

Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic za primer vodomernih postaj v Sloveniji

Katarina Kavčič, Mitja Brilly, Mojca Šraj*

Povzetek

Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic je neke vrste nadgradnja klasične verjetnostne analize, ki temelji na hidroloških regijah, ki jih sestavljajo vodomerne postaje s podobnimi lastnostmi. Za njeno izvedbo so potrebni štirje glavni koraki. Najprej se pripravi in preveri podatke, temu sledi oblikovanje hidroloških regij, izbira verjetnostne porazdelitve posameznih regij in ocena parametrov teh porazdelitev. V analizo smo vključili 112 vodomernih postaj iz cele Slovenije, za glavno kontrolo podatkov pa smo uporabili test neskladnosti. Ta je kot kritične izpostavil tri postaje, ki pa smo jih v nadaljevanju kljub temu upoštevali brez težav. Pri oblikovanju hidroloških regij smo uporabili dve metodi razvrščanja, Wardovo metodo in metodo voditeljev, končne regije pa smo določili na podlagi rezultatov slednje. Oblikovali smo devet regij, ki so združevale med 3 in 19 postaj, mera heterogenosti pa se je gibala med -1,21 in 0,8. Tudi izbiro verjetnostne porazdelitve posameznih regij smo izvedli na dva načina in sicer najprej za skupne podatke regij nato pa še za podatke posameznih vodomernih postaj v regiji. V obeh primerih smo uporabili več testov ustreznosti. Ugotovili smo, da je verjetnostno porazdelitev najbolje izbirati z dvema do največ tremi različnimi metodami. Zadnji korak pa je dal podobne vrednosti ocenjenih kvantilov ne glede na način izbire verjetnostne porazdelitve.

Ključne besede: hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic, momenti L, metode razvrščanja, testi ustreznosti porazdelitve, mera heterogenosti

Key words: regional flood frequency analysis, L-moments, cluster analysis, goodness-of-fit tests, heterogeneity measure

Uvod

Po podatkih Inštituta za vode Republike Slovenije (2013) imamo v Sloveniji več kot 26.000 km vodotokov, več kot polovica jih ima stalno tekočo vodo. Vsakoletne poplave zalijejo okrog 23 km² površin, za poplavno ogrožene pa jih je označenih kar 3.000 km², kar predstavlja skoraj 15 % površine celotne države. Več kot polovica vsega poplavnega sveta je v porečju Save, ki mu pripada 58 % ozemlja države. V porečju Drave je 42 % poplavnih površin, v porečju Soče in pritokov pa 4 % (Uprava RS za zaščito in reševanje, 2013). Ukrepe, ki jih izvajamo z namenom preprečiti ali čim bolj zmanjšati posledice poplav, glede na vrsto posega delimo na vodogradbene (gradnja hidrotehničnih objektov – nasipi, pregrade, obtoki) in alternativne ukrepe (upravno-zakonski ukrepi, prostorsko načrtovanje, omejevanje dejavnosti, nezgodno zavarovanje) (Brilly et al., 1999). Ne glede na to, za kakšen ukrep gre, pa je za njegovo kakovostno načrtovanje potrebno poznati podatke o projektnih pretokih. Osnovna metoda za določevanje projektnih pretokov s predpisano povratno dobo je verjetnostna analiza. Verjetnostna analiza je postopek, ki povezuje različno obsežne hidrološke pojave s pogostostjo njihovega pojavljanja, njena nadgradnja pa je hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz.

Pogosto se zgodi, da je za verjetnostno analizo na voljo več med seboj povezanih podatkov, kot na primer meritve pretokov ob nekem ekstremnem dogodku na različnih

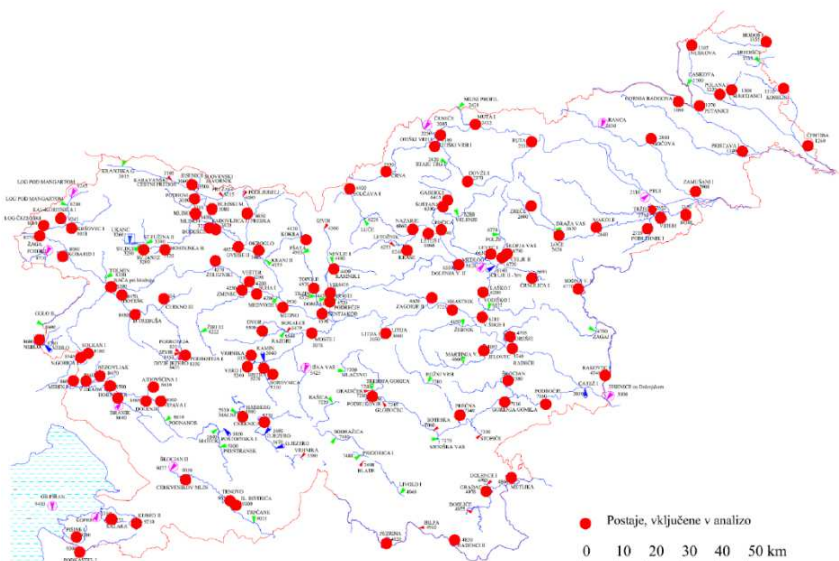
* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

vodomernih postajah. Če je pogostost dogodka podobna za različne opazovane količine, so z analizo vseh vzorcev podatkov skupaj lahko doseženi boljši rezultati. Ob uporabi tega pristopa govorimo o hidrološki regionalizaciji verjetnostnih analiz (ang. *regional frequency analysis*), saj so analizirani vzorci po navadi rezultati opazovanj iste spremenljivke na več merilnih mestih na območju ustrezno definirane "hidrološke regije". Metoda ima štiri glavne korake: pregled in pripravo podatkov, določanje homogenih hidroloških regij, izbiro verjetnostne porazdelitve za posamezne hidrološke regije in oceno parametrov izbrane verjetnostne porazdelitve hidrološke regije. Ta postopek se največkrat uporablja takrat, ko so na voljo raznovrstni vzorci enakih podatkov (Hosking in Wallis, 1997). Prednost regionalizacije je tudi v tem, da lahko dobimo ocene projektnih pretokov tudi za lokacije s pomanjkljivimi podatki oziroma kratkimi nizi meritev (nove postaje).

