

ANALIZA VISOKOVODNIH VALOV SAVE V LITJI

The analysis of flood waves on the Sava River in Litija

Mojca Šraj*, Nejc Bezak** UDK 556.166(497.4Litija)

Povzetek Abstract

Poglobljena analiza visokovodnih valov je pogoj za izvedbo zanesljivih verjetnostnih analiz poplavnih dogodkov. V študiji smo ugotavljali smiselnost uporabe urnih in dnevnih vrednosti pretokov z upoštevanjem lokalnih ekstremov in brez njih. Analizirali smo konice, prostornine in čas trajanja 58 visokovodnih valov ter njihovo povezanost. Ugotovili smo, da je upoštevanje dnevnih vrednosti pretokov z vključenimi absolutnimi konicami smiselno. Rezultati kažejo, da je korelacija med prostorninami in časom trajanja večja kot korelacija med konicami in prostorninami valov. Konice in čas trajanja pa so pričakovano neodvisni.

A comprehensive analysis of flood waves is a precondition for reliable frequency analyses of flood events. The aim of the study is to determine the reasonableness of using hourly or daily discharge data with and without consideration of local extremes. Peaks, volumes and durations of 58 flood waves and their correlation have been analysed. It has been found out that consideration of daily values with absolute local peaks is reasonable. The results show that the correlation between volumes and durations is higher than the correlation between peaks and volumes of the wave. Peaks and durations are independent variables as expected.

Uvod

Načrtovanje in upravljanje voda, določanje poplavnih območij, obvladovanje tveganja zaradi poplav, dimenzioniranje objektov na vodi ipd., vse to zahteva temeljito poznavanje značilnosti visokovodnih valov (Grimaldi in Serinaldi, 2006; Karmakar in Simonovic, 2007). Večina ekstremnih hidroloških pojavov je odvisna od hkratnega vpliva več naključnih spremenljivk, ki so v večini primerov medsebojno povezane in odvisne. Visokovodni val je tako določen s konico pretoka, prostornino in časom trajanja vala. Te tri spremenljivke so medsebojno bolj ali manj odvisne. Z natančnejšimi analizami lahko ugotovimo resnost pojava visokovodnih valov. Pri analizi ekstremnih dogodkov zato ni dovolj, da poznamo le podatek o konici pretoka, temveč je enako pomembno tudi poznavanje prostornine in trajanja visokovodnega vala (Karmakar in Simonovic, 2007). Tako lahko na primer dogodek s 100-letno povratno dobo konice vala povzroči manj škode kot dogodek z 10-letno povratno dobo konice in prostornine vala (Renard in Lang, 2007). Čeprav se je število smrtnih žrtev zaradi naravnih nesreč v zadnjih 200 letih prepolovilo, lahko naravne nesreče, med katere štejemo tudi poplave, še vedno povzročijo veliko gmotno škodo in tudi ogrozijo človeška življenja. Poplave so v Sloveniji od leta 1995 do 2010 povzročile povprečno 15 odstotkov škode

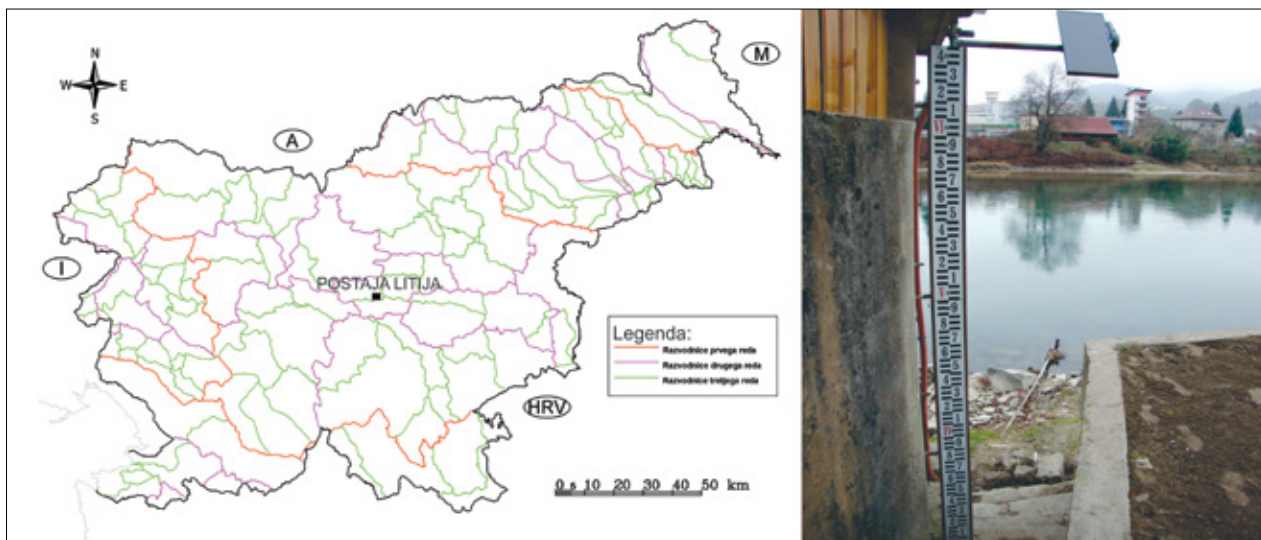
zaradi naravnih nesreč (Zorn in Komac, 2011). Zaradi velike gmotne škode in povečane ogroženosti človeških življenj, ki jo lahko povzročijo poplave (Brilly in Polič, 2005; Mikoš in sod., 2004), je pomembno verjetnostne analize izvesti čim bolj zanesljivo. Pogoj za kakovostno izvedene verjetnostne analize pa so temeljite analize visokovodnih valov. Določanje projektnih vrednosti spremenljivk v povezavi z določeno povratno dobo naj torej, po najnovejših dognanjih, ne bi temeljilo le na oceni konice, temveč tudi na oceni prostornine in trajanja visokovodnega vala.

