

UDK/UDC: 519.2:556.166(497.4)

Prejeto/Received: 23.12.2015

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 25.02.2016

## HIDROLOŠKA REGIONALIZACIJA VERJETNOSTNIH ANALIZ VISOKOVODNIH KONIC V SLOVENIJI

### HYDROLOGICAL REGIONALISATION OF FLOOD FREQUENCY ANALYSES IN SLOVENIA

Katarina Zabret<sup>1,\*</sup>, Mitja Brilly<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

#### Izvleček

Poplave so v Sloveniji vedno pogostejši pojav in so na tretjem mestu glede na povzročeno škodo zaradi naravnih nesreč. Osnova za učinkovito upravljanje z vodami in zaščito pred njihovim škodljivim delovanjem so zanesljive verjetnostne analize, s katerimi ocenimo povratno dobo pojava. Nadgradnja klasičnih verjetnostnih analiz visokovodnih konic je hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic, katere glavna prednost je, da lahko z večjo točnostjo napovemo pretoke velikih povratnih dob tudi za lokacije, kjer so nizi merjenih podatkov kratki ali pa meritev sploh ni. Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz zahteva štiri korake: pregled podatkov, oblikovanje homogenih hidroloških regij, izbiro ustrezne verjetnostne porazdelitve ter oceno parametrov in kvantilov zanjo. Najbolj zahteven del analize je oblikovanje homogenih hidroloških regij, za katerega so v prispevku predstavljene tri različne metode. Hidrološko regionalizacijo visokovodnih konic smo izvedli za izbrane vodomerne postaje v Sloveniji.

**Ključne besede:** hidrološka regionalizacija, poplave, pretoki, verjetnostna analiza, metode razvrščanja, Slovenija

#### Abstract

Floods in Slovenia are becoming more and more frequent and are cause of the third highest damage due to natural disasters. The basis of effective flood risk management is a reliable frequency analysis that can be used for estimating event return period. An upgrade of the classical frequency analysis is the regional flood frequency analysis. Its main advantage is that it allows higher accuracy of flood forecasts also in areas with shorter or no measurements. Regional flood frequency analysis encompasses four steps: checking the accuracy and discordance of data, identification of homogeneous regions, choice of an appropriate frequency distribution for a region, and quantiles of the selected distribution. The most challenging part of this analysis is the identification of homogeneous hydrological regions. In this paper we present three methods that can be used for this step. The regional flood frequency analysis was performed for selected water gauging stations in Slovenia.

**Keywords:** hydrological regionalization, flood, discharge, probability analysis, cluster analysis, Slovenia

---

<sup>1</sup> Stik / Correspondence: [katarina.zabret@fgg.uni-lj.si](mailto:katarina.zabret@fgg.uni-lj.si)

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

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

## 1. Uvod

Vodne ujme so obsežne naravne nesreče, ki jih povzroči voda v širšem pomenu besede. Tako mednje uvrščamo hudourniške, rečne nižinske in kraške poplave, snežne in zemeljske plazove. Vzroki vodnih ujm so lahko meteorološki (nevihte, neurja, snežni viharji) ali hidrološki pojavi (poplave, snežni plazovi) (Brilly et al., 1999). Od navedenih vrst vodnih ujm so v svetu najštevilčnejše naravne nesreče poplave, ki velikokrat zahtevajo smrtne žrtve, prizadenejo veliko število ljudi in povzročajo veliko gmatno škodo.

V Sloveniji so naravne nesreče kot so poplave, plazovi, potresi in suše precej pogoste (Mikoš et al., 2004; Zorn in Komac, 2011; Šebenik et al., 2014). Po povzročeni škodi so poplave na tretjem mestu med naravnimi nesrečami. V zadnjih dveh desetletjih (1995–2010) so v povprečju znašale 15 % vse škode, povzročene zaradi naravnih nesreč (Zorn in Komac, 2011). Po podatkih Statističnega urada republike Slovenije (2015) je škoda zaradi naravnih nesreč med letoma 1994 in 2008 v povprečju znašala 86 milijonov evrov letno, velik delež teh sredstev (16 %) pa je bil namenjen za sanacijo posledic poplav. Vsakoletne poplave zalijejo okrog 23 km<sup>2</sup> površin v naši državi (Uprava RS za zaščito in reševanje, 2015). Več kot polovica poplavnih površin je v porečju Save, 42 % v porečju Drave in 4 % v porečju Soče in pritokov (Uprava RS za zaščito in reševanje, 2015).