Glavni namen študije je predstavitev metodologije in prikaz njene praktične uporabe za naš prostor. Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz se že nekaj desetletij intenzivno uporablja po vsem svetu, v Sloveniji pa je še dokaj neznana, saj ob pregledu domače literature njene uporabe v slovenskem prostoru nismo zasledili. Tako smo v prispevku predstavili potrebne korake za izvedbo regionalne verjetnostne analize visokovodnih konic in predstavili osnovne metode, ki se pri posameznem koraku lahko uporabljajo. Ker je primernih metod več, smo izbrali nekaj najbolj pogosto uporabljenih in med seboj primerjali z njimi dobljene rezultate. Analizirali smo prednosti in slabosti različnih metod ter ugotavljali, katera je najbolj primerna za uporabo.

Podatki

V študiji smo želeli zajeti čim večje število vodomernih postaj v Sloveniji. Po podatkih ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2013) je v Sloveniji v okviru državnega hidrološkega monitoringa na površinskih vodah trenutno delujočih 192 vodomernih postaj. Izmed njih smo izločili tiste, ki so postavljene na izvirih, jezerih ali morju, tiste, na katerih se meritve opravljajo le z vodomernimi letvami, tiste, katerih obdobje meritev je krajše od 15 let in tiste, pri katerih v nizih podatkov o najvišjih izmerjenih letnih pretokih manjka več kot 10 % vrednosti. Na postajah, kjer so bili podatki dostopni že pred letom 1950, izmerjenih vrednosti pred tem letom nismo upoštevali, saj je njihova točnost vprašljiva. Tako je bilo na koncu v analizo vključenih 112 vodomernih postaj (slika 1).



Slika 1: Karta vodomernih postaj vključenih v analizo (povzeto po ARSO, 2013)

Pregled in priprava podatkov

Prvi korak pri verjetnostni analizi je preverjanje in urejanje podatkov. To, da so ti pravilni, je zelo pomembno pri vsaki statistični analizi, saj vse nadaljnje delo izhaja iz njih. Ne glede na tip podatkov v statistiki običajno preverjamo manjkajoče podatke, izstopajoče podatke, normalnost in linearnost (Important issues in data screening, 2013).

Poleg osnovnega preverjanja pa je dobro biti pozoren še na dve najpogostejši napaki, napačno vrednost podatkov in neupoštevanje spremembe razmer, v katerih se meritve izvajajo. Glede na to Hosking in Wallis (1997) za hidrološko regionalizacijo verjetnostnih analiz priporočata vsaj tri načine preverjanja podatkov:

- pregled posameznih vrednosti podatkov, ki razkrije velike napake,
- pregled podatkov za vsako lokacijo, ki razkrije izstopajoče in ponavljajoče se podatke,
- primerjavo podatkov med posameznimi lokacijami, ki razkrije neskladnost podatkov.

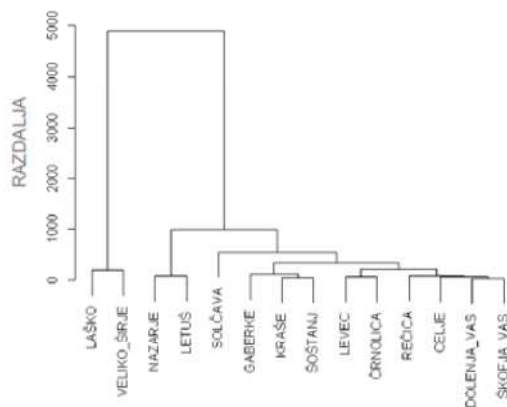
Za primerjavo podatkov posameznih lokacij je na voljo več različnih metod, kot na primer QQ diagram ali graf dvojne masne krivulje (ang. *double-mass plot*). Hosking in Wallis (1997) pa priporočata, da se v primeru regionalne verjetnostne analize z momenti L uporabi tako imenovan test neskladnosti (ang. *discordancy measure*), ki temelji na primerjavi razmerij momentov L različnih lokacij. Mejna vrednost, pri kateri neka postaja ni več skladna s skupino, je podana kot D_i (mera neskladnosti) in za primer 15 ali več postaj znaša 1. Test se lahko uporabi za veliko število enot na nekem geografskem območju, saj tiste z velikimi napakami v podatkih ne bodo skladne z drugimi (Chavoshi Borujeni in Azmin Sulaiman 2009); s tem preverimo podatke med posameznimi lokacijami in njihovo skladnost za vse postaje, zajete v analizi.

Določanje homogenih hidroloških regij

Drugi korak hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic, ki je po navadi najtežji in zahteva največ subjektivne presoje, je delitev postaj v homogene hidrološke regije. Hidrološko regijo si lahko razlagamo tudi kot skupino vodomernih postaj, za katere lahko s kombiniranjem podatkov o ekstremnih pretokih izboljšamo napovedi za katerokoli postajo v regiji (Burn in Goel, 2000).

Za razvrščanje vodomernih postaj v hidrološke regije lahko uporabimo več različnih postopkov. Katerega uporabimo, je odvisno od podatkov, ki jih imamo na voljo, in lastne presoje. Poznamo več možnih načinov razvrščanja: glede na geografsko ustreznost, subjektivno delitev, objektivno delitev, metode razvrščanja in druge multivariatne analize (Hosking in Wallis, 1997). Najpogosteje se uporablja različne metode razvrščanja, saj so najbolj primerne za delo z velikim številom podatkov. Delitev postaj v regije po tej metodi temelji na principu podobnosti. Gre namreč za to, da so znotraj ene skupine združene vse tiste postaje, ki so si glede na predhodno določene kriterije med seboj podobne. Vsaka postaja pripada samo eni skupini, te pa se med seboj ne prekrivajo (Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006). Najpogosteje uporabljeni metodi razvrščanja v primeru hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz sta Wardova metoda in metoda voditeljev (ang. *K-means*).