Podatki

Analizo visokovodnih valov smo naredili za podatke z vodomerne postaje Litija I na reki Savi (slika 1) za obdobje od leta 1953 do 2010 (ARSO 2011). Postaja Litija je najstarejša postaja v Sloveniji (Kobold, 2011). Postaja je opremljena z limnigrafom Seba Omega. Za oblikovanje vzorca smo uporabili metodo letnih maksimumov. Kakovostno izvedene meritve so pogoj tako za analize valov kot za verjetnostne analize (Šraj in sod., 2008). Prispevna površina hidrološke postaje Litija znaša 4821 km². Za Savo pri Litiji je značilen alpski dežno-snežni režim (Frantar in Hrvatina, 2005). Značilnost tega režima sta dva precej izenačena vrhunca, eden spomladi in eden jeseni. V primeru Litije je jesenski vrhunec nekoliko bolj izrazit. Pri tem režimu je manjša količina vode značilna za zimske in poletne mesece, ko je poletni primanjkljaj izrazitejši.

** dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

** Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, nejc.bezak@fgg.uni-lj.si



Slika 1: Lega in fotografija vodomerne postaje Litija I na reki Savi (foto: N. Bezak)

Figure 1: Location of the Litija hydrological station on the Sava River and the station (Photo: N. Bezak).

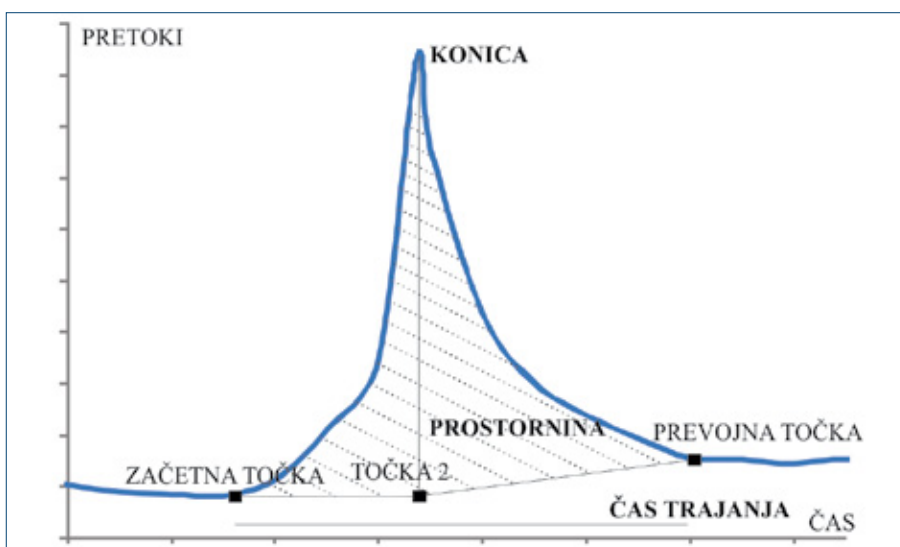
Metode

Kontrola neodvisnosti dogodkov

Pri analizah visokovodnih valov se pogosto srečamo s pojavom kompleksnih hidrogramov ali sestavljenih valov. Pri teh valovih nastopi problem določitve neodvisnosti konic. Neodvisnost zaporednih konic hidrograma pomeni, da lahko dve zaporedni konici hidrograma ločimo in ju obravnavamo kot dva neodvisna visokovodna vala. Eden izmed načinov preverjanja neodvisnosti zaporednih konic je s pomočjo izračuna časa N , ki ga določimo po empirični enačbi (Cimen in Sapliouglu, 2004), pri čemer N predstavlja čas med konico hidrograma in koncem površinskega dela odtoka (slika 2), A pa označuje prispevno površino v kvadratnih kilometrih. Če je čas N krajši od časa med konico prvega vala in začetkom naraščanja drugega vala, lahko zaporedni konici obravnavamo kot neodvisni. Na sliki 2 bi lahko začetno točko poimenovali tudi točka 1, prevojno točko pa točka 3.