Glede na veliko škodo, ki jo povzročajo poplave, je jasno, da si prizadevamo zagotoviti čim boljše varstvo pred njimi ali se vsaj ustrezno pripraviti nanje. Po Zakonu o vodah (2002) varstvo pred škodljivim delovanjem voda, ki vključuje tudi zaščito pred poplavami, obsega izvajanje ukrepov, s katerimi se zmanjšuje ali preprečuje ogroženost pred škodljivim delovanjem voda in odpravljanje posledic njihovega škodnega delovanja. Ne glede na to, za kateri ukrep gre, pa ga je najprej potrebno skrbno načrtovati. Podlaga za načrtovanje protipoplavnih ukrepov pa so verjetnostne analize, s pomočjo katerih izračunamo projektni pretok z

izbrano povratno dobo oz. verjetnostjo pojavljanja, ki je osnova za dimenzioniranje hidrotehničnih objektov, upravljanje z vodami, določanje poplavnih območij ipd. Ker gre za ukrepe, ki neposredno vplivajo na ogroženost določenega območja in prebivalstva (Đurović in Mikoš, 2004; Kobold et al., 2005), je potrebno verjetnostne analize izvesti s čim večjo zanesljivostjo.

Verjetnost pojava visokih voda lahko ocenimo s pomočjo verjetnostnih analiz le v primeru, ko razpolagamo z merjenimi podatki (Bezak et al., 2014b). Verjetnostna analiza je statistična metoda, ki se uporablja za ocenjevanje pričakovane pogostosti pojava nekega dogodka, ki ga navadno izrazimo s povratno dobo. Pri analizah lahko upoštevamo najvišjo visokovodno konico v vsakem letu ali pa vse visokovodne konice, ki presegajo izbrano mejo (Bezak et al., 2014a; Šraj et al., 2012). Podatke nato uskladimo z izbrano porazdelitvijo, za katero izračunamo karakteristična števila (srednja vrednost, standardna deviacija, koeficient asimetrije in koeficient variacije). Najboljše ocene parametrov omogoča metoda momentov L (Šraj et al., 2012), ki se je kot najbolj stabilna izkazala tudi v primeru verjetnostne analize visokih voda za 300 vodomernih postaj v Sloveniji (Kučić, 2007).

Iz klasične verjetnostne analize izhaja hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz, ki povezuje različno obsežne in pogoste hidrološke pojave. Glavna prednost hidroloških regij je, da lahko vse že znane podatke znotraj regije združimo in učinkovito ocenimo potrebne parametre za posamezne lokacije, kjer podatki niso znani. Tako lahko za ekstremne dogodke ocenimo njihovo povratno dobo, ki je daljša od opazovanega časovnega niza (Hosking in Wallis, 1997; Robson in Read, 1999; Burn in Goel, 2000).

Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz ima štiri glavne korake: pregled podatkov, določanje homogenih hidroloških regij, izbiro najustreznejše verjetnostne porazdelitve in oceno parametrov ter kvantilov izbrane verjetnostne porazdelitve za hidrološko regijo (Hosking in Wallis, 1997; Kavčič, 2013). Pravilnost podatkov je zelo