Wardova metoda je ena izmed hierarhičnih metod razvrščanja, ki se začne s tolikšnim številom skupin kot je posameznih enot. Glede na podobnosti med njimi se te med seboj združujejo, dokler ne dobimo ene same velike skupine, kar lahko pregledno prikažemo z dendrogramom (slika 2). Združevanje lahko kadarkoli prekinemo.



Slika 2: Primer dendrograma za vodomerne postaje v porečju Savinje

Metoda voditeljev spada v skupino nehierarhičnih metod razvrščanja. Še pred začetkom delitve je potrebno podati želeno število končnih skupin. Glede na to definiramo enako število voditeljev – enot, ki so predstavniki svojih skupin. Začetna množica voditeljev je po navadi določena naključno (Ferligoj, 1997).

Skupine, dobljene z metodo razvrščanja, po navadi še niso končni rezultat, saj je naš cilj oblikovati homogene hidrološke regije, kar zelo redko dosežemo po prvem razvrščanju. Z namenom izboljšati homogenost regije lahko uporabimo različne ukrepe, kot so na primer premeščanje postaj med skupinami, združevanje in razčlenjevanje skupin. Če je hidrološka regija povsem homogena velja, da so razmerja L-momentov za vsako postajo enaka. Ker pa to v praksi seveda ni mogoče, so regije, ki jih sicer imenujemo homogene, teoretično le "sprejemljivo homogene" (Hussain in Pasha, 2009). Potrebno je preveriti, ali je nihanje vrednosti razmerij momentov L znotraj regije še sprejemljivo za tako definicijo.

Za preverjanje homogenosti oziroma heterogenosti regije obstaja več različnih načinov, najpogosteje pa je uporabljen test heterogenosti, ki sta ga prva predstavila Hosking in Wallis (1997), uporabili pa so ga na primer še Norbiato in drugi (2007), Shu in Burn (2003) ter Hassan in drugi (2012). Rezultat tega testa je mera heterogenosti H . Regija je sprejemljivo homogena, če je vrednost $H < 1$ in mogoče heterogena, če je vrednost $1 \leq H < 2$, če pa je vrednost $H \geq 2$, je regija zagotovo heterogena.

Izbira verjetnostne porazdelitve za posamezne hidrološke regije

Pri hidrološki regionalizaciji verjetnostnih analiz se, po oblikovanju homogenih regij, v vseh nadaljnjih korakih dela le še s hidrološko regijo in njenimi lastnostmi, posameznih postaj se ne upošteva več. Tako se tudi najbolj primerno verjetnostno porazdelitev išče za celo skupino in ne le za eno postajo. Naš cilj je, da najdemo tako porazdelitev, ki bo z dovolj veliko točnostjo omogočala oceno kvantilov za vsako postajo, ki bo uvrščena v to hidrološko regijo (Hosking in Wallis, 1997).

Za preverjanje najustrežnejše porazdelitve obstaja veliko različnih testov (ang. *goodness-of-fit*). Nekatere izmed njih lahko uporabljamo neposredno za preverjanje celotnih regij, druge pa uporabljamo za vsako postajo v regiji posebej, potem pa rezultate za celo regijo združimo (Kavčič, 2013). Za uporabo s podatki celih regij sta primerna testa regionalna mera ustreznosti porazdelitve Z in diagram razmerij momentov L , poleg teh dveh pa smo izmed množice ostalih testov, primernih za podatke posameznih vodomernih postaj, uporabili še QQ diagrame, test PPCC, Kolmogorov-Smirnov test in test RMSE.

Mera ustreznosti porazdelitve Z je posebej prilagojena hidrološki regionalizaciji verjetnostnih analiz. Izhaja iz predpostavke, da je regija homogena in določa, kako dobro

sovpadajo razmerja momentov L, predvsem koeficienta asimetrije in sploščenosti izbrane verjetnostne porazdelitve ter merjenih podatkov, kar v tem primeru pomeni regijska povprečja (Hosking in Wallis, 1997). Prav tako je za to metodo prilagojen tudi diagram razmerij momentov L (ang. *L-moment ratio diagram*). To je graf, na katerem sta prikazani razmerji koeficienta asimetrije in sploščenosti izbranega niza podatkov. Kot najboljšo porazdelitev izberemo tisto, ob krivulji katere je največ točk vodomernih postaj.

Za preverjanje ustreznosti izbrane porazdelitve za podatke posameznih vodomernih postaj, je primerna grafična metoda QQ diagrami, ki prikazujejo ujemanje podatkov obravnavanega vzorca z generiranimi podatki izbrane teoretične porazdelitve (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 2013). Zelo podobno je tudi testiranje s korelacijskim koeficientom PPCC (ang. *probability plot correlation coefficient*), pri katerem pa gre namesto vizualne presoje za oceno na podlagi izračunane vrednosti. Še dva izmed uporabljenih testov, ki temeljita na številčnih vrednostih, pa sta Kolmogorov-Smirnov test, ki je osnovan na največji vertikalni razdalji med empirično in teoretično zbirno funkcijo (Millington et al., 2011) in test RMSE (ang. *root mean square error*), ki temelji na korenu srednjih vrednosti kvadratov napak (Šraj et al., 2012).

Ocena parametrov izbrane verjetnostne porazdelitve hidrološke regije

Pri analizah verjetnosti pojava poplav se za ocenjevanje parametrov porazdelitve pogosto uporabljajo momenti L (Bezak et al., 2013; Hussain in Pasha, 2009; Šraj et al., 2012). Postopek je zelo podoben metodi momentov, vendar ocene temeljijo na linearni kombinaciji reda statistike, zato so v primerjavi z navadnimi momenti veliko manj občutljivi na osamelce med podatki, omogočajo boljše ugotavljanje osnovne porazdelitve posameznega niza podatkov in imajo na splošno boljše statistične lastnosti. Določeni so kot linearna kombinacija verjetnostno uteženih momentov (ang. *probability weighted moments* – PWM) (Hussain in Pasha, 2009).

