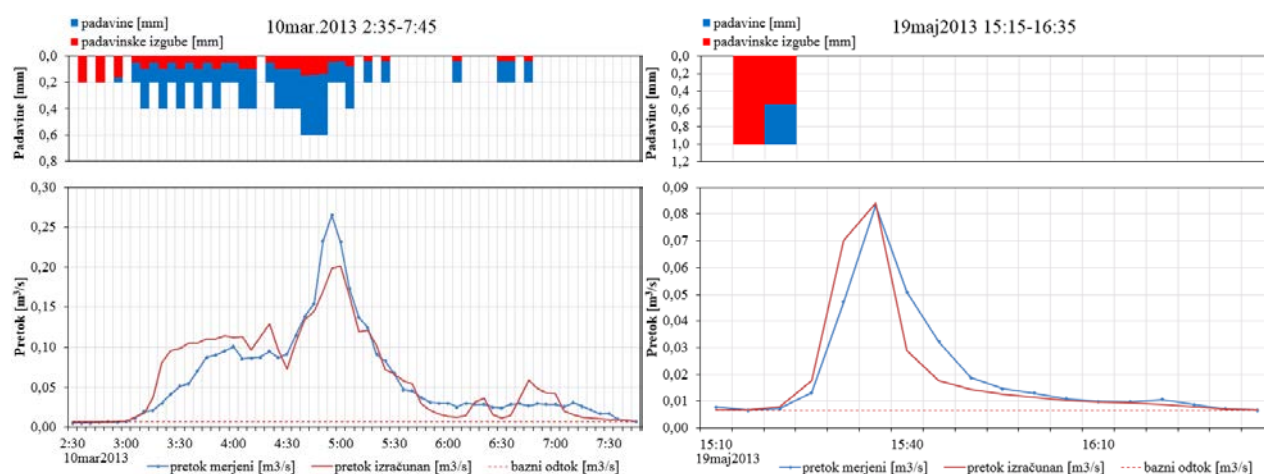
velikega deleža neprepustnih površin. Tako je s kombinacijo ponikalnih jaskov, cevni ponikalnih jarkov in zelenih streh mogoče ponikati oziroma

zadržati odtok s 33,4 % prispevnega območja oziroma z 39,9 % površin, ki imajo površinski odtok odveden neposredno v kanalizacijski sistem.



Slika 5: Merjena in simulirana hidrograma odtoka za dogodka dne 2. februarja 2013 in dne 29. maja 2013 (umerjanje modela).

Figure 5: Observed and simulated hydrographs for the events on 2nd February 2013 and 29th May 2013 (model calibration).



Slika 6: Merjena in simulirana hidrograma odtoka za dogodka dne 10. marca 2013 in 19. maja 2013 (preverjanje modela).

Figure 6: Observed and simulated hydrographs for the events 10th March 2013 and 19th May 2013 (model verification).

Preglednica 6: Odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka ter konicami pretokov v odstotkih in razlike v času nastopa konic pretokov ter RMSE za pretoke v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za umerjanje modela.