pomembna pri vsaki statistični analizi, saj vse nadaljnje delo temelji na njih. Zato je na začetku potrebno preveriti, če so vrednosti smiselne (npr. visokovodna konica mora biti višja od povprečnega letnega pretoka) ter odstraniti neskladnosti in večje napake (npr. v polje za količino padavin je bila vnesena temperatura, ki je lahko tudi negativna). Najbolj zahteven in dolgotrajen je drugi korak – določanje homogenih hidroloških regij oziroma hidrološka regionalizacija. Vodomerne postaje razvrstimo po hidroloških regijah, ki so osnovne enote za izvedbo analize in za katere želimo doseči, da bi bile približno homogene, kar preverjamo z različnimi testi homogenosti oziroma heterogenosti. Metod za regionalizacijo je več, odvisne pa so od podatkov, ki jih imamo na razpolago in od števila postaj, ki jih razvrščamo po regijah. Izbira verjetnostne porazdelitve je zadnja stopnja pri specifikaciji statističnega modela. Gre za statistični problem, ki se običajno rešuje s pomočjo statističnih testov (ang. *goodness-of-fit test*), vendar z upoštevanjem dveh predpostavk: verjetnostne porazdelitve izmerjenih visokovodnih konic ne določamo za naključni vzorec vodomernih postaj, temveč za določeno skupino postaj, ki tvorijo hidrološko regijo in izbrana porazdelitev mora biti poleg tega, da se podatkom prilega, tudi robustna, da dopušča oceno kvantilov odstopanj, ki so možna pri naravnih pojavih. Na koncu pa se oceni še ustreznost izbrane verjetnostne porazdelitve, pri čemer je učinkovita metoda regionalnega algoritma L-momentov.

Za slovenski prostor so bile narejene že številne različne regionalizacije, kot so naravnogeografska regionalizacija (Kladnik, 1996), regionalizacija po hidrogeografskih in ekonomsko-geografskih kriterijih (Plut, 1999) ter določitev ekoregij (Brilly et al., 2001) in ekohidrografske regije (Brilly et al., 2003). Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic za slovenski prostor pa še ni bila narejena. Namen prispevka je predstaviti metodologijo hidrološke regionalizacije in njene rezultate za vodomerne postaje v Sloveniji. Rezultati raziskave predstavljajo pomemben prispevek k napovedovanju verjetnosti poplav.

## 2. Metodologija

### 2.1 Podatki

V analizi smo upoštevali podatke o letnih visokovodnih konicah pretokov vodomernih postaj (VP), ki so v Sloveniji delovale leta 2013 (ARSO, 2013). Upoštevani so bili podatki od leta 1950 dalje. Pri izbiri postaj smo upoštevali več kriterijev: da postaja ni postavljena na izviru, jezeru ali morju, da se meritev ne opravlja samo z vodomerno letvijo, da je obdobje meritev daljše od 15 let in da v nizih podatkov o najvišjih izmerjenih letnih pretokih ne manjka več kot 10 % vrednosti. V analizo je bilo tako izmed vseh 192 delujočih vodomernih postaj vključenih 112 vodomernih postaj (slika 1).

Povprečna dolžina obravnavanih nizov podatkov je bila 46 let. Najdaljši je vseboval podatke za obdobje 61 let. Takih vodomernih postaj je bilo 28. Najkrajši niz je zajemal 15 let, imeli pa sta ga dve vodomerni postaji.

### 2.2 Pregled in priprava podatkov

Prvi korak pri vsaki verjetnostni analizi je preverjanje in urejanje podatkov, saj vse nadaljnje delo temelji na njih. Ne glede na tip podatkov v statistiki običajno preverjamo manjkajoče podatke, izstopajoče podatke, normalnost in linearnost (Important issues in data screening, 2013). V analizi smo upoštevali letne visokovodne konice pretokov.

Podatki lahko manjkajo zaradi nedelujoče opreme, kot posledica ekstremnih vremenskih razmer, premajhnega merilnega območja v ekstremnih razmerah ali vandalizma, ali kadar za to zadolžena oseba ne odčitava izmerjenih vrednosti. Ravnanje v primeru manjkajočih podatkov je odvisno od tega, koliko jih manjka. Če manjka zelo majhen odstotek podatkov (manj kot 1 %), manjkajočih vrednosti ne upoštevamo in delo nadaljujemo brez njih. V primeru več manjkajočih podatkov analizo naredimo dvakrat (z upoštevanjem in z neupoštevanjem manjkajočih podatkov, rezultate pa primerjamo med seboj), lahko pa uporabimo pričakovane vrednosti podatkov, če jih poznamo.

Pri tem se lahko zanesemo na lastno znanje in subjektivno presodimo njihove vrednosti ali jim pripišemo srednjo vrednost celotnega vzorca oziroma uporabimo regresijo (Important issues in data screening, 2013).

