

VPLIV PADAVIN NA PROJEKTNE PRETOKE

THE INFLUENCE OF RAINFALL ON THE DESIGN DISCHARGE

asist. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad.

nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad.

mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

ZNANSTVENI ČLANEK

UDK 556.121:627.82(078.9)

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

Povzetek | Različni hidrotehnični objekti (pregrade, akumulacije, jezovne zgradbe, hudourniške pregrade ...) in vodarske ureditve (ureditve vodotokov ...) so zasnovani ob upoštevanju hidravlične obtežbe, na katero dimenzioniramo objekt ali ureditev, najpogosteje izraženo v obliki projektnih pretokov. Projektne pretoke različnih povratnih dob najpogosteje določamo iz merjenih pretokov s statističnimi analizami. V nemerjenih porečjih ali ko ne razpolagamo z dovolj dolgimi serijami merjenih podatkov o pretokih z vodomernih postaj uradnega državnega hidrološkega monitoringa, ki ga izvaja Agencija Republike Slovenije (ARSO), je določitev projektnega padavinskega dogodka eden najpomembnejših korakov pri določanju projektnih hidrogramov (časovnega diagrama pretokov) oziroma konic projektnih pretokov za načrtovanje hidrotehničnih objektov in vodarskih ureditev. Za določitev projektnega padavinskega dogodka potrebujemo informacije o dolžini padavinskega dogodka, količini padavin in razporeditvi padavin med dogodkom. V prispevku je prikazan vpliv trajanja padavinskega dogodka in razporeditve padavin znotraj dogodka na hidrogram površinskega odtoka in konico pretoka. Ugotovljeno je bilo, da ta dva parametra projektnega padavinskega dogodka lahko izrazito vplivata na projektne hidrograme, tako na obliko, čas nastopa konice kot tudi na velikost konice projektnega pretoka. Za zagotavljanje varnejšega dimenzioniranja hidrotehničnih objektov v prihodnosti so predlagane usmeritve za določitev projektnih padavinskih dogodkov z uporabo krivulj intenziteta-trajanje-povratna doba (ITP) in Huffovih krivulj, ki opisujejo porazdelitev padavin znotraj padavinskega dogodka. Te krivulje so prosto dostopne projektantom hidrotehničnih objektov in vodarskih ureditev za 30 padavinskih postaj na območju Slovenije.

Ključne besede: hidrološko modeliranje, hidrotehnični objekti, Huffove krivulje, nemerjena porečja, projektne padavine, projektni pretoki

Summary | Different hydraulic structures (dams, accumulations, weirs, torrent check dams, ...) and water management systems (river engineering works,...) are designed by taking into account hydraulic loads. The hydraulic load on a structure or system is most often expressed in the form of design floods (discharges). The design floods (discharges) of different return periods are most often determined from measured discharges applying statistical analyses. In ungauged catchments or when long enough measured data on flows from gauging stations of the Slovenian national monitoring

network, executed by the Slovenian Environment Agency (ARSO), are not available, the determination of design storms or design hyetographs is one of the most important steps in determining design hydrographs or design peak discharges for planning hydraulic structures and water management systems. For the design storm definition one needs to define rainfall duration, rainfall amount and internal rainfall distribution. The paper shows the influence of rainfall duration and temporal rainfall distribution on surface runoff hydrograph and peak discharge. The results indicate that these two parameters can have significant impact on the determined design hydrograph, namely on hydrograph shape, time to peak value and design peak discharge value. In order to ensure safer design of hydraulic structures in the future, guidelines are proposed for the design storm definition using intensity-duration-frequency (IDF) curves and Huff curves that can be used to describe the temporal rainfall distribution. These curves are freely available to designers of hydraulic structures and water management systems for 30 precipitation stations in Slovenia.

Key words: design hyetograph, design discharge, ungauged catchments, Huff curves, hydrological modelling, hydrotechnical structures.

1 • UVOD

Pri načrtovanju različnih hidrotehničnih objektov, kot so pregrade, jezovne zgradbe, prepusti ali drče, in načrtovanju vodarskih sistemov, kot so ureditve daljših odsekov vodotokov ali obsežnejše protipoplavne ureditve večjih poplavljenih območij, potrebujemo med drugimi strokovnimi podlagami tudi podatek o konici projektnega pretoka oziroma v nekaterih inženirskih primerih celo podatek o celotnem projektnem hidrogramu za prečni prerez ali odsek vodotoka, na katerem načrtujemo hidrotehnični objekt oziroma ga po potrjeni projektni dokumentaciji pozneje tudi gradimo. Celoten projektni hidrogram (časovni potek projektnega pretoka) potrebujemo tudi za numerično modeliranje razlivanja rečne vode na poplavna območja in seveda za rekonstrukcijo poplavnih dogodkov (npr. hidravlično modeliranje nestalnega toka) – v zadnjem desetletju npr. poplav v večjem delu Slovenije septembra 2007 (Kobold, 2008) in na reki Dravi novembra 2012 (Klaneček, 2013) –, ki še čaka na sodni epilog. Za numerično (dvo)dimenzijsko modeliranje takega poplavnega dogodka je nujno uporabiti nestalni numerični hidravlični model in ga umeriti z dejanskim hidrogramom pretokov oziroma nivogramom. Če razpolagamo z meritvami pretokov, lahko te uporabimo za določitev projektnih pretokov, denimo za izvedbo statističnih analiz (t. i. verjetnostne analize; *angl.* flood frequency analysis), npr. ((Šraj, 2012), (Martinkova, 2013), (Bezak, 2014)), ali za umerjanje in validacijo hidrološkega modela, npr. ((Šraj, 2010), (Martinkova, 2013)). Pogosto pa merjenih podatkov ni na razpolago (t. i. nemer-