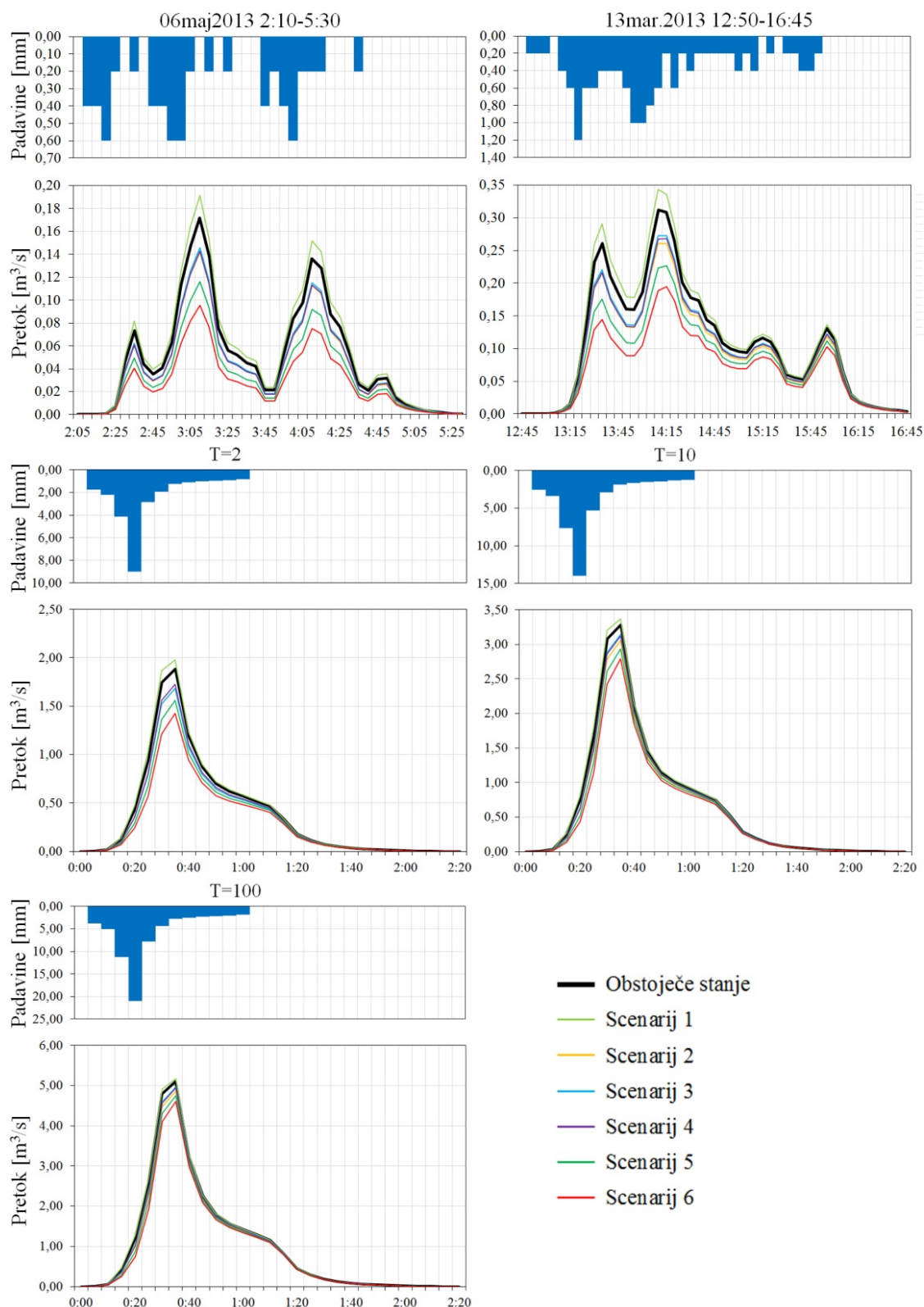
Table 6: Percent differences between observed and calculated volumes, peak flows, differences in time to peak and RMSE for discharges in events used for model calibration.

Datum	Razlika izračunan/izmerjen volumen [%]	Razlika izračunana/izmerjena konica pretoka [%]	Razlika časa nastopa merjene in izračunane konice pretoka [hh:mm]	RMSE [m ³ /s]
2.feb.13	-4,4	-24,5	00:10	0,0339
13.mar.13	7,0	-7,7	00:00	0,0339
6.-7.maj 13	4,8	0,8	-00:05	0,0151
29.maj 13	-4,8	3,0	00:00	0,0031



Slika 7: Prikaz razporeditve posameznih sonaravnih ukrepov v primeru scenarijev 2 – 6 (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 7: Distribution of sustainable measures for scenarios 2 – 6 (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).