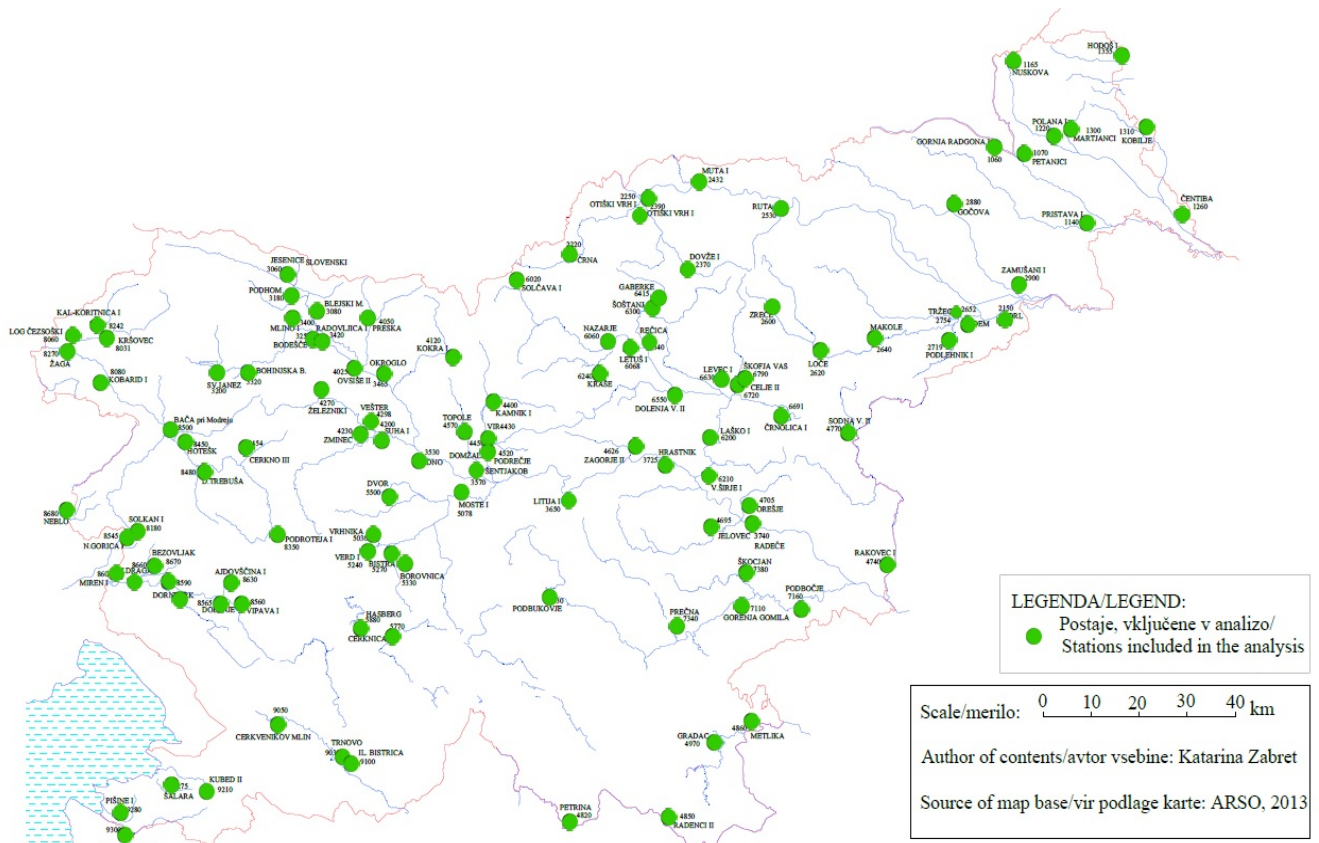
Izstopajoči podatki močno odstopajo od drugih vrednosti, tako da popačijo celotno statistiko. Te vrednosti lahko najdemo tako, da pregledamo vrednosti podatkov, jih prikažemo na grafu ali izračunamo razliko med njimi. Pregledamo lahko vrednosti vsake spremenljivke posebej ter vseh skupaj, saj so običajno medsebojno odvisne.