jena porečja; *angl.* ungauged catchments). V teh primerih lahko uporabimo katero izmed obstoječih metod, njihov pregled so naredili Blöschl in sodelavci (Blöschl, 2013). Nekatere izmed teh metod so za praktično inženirsko uporabo precej zamudne, saj zahtevajo veliko predznanja o hidrologiji ter pogosto tudi dobro poznavanje statistike in matematike. Tak primer so regionalne verjetnostne analize (*angl.* regional flood frequency analysis), s katerimi lahko določimo projektne pretoke na izbranem nemerjenem vodotoku na podlagi obstoječih merjenih podatkov s hidrološko analizo podobnih porečij, npr. (Blöschl, 2013). Del takšnih analiz za območje Slovenije prikazujeta Zabret in Brilly (Zabret, 2014). Zaradi kompleksnosti omenjenih metod se v inženirski praksi projektne konice pretokov oziroma celotni projektni hidrogrami v primeru nemerjenih porečij pogosto določajo z upoštevanjem projektnih padavinskih dogodkov (sintetičnih padavin) in hidrološkim modeliranjem. Še posebno je ta praksa primerna za manjša nemerjena porečja, kjer večinoma nimamo merjenih podatkov o pretokih. Pri tem postopku je poleg ustreznih parametrov hidrološkega modela treba oceniti oziroma določiti tudi t. i. projektni padavinski dogodek, kar pomeni, da moramo izbrati trajanje padavinskega dogodka, razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka in povratno dobo padavinskega dogodka (UACE, 2000). Ta je večinoma določena glede na tip hidrotehničnega objekta, ki ga načrtujemo. Razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka moramo določiti na podlagi preteklih

merjenih padavinskih dogodkov, trajanje padavinskega dogodka pa ocenimo na podlagi hidroloških značilnosti porečja (časa koncentracije), ki ga analiziramo. Del te tematike je bil v Gradbenem vestniku v preteklosti že obravnavan. Tako sta Dirnbek in Šraj (Dirnbek, 2010) prikazala vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka s poudarkom na različnih metodah, ki jih lahko uporabimo za izračun padavinskih izgub, ki zajemajo prestrežanje padavin zaradi vegetacije, infiltracijo v tla in zadrževanje padavin na površini. Dolšak s sodelavci (Dolšak, 2015b) pa je prikazal metodologijo za določitev t. i. Huffovih krivulj ((Huff, 1967), (Huff, 1970), (Huff, 1990)), s katerimi lahko opišemo razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka. Te krivulje so bile pred kratkim izdelane za 30 padavinskih postaj (Dolšak, 2016), ki so relativno enakomerno razporejene na območju Slovenije in so tudi javno dostopne v delu, ki ga je pripravil Dolšak (Dolšak, 2015a). Zavedati se moramo, da je natančnost podajanja padavinskih dogodkov v hidrološke modele ključnega pomena, saj so hidrološki modeli zelo občutljivi za padavine, s tem pa imajo seveda velik vpliv na rezultate modeliranja ((El-Jabi, 1991), (Ball, 1994), (Danil, 2005), (Kobold, 2005), (Dolšak, 2015a)). To posledično pomeni, da morajo biti padavine v hidroloških modelih podane čim bolj natančno z vidika količine padavin, trajanja padavin in razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka. Enako velja za hidrološke prognostične modele, ki služijo za napovedi poplav oz. možnega poteka poplavnega dogodka in sisteme zgodnjega opozarjanja. Napačna napoved kateregakoli izmed prej omenjenih elementov padavinskega dogodka

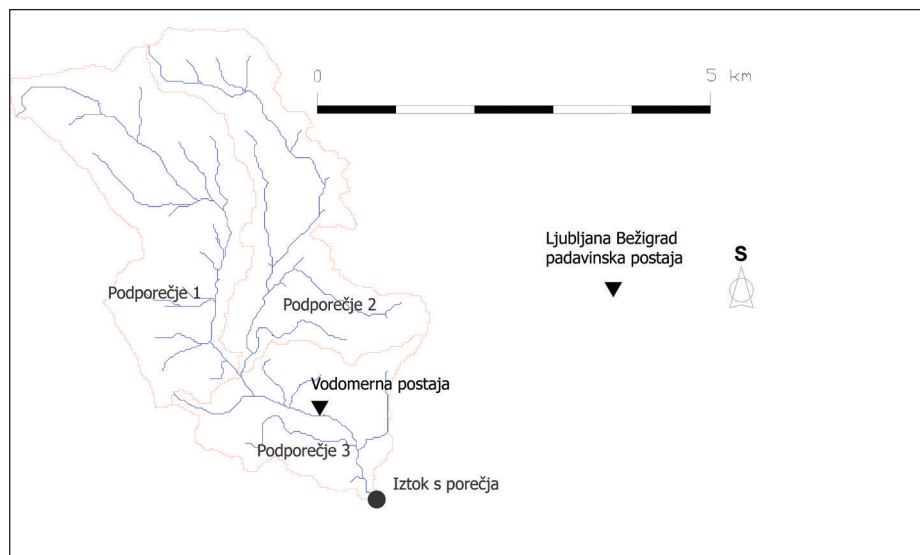
lahko privede do napačnega opozorila pred poplavami ali pa to sploh ni podano. Zgolj z natančno napovedjo padavinskega dogodka relativno zanesljivo lahko napovemo tudi potek poplavnega dogodka (Kobold, 2005). Opisana problematika nakazuje, da gre za pomembno tematiko, in ker je bilo v pretek-

losti ugotovljeno, da ima izbira projektnega padavinskega dogodka oziroma projektnega sintetičnega histograma padavin, npr. ((Ball, 1994), (Šraj, 2010)), velik vpliv na hidrogram površinskega odtoka, bo ta vsebina v članku nekoliko podrobneje analizirana in ovrednotena. V prispevku so na praktičnem

primeru porečja Glinščice prikazani predvsem vpliv trajanja padavinskega dogodka in razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na hidrogram odtoka oziroma na projektne visokovodne konice ter celotne projektne hidrograme, kar je pomemben korak pri načrtovanju različnih hidrotehničnih objektov.