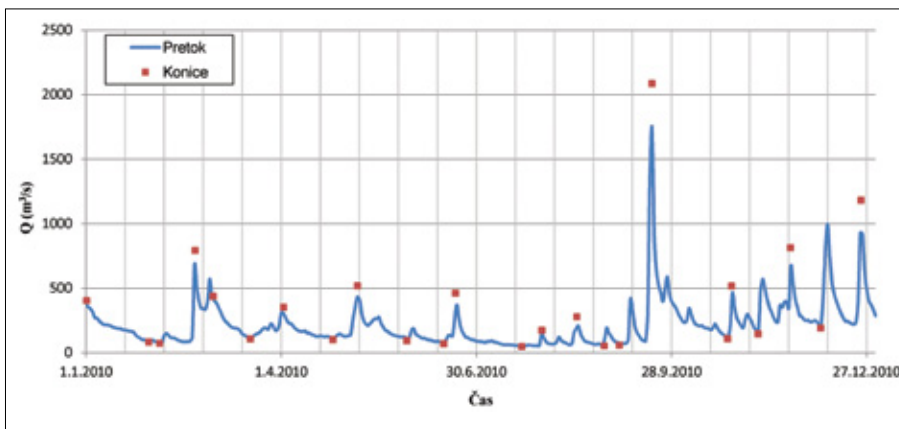
Izločanje baznega odtoka in račun prostornin valov

Celotni odtok oziroma hidrogram odtoka lahko razdelimo na dve glavni komponenti: bazni in površinski del odtoka. Bazni odtok je predvsem posledica izcejanja podzemnih voda v strugo vodotoka. Strogo definicijo baznega odtoka je težko oblikovati, na splošno bazni odtok predstavlja pretok, ki je prisoten v vodotoku tudi po daljšem obdobju brez padavin. Določanje deleža baznega odtoka je pogosto težavno in večinoma precej subjektivno. Mogoče so sicer tudi posamične meritve, s katerimi lahko določimo delež baznega odtoka, ki pa so enkratne (tudi zelo drage). V hidrološki praksi se za določanje deleža baznega odtoka najpogosteje uporablja več metod, ki se delijo na grafične, primerne za izločanje baznega odtoka posameznih dogodkov, in metode filtriranja, ki jih lahko uporabimo za izločanje baznega odtoka pri večletnih serijah podatkov. Primer metode filtriranja je npr. metoda BFI (angl. *Base-flow index method*) (Kovačič, 2012). Grafične metode temeljijo na določanju prevojnih točk hidrograma, ki pa jih je



Slika 2:
Tritočkovna metoda izločanja baznega odtoka

Figure 2:
Three-point baseflow separation method.



Slika 3:

Prikaz razlike med srednjimi dnevnimi pretoki in absolutnimi konicami

Figure 3:

Comparison between mean daily discharges and absolute peaks.

v nekaterih primerih težko natančno določiti. Za izvedbo analize v naši študiji je bila izbrana tritočkovna metoda, ki je prikazana na sliki 2.

Pri računu prostornin visokovodnih valov smo upoštevali samo površinski del odtoka. Začetek površinskega dela odtoka (naraščajoči del hidrograma) določa začetna točka, konec (padajoči del hidrograma) pa prevojna točka (slika 2). V obdobju med začetno in končno točko je površinski delež odtoka veliko večji kot bazni odtok. Prostornina vala je površina grafa nad mejno črto baznega odtoka.

Osnovne statistične analize spremenljivk in povezave med njimi

Za vzorec izbranih neodvisnih visokovodnih valov (1953–2010) smo naredili osnovne statistične analize, izračunali nekatere opisne statistike posameznih spremenljivk in določili sezonsko pojavljanje konic (tako na vzorcu metode letnih maksimumov kot na vzorcu metode vrednosti nad izbranim pragom). Poleg tega smo za vse valove izračunali nekatere pomembne koeficiente, indekse in razmerja (indeks baznega odtoka, koeficient izločanja, koeficient oblike, razmerje med časom naraščanja in padanja, debelina vodne plasti površinskega odtoka in vrednost specifičnega pretoka). Enačbe za izračune je zbrala Pugalj (2012). Na podlagi lastnosti hidrogramov in razmerij med posameznimi komponentami valov lahko sklepamo o lastnostih porečja in padavinskega dogodka ter tudi o geoloških značilnostih (Lacey, 1996) obravnavanega prispevnega območja.

Rezultati in analiza

Vpliv izbire podatkov

Pri analizi visokovodnih valov smo uporabili več vrst podatkov o pretokih (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2011):

- srednje dnevne vrednosti pretokov,
- izmerjene urne vrednosti pretokov,
- srednje dnevne vrednosti pretokov z vrinjeno lokalno izmerjeno konico pretoka.