Za primer regionalizacije, pri kateri parametre in kvantile ocenjujemo glede na porazdelitev, ki je bila izbrana za regijo, torej za večje število vodomernih postaj, je najbolj ustrezen postopek za ocenjevanje regionalni algoritem momentov L. Postopek temelji na tako imenovani metodologiji indeksa poplav, pri kateri gre za povzemanje statističnih vrednosti iz različnih skupin podatkov. Glavna predpostavka metode indeksa poplav je ta, da postaje tvorijo homogeno regijo, kar pomeni, da je verjetnostna porazdelitev N postaj enaka, razen v primeru faktorja spremembe podatkov lokacije, ki ga imenujemo tudi indeks poplav (Hosking in Wallis, 1997).

Da bi vse skupaj poenostavili, privzamemo, da je indeks poplav kar srednja vrednost verjetnostne porazdelitve za vsako vodomerno postajo. Po tem je srednja vrednost spremenjenih podatkov za vsako postajo enaka 1, posledično pa toliko znaša tudi srednja vrednost za regijo. Prav tako pa so razmerja momentov L za vsako postajo enaka, ne glede na to, ali so izračunana iz spremenjenih ali začetnih vrednosti podatkov, zato poseben izračun spremenjenih podatkov ni potreben.

Izbrano verjetnostno porazdelitev prilagodimo podatkom tako, da njena razmerja momentov L izenačimo z regionalnimi povprečji, pri čemer pa upoštevamo, da je srednja vrednost enaka 1.

Ocena kvantilov brez prekoračitve verjetnosti F je:

$$\bar{Q}_i(F) = I_1^{(i)} \hat{q}(F), \quad (1)$$

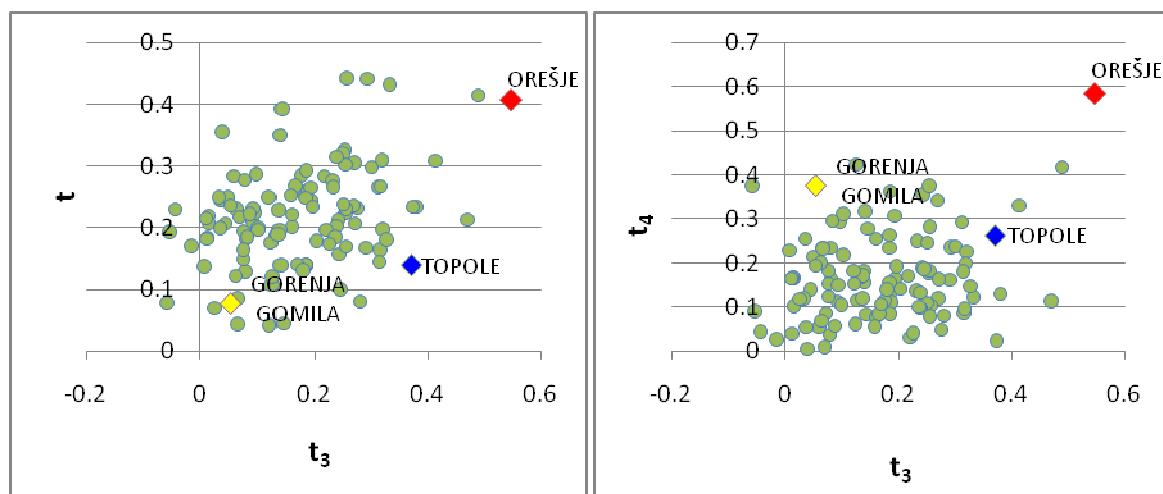
kjer sta $I_1^{(i)}$ srednja vrednost podatkov postaje in $\hat{q}(F)$ verjetnostna porazdelitev za regijo.

Rezultati in analiza

Na več načinov smo preverili pravilnost zbranih podatkov 112 vodomernih postaj, ki smo jih vključili v analizo. Uporabili smo tudi test neskladnosti, s katerim smo preverili več različnih možnosti. Najprej smo upoštevali delitev, ki je že bila narejena, to je po porečjih, nato smo postaje združili v šest skupin glede na velikost površine hidrometričnega zaledja, na koncu pa smo skupaj testirali še vse postaje. Mera neskladnosti D_i je bila presežena v 6 primerih. Največja je bila 7,86, in sicer za postajo Orešje v skupini vseh postaj. Glede na rezultate se je kot najbolj neskladna izkazala prav vodomerna postaja Orešje, saj je njena vrednost D_i v prav vsaki skupini presegala zgornjo mejo. Prav tako pa smo pozornost namenili še postajama Gorenja Gomila in Topole, ki sta bili neskladni v dveh izmed treh preverjenih skupin. Podrobnejša analiza je pokazala, da ima postaja Orešje zmerno velik koeficient variacije (t) ter zelo velika koeficienta asimetrije (t_3) in sploščenosti (t_4) (slika 3). Hidrogram izmerjenih pretokov na tej postaji kaže, da je bila leta 2005 izmerjena zelo visoka visokovodna konica, ki je znašala kar $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (povprečne visokovodne konice znašajo $14,6 \text{ m}^3/\text{s}$), kar je razlog za veliki vrednosti koeficientov asimetrije (t_3) in sploščenosti (t_4).

Po preverjanju se je izkazalo, da je omenjena izmerjena visokovodna konica na postaji Orešje verjetno pravilna. Neskladnost drugih dveh postaj pa ni posledica zelo velikih izmerjenih pretokov, ampak kombinacije vrednosti vseh koeficientov.

Podatki vseh 112 vodomernih postaj so se med preverjanjem izkazali za ustrezne, zato smo nadaljevali analizo z razvrščanjem postaj v hidrološke regije. Pri tem smo uporabili dve izmed metod razvrščanja, to sta Wardova metoda in metoda voditeljev.