Normalnost podatkov preverimo preko vrednosti koeficientov asimetrije in sploščenosti, linearnost pa najlažje z grafično ponazoritvijo (Important issues in data screening, 2013).

Za primerjavo podatkov posameznih lokacij je na voljo več različnih metod, na primer QQ diagram

ali graf dvojne masne krivulje (ang. *double-mass plot*). Hosking in Wallis (1997) priporočata, da v primeru regionalne verjetnostne analize z momenti L uporabimo tako imenovan test neskladnosti (ang. *discordancy measure*).

Test neskladnosti temelji na primerjavi razmerij momentov L različnih lokacij. Vsaka postaja je predstavljena kot točka v prostoru, ki je določen s koordinatnimi osmi, na katerih so prikazana razmerja momentov L, središčno točko pa predstavljajo povprečne vrednosti razmerij. Postaja, ki je preveč oddaljena od središčne točke, je označena kot neskladna (slika 2) (Hosking in Wallis, 1997). Ta test so v analizah uporabili tudi Hussain in Pasha (2009) za provinco Punjab v Pakistanu, Burn in Goel (2000) za porečja v osrednji Indiji ter Chavoshi Borujeni in Azmin Sulaiman (2009) za severni del porečja reke Karun v Iranu.



Slika 1: Vodomerne postaje, vključene v analizo.

Figure 1: Water gauging stations included in the analysis.

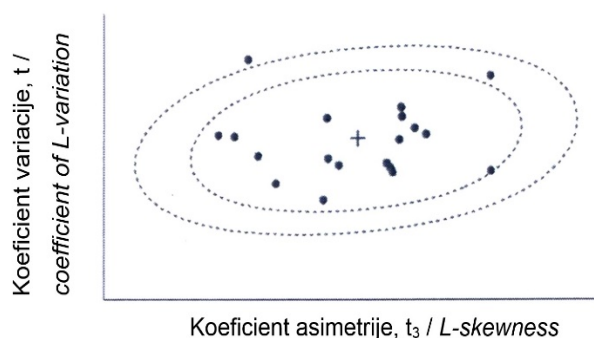
### 2.3 Hidrološka regionalizacija

Drugi korak hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic je združitev postaj v homogene hidrološke regije. Ta korak lahko izpustimo, ko obravnavamo le nekaj 10 postaj, kar je značilno za analizo manjših območij. Če pa postopek uporabimo na območju z gosto mrežo vodomernih postaj, jih je potrebno razvrstiti v skupine, za katere želimo, da so homogene. Ta postopek je običajno najbolj zahteven v celotni analizi in zahteva največ subjektivne presoje (Hosking in Wallis, 1997).

Pri regionalizaciji gre za združevanje vodomernih postaj v skupine (regije) glede na podobnost med njimi. To podobnost izračunamo na podlagi različnih lastnosti vodomernih postaj, ki jih v osnovi delimo na statistične in fizične lastnosti (Hosking in Wallis, 1997). Pri delitvi v regije se najpogosteje uporablja fizične lastnosti, pri preverjanju in zagotavljanju homogenosti regij pa statistične lastnosti. Končne homogene regije naj bi imele med 10 in 20 elementov (Hosking in Wallis, 1997), vsekakor pa je priporočljivo, da število ni manjše od pet.

Najbolj preprost način regionalizacije, ki se v zadnjem času sicer ne uporablja več, temelji na geografski ustreznosti. Beable in McKerchar (1982; cit. po Hosking in Wallis, 1997) sta na tak način oblikovala zemljepisno povezane regije na Novi Zelandiji, vendar je njuno delitev kasneje popravil Mosley (1982; cit. po Roald, 1989), ki je pokazal, da regije niso ustrezno razporejene glede na podobnost med lastnostmi pripadajočih porečij. Roald (1989) je severozahodno Evropo razdelil na regije kar po državah, vendar je bila le ena izmed trinajstih tako oblikovanih regij homogeni. Za regionalizacijo lahko uporabimo tudi subjektivno metodo, ki je primerna za analize manjšega prostorskega obsega. Z združitvijo lokacij s podobnimi srednjimi letnimi padavinami je Schaefer (1990) določil regije v zvezni državi Washington v ZDA, za analizo letnih visokovodnih konic v Tanzaniji pa so Kachroo in sodelavci (2000) homogene hidrološke regije oblikovali z upoštevanjem računalniško obdelanih podatkov o mejah porečij, izohipsah in izohietah. Določanje hidroloških regij lahko poteka tudi z