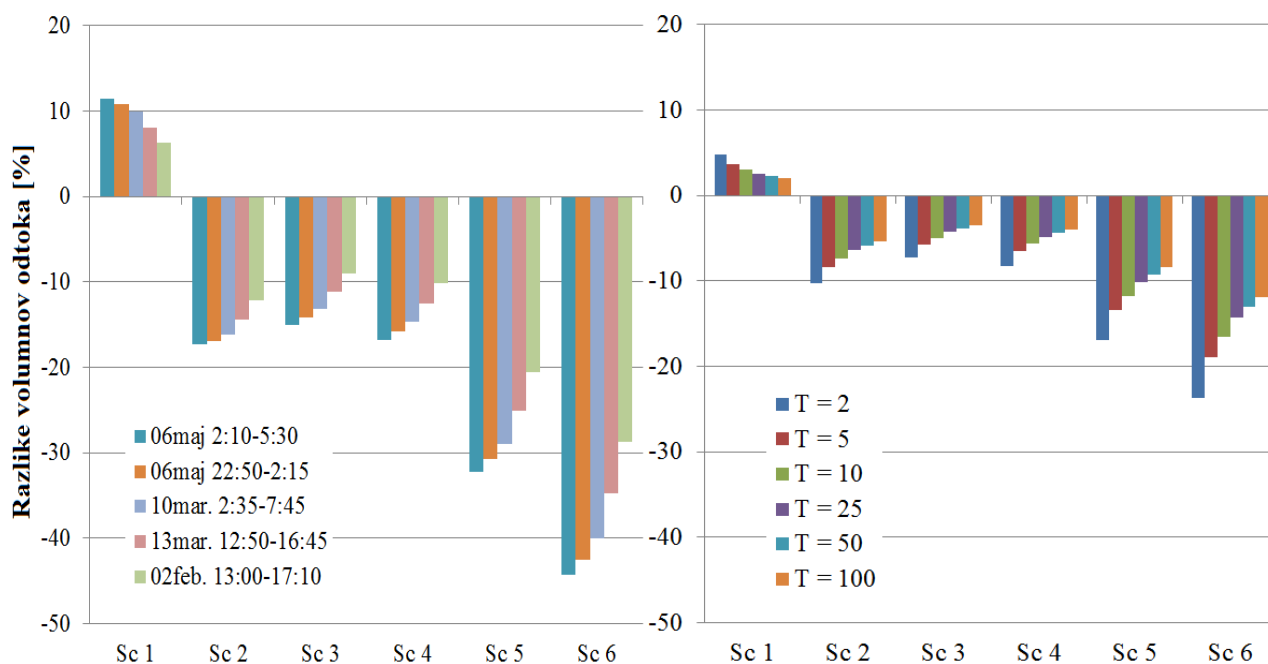
Slika 8: Hidrogrami odtoka pri posameznih scenarijih za dva realna dogodka, ki smo ju uporabili za umerjanje oziroma preverjanje modela ter za tri sintetične nevihte s povratnimi dobami (T) 2, 10 in 100 let.

Figure 8: Runoff hydrographs for individual scenarios of two events used for model calibration and verification and for three synthetic storms with return periods (T) 2, 10 and 100 years.

Preglednica 7: Odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka ter konicami pretokov v odstotkih in razlike v času nastopa konic pretokov ter RMSE v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela.

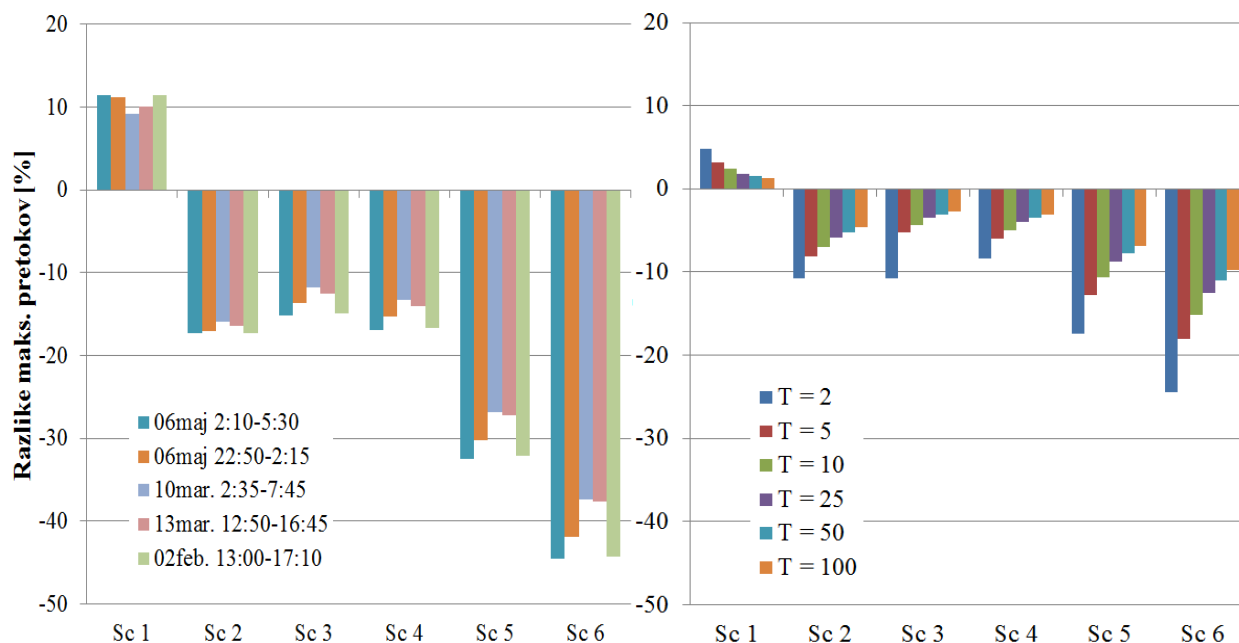
Table 7: Percent differences between observed and calculated volumes, peak flows, differences in time to peak and RMSE for events used for model verification.