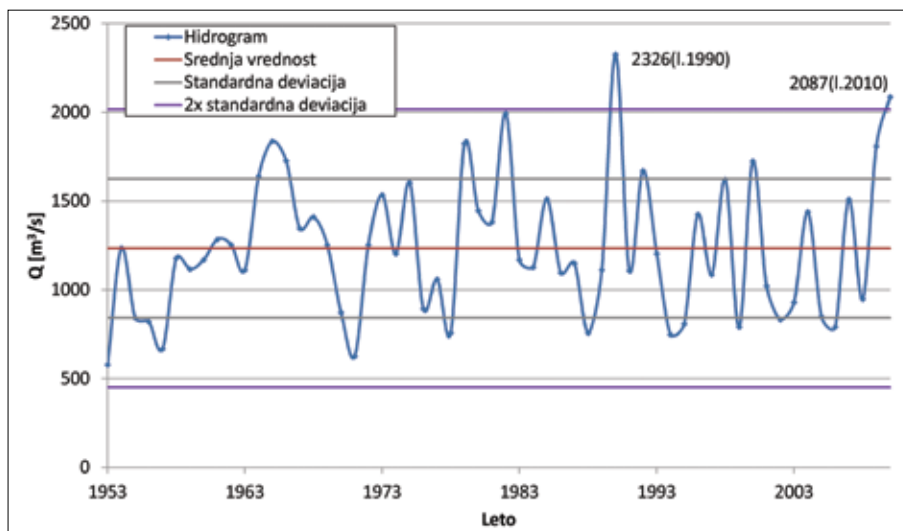
Na sliki 3 je prikazana razlika med povprečnimi dnevnimi vrednostmi pretokov (hidrogram) in absolutnimi izmerjenimi ekstremi. Razlike so lahko še posebno velike ob hitrem naraščanju in padanju odtoka. Z upoštevanjem dnevnih vrednosti lahko torej precej podcenimo dejansko vrednost konice vala, zato je upoštevanje absolutnih ekstremov smiselno. Natančna analiza trinajstih naključno izbranih valov iz obdobja 1953–2010, ki smo jim bazni odtok izločili z uporabo tritočkove grafične metode, je pokazala, da so se prostornine pri uporabi urnih vrednosti in povprečnih dnevnih vrednosti z vrinjeno absolutno konico v povprečju razlikovale za 4,3 odstotka, vrednost konice posameznega vala pa je ostala enaka. Posamezna odstopanja so se gibala med 0,9 in 15,1 odstotka. Analiza je pokazala, da je uporaba dnevnih vrednosti z vrinjeno konico smiselna in najbolj primerna. S tako kombinacijo podatkov smo se izognili problemu manjkajočih urnih podatkov zaradi izpada meritev in lokalnemu nihanju vrednosti pretokov, ki je posledica gorvodnih HE. Nihanja urnih vrednosti pomenijo namreč kar precejšnjo težavo pri določanju prevojnih točk hidrograma in uporabi grafičnih metod pri izločanju baznega odtoka.

Analiza visokovodnih konic

Na sliki 4 so prikazane vrednosti letnih maksimumov z označeno srednjo vrednostjo in območjem standardne deviacije, ki predstavlja mero razpršenosti vzorca. Vidimo lahko, da dve konici odstopata od drugih in padeta zunaj območja dvakratnika standardne deviacije. To sta največja pretoka v obravnavanem obdobju, ki sta se zgodila leta 1990 in 2010. Ocene značilnih opisnih statistik obravnavanega vzorca so prikazane v preglednici 1.

Z upoštevanjem vrednosti konic letnih maksimumov in prispevne površine vodomerne postaje smo izračunali vrednost povprečnega specifičnega pretoka visokovodnih valov, ki je v obravnavanem obdobju znašal $0,256 \text{ m}^3/\text{s km}^2$. Vrednost je zaradi obravnave ekstremnih dogodkov veliko večja (približno 10–25-krat), kot je povprečni specifični odtok za Litijo, ki znaša $10,1–25,0 \text{ l/s/km}^2$ in je bil izračunan na podlagivseh izmerjenih pretokov (Frantar, 2008).

Analiza sezonskosti pojavljanja visokovodnih valov v obravnavanem obdobju je pokazala, da se je več kot polovica



Slika 4:

Hidrogram maksimalnih letnih konic Save v Litiji za obdobje 1953–2010 in območje standardne deviacije

Figure 4:

Hydrograph of annual peak discharges for data obtained from the Litija station on the Sava river for the period 1953–2010 with area of standard deviation.

srednja vrednost	1234,4 m ³ /s
maksimum	2326 m ³ /s
minimum	579 m ³ /s
standardna deviacija	391,62 m ³ /s
varianca	153370,7 m ⁶ /s ²
mediana	1174 m ³ /s
modus	1254 m ³ /s
koeficient sploščenosti	-0,071
koeficient asimetrije	0,569
Preglednica 1:	Ocene opisnih statistik konic letnih maksimumov za obdobje 1953–2010
Table 1:	Descriptive statistics for series of annual peak discharges for the period 1953–2010.

srednja vrednost	338 · 10 ⁶ m ³
maksimum	766 · 10 ⁶ m ³
minimum	123 · 10 ⁶ m ³
standardna deviacija	152 · 10 ⁶ m ³
varianca	2,32 · 10 ¹⁶ m ⁶
mediana	300 · 10 ⁶ m ³
modus	ni opredeljen
koeficient sploščenosti	0,333
koeficient asimetrije	0,943
Preglednica 2:	Ocene opisnih statistik vzorca prostornin letnih maksimumov za obdobje 1953–2010
Table 2:	Descriptive statistics for annual maximum series of wave volumes for the period 1953–2010.