2 • METODE IN PODATKI

Za preučevanje vpliva trajanja padavinskega dogodka in razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka je bil uporabljen hidrološki model porečja Glinščice, ki je bil postavljen, umerjen, preverjen in uporabljen že v prejšnjih študijah ((Dirnbek, 2010), (Šraj, 2010)). Porečje Glinščice je eno izmed eksperimentalnih porečij v Sloveniji ((Šraj, 2008), (Bezak, 2013)). Gre za porečje s prispevnim območjem v velikosti 16,85 km², ki je umeščeno zahodno od Ljubljane. Reka Glinščica je del porečja Gradaščice, ki se v Ljubljani izliva v Ljubljanico. Nadmorska višina območja sega od 590 m.n.m.g. do 209 m.n.m.g. (Šraj, 2010). Gozdovi pokrivajo približno 50 % celotne površine porečja Glinščice, kmetijska zemljišča približno 25 % in urbana območja približno 20 % celotnega porečja, preostalih 5 % pa predstavljajo manj zastopani tipi uporabe tal (Šraj, 2010). Zemljinjo glede na lastnosti lahko uvrstimo v tip C oziroma D glede na klasifikacijo Soil Conservation Service (SCS) (SCS, 1986) z relativno nizko stopnjo infiltracije (Šraj, 2010). Porečje Glinščice v velikosti 16,85 km² je bilo za namen hidrološkega modeliranja razdeljeno na tri manjša podporečja (Šraj, 2010). Slika 1 prikazuje porečje Glinščice in umestitev postaje Ljubljana Bežigrad, ki je bila uporabljena za določitev projektnih padavinskih dogodkov. Hidrološko modeliranje je bilo izvedeno s prosto dostopnim programom HEC-HMS 4.2.1 (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>). Površinski odtok je bil modeliran z uporabo teorije hidrograma enote (metodologija, uporabljena za transformacijo padavin v površinski odtok), kjer je bil hidrogram enote določen na podlagi meritev, ki so bile opravljene v porečju Glinščice med letoma 2003 in 2004 (Šraj, 2010). Če ne razpolagamo z meritvami pretokov, lahko določimo sintetični hidrogram enote na podlagi podatkov o lastnostih porečja, kot sta povprečni naklon in dolžina vodotoka, izvednotimo pa jih lahko z uporabo lidarskih podatkov, ki so na voljo za celotno

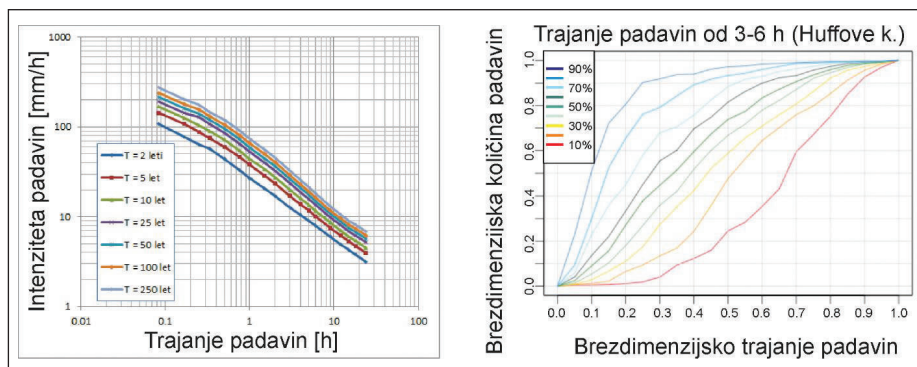


Slika 1 • Porečje Glinščice je razdeljeno na tri podporečja; povzeto po (Dirnbek, 2010).

območje Slovenije (<http://evode.arso.gov.si/indexd022.html?q=node/12>). Za izračun padavinskih izgub smo uporabili metodo SCS, ki je ena najbolj pogosto uporabljenih metod v inženirski praksi in je v prejšnjih študijah, ki so bile narejene na porečju Glinščice, podala najboljše rezultate v primerjavi z nekaterimi drugimi metodami ((Dirnbek, 2010), (Šraj, 2010)). Na podlagi podatkov o vrsti zemljin in prisotnih tipih uporabe tal je bil ocenjen tudi parameter Curve Number (CN) za vsa tri podporečja ((Dirnbek, 2010), (Šraj, 2010)), ki ga potrebujemo za izračun padavinskih izgub z metodo SCS (SCS, 1986). Dodatne informacije o modeliranju površinskega odtoka in uporabljenih metodah podajata Brilly in Šraj (Brilly, 2006). Za propagacijo hidrograma (med sotočjem podporečij 1 in 2 ter iztokom s porečja) smo v hidrološkem modelu uporabili Muskingumovo metodo, pri čemer sta bila parametra K in X enaka 0,5 in 0,2. Več informacij o Muskingumovi metodi podajata Brilly in Šraj (Brilly, 2006). Za določitev projektnih padavinskih dogodkov, s katerimi nato z uporabo umerjenega in

potrjenega) hidrološkega modela izračunamo projektne pretoke, potrebujemo krivulje intenziteta-trajanje-povratna doba (ITP; *angl.* intensity-duration-frequency curves), ki jih lahko izvednotimo na podlagi preteklih merjenih podatkov o padavinah, npr. (Goranc, 2012). Te krivulje so že izračunane za več postaj na območju Slovenije in so prosto dostopne na spletnih straneh Agencije RS za okolje (ARSO, 2014). V tej študiji so bili uporabljeni podatki z meteorološke postaje Ljubljana Bežigrad, kjer so bile ITP-krivulje določene na podlagi padavinskih podatkov, merjenih med letoma 1948 in 2012 (ARSO, 2014). Poleg ITP-krivulj za določitev projektnih padavinskih dogodkov potrebujemo podatke o razporeditvi padavin znotraj padavinskega dogodka. To lahko opišemo s Huffovimi krivuljami, npr. (Huff, 1967), ki so za več kot 20 meteoroloških postaj v Sloveniji na voljo v delu, ki ga je pripravil Dolšak (Dolšak, 2015a). Huffove krivulje so bile pripravljene za različna trajanja padavinskih dogodkov, in sicer 3–6 ur, 6–12 ur, 12–24 ur ter več kot 24 ur (Dolšak, 2015a). Na sliki 2 so prikazani ITP-krivulje za