Datum	Razlika izračunan/izmerjen volumen [%]	Razlika izračunana/izmerjena konica pretoka [%]	Razlika časa nastopa merjene in izračunane konice pretoka [hh:mm]	RMSE [m ³ /s]
10.mar.13	4,20	-23,8	00:05	0,0219
6.maj 13	15,9	-15,7	00:00	0,0206
21.maj 13	17,2	-11,4	-00:05	0,0184
6.feb.13	6,4	-0,3	00:00	0,0187
19.maj 13	-5,5	1,2	00:00	0,0084



Slika 9: Odstopanja volumnov odtoka pri različnih scenarijih od volumnov odtoka pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.

Figure 9: Percent difference from the existing conditions on the drainage area under study in runoff volumes for each scenario.



Slika 10: Odstopanja konic pretokov pri različnih scenarijih od konic pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.

Figure 10: Percent difference from the existing conditions on the drainage area under study in peak flows for each scenario.

Na slikah 9 in 10 so za posamezne scenarije in padavinske dogodke prikazana odstopanja volumnov odtoka (slika 9) in konic pretokov (slika 10) od volumnov odtoka oziroma konic pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem območju. V primeru realnih dogodkov (sliki 9 in 10 levo) so prikazana odstopanja za pet največjih dogodkov. Odstopanja pri manjših dogodkih so podobna odstopanjem, ki so značilna za najmanjšega od prikazanih dogodkov (t.j. dogodek 6. maj 2013 2:10 do 5:30).

Tako pri realnih padavinskih dogodkih (sliki 9 in 10 levo) kot tudi pri sintetičnih nevihtah (sliki 9 in 10 desno) lahko opazimo, da so odstopanja volumnov odtoka in konic pretokov pri posameznih scenarijih v primerjavi z obstoječim stanjem večja pri tistih scenarijih, kjer je predvideno večje število sonaravnih ukrepov. Podobno so ugotovili tudi nekateri drugi avtorji, ki so preučevali vpliv različnih sonaravnih ukrepov na površinski odtok, npr. Damodaram et al. (2010) ter Rose in Hodges (2010), ki so preučevali vpliv prepustnih asfaltov, zelenih streh in cistern za zbiranje deževnice, Brander et al. (2004), ki so preučevali vplive različnih kombinacij ukrepov za

ponikanje padavinske vode in Jeon et al. (2010), ki so preučevali vpliv prepustnih asfaltov in zelenih streh.