uporabo objektivne metode, pri kateri postaje v odvisnosti od izbrane značilnosti razdelimo v dve skupini glede na to, ali dosegajo izbrano vrednost ali ne. Po tem principu je Wiltshire (1985) porečja razdelil glede na povprečne letne padavine v skupino suhih in mokrih. Podobno pa je tudi Pearson (1991) razdelil v regije 117 majhnih porečij na Novi Zelandiji, pri čemer je upošteval 24-urne padavine s petletno povratno dobo in padec terena. Postopek objektivne delitve se uporablja le redko, saj so rezultati podobne metode razvrščanja (ang. *cluster analysis*) boljši. Metoda razvrščanja je v primeru velikega števila podatkov najbolj praktična za oblikovanje regij in da najboljše rezultate (Hosking in Wallis, 1997).



**Slika 2:** Grafični prikaz testa neskladnosti (povzeto po Hosking in Wallis, 1997).

**Figure 2:** Graphical representation of discordancy measure (adapted from Hosking and Wallis, 1997).

Za hidrološko regionalizacijo vodomernih postaj v Sloveniji smo uporabili dve metodi razvrščanja (metodo voditeljev in hierarhično metodo) ter subjektivno metodo.

Za določitev hidroloških regij sta najpogosteje uporabljeni dve metodi razvrščanja, Wardova metoda razvrščanja in metoda voditeljev (ang. *K-means*) (Hosking in Wallis, 1997). Wardova metoda spada med hierarhične metode razvrščanja, prednost katerih je, da na začetku še ni potrebno opredeliti končnega števila skupin, celoten postopek pa lahko zelo nazorno predstavimo z dendrogramom (slika 3).

Metoda voditeljev je nehierarhična metoda razvrščanja, za katero je še pred začetkom delitve potrebno podati število končnih skupin. Metoda se največkrat izvaja iteracijsko, saj iz začetne



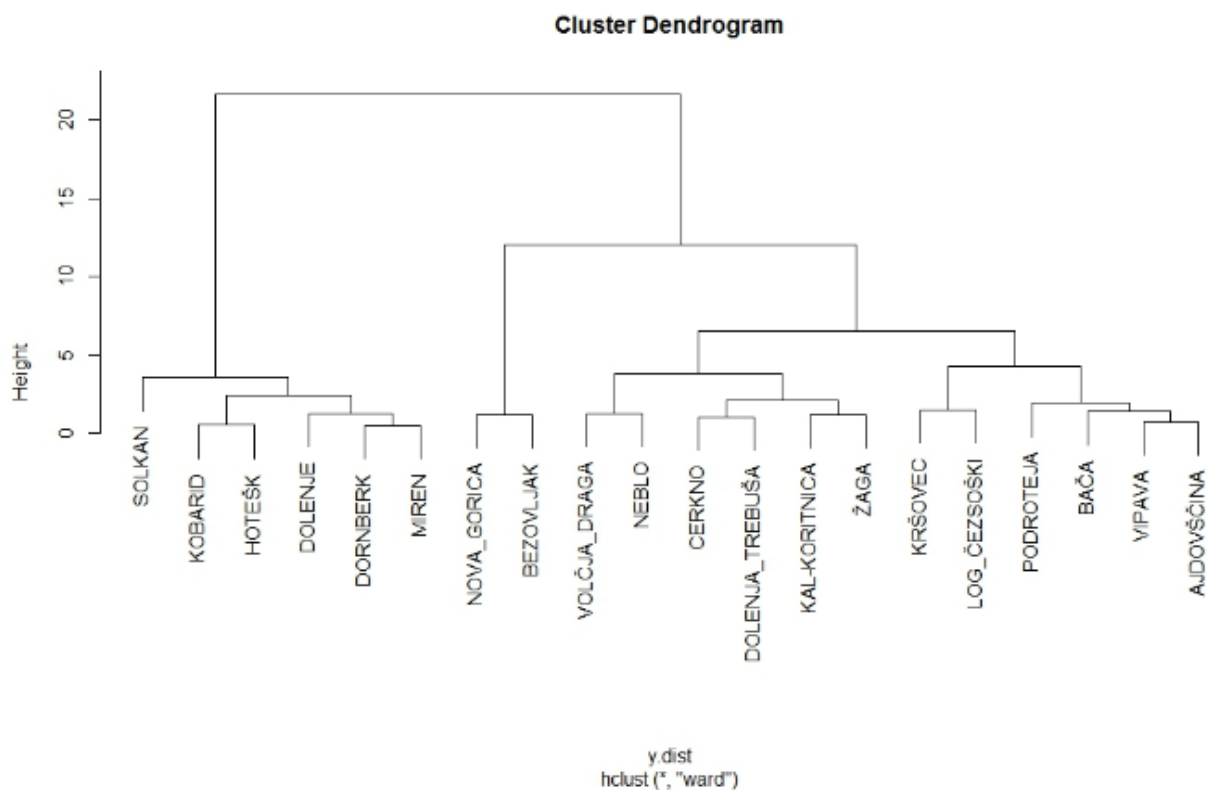
porazdelitve glede na predpisano število skupin predstavljamo enote med skupinami, da dosežemo optimalno razporeditev (Ferligoj, 1989; Košmelj in Breskvar-Žaucer, 2006). Rezultati so predstavljeni opisno, zato so slabše pregledni kot v primeru Wardove metode.