postajo Ljubljana Bežigrad (levo) in primer Huffovih krivulj za trajanje padavinskih dogodkov od 3 do 6 ur na tej isti postaji (desno). Dolšak (Dolšak, 2015a) in Dolšak s sodelavci (Dolšak, 2015b) opisuje metodologijo določitve Huffovih krivulj. Tako za posamezno postajo in določeno trajanje padavinskih dogodkov razpolagamo z različnimi centilnimi krivuljami (od 10 do 90 %). 10-centilna krivulja pomeni, da je 10 % padavinskih dogodkov manjših, 90 % pa večjih od te krivulje. 50-% krivulja tako predstavlja mediano.



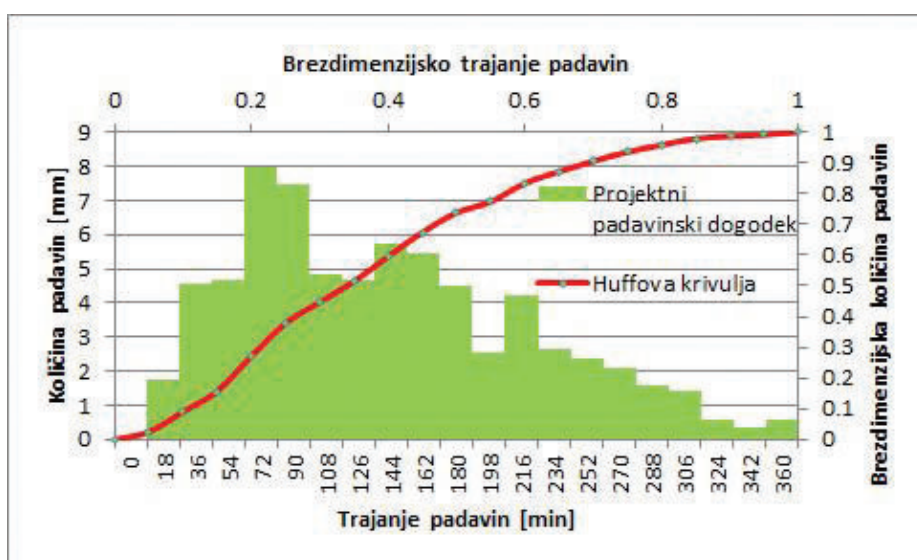
Slika 2 • ITP-krivulje, levo povzeto po (ARSO, 2014), in Huffove krivulje za trajanje padavinskega dogodka od 3 do 6 ur, desno povzeto po (Dolšak, 2015a), za postajo Ljubljana Bežigrad.

3 • REZULTATI IN RAZPRAVA

Z uporabo umerjenega in potrjenega hidrološkega modela porečja Glinščice ((Dirnbek, 2010), (Šraj, 2010)) smo v raziskavi analizirali vpliv trajanja padavinskega dogodka in razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na hidrogram površinskega odtoka.

3.1 Vpliv trajanja padavinskega dogodka

Za določitev projektne padavinskega dogodka smo uporabili Huffove krivulje in ITP-krivulje. Slika 3 prikazuje primer transformacije Huffove krivulje v projektne padavinske dogodke z upoštevanjem količine padavin in trajanja padavinskega dogodka. Količina padavin različnega trajanja je določena na podlagi ITP-krivulj za postajo Ljubljana Bežigrad (slika 2). Za primer, prikazan na sliki 3, smo izbrali 10-letno povratno dobo in trajanje padavin 6 ur, kar pomeni, da je količina padavin enaka 70 mm (slika 2, levo). Razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka pa smo določili na podlagi 50-centilne krivulje za trajanje padavin od 3 do 6 ur za postajo Ljubljana Bežigrad (slika 2, desno). Podoben postopek transformacije lahko uporabimo tudi za druge Huffove verjetnostne krivulje. V prvem koraku smo analizirali vpliv trajanja padavinskega dogodka na površinski odtok. V ta namen smo izbrali za vsa trajanja enako tipično razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad in uporabili podatke ITP-krivulje z 10-letno povratno dobo (slika 2). Določili smo projektne padavine z različnim trajanjem in količino padavin (2 h: 55 mm, 4 h: 64 mm, 6 h: 70 mm, 9 h: 79 mm, 12 h: 84 mm, 15 h: 90 mm ter 24 h: 108 mm). Slika 4 prikazuje primer razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka za trajanja 2 uri, 4 ure



Slika 3 • Primer transformacije Huffove krivulje v projektne padavinske dogodke z upoštevanjem količine padavin (70 mm) in trajanja padavinskega dogodka (6 ur).