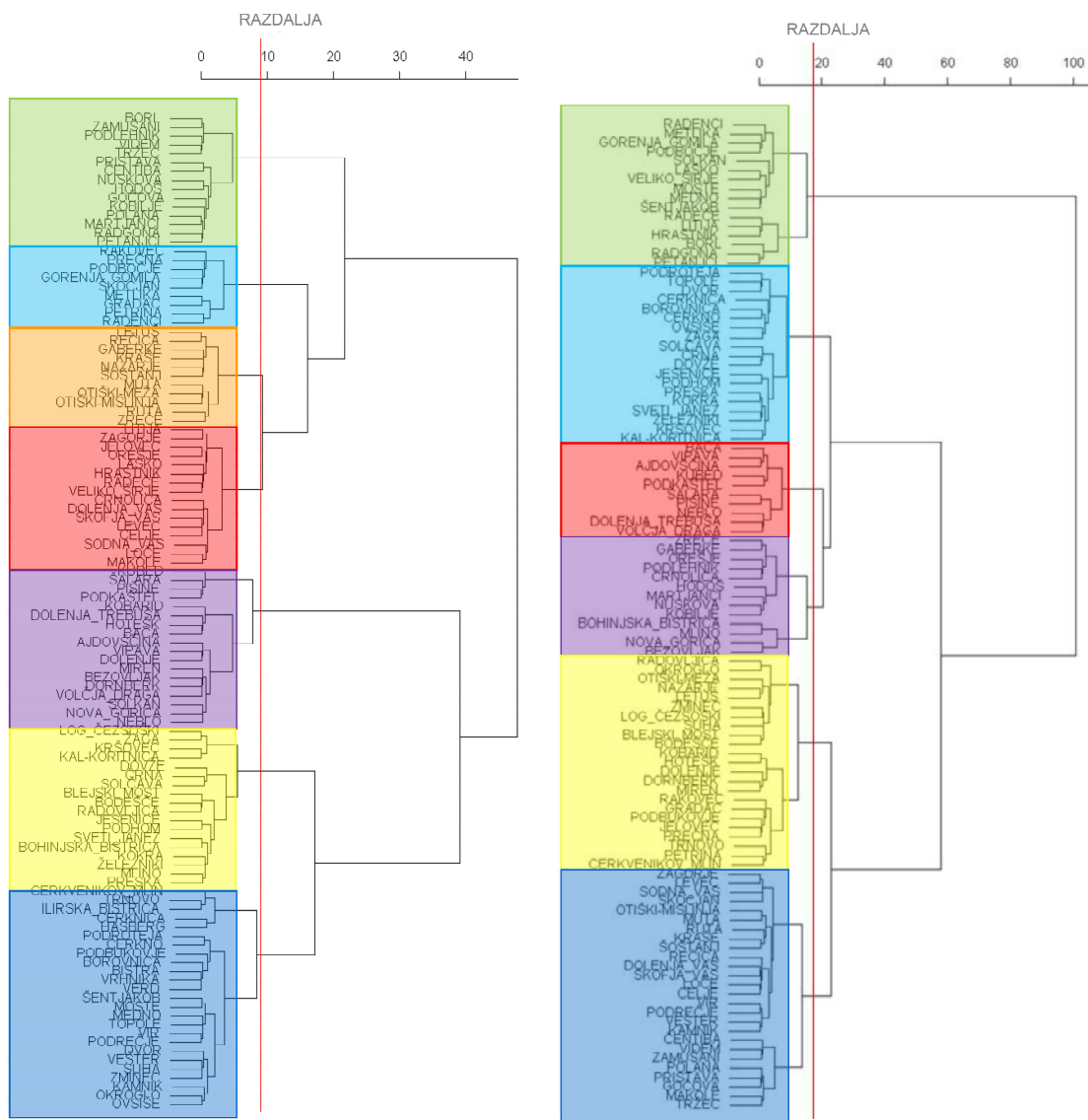


Slika 3: Diagram razmerij L-momentov za vse vodomerne postaje

Pri razvrščanju imamo več možnosti. Izhajamo lahko iz statističnih lastnosti postaj (kot so na primer razmerja momentov L) ali iz njihovih fizičnih lastnosti (zemljepisna širina in dolžina, padec struge, sestava tal, koeficient infiltracije). Pri tej metodi se običajno razvršča z upoštevanjem fizičnih lastnosti, saj preverjanje homogenosti oblikovanih regij temelji na statističnih lastnostih. Če bi torej razvrščali in preverjali z uporabo istih podatkov, uporabljen test ne bi bil merodajen.

Ker gre v tem primeru za osnoven prikaz poteka analize, smo upoštevali osnovne lastnosti postaj, to so zemljepisna širina in dolžina, kota 0 (nadmorska višina nulte točke vodomera), površina hidrometričnega zaledja in letna količina padavin na prispevnem območju postaje. Izbrane atribute smo standardizirali, površini zaledja pa smo povečali faktor vpliva na 3.

Z Wardovo metodo razvrščanja smo postopek ponovili trikrat. Najprej smo upoštevali le tri attribute in sicer zemljepisno širino in dolžino ter nadmorsko višino, nato pa smo dodali še površino hidrometričnega zaledja in na koncu še letno količino padavin (preglednica 1). Rezultat razvrščanja so trije dendrogrami, iz katerih smo skupine oblikovali s predhodno prekinitvijo (slika 4). Hosking in Wallis (1997) priporočata, da v hidrološki regiji ni več kot 20 postaj, zato smo se odločili, da bomo v prvem koraku upoštevali delitev na 6 ali 7 regij, kar v povprečju pomeni 17 postaj na regijo.