Subjektivna metoda oblikovanja hidroloških regij je primerna za študije manjšega obsega. Poteka tako, da na podlagi lastne presoje določimo kriterije, po katerih postaje razdelimo v skupine. Čeprav so ta merila za delitev izbrana subjektivno, pa oblikovanim regijam še vedno lahko objektivno preverimo homogenost z uporabo ustreznih testov. Upoštevati pa je potrebno kriterij, da izbrana merila za regionalizacijo izhajajo iz fizičnih lastnosti postaj in ne iz statističnih, torej da nimajo nobene povezave z izmerjenimi podatki, ki jih obravnavamo. S tem namreč vplivamo na veljavnost testov, ki jih v nadaljevanju uporabimo za preverjanje homogenosti (Hosking in Wallis, 1997).

Hidrološke regije, ki jih dobimo po razvrščanju z eno izmed izbranih metod, so le redko homogene.

Tako je naslednja stopnja regionalizacije preverjanje že dosežene homogenosti ali njeno zagotavljanje z upoštevanjem različnih prilagoditev. Največkrat vodomerne postaje premikamo med hidrološkimi regijami ter s tem vplivamo na njihovo homogenost, lahko pa regije med sabo tudi združimo, jih razpustimo ali pa nadaljujemo njihovo delitev (Robson in Read, 1999).

Za povsem homogeno hidrološko regijo velja, da so razmerja momentov L (Robson in Read, 1999; Bezak et al., 2014a; Šraj et al., 2012) za vsako vodomerno postajo enaka, kar pa v praksi ni mogoče doseči. Glede na to so regije, ki jih označimo za homogene, pravzaprav le sprejemljivo homogene, z ustreznimi testi pa preverimo, če so razlike med vrednostmi razmerij momentov L znotraj regije še sprejemljive (Hussain in Pasha, 2009; Kavčič, 2013). Na računu dopustnih odstopanj razlik je osnovana tudi mera heterogenosti H.