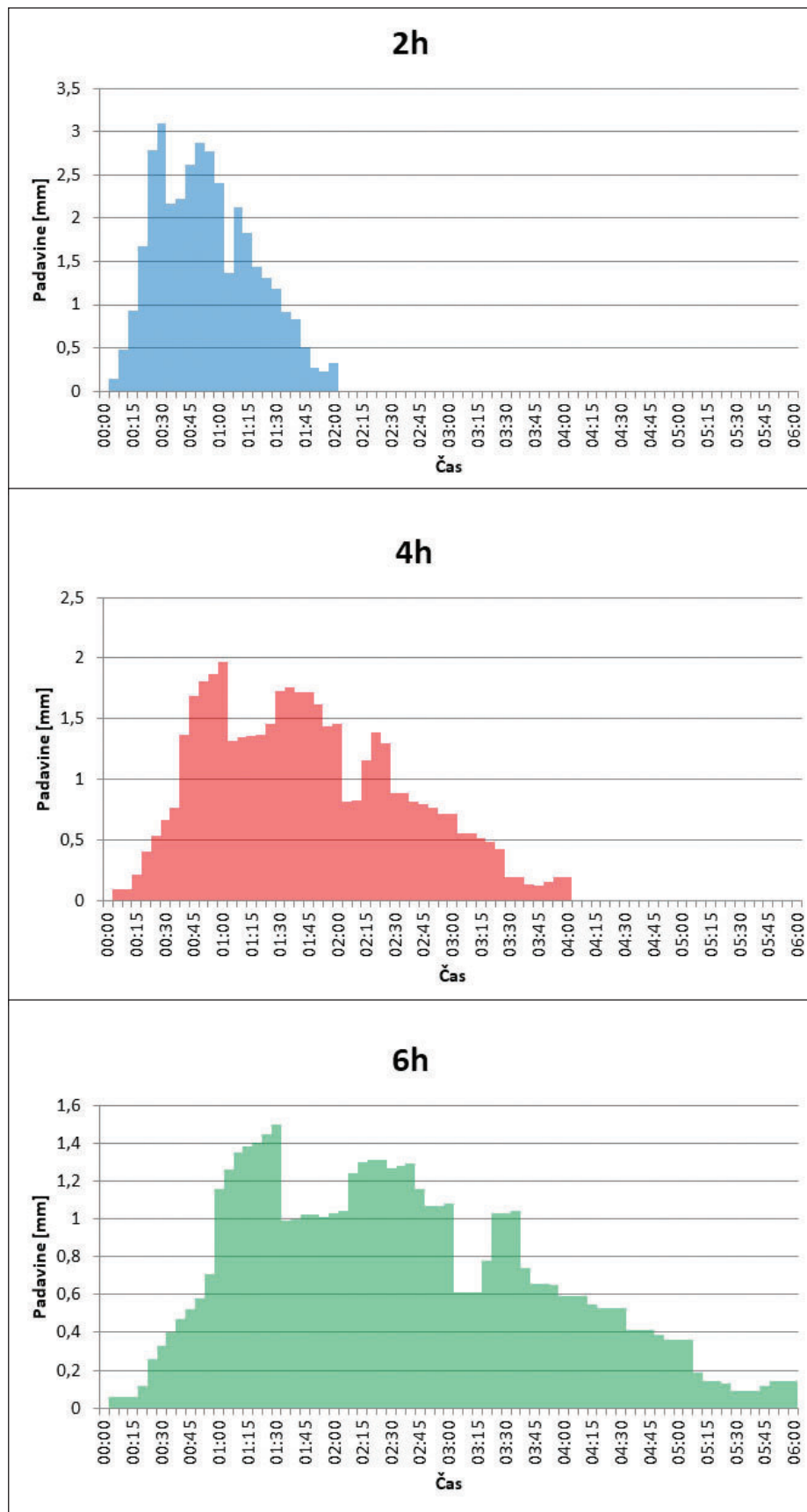
in 6 ur. Identično razporeditev in daljše trajanje smo uporabili tudi pri trajanjih padavinskega dogodka 9, 12, 15 in 24 ur, vendar jih na sliki 4 ne prikazujemo. Z uporabo omenjenih projektne padavinske dogodke smo nato z umerjenim in potrjenim hidrološkim modelom izračunali površinski odtok na iztoku z obravnavanega porečja. Slika 5 prikazuje modelirane vrednosti pretokov za iztočni profil z uporabo projektne padavinske dogodke z različnim trajanjem (od 2 do 24 ur). Vidimo lahko, da so razlike med posameznimi primeri relativno velike, tako je bila najmanjša konica pretoka izračunana pri padavinskem dogodku s trajanjem 24 ur (17,7 m³/s), največja konica pa je bila značilna za dogodek s trajanjem 6 ur (21,6 m³/s). To pomeni, da je razlika v

konici pretoka za ta primer skoraj 20%, pri večjih vrednostih povratnih dob (npr. 100-letna povratna doba) pa so razlike še večje. Poleg tega lahko opazimo različne oblike hidrogramov in tudi razlike v značilnostih hidrogramov, kot so trajanje naraščajočega dela hidrograma, čas nastopa konice pretoka in trajanje padajočega dela hidrograma. Nadalje s slike 5 lahko razberemo, da je čas koncentracije obravnavanega porečja približno 6 ur, saj pri takšnem trajanju padavinskega dogodka lahko dobimo največjo vrednost konice pretoka. Čas koncentracije je eden izmed najpogosteje uporabljenih konceptov v hidrologiji in predstavlja čas, ki ga potrebujejo učinkovite padavine, da z najbolj oddaljene točke prispevnega območja prispejo do iztočnega profila

porečja, oz. čas od konca učinkovitih padavin do konca površinskega dela odtoka, npr. (Brilly, 2006). To posledično pomeni, da bodo padavinski dogodki s trajanjem, krajšim od časa koncentracije porečja, povzročili manjše konice pretokov, dogodki z daljšim trajanjem pa bodo povzročili hidrogram z relativno dolgim trajanjem (Thompson, 2003). Tako je oblika hidrograma, ki smo jo dobili z uporabo 24-urnih padavin, neznatna za območja velikostnega razreda do 20 km². Zaradi tega se v praksi pogosto uporablja trajanje padavinskega dogodka, ki je enako času koncentracije porečja, ki je v našem primeru 6 ur, kar se da razbrati tudi iz rezultatov, prikazanih na sliki 6. Čas koncentracije lahko ocenimo na podlagi časa zakasnitve, ki predstavlja razdaljo med težiščem histograma učinkovitih padavin in konico pretoka. V našem primeru (slika 6) je čas zakasnitve enak približno 4 ure. Čas zakasnitve pa je približno 60 % časa koncentracije, npr. ((U.S. Army Corps of Engineers, 2000), (Brilly, 2006)), kar pomeni, da je čas koncentracije porečja Glinščice po tej metodi enak približno 6 ur. Na sliki 6 so prikazane tudi padavinske izgube, ki so bile določene z uporabo SCS-metode, ki se je na primeru porečja Glinščice izkazala za najustreznejšo (Šraj, 2010). Izbira metode za izračun padavinskih izgub je eden izmed parametrov, ki imajo lahko velik vpliv na projektne hidrograme.