Slika 4: Dendrograma delitve z upoštevanjem treh atributov (zemljepisna širina in dolžina, kota 0) - levo in štirih atributov (zemljepisna širina in dolžina, kota 0, površina hidrometričnega zaledja) – desno

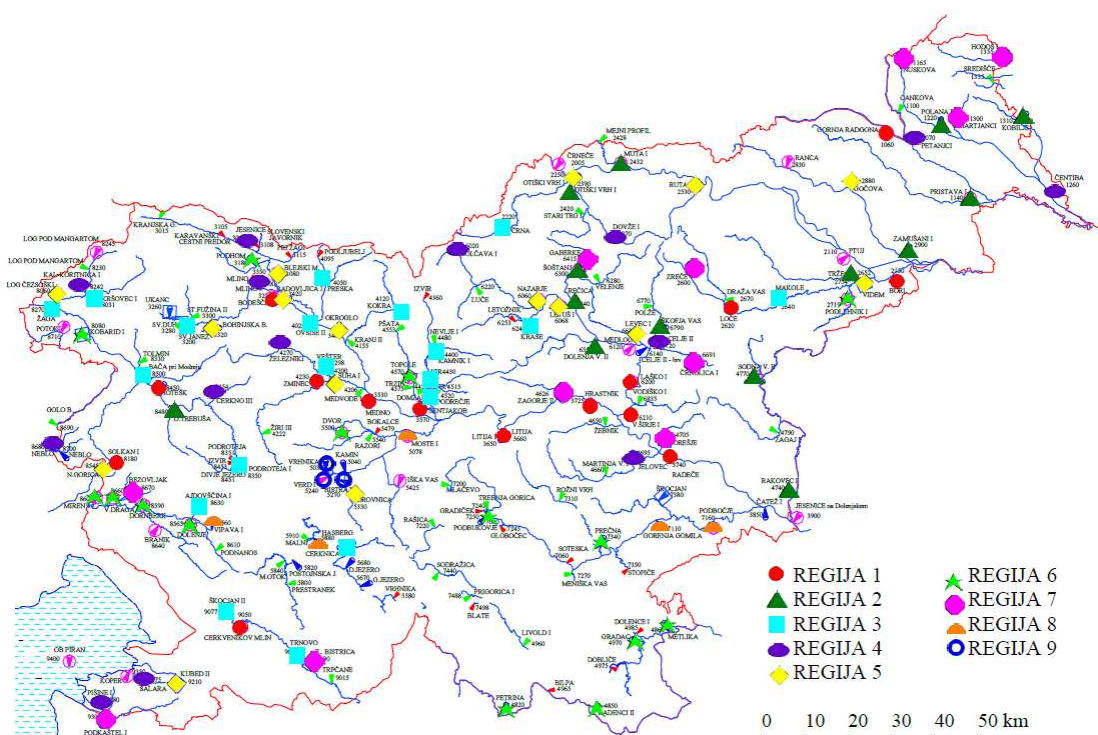
Postaje v hidroloških regijah, ki so dobljene z upoštevanjem različnega števila atributov, se seveda razlikujejo. Največje razlike v razporeditvi postaj so med skupinami, ki so dobljene z upoštevanjem prvih treh oziroma štirih atributov, skupine delitve s štirimi in petimi atributi pa so si med seboj dokaj podobne, kar kaže na to, da ima velik vpliv na razvrščanje četrti dodani atribut, površina zaledja.

Preglednica 1: Rezultati razvrščanja z različnim številom upoštevanih atributov

Upoštevano število atributov	Wardova metoda razvrščanja		Razvrščanje z metodo voditeljev	
	Povprečno število postaj	Povprečna mera heterogenosti H	Povprečno število postaj	Povprečna mera heterogenosti H
3	16	9,63	18,67	10,06
4	17,83	7,03	17,33	7,18
5	14	6,31	16,33	6,10

Tudi pri razvrščanju z metodo voditeljev smo postopek ponovili trikrat, vsakič za 6 končnih skupin, ob vsaki ponovitvi pa smo dobili drugačne rezultate (preglednica 1). Tudi v tem primeru se je izkazalo, da ima površina zaledja velik vpliv. Postaje, ki so bile pri razvrščanju s tremi upoštevanimi lastnostmi najprej združene v skupine, so bile po delitvi s štirimi povsem pomešane po novonastalih regijah. V nadaljevanju, z upoštevanjem petih lastnosti, pa so bile razlike dosti manjše. Pet novonastalih skupin je imelo skoraj vse elemente enake kot regije, dobljene z upoštevanjem štirih atributov, ena pa je bila sestavljena iz vodomernih postaj, ki so prvotno pripadale dvema regijama.

Skupine, dobljene po prvem koraku razvrščanja, še niso homogene. Odločili smo se za skupine dobljene z metodo voditeljev, saj je ta metoda iterativna in ne da enakega končnega rezultata ob vsaki ponovitvi. Pri končnem določanju homogenih regij smo upoštevali štiri lastnosti vodomernih postaj (zemljepisna širina in dolžina, kota 0 in površina zaledja), saj ima, kot se je izkazalo pri razvrščanju, površina zaledja velik vpliv na delitev, upoštevanje padavin pa regij ne spremeni več veliko. S premikanjem postaj med skupinami smo tako dobili devet končnih, homogenih hidroloških regij (slika 5).



Slika 5: Karta razporeditve postaj glede na končne homogene hidrološke regije (Podloga – osnovna karta povzeta po ARSO, 2013)

Regije so zelo razpršene, vendar so vse sprejemljivo homogene, poleg tega pa imajo tudi manj kot dvajset elementov (preglednica 2). Le osma in deveta regija se morda zdita

nesmiselni, saj vsako sestavljajo le trije oziroma pet elementov. Za tako sestavo smo se odločili zato, ker imajo vse tri vodomerno postaje (Verd, Bistra in Vrhnika) v deveti regiji zelo specifične lastnosti, ki v primeru priključitve postaje k drugi regiji močno povečajo njeno mero heterogenosti. Povprečno število elementov v homogenih hidroloških regijah je 12,44, njihova povprečna mera heterogenosti H pa znaša 0,25. Za vsako končno regijo smo preverili tudi vrednosti mere neskladnosti postaj. Vse so bile nižje od mejnih vrednosti, tudi za postajo Orešje, ki je bila pri prvem preverjanju najbolj kritična.

Preglednica 2: Končne homogene hidrološke regije

Regija	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Število elementov	15	14	19	14	16	15	11	5	3
Mera heterogenosti H	0,45	0,66	0,8	0,1	0,05	0,13	0,51	0,79	-1,21

Za vsako homogeno hidrološko regijo smo nato izbrali ustrezno verjetnostno porazdelitev. Upoštevali smo normalno (NORM), logaritemsko normalno dvo- (LN) in troparametrsko (LN3), Pearson III (PE3), logaritemsko Pearson III (LPE3), Gumbelovo (Gumbel), generalizirano logistično (GLO) in generalizirano Pareto porazdelitev (Pareto) ter generalizirano porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV). Izmed teh porazdelitev smo najbolj ustrezno izbrali s pomočjo prej predstavljenih testov ustreznosti.