5. Zaključki

V splošnem lahko ugotovimo, da imajo sonaravni ukrepi in njihove kombinacije večji vpliv na volumne odtokov in konice pretokov pri manjših padavinskih dogodkih s krajšo povratno dobo. Z uporabo vseh možnih ukrepov na obravnavanem območju lahko pri dogodkih s povratno dobo približno eno leto ali manj volumne odtoka zmanjšamo za 29 % do 44 % in konice pretokov za 37 % do 45 %, pri dogodku s povratno dobo 2 leti lahko volumen odtoka zmanjšamo za 24 % in konico pretoka za 25 %, pri dogodku s 100-letno povratno dobo pa lahko volumen odtoka zmanjšamo le za 12 %, konico pretoka pa za 10 %. Do podobnih ugotovitev so poleg prej omenjenih prišli tudi drugi avtorji, npr. Williams in Wise (2006) ter Holman-Dodds et al. (2003), ki so preučevali vpliv preusmerjanja padavinske vode z neprepustnih površin na prepustne, Gilroy in McCuen (2009), ki sta preučevala vpliv cistern za

zbiranje deževnice in bioretenzijskih površin, Juan et al. (2013), ki so preučevali vpliv zelenih streh in prepustnih asfaltov ter Ellis in Viavattene (2013), ki sta preučevala vpliv ponikalnih bazenov, zelenih streh in prepustnih asfaltov. Kljub temu, da so naše ugotovitve v splošnem konsistentne z ugotovitvami drugih avtorjev, je konkretne učinke sonaravnih ukrepov na volumne odtoka in konice pretokov pri posameznih raziskavah med seboj težko primerjati. Vpliv sonaravnih ukrepov na površinski odtok je namreč odvisen od številnih dejavnikov, kot so prepustnost in predhodna vlažnost tal na obravnavanem območju, vrsta izbranih ukrepov, velikost in trajanje obravnavanih neviht ipd..

Raziskava je pokazala, da je vpliv sonaravnih ukrepov na konice pretokov odvisen tudi od časovne razporeditve padavin. To lahko opazimo pri realnih dogodkih, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje modela, kjer odstopanja konic pretokov pri posameznih scenarijih od tistih pri obstoječem stanju niso konsistentna z velikostjo dogodka, kot je to primer pri sintetičnih nevihtah, kjer je razporeditev padavin v vseh primerih enaka (slika 10).

Čeprav so rezultati v splošnem skladni s pričakovanji, pa se je pri njihovi interpretaciji potrebno zavedati omejitev, ki izhajajo iz točnosti meritev in natančnosti drugih uporabljenih podatkov, pa tudi omejitev, ki so vezane na eksperimentalno metodo. Te med drugim izhajajo iz pomanjkljivosti metode SCS za izračun padavinskih izgub, ki ne upošteva trajanja in intenzitete padavin in tudi ne predhodne vlažnosti tal. Izbrane oziroma izračunane vrednosti koeficientov *CN*, ki jih odčitamo iz ustreznih preglednic (USDA, 1986), so bile določene na kmetijskih območjih v ZDA, zato je njihova uporaba na drugih geografskih območjih in rabah tal lahko vprašljiva. Prav tako je z določeno zadržanostjo potrebno obravnavati izračunane vrednosti koeficientov *CN* za območja z objekti za ponikanje padavinske vode, saj je skladiščno kapaciteto (skladiščni volumen) teh objektov razmeroma težko opredeliti. Različni priročniki v ta namen priporočajo različne metode, ki pa v vsakem primeru predstavljajo le približek dejanskega stanja. Rezultatov te raziskave tako ne

smemo interpretirati v strogo kvantitativnem smislu, vendar kljub temu dajejo dober vpogled v obravnavano problematiko in pripomorejo k lažjemu razumevanju ključnih procesov. Kljub vsemu lahko zaključimo, da bi z uporabo sonaravnih ukrepov v širšem središču mesta Ljubljane lahko do določene mere zmanjšali volumne površinskega odtoka in konice pretokov. Na ta način bi lahko dosegli manjšo frekvenco prelivanja mešane odpadne vode v reko Ljubljanico in tako izboljšali njeno kemijsko in ekološko stanje ter dosegli bolj enakomerno obremenjenost ljubljanske čistilne naprave.

Viri

ARSO. (2009). Povratne dobe za ekstremne padavine po Gumbelovi metodi. Ljubljana, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, 67 str.
http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/precip-return-periods_2008.pdf
(Pridobljeno 1. 10. 2015.)

Brander, K.E., Owen, K.E., Potter, K.W. (2004). Modeled impacts of development type on runoff volume and infiltration performance. *Journal of the American Water Resources Association* 40(4), 961–969.