3.2 Vpliv razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka

V naslednjem koraku smo analizirali vpliv razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na vrednosti površinskega odtoka. Pri tem smo se osredotočili na 6-urno trajanje padavin, kolikor znaša čas koncentracije obravnavanega porečja Glinščice, in povratno dobo 10 let. Najprej smo z uporabo različnih centilnih Huffovih krivulj določili projektne padavinske dogodke s pripadajočo razporeditvijo padavin znotraj padavinskega dogodka. Slika 7 prikazuje rezultate hidrološkega modeliranja v iztočnem profilu porečja Glinščice za izbrane Huffove krivulje različnih verjetnosti. Tako največjo razliko v konici pretoka lahko opazimo med 50-centilno in 90-centilno Huffovo krivuljo (2,5 m³/s oziroma več kot 10 %). Poleg razlik v konici pretoka lahko opazimo tudi razlike v času nastopa konice pretoka, ki pri 50-centilni krivulji nastopi več kot 2 uri pred konico pretoka, ki je značilna za 10-centilno krivuljo. Nadalje je konica pretoka pri 90-centilni krivulji nastopila manj kot 5 ur po začetku padavinskega dogodka. V splošnem lahko torej opazimo relativno velik vpliv razporeditve



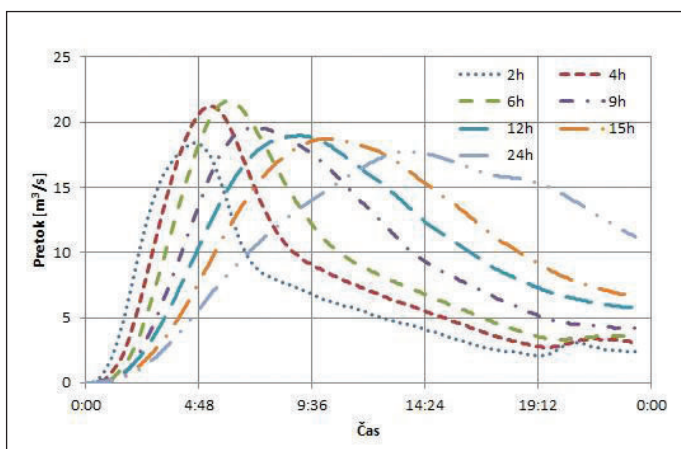
Slika 4 • Primer projektne padavinske dogodke z različnim trajanjem (2, 4 in 6 ur) in z identično razporeditvijo padavin znotraj padavinskega dogodka s povratno dobo 10 let.

padavin znotraj padavinskega dogodka na obliko hidrograma, čas nastopa konice pretoka in tudi velikost konice pretoka.

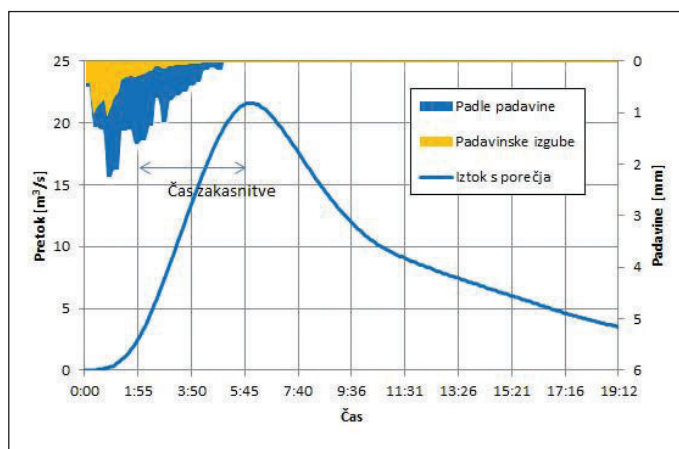
Slika 8 prikazuje primerjavo med površinskim odtokom, ki je bil določen z upoštevanjem 50-centilne Huffove krivulje in nekaterimi drugimi metodami, ki jih lahko uporabimo za določitev razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka. Za primerjavo smo izbrali enakomerno razporeditev padavin med dogodkom in tri primere, kjer je največja intenziteta padavin postavljena na 25 %, 50 % in 75 % trajanja dogodka, padavine pa so razporejene po verjetnostni metodi izbrane povratne dobe (*angl.* Frequency Storm Method), ki temelji na podatkih ITP-krivulj, kjer je razporeditev padavin v vsakem časovnem

intervalu (npr. 5 min., 10 min., 15 min.) enaka vrednosti, določeni na podlagi ITP-krivulje (USACE, 2000). To posledično pomeni, da gre za relativno ekstremno razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka. To se odraža tudi v modeliranih vrednostih površinskega odtoka (slika 8), kjer smo z uporabo verjetnostne metode ne glede na lokacijo maksimalne intenzitete dobili večje vrednosti maksimalnih pretokov kot pri 50-centilni Huffovi krivulji. Nadalje lahko opazimo tudi razlike glede na položaj maksimalne intenzitete padavin, kjer je največja konica pretoka izračunana za primer, ko je največja intenziteta padavin postavljena na 75 % trajanja padavinskega dogodka. Razlog za to je večja predhodna namočenost, ki posledično pomeni bolj neugodne razmere z