Za izbiro najbolj ustrezne verjetnostne porazdelitve smo za splošne podatke homogenih hidroloških regij uporabili regionalno mero ustreznosti Z in diagram razmerij momentov L . Drugi testi, s katerimi smo preverili ustreznost izbranih porazdelitev, omogočajo testiranje posameznega niza podatkov za vsako vodomerno postajo posebej. Glede na to smo za vsako vodomerno postajo izračunali testne statistike za teste Kolmogorov-Smirnov (KS), test PPCC in test RMSE. Na koncu smo s primerjavo dobljenih rezultatov izbrali najbolj ustrezno porazdelitev (preglednica 3).

Iz preglednice 3 je razvidno, da se izbrane verjetnostne porazdelitve za podatke celotnih regij in podatke posameznih vodomernih postaj med seboj razlikujejo.

Preglednica 3: Izbrane najbolj ustrezne verjetnostne porazdelitve

Regija	Porazdelitev za podatke cele regije	Porazdelitev za podatke vodomernih postaj
Regija 1	PE3	GEV
Regija 2	PE3	GEV
Regija3	LN3	PE3
Regija4	GLO	LPE3
Regija5	GEV	LPE3
Regija6	GLO	GEV
Regija7	PE3	GEV
Regija 8	GLO	GLO
Regija 9	GLO	GLO

Razlaga kratic, uporabljenih v tabeli: logaritemska normalna troparametrsko porazdelitev (LN3), Pearson III porazdelitev (PE3), logaritemska Pearson III porazdelitev (LPE3), generalizirana logistična porazdelitev (GLO), generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV)

Zadnji korak hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz je ocena parametrov in kvantilov. Ocenjujejo se za cele regije in so pravzaprav standardizirani kvantili

visokovodnih konic na vodomernih postajah (Parida et al., 1998). Glede na to, da smo najbolj ustrezne verjetnostne porazdelitve izbirali na dva načina in da smo pri tem dobili različne rezultate, smo tudi oceno parametrov in kvantilov naredili dvakrat, za vsak primer posebej. Le za regiji osem in devet postopka nismo ponavljali, saj sta izbrani porazdelitvi v obeh primerih enaki. Vrednosti ocenjenih kvantilov na podlagi verjetnostnih porazdelitev podatkov celih regij in podatkov posameznih vodomernih postaj so v večini primerov skoraj enake. Povprečna vrednost odstopanja med vrednostmi kvantilov za eno regijo se giblje med 0,004 in 0,7, v primeru tretje regije pa so vrednosti celo enake.

Zaključki

Osnova hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic so homogene hidrološke regije. Za delitev vodomernih postaj po regijah lahko uporabimo več različnih metod, izmed katerih smo izbrali dve metodi razvrščanja, Wardovo metodo in metodo voditeljev. Obe metodi sta dali zelo podobne rezultate. Povprečno število postaj v regiji je v obeh primerih 17,83, povprečna mera heterogenosti H pa je za Wardovo metodo (7,09) malenkost nižja kot v primeru metode voditeljev (7,19). Primerjava obeh metod je pokazala, da je glede na hierarhično delitev v istih skupinah metode voditeljev ostalo 86 % postaj.

Končne homogene regije se oblikuje iz le ene predhodne delitve. Izbrali smo metodo voditeljev, ta pa je odvisna od števila iteracij in da ob vsaki ponovitvi drugačen rezultat. Različne rezultate smo dobili tudi pri 100.000 ponovitvah. Čeprav smo pri končni delitvi regij izhajali iz skupin, oblikovanih z metodo voditeljev, bi za splošno uporabo kot bolj primerno predlagali Wardovo metodo. Rezultati pri Wardovi metodi so končni in se ne spreminjajo. Poleg tega pa iz dendrograma z razrezom na določeni višini lahko brez ponavljanja dobimo toliko skupin, kot želimo (Kumar Kar et al., 2012).

Pri razvrščanju je pri obeh metodah mogoče opaziti vpliv izbire atributov. Razlike v sestavi skupin so bile največje pri dodatnem upoštevanju površine hidrometričnih zaledij. Padavine niso imele tako velikega dodatnega vpliva, saj so odvisne od nadmorske višine oziroma kote 0 in zemljepisne dolžine, ki sta pri delitvi že upoštevani (Kavčič, 2013). Pri nadaljnjih analizah pa bi bilo verjetno smiselno upoštevati še kakšne druge lastnosti vodomernih postaj. Tako bi na primer lahko upoštevali še kamninsko sestavo tal, splošen naklon rečne struge ali zaledja postaje in poraščenost z gozdom, kot so to storili Acreman in Sinclair (1986) ter Malekinezhad s sodelavci (2011, cit. po Kumar Kar et al., 2012).

Pri izbiri najustreznejše verjetnostne porazdelitve posameznih regij smo upoštevali dva pristopa. Najprej smo izhajali iz splošnih regionalnih podatkov nato pa še iz podatkov posameznih vodomernih postaj v regiji. Veliko bolj preprost in hiter je prvi način, za izbiro ustrezne porazdelitve glede na podatke vodomernih postaj pa se je izkazalo, da ni najboljše, saj je zaradi večjega števila testov preveč možnosti in postopek se hitro zaplete. Kot najboljši način bi po dosedanjih izkušnjah priporočali kombinacijo obeh možnosti, najprej izbire z regionalno mero ustreznosti Z ter kontrolo ali dopolnitev z diagramom razmerij momentov L , nato upoštevanje enega izmed testov za vsako vodomerno postajo posebej, na koncu pa še kontrolo z upoštevanjem QQ diagramov. Različne teste so med sabo kombinirali tudi Cunnane (1989, cit. po Karim in Chowdhury, 1995), Haile (2011), Millington in drugi (2011) ter Chavoshi Borujeni in Azmin Sulaiman (2009).