Chow V.T. (1964). Runoff. V: Chow V.T. (ur.). Handbook of applied hydrology. New York: McGraw Hill, str. 20-1 do 20-43.

CIRIA. (2015). The SuDS Manual. London, Construction Industry Research and Information Association, Department of Environment Food and Rural Affairs, 888 str.

Coffman, L.S. (2000). Low impact development design: a new paradigm for stormwater management mimicking and restoring the natural hydrologic regime. An alternative stormwater management technology. Prince George's County, Department of Environmental Resources, 10 str.

Comprehensive Environmental Inc. (2012). Stormwater practices research project. Final report. Vermont, Vermont Agency of Transportation, 166 str.

Damodaram, C., Giacomoni, M.H., Khedun, C.P., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., Zechman, E.M. (2010). Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management. *Journal of the American Water Resources Association* 46(5), 907–918.

DWA-A-138E. (2005). Planning, construction and operation of facilities for the percolation of precipitation water. German Association for Water, Wastewater and Waste, 60 str.

- Ellis, J.B., Viavattene, C. (2013). Sustainable urban drainage system modeling for managing urban surface water flood risk. *CLEAN – Soil, Air, Water* **42**, 153–159.
- Emerson, C. H., Welty, C., Traver, R. (2005). Watershed-scale evaluation of a system of storm water detention basins. *Journal of Hydrologic Engineering* **10(3)**, 237–242.
- EPA. (2000). Low Impact Development (LID). A literature review. NW, Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Water, 35 str.
- Gilroy, K.L., McCuen, R.H. (2009). Spatio-temporal effects of low impact development practices. *Journal of Hydrology* **367(3-4)**, 228–236.
- GeoZS. (1992). Geotehnično poročilo o pogojih temeljenja in izgradnje objektov 9, 10(D), 11(E) ter garažne hiše na ustreznem območju ZN CO 5/3 zdravstveni dom v Ljubljani. Geološki zavod Ljubljana, Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, 13 str. (in Slovenian).
- GeoZS. (1995). Hidrogeološka karta. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- GURS. (2014). Ortofoto posnetek za območje MOL. Geodetski Zavod Slovenije.
- GURS. (2016). Prostor – prostorski portal RS. Geodetska uprava Republike Slovenije. <http://prostor3.gov.si/javni/login.jsp?jezik=sl> (Pridobljeno 19. 5. 2016.)
- Hawkins, R.H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **119(2)**, 334–345.
- Hollis, G.E. (1975). The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. *Water Resources Research* **11(3)**, 431–434.
- Holman-Dodds, J.K., Bradley, A.A., Potter, K.V. (2003). Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management. *Journal of the American Water Resources Association* **39(1)**, 205–215.
- Huang, S.-Y., Cheng, S.-J., Wen, J.-C., Lee, J.-H. (2012). Identifying hydrograph parameters and their relationships to urbanization variables. *Hydrological Sciences Journal* **57(1)**, 144–161.
- HydroCAD Software Solutions LLC. (2011). HydroCAD Stormwater Modeling System. Chocorua, HydroCAD Software Solutions LLC. <http://www.hydrocad.net/> (Pridobljeno 30. 4. 2015.)
- IBE, d.d., Svetovanje projektiranje in inženiring d.d.. (2003). PGD št. JGAR.ME-D531/007A, Metelkova, Garaže v I. in II. kleti, atrij in skladiščni prostori v kleti. RS Ministrstvo za kulturo, 21 str. (in Slovenian).
- Jeon, J.H., Lim, K.J., Choi, D., Kim, T.D. (2010). Modeling the effects of Low Impact Development on runoff and pollutant loads from an apartment complex. *Environmental Engineering Research* **15(3)**, 167–172.
- JP VO-KA. (2013). Kataster kanalizacije. Ljubljana, JP VODOVOD-KANALIZACIJA d.o.o.
- Juan, A., Fang, N., Bedient, P. (2013). Flood Improvement and LID Modeling Using XP-SWMM. Houston, Rice University, 11 str.
- Lim, K.J., Engel, B.A., Muthukrishnan, S., Harbor, J. (2006). Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology. *Journal of the American Water Resources Association* **42(3)**, 626–643.
- Low Impact Development Center, Inc. (2014). Urban Design Tools Website. Beltsville, Low Impact Development Center. <http://www.lid-stormwater.net/index.html> (Pridobljeno 22. 9. 2014.)
- LUZ d.d. (1996). PGD št. 4560, Poslovno apartmajski objekt. Investplan d.d., 54 str. (in Slovenian).
- LUZ d.d. (1999). PGD št. 4560/1 Objekt D1, območje urejanja CO 5/3 zdravstveni dom. Energoplan d.d., 30 str. (in Slovenian).
- MDE. (1983). Modelling infiltration practices using the TR-20 hydrologic program. Baltimore, Maryland Department of the Environment, 15 str. <http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/SoilErosionandSedimentControl/Documents/Modeling%20Infiltration%20wTR%2020.pdf> (Pridobljeno 9. 5. 2015.)
- MDE. (2012). Stormwater Design Guidance – Addressing Quantity Control Requirements. Baltimore, Maryland Department of the Environment, 4 str. <http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/SedimentandStormwaterHome/Documents/ESDMEP%20Quantity%20Management%20Design%20Guidance.pdf> (Pridobljeno 10. 5. 2015.)
- Medvešček, T., Grmek, J. (2002). SPO-CO-1/5 Komenskega ul., faza 1.1 in 1.2, podzemna garaža, niz Komenskega. IMOS, Investicijske gradnje d.d., 22 str. (in Slovenian).
- National Research Council. (2009). Urban stormwater management in the United States. Washington, D.C., National Research Council, The National Academies Press, 513 str.
- Odlok o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana – izvedbeni del. Uradni list RS št. 78/2010: 11441.
- Progres Slovenj Gradec, delovna organizacija za projektiranje in inženiring. (1990). PGD št. 894, Poslovni proizvodni objekt ISKRA COMMERCE. ISKRA COMMERCE Ljubljana, 7 str. (in Slovenian).
- Projektivna Gorica d.o.o. (1992). PGD št. 1403/P2. CO 5/3 Zdravstveni dom Ljubljana, objekt podzemni parking II. Faza. IMOS d.d., Ljubljana, 10 str. (in Slovenian).