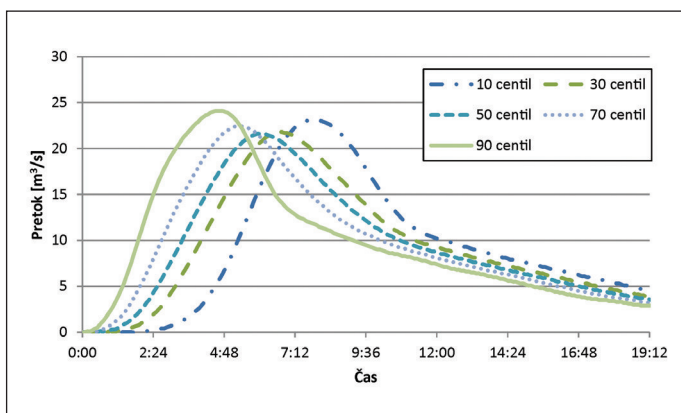
vidika površinskega odtoka (manjša infiltracija in večji površinski odtok). Po drugi strani pa smo najmanjšo konico pretoka dobili z enakomerno razporeditvijo padavin znotraj padavinskega dogodka, in sicer je bila ta za približno 7 % manjša kot pri razporeditvi padavin po 50-centilni Huffovi krivulji. Nekatere raziskave so pokazale, da so razlike med posameznimi metodami razporeditve padavin lahko tudi velikostnega razreda do 50 %, npr. ((Ball, 1994), (Singh, 1997), (Šraj, 2010)). Relativno velike razlike, na primer oblika in čas nastopa konice pretoka, pa so značilne tudi za druge lastnosti hidrograma, kjer so razlike med posameznimi prikazanimi metodami v našem primeru tudi več kot 4 ure.



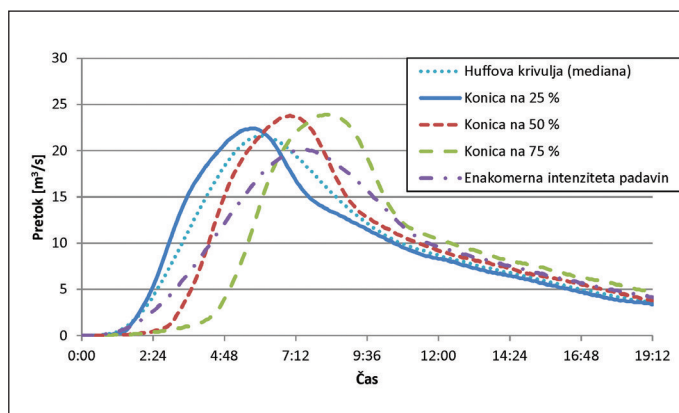
Slika 5 • Vpliv trajanja padavinskega dogodka na hidrogram površinskega odtoka v iztočnem profilu obravnavanega porečja Glinščice.



Slika 6 • Primer projektne padavinskega dogodka s trajanjem 6 ur (10-letna povratna doba in količina padavin 70 mm), s padavinskimi izgubami, izračunanimi z uporabo metode SCS, ter hidrogramom površinskega odtoka na iztočnem profilu porečja Glinščice.



Slika 7 • Vpliv razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka, opisan s različnimi Huffovimi krivuljami, na hidrogram v iztočnem profilu porečja Glinščice.



Slika 8 • Primerjava različnih razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka na modelirane vrednosti površinskega odtoka (50-centilna Huffova krivulja, enakomerna razporeditev padavin in verjetnostna metoda razporeditve padavin, kjer konica padavin nastopi na 25 %, 50 % in 75 % trajanja padavinskega dogodka).

4 • ZAKLJUČKI

V prispevku so prikazani vpliv trajanja padavinskega dogodka in razporeditve padavin znotraj padavinskega dogodka na hidrogram površinskega odtoka. Predstavljene so metode, ki jih lahko uporabimo za določanje projektnih hidrogramov in konic projektnih pretokov v primerih, ko ne razpolagamo z merjenimi podatki o pretokih ali je teh premalo za statistično obravnavo. V slednjem primeru moramo razpoložljive merjene podatke o pretokih uporabiti za umerjanje in validacijo hidrološkega modela. Večinoma je pomanjkanje merjenih podatkov o pretokih značilnost manjših prispevnih območij v velikostnem razredu do 30 km². Prispevek prikazuje primer določitve hidrograma projektnega pretoka za izbrano 10-letno povratno dobo, vendar identičen postopek lahko uporabimo tudi pri daljših povratnih dobah. Na podlagi analize primera lahko predlagamo usmeritve za določitev projektnih padavinskih dogodkov za manjša, nemerjena porečja (do 30 km²): Na podlagi lokacije območja izberemo reprezentativno padavinsko postajo (glede

na oddaljenost ali glede na tip podnebja), za katero so na voljo tako ITP-krivulje kot tudi Huffove krivulje.

Na podlagi časa koncentracije območja izberemo trajanje padavinskega dogodka in na podlagi zahtev hidravličnega modeliranja oziroma načrtovanja hidrotehničnega objekta ali vodarskega sistema določimo še povratno dobo padavinskega dogodka. S pomočjo obeh podatkov z uporabo ITP-krivulj določimo količino padavin, ki je značilna za izbrani projektni padavinski dogodek.

Z uporabo 50-centilne Huffove krivulje (glede na ustrezno trajanje padavinskega dogodka) določimo tipično razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka. Za upoštevanje intervalov zaupanja lahko uporabimo npr. 20- in 80-centilno Huffovo krivuljo.

Z upoštevanjem projektnih padavinskih dogodkov (mediana in interval zaupanja) določimo vrednosti površinskega odtoka (konica pretoka, oblika hidrograma) za obravnavano območje. Vselej pa je v hidrološke analize poplavnih dogodkov in v hidrološke študije kot strokovno

podlago za dimenzioniranje hidrotehničnih objektov in vodarskih ureditev smiselno vključiti merjene podatke o pretokih, če ti obstajajo. Rezultati opravljene analize primera kažejo, da je v praksi smiselno upoštevati dejansko razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka, ki je opisana s Huffovimi krivuljami, saj so lahko razlike med posameznimi primeri (drugačne definicije projektnih padavinskih dogodkov) velike. Nadalje strokovno odsvetujemo, da bi v hidroloških študijah in analizah poplavnih dogodkov še naprej uporabljali zakoreninjeno predpostavko o enakomerni razporeditvi padavin znotraj posameznega izbranega projektnega padavinskega dogodka in izbirali trajanja projektnih padavinskih dogodkov, ki izrazito presegaajo čas koncentracije analiziranega območja – o tem problemu smo pisali v Gradbenem vestniku že pred leti (Dirnbek, 2010). Tudi druge podobne študije kažejo, da je natančnost podajanja padavinskega dogodka v hidrološke modele ključnega pomena za verodostojne rezultate modeliranja in s tem določitve bistvenih projektnih pretokov ((El-Jabi, 1991), (Ball, 1994), (Faurès, 1995), (Singh, 1997), (Danil, 2005), (Kobold, 2005), (Dolšak, 2015b)).

programa Vodarstvo in geotehnika: orodja in metode za analize in simulacije procesov ter razvoj tehnologij, P2-0180. Zahvaljujemo se Agenciji RS za okolje za posredovane podatke.