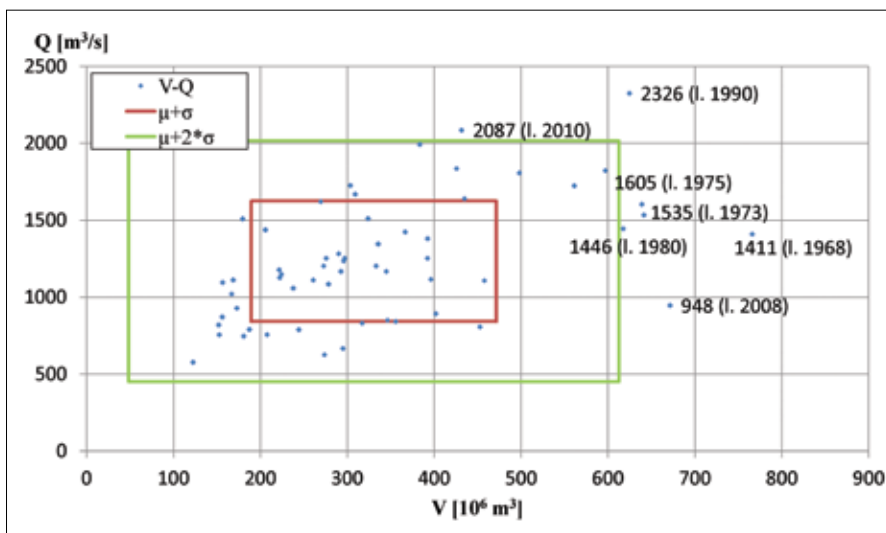
letnih maksimumov zgodila v jesenskem obdobju, spomladansko in zimsko obdobje pa sta imela približno enako zastopanost pri številu letnih maksimumov. Pri vzorcu metode vrednosti nad izbranim pragom (POT), ki je vseboval povprečno en dogodek nad pragom na leto, pa se je več kot 60 odstotkov dogodkov zgodilo v jesenskem obdobju. Tako pri vzorcu metode letnih maksimumov kot pri vzorcu POT se je najmanj ekstremnih dogodkov zgodilo poleti. Značilnost alpskega dežno-snežnega režima sta dva precej izenačena vrhunca (jesenski in spomladanski). Na primeru postaje Litija smo ugotovili, da je jesenski vrhunec, ki je posledica padavin, izrazitejši kot spomladanski, ki je v večini primerov posledica taljenja snega. Po številu letnih maksimumov je spomladanski vrhunec bolj primerljiv z zimskim, ki bi moral biti precej bolj izenačen s poletnim, vendar od tega precej odstopa. Najmanjše vrednosti pretokov pa so značilnost poletnega obdobja, kar se ujema z značilnostmi obravnavanega režima.

Analiza prostornin visokovodnih valov

Ocene nekaterih opisnih statistik vzorca prostornin letnih maksimumov so prikazane v preglednici 2. Največja prostornina pripada valu iz leta 1968, ki sicer ni imel

izrazito velike konice (1411 m³/s), je pa imel najdaljše trajanje, in sicer kar 30 dni. Val je imel več konic, ki pa so bile med seboj odvisne, zato smo ga obravnavali kot kompleksen hidrogram. Poleg omenjenega vala še šest prostornin valov pade zunaj območja dvakratnika standardne deviacije (slika 5). Dva od njih sta imela hkrati tudi največji konici (leti 1990 in 2010), štiri pa po velikosti konic niso izrazito odstopali (leta 1973, 1975, 1980 in 2008). Nadpovprečne prostornine teh valov so posledica več zaporednih odvisnih konic.

Povprečni indeks baznega odtoka za Savo v Litiji, izračunan za 58 visokovodnih valov, je znašal 0,31. Minimalna vrednost je bila izračunana za val iz leta 2007 in je znašala 0,18, maksimalna pa za val iz leta 1974, ki je znašala 0,51. Pri tem je treba poudariti, da so dobljene vrednosti izračunane za ekstremne dogodke, ki so večinoma posledica obilnih padavin in izrazitega površinskega dela odtoka. Dobljene vrednosti so zato seveda nižje od tistih, ki bi jih dobili pri uporabi dolgoletnih povprečnih vrednosti. Kovačič (2012) je za 20 manjših porečij na območju Slovenije za obdobje 1975–2000 izračunal povprečne indekse BFI v razponu od 0,284 do 0,736. Srednja vrednost izračunanih indeksov BFI je znašala 0,517, standardni odklon



Slika 5:

Prikaz razmerja med konicami in prostorninami

Figure 5:

Comparison between peaks and wave volumes.

pa 0,135 (Kovačič, 2012). Do podobnih vrednosti indeksa baznega odtoka (srednja vrednost 0,555; standardna deviacija 0,12) je prišel tudi Janža (2006), ki je analiziral podatke s 25 porečij v Sloveniji, ki skupaj pokrivajo 2078 km² površine, kar je približno 10 odstotkov površja Slovenije. Kovačič (2012) je ugotovil, da je indeks BFI najbolj odvisen od naklona porečja, prispevne površine, gostote hidrografske mreže, rabe tal (deleža kmetijskih površin) in klimatskih razmer (predvsem količina izhlapevanja). Pri obeh omenjenih študijah (Janža, 2006; Kovačič, 2012) je bila uporabljena metoda filtriranja (računalniški program) baznega odtoka. Pugelj (2012) je ugotovila, da lahko izbira metode izločanja baznega odtoka povzroči tudi do 25-odstotno razliko pri oceni indeksa BFI.

Razmerje med površinskim in baznim deležem odtoka (prostornino) lahko izrazimo tudi s koeficientom izločanja (Bergmann in Sackl, 1990), ki je za obravnavane valove s hidrološke postaje Litija I v povprečju znašal 2,23, kar pomeni, da je bila povprečna prostornina površinskega odtoka več kot dvakrat večja kot povprečna prostornina baznega odtoka. Vrednosti za posamezne valove so se gibale med 0,97 in 4,48.