Projektivno konstrukcijski biro SGP Stavbenik Koper. (1983). PGD, PZI št. 83-33. Stanovanjski objekt L5 plinarna. IMOS Inženiring d.d., 7 str. (in Slovenian).

Rose, K., Hodges, B.R. (2010). Evaluating the effects of low impact development on Texas A&M University west campus. Center for Research in Water Resources, The University of Texas in Austin., 45 str.

State of Delaware. (2015). Delaware DNREC runoff reduction guidance document. Post construction stormwater management. State of Delaware, 25 str.

Štajdohar, M. (2016). Vpliv sonaravnih ukrepov na hidrogram odtoka z urbaniziranega prispevnega območja. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, FGG, 115 str. (in Slovenian).

Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja. Uradni list RS št. 43/2015: 4751.

USACE. (2015). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: HEC-HMS 4.1 for Windows. United States Army Corps of Engineers. [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS Users Manual 4.1.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS%20Users%20Manual%204.1.pdf) (Pridobljeno 15. 6. 2015.)

USDA. (1986). Urban hydrology for small watersheds, Technical release – 55. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, 164 str.

Whiters, Ravenel. (2006). Wake County Stormwater Design Manual. Wake County, North Crolina. http://conservationsuccess.wikispaces.com/file/view/Wake+County+DRAFT_STORMWATER_MANUAL.pdf (Pridobljeno 10. 5. 2015.)

Williams, E.S., Wise, W.R.. (2006). Hydrologic impacts of alternative approaches to storm water management and land developement. *Journal of the Americam Water Resources Association* **42(2)**, 443–455.

Zakon o vodah. Uradni list RS št. 67/2002: 7648.

Zomorodi, K. (2015). Curve number and groundwater recharge credits for LID facilities in New Jersey. http://dewberry.com/docs/default-source/documents/curve_number_and_groundwater_recharge_credits.pdf (Pridobljeno 10. 5. 2015.)