5 • ZAHVALA

Raziskava je nastala pri raziskovalnem projektu J2-7322 z naslovom Modeliranje hidrološkega odziva nehomogenih povodij. Fi-

nancira ga Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), raziskava je bila delno sofinancirana iz raziskovalnega

6 • LITERATURA

- ARSO, Krivulje intenziteta-trajanje-povratna doba z uporabo Gumbelove porazdelitve, http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/precip-return-periods_2014.doc, 2014.
- Ball, J. E., The influence of storm temporal patterns on catchment response, *J. Hydrol.*, 158, 285–303, 1994.
- Bezak, N., Brilly, M., Šraj, M., Comparison between the peaks over threshold method and the annual maximum method for flood frequency analyses, *Hydrological sciences journal* 59(5), 959–977, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.831174>, 2014.
- Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M., Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben, *Acta hydrotechnica* 26(45), 85–97, <ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a45nb.pdf>, 2013.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H. (Editors), *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*, United Kingdom, Cambridge University Press, 2013.
- Brilly, M., Šraj, M., Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS, UL FGG, Ljubljana, 2006.
- Danil, E. I., Michas, S. N., Lazaridis, L. S., Hydrologic modeling for the determination of design discharges in ungauged basins, *Global NEST Journal* 7(3), 296–305, 2005.
- Dirnbek, L., Šraj, M., Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka, *Gradbeni vestnik* 59(3), 48–56, <http://www.zveza-dgits.si/213/pdf/3-2010-85sg.pdf>, 2010.
- Dolšak, D., Algoritem za analizo časovne porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka, magistrska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, <http://drugg.fgg.uni-lj.si/5161/>, 2015a.

- Dolšak, D., Bezak, N., Šraj, M., Pomembnost poznavanja časovne porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka v vodarski praksi, *Gradbeni vestnik* 64(10), 231–28, 2015b.
- Dolšak, D., Bezak, N., Šraj, M., Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in Slovenia, *Journal of Hydrology* 541(B), 1395–1405, 2016.
- El-Jabi, N., Sarraf, S., Effect of maximum rainfall position on rainfall-runoff relationship, *ASCE Publ.*, 117(5), 681–685, 1991.
- Faurès, J.-M., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A., Sorooshian, S., Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling, *Journal of Hydrology* 173, 309–326, 1995.
- Goranc, N., Izdelava in primerjava ITP-krivulj z različno izbiro porazdelitev, diplomska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, http://drugg.fgg.uni-lj.si/3803/1/VKI_0186_Goranc.pdf, 2012.
- Huff, F., Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms, *Water Resources Research* 3, 1007–1019, 1967.
- Huff, F., Rainfall evaluation studies, Final report, part 1 – summary, Urbana, Illinois, University of Illinois, Illinois State Water Survey, 1970.
- Huff, F., Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois, Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173, 1990.
- Klaneček, M., Poplave 5. novembra 2012 v porečju, *Ujma* 27, 52–61, <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2013/052.pdf>, 2013.
- Kobold, M., Katastrofalne poplave in visoke vode 18. septembra 2007, *Ujma* 22, 65–75, <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2008/065.pdf>, Ljubljana, 2008.
- Kobold, M., Sušelj, K., Padavinske napovedi in njihova nezanesljivost v hidrološkem prognoziranju, Zbornik Raziskave s področja geodezije in geofizike 2004, 61–75. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2005/SZGG_05_Kobold_Suseelj.pdf, 2005.
- Martinkova, M., A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment, Floodfreq COST action ES0901: European procedures for flood frequency estimation, Centre for Ecology & Hydrology on behalf of COST, Wallingford, U. K. <http://opus.bath.ac.uk/36915/>, 2013.
- SCS, Soil Conservation Service, Urban hydrology for small watersheds, Technical reference manual 55, USDA, Springfield, VA, ftp://ftp.odot.state.or.us/techserv/Geo-Environmental/Hydraulics/Hydraulics%20Manual/Chapter_07/Chapter_07_appendix_G/Urban_Hydrology_for_Small_Watersheds.pdf, 1986.
- Singh, V. P., Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph, *Hydrological Processes* 11, 1649–1669, 1997.
- Šraj, M., Rusjan, S., Petan, S., Vidmar, A., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M., The experimental watersheds in Slovenia, *IOP Conference Series* 4, 1–13, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1307/4/1/012051/pdf>, 2008.
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M., Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji, *Acta hydrotechnica* 25(42), 41–59. <ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a42ms.pdf>, 2012.
- Šraj, M., Dirnbek, L., Brilly, M., The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph, *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 58(1), 3–14, http://drugg.fgg.uni-lj.si/4501/1/Sraj_JHH_2010_The_Influence_k.pdf, 2010.
- Thompson, B. D., Xing, F., Gharty-Chhetri, O. B., Synthesis of TxDOT storm drain design, Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Department of Civil Engineering, Texas Tech University, 2003.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf), 2000.
- Zabret, K., Brilly, M., Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji, *Acta hydrotechnica* 27(47), 139–156, <ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a47kz.pdf>, Ljubljana, 2014.