Analiza časov trajanja visokovodnih valov

Ocene značilnih opisnih statistik vzorca časov trajanja letnih maksimumov so prikazane v preglednici 3. Štirje valovi so imeli trajanje vala daljše, kot ga določa območje standardne deviacije. Gre za dogodke iz let 1955, 1968, 1995 in 2008. Nobeden izmed teh dogodkov ni imel izrazito visoke konice.

Poleg celotnega trajanja posameznega vala sta pomembna še čas naraščanja in čas padanja vala. Na splošno je čas naraščanja krajši kot čas padanja, vendar lahko pri kompleksnih hidrogrami pride do izjem (Yue in sod., 2002). Letni maksimum iz leta 1968, ki je imel najdaljše trajanje vala (30 dni), je imel tudi največje razmerje med časom padanja in časom naraščanja (3,29), saj je bil slednji v tem primeru izrazito krajši. Povprečni čas na-

srednja vrednost	12,98 dni
maksimum	30 dni
minimum	6 dni
standardna deviacija	4,84 dni
varianca	23,39 dni ²
mediana	12 dni
modus	12 dni
koeficient sploščenosti	2,327
koeficient asimetrije	1,455

Preglednica 3: Ocene opisnih statistik vzorca časov trajanja obravnavanih valov za obdobje 1953–2010

Table 3: Descriptive statistics for annual maximum series of wave durations for the period 1953-2010.

raščanja za analizirane valove znaša 4,98 dni, povprečni čas padanja pa 8 dni. Razmerje med obema časoma je 0,623. Pandi (2010) je ugotovil, da naj bi razmerje med časom naraščanja in celotnim časom trajanja visokovodnega vala znašalo med 1/3 in 1/5 za večje prispevne površine, kar se ujema tudi z našimi izračuni. Reka Sava v srednjem toku ima še vedno hudourniški značaj, kar pomeni, da trajanje enostavnih valov ne more biti tako dolgo (npr. 30 dni). Daljša trajanja so, kot že rečeno, posledica sestavljenih valov. Za hudourniške dogodke je značilno hitro naraščanje poplavnega vala (majhna vrednost časa naraščanja) in tudi razmeroma kratek čas padanja (glede na sestavljene valove).

Povezave med spremenljivkami

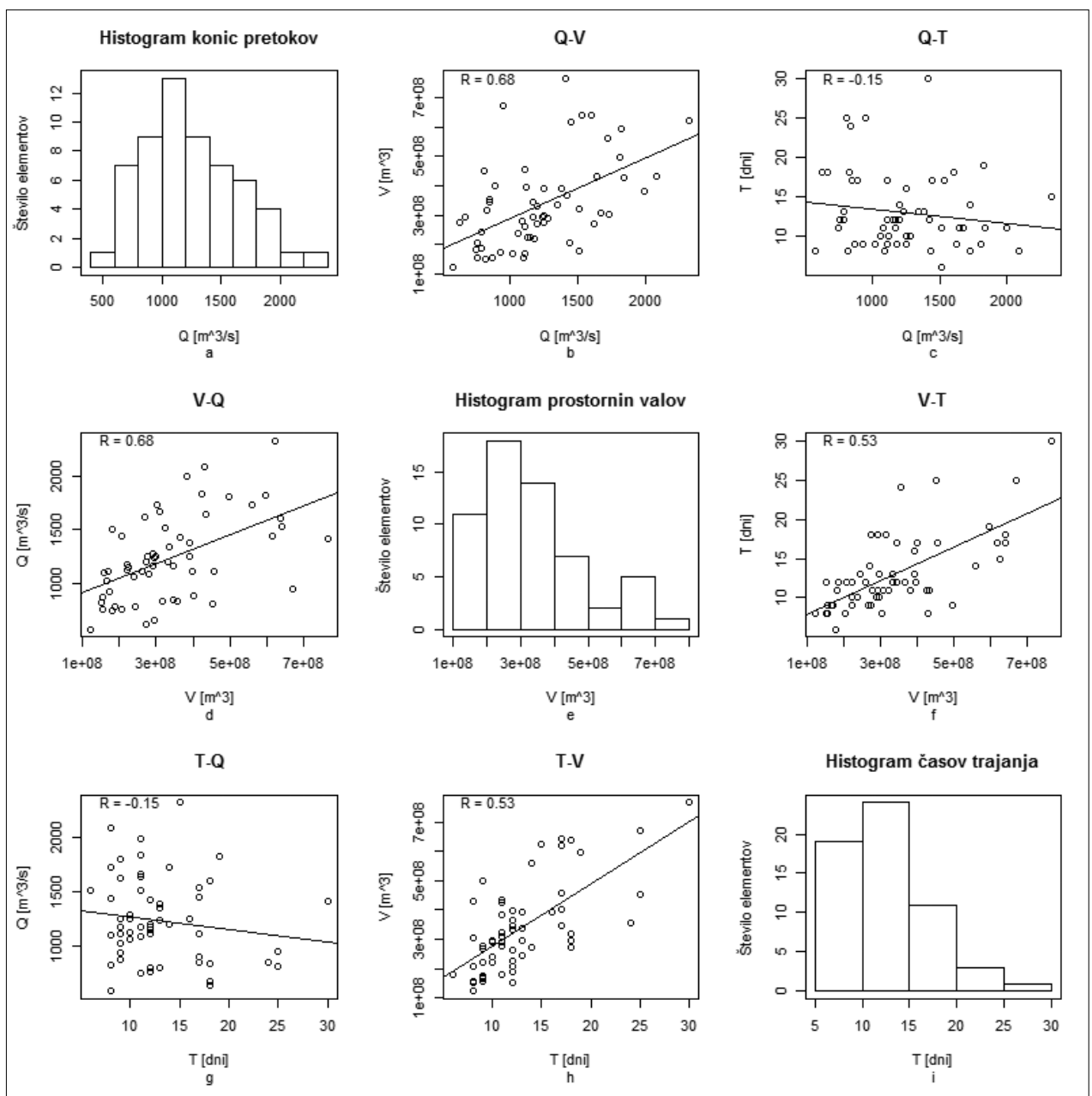
Na sliki 6 so prikazani povezave med spremenljivkami, ki določajo visokovodni val, in histogrami podatkov, ki prikazujejo lastnosti obravnavanega niza. Največji koeficient korelacije je bil izračunan pri paru prostornina-trajanje vala. Ta značilnost je bila pričakovana, saj daljše trajanje vala (kompleksni hidrogrami) pomeni tudi večjo prostornino površinskega odtoka (vala). Prostornina vala pa je poleg trajanja odvisna tudi od konice površinskega odtoka.