Pri hidrološki regionalizaciji pa smo ustvarili tudi dve homogeni regiji, s katerima je bilo težko nadaljevati; osma in deveta regija sta imeli le pet oz. tri elemente. Čeprav sta bili homogeni, je bilo zaradi majhnega števila podatkov zelo težko določiti najustreznejšo porazdelitev. Pri tem smo si morali pomagati na več različnih načinov. Ta primer kaže na

to, da homogenost regije ni najpomembnejša. Potrebno je upoštevati tudi priporočila o številu elementov v njej, ki naj bi se gibalo med deset in dvajset (Hosking in Wallis, 1997).

Ker je to prvi poskus hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji, nismo imeli nobenih izhodišč, na katera bi se lahko oprli. Število vodomernih postaj, ki so bile vključene v analizo, je bilo zelo veliko, njihove lastnosti pa se močno razlikujejo, poleg tega pa za vsakega izmed štirih potrebnih korakov analize obstaja več različnih možnosti izvedbe. V prikazanem primeru smo uporabili tiste, katerih uporabo smo največkrat zasledili v tuji literaturi. Čeprav je metoda razvrščanja dala dobre in pregledne rezultate, bi bilo smiselno pri razvrščanju uporabiti še subjektivno ali objektivno metodo delitve postaj. Odlično izhodišče za objektivno delitev pa bi bilo začetno ločevanje postaj na tiste, ki so postavljene v urbano okolje in tiste v neurbanem okolju.

Literatura

- Acreman, M. C., Sinclair, C. D. (1986). Classification of Drainage Basins According to Their Physical Characteristics; an Application for Flood Frequency Analysis in Scotland, *Journal of Hydrology* 84, 34: 365–380.
- Agencije republike Slovenije za okolje (ARSO). 2013. http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (4. 3. 2013)
- Bezak, N. Brilly, M. Šraj, M. (2013). Comparison between the peaks over threshold method and the annual maximum method for flood frequency analyses. *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.831174.
- Brilly, M., Mikoš M., Šraj, M. (1999). *Vodne ujme. Varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.
- Burn, D. H., Goel, N. K. (2000). The formation of groups for regional flood frequency analysis, *Hydrological Sciences Journal* 45, 1: 97–112.
- Chavoshi Borujeni, S., Azmin Sulaiman, W. N. (2009). Development of L-moment Based Models for Extreme Flood Events, *Malaysian Journal of Mathematical Sciences* 3, 2: 281–296.
- Ferligoj, A. (1989). *Ravzrščanje v skupine. Teorija in uporaba v družboslovju*. Ljubljana, Jugoslovansko združenje za sociologijo, Sekcija za metodologijo in statistiko: 182 str. http://dk.fdv.uni-lj.si/metodoloskizvezki/Pdfs/Mz_4Ferligoj.pdf (3. 3. 2013.)
- Haile, A. T. (2011). *Regional Flood Frequency Analysis in Southern Africa*. Magistrsko delo. Oslo, University of Oslo, Faculty of Mathematics and Natural Sciences: 113 str. https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/12530/Alem_FINALTHESI%5B1%5D.pdf?sequence=1 (22. 4. 2013.)
- Hassan, B. G. H., Atiem, I. A., Jianzhu, L., Ping, F. 2012. At Site and Regional Frequency Analysis for Sudan Annual Rainfall by Using the L-Moments and Nonlinear Regression Techniques. *International Journal of Engineering Research and Development* 3, 6: 13–19.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge, Cambridge University Press: 224 str.
- Hussain, Z., Pasha, G. R. (2009). Regional Flood Frequency Analysis of the Seven Sites of Punjab, Pakistan, Using L-Moments, *Water Resources Management* 23, 10: 1917–1933.
- Important Issues in Data Screening. 2013. www.geography.unt.edu/.../week2handout-datascreening.doc (Pridobljeno 5. 3. 2013.)
- Inštitut za vode republike Slovenije. (2013). <http://www.izvrs.si/> (21. 4. 2013.)
- Karim, A., Chowdhury, J. U. (1995). A comparison of four distributions used in flood frequency analysis in Bangladesh, *Hydrological Sciences Journal* 40, 1: 55–66.
- Kavčič, K. (2013): *Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji (Regionalisation of flood frequency analyses in slovenia)*. Diplomsko naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 113 p. (in Slovenian).
- Košmelj, K., Breskvar Žaucer L. (2006). Metode za razvrščanje enot v skupine; osnove in primer, *Acta agriculturae Slovenica* 87, 2: 299–310. <http://aas.bf.uni-lj.si/september2006/11kosmelj.pdf> (3. 3. 2013.)

- Kumar Kar, A., Goel, N. K., Lohani, A. K., Roy, G.P. (2012). Application of Clustering Techniques Using Prioritized Variables in Regional Flood Frequency Analysis – Case Study of Mahanadi Basin, *Journal of Hydrologic Engineering* 17, 1: 213–223.
- Millington, N., Das, S., Simonovic, S. P. (2011). The Comparison of GEV, Log-Pearson Type 3 and Gumbel Distributions in the Upper Thames River Watershed under Global Climate Models. *Raziskovalno poročilo o vodnih sredstvih*. London, Ontario, Canada, The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering: 52 str.
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. 2013.
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> (Pridobljeno 22. 4. 2013.)
- Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M., Zanon, F. 2007. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology* 345, 3-4: 149–166.
- Parida, B. P., Kachroo, R. K., Shrestha, D. B. (1998). Regional Flood Frequency Analysis of Mahi-Sabarmati Basin (Subzone 3-a) using Index Flood Procedure with L-Moments, *Water Resources Management* 12, 1: 1–12.
- Shu, C., Burn, D. H. 2003. Spatial patterns of homogeneous pooling groups for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal* 48, 4: 601–618.
- 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 (v tisku).
- Uprava republike Slovenije za zaščito in reševanje. (2013).
<http://www.sos112.si/slo/page.php?src=og12.htm> (Pridobljeno 23. 4. 2013.)