ka, vendar je ta korelacija nekoliko manjša. Pričakovano je med konico in časom trajanja vala najmanj povezave, saj lahko nadpovprečno veliki konici pripada tudi podpovprečno trajanje visokovodnega vala in obratno (nadpovprečno trajanje in podpovprečna konica). Na slikah 6f in 6h lahko vidimo razmerje med prostorninami in časi trajanja visokovodnega vala. Pearsonov, Kendallov in Spearmanov koeficient korelacije so v tem primeru znašali: 0,676, 0,484 in 0,627. Pripadajoča p-vrednost za Pearsonov koeficient korelacije znaša $5,7 \cdot 10^{-9}$, kar ponovno pomeni, da sta obravnavani spremenljivki linearno povezani, saj je izračunana p-vrednost manjša od izbrane stopnje značilnosti ($\alpha = 0,05$).

Na slikah 6b in 6d je prikazano razmerje med konicami in prostorninami površinskega odtoka (vala). Koeficienti

korelacije [Pearsonov, Kendallov, Spearmanov] za ta par spremenljivk so enaki: 0,525, 0,385 in 0,541. Vsi trije koeficienti so manjši kot tisti, ki so bili izračunani pri paru prostornina-trajanje. P-vrednost za Pearsonov koeficient korelacije je enaka $2,3 \cdot 10^{-5}$. Ta vrednost je ponovno manjša od določene stopnje tveganja ($\alpha = 0,05$), kar pomeni, da so tudi vrednosti pretokov linearno povezane s prostorninami visokovodnih valov.

Na slikah 6c in 6g lahko vidimo razmerje med konicami in časi trajanja visokovodnega vala. Pearsonov, Kendallov in Spearmanov koeficient korelacije pa so enaki: $-0,145$, $-0,083$ in $-0,139$. Izračunane vrednosti koeficientov korelacije so sicer negativne, a zelo blizu nič, kar pomeni, da težko govorimo o linearni povezanosti teh dveh spremenljivk. To potrjuje tudi izračunana p-vrednost (Pearsonov



Slika 6: Prikaz korelacij med konicami, prostorninami in časi trajanja visokovodnih valov
 Figure 6: Correlations between flood wave peaks, volumes and durations.

koeficient korelacije), ki znaša 0,28, kar je več od izbrane stopnje značilnosti $\alpha = 0,05$, kar pomeni, da ničelna hipoteza (spremenljivki sta neodvisni) ni zavrnjena s stopnjo tveganja 0,05.

Prikazani koeficienti korelacije so odvisni tudi od izbrane metode izločanja baznega odtoka. Grimaldi in Serinaldi (2006) sta pri analiziranju koeficientov korelacije vseh treh elementov visokovodnih valov prišla do enake ugotovitve: da je korelacija med prostornino in časom trajanja večja kot korelacija med konico in prostornino površinskega odtoka. Nekateri avtorji, ki so za izločanje baznega odtoka uporabili dvotočkovno metodo, so ugotovili, da je korelacija med konico in prostornino večja kot korelacija med prostornino in časom trajanja visokovodnega vala (Karmakar in Simonovic, 2007; Pugelj, 2012), kar potrjuje dejstvo, da je odvisnost med spremenljivkami odvisna tudi od izbrane metode za separacijo površinskega in baznega odtoka. Koeficienti korelacije pa so odvisni tudi od lastnosti porečja.

Sklepne misli

Kompleksni hidrološki pojavi, kot so poplave, se vedno pojavljajo kot posledica več med seboj odvisnih slučajnih spremenljivk. Torej lahko z verjetnostno analizo le ene spremenljivke dobimo napačne informacije o pogostosti posameznih kompleksnih pojavov, kot so visoke vode. Pri analizi visokovodnih valov v Litiji na reki Savi smo upoštevali konice, prostornine in čase trajanja. Tak pristop je nujen za učinkovito upravljanje voda in zaščito pred poplavami.

Analizirali smo 58 let podatkov dnevni vrednosti pretočkov. Ugotovili smo, da je bila razlika med prostornino vala pri upoštevanju urnih vrednosti in dnevni vrednosti z vključenimi absolutnimi ekstremi majhna (4,3 odstotka). Upoštevanje dnevni vrednosti z vključenimi absolutnimi konicami je torej smiselno, še posebej zato, ker so dnevni podatki skoraj vedno na voljo (merska letev), urne meritve pa so lahko pogosto prekinjene. V analizah smo ugotovili, da je korelacija med prostornino in časom trajanja večja kot korelacija med konico in prostornino visokovodnega vala. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi nekateri drugi avtorji (Grimaldi in Serinaldi, 2006). Pričakovano pa med konico in časom trajanja ni bilo velike medsebojne povezanosti, saj je čas trajanja visokovodnega dogodka odvisen predvsem od kompleksnosti hidrograma, ki ga določa odvisnost oziroma neodvisnost zaporednih konic. Tudi Pugelj (2012) in Karmakar in Simonovic (2007) so ugotovili, da sta konica in čas trajanja praktično neodvisna. Izračunali smo tudi nekatere indekse, koeficiente in razmerja. Ugotovili smo, da so izračunane vrednosti v pričakovanih mejah, kar pomeni, da je izbrana metoda izločanja baznega odtoka ustrezna.

Kompleksne verjetnostne analize, pri katerih upoštevamo več spremenljivk (angl. *multivariate frequency*

analysis), zahtevajo poglobljeno analizo lastnosti in odvisnosti posameznih elementov visokovodnih valov. Rezultati bivariatnih verjetnostnih analiz, pri katerih hkrati upoštevamo konice in prostornine visokovodnih valov, so lahko precej drugačni kot rezultati univariatnih (ena spremenljivka) verjetnostnih analiz. Rezultat bivariatne analize so skupne (angl. *joint*) oziroma pogojne (angl. *conditional*) povratne dobe, ki so lahko večje ali manjše od običajnih vrednosti povratnih dob, ki nastopajo pri verjetnostnih analizah ene spremenljivke. Prepričati se je treba, da je izbrana metoda izločanja baznega odtoka ustrezna in da so posamezni elementi valov določeni pravilno. Le tako so lahko nadaljnje verjetnostne analize izvedene kakovostno (Šraj in sod., 2012).

Zahvala

Zahvaljujemo se Agenciji RS za okolje za posredovane podatke. Rezultati raziskave so nastali v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2-4096, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Viri in literatura

1. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), 2011. Hidrološki podatki. Medmrežje: http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Sava&p_postaja=3650&p_let=1953&b_arhiv=Prika%C5%BEI (10.12.2012).
2. Bergmann, H., Sackl, B., 1990. Development of a flood data base and its application in water resources management. International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 211–218.
3. Brilly, M., Polič, M., 2005. Public perception of flood risks, flood forecasting and mitigation. Natural Hazards and Earth System Sciences, 345–355.
4. Cimen, M., Saplioglu, K., 2004. A procedure for separation of base flow. Balwois Conference 2004. Ohrid, Macedonia.
5. Frantar, P., Hrvatina, M., 2005. Pretočni režimi v Sloveniji med letoma 1971 in 2000. Geografski vestnik, 115–127.
6. Frantar, P., 2008. Specifični odtoki 1971–2000. V: Frantar, P. (ur.), Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. Ljubljana.
7. Grimaldi, S., Serinaldi, F., 2006. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis. Advances in Water Resources, 1155–1167.
8. Janža, M., 2006. Analiza odvisnosti indeksa baznega odtoka od lastnosti povodja. Geografski informacijski sistemi 2005–2006, 103–111.
9. Karmakar, S., Simonovic, S., 2007. Flood frequency analysis using copula with mixed marginal distributions, Water Resources Research report 5. Ontario, Canada.
10. Kobold, M., 2011. Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. Ujma 25, 48–56.

11. Kovačič, T., 2012. Analiza vpliva lastnosti porečja na indeks baznega odtoka. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani. Ljubljana.
12. Lacey, G. C., 1996. Relating base flow to catchment properties: a scaling approach, Report 96/8. Canberra, Australia.
13. Mikoš, M., Brilly, M., Ribičič, M., 2004. Poplave in zemeljski plazovi v Sloveniji = Floods and landslides in Slovenia, *Acta hydrotechnica*, 113–133.
14. Pandi, G., 2010. The analysis of flood waves: air and water components of the environment conference. Cluj, Romania.
15. Pugelj, A., 2012. Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani. Ljubljana.
16. Renard, B., Lang, M., 2007. Use of a Gaussian copula formultivariate extreme value analysis: Some case studies in hydrology. *Advances in Water Resources*, 897–912.
17. Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M., 2012. Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji, *Acta hydrotechnica*, 25(43) [v tisku].
18. Šraj, M., Rusjan, S., Petan, S., Vidmar, A., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M., 2008. The experimental watersheds in Slovenia. *IOP Conference Series* 4. Bristol, United Kingdom, 1–13.
19. Yue, S., Ouarda, T., Bobée, B., Legendre, P., Bruneau, P., 2002. Approach for describing statistical properties of flood hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 147–153.
20. Zorn, M., Komac, B., 2011. Škoda zaradi naravnih nesreč v Sloveniji in svetu med letoma 1995 in 2010. *Acta geographica Slovenica*, 7–41.