*Slika 3: Primer dendrograma za vodomerne postaje v porečju Soče.*

*Figure 3: Example of dendrogram for water gauging stations in Soča River basin.*

Za določitev mere heterogenosti  $H$  za hidrološko regijo z  $N$  postajami, za vsako postajo  $i$  z dolžino niza podatkov  $n_i$  izračunamo razmerja momentov  $L(t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)})$  iz njih pa glede na dolžino nizov utežena povprečja za regijo  $(t^R, t_3^R, t_4^R)$  (Hosking in Wallis, 1997). Utežena standardna deviacija vzorca je:

$$V = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (t^{(i)} - t^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

Na podlagi razmerij momentov  $L(l_1, t^R, t_3^R, t_4^R)$  izračunamo parametre Kappa porazdelitve, ki jo privzamemo za verjetnostno porazdelitev v primeru simulacije velikega števila postaj v regiji  $N_{sim}$ . Za vsako simulirano regijo izračunamo  $V$ , na koncu pa na podlagi  $N_{sim}$  še njeno srednjo vrednost  $\mu_V$  in standardno deviacijo  $\sigma_V$  (Hosking in Wallis 1997). Mera heterogenosti je:

$$H = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} \quad (2)$$

Regija je sprejemljivo homogena za vrednosti  $H < 1$ , mogoče heterogena za  $1 \leq H < 2$  in zagotovo heterogena za  $H \geq 2$  (Hosking in Wallis, 1997).

## 2.4 Izbira verjetnostne porazdelitve za regije

Ko so homogene hidrološke regije oblikovane, jih namesto posameznih postaj upoštevamo v vseh nadaljnjih korakih. Cilj je najti tako porazdelitev, ki bo z dovolj veliko točnostjo omogočala oceno kvantilov za vsako postajo. Priporočeno je, da je porazdelitev čim bolj robustna, imela pa naj bi več parametrov (Hosking in Wallis, 1997).

Verjetnostnih porazdelitev, ki bi jih pri testiranju lahko upoštevali, je veliko, zato najprej naredimo izbor najbolj primernih glede na to, kakšne lastnosti naj porazdelitev ima. Pri tem upoštevamo zgornjo mejo porazdelitve, prilagajanje zgornjega in spodnjega dela krivulje porazdelitve izhodiščnim podatkom, obliko osrednjega dela krivulje s številom potrebnih vrhov za čim boljše prilagoditev podatkom, ter spodnjo mejo porazdelitve, ki pa je pogosto znana in znaša nič (Hosking in Wallis, 1997; Kavčič, 2013).

Ali je izbrana porazdelitev ustrezna, lahko preverimo z različnimi testi (ang. *goodness-of-fit*

*measures*). Taki testi so na primer regionalna mera ustreznosti porazdelitve  $Z$  (Hosking in Wallis, 1997), QQ diagram (Scott, 2015), diagram razmerij momentov  $L$  (Millington et al., 2011), Kolmogorov-Smirnov test (Brilly in Šraj, 2005), testiranje s korelacijskim koeficientom PPCC (ang. *probability plot correlation coefficient*) (Karim in Chowdhury, 1995) in test RMSE (ang. *root mean square error*) (Brilly in Šraj, 2005). 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.

## 2.5 Ocena parametrov izbrane verjetnostne porazdelitve regije

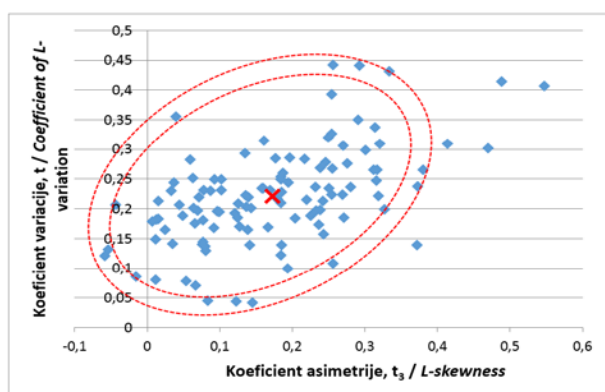
Z zadnjim korakom hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz ocenimo parametre in kvantile izbrane verjetnostne porazdelitve, kar je tudi cilj celotnega postopka. Z združevanjem postaj v regije in iskanjem ene porazdelitve za celo regijo zagotovimo, da bodo vrednosti, ocenjene za to večjo skupino podatkov, bolj točne.

Metod za oceno lastnosti porazdelitve je veliko, vendar pa je v tem primeru, ko parametre in kvantile ocenjujemo glede na porazdelitev celotne regije, torej za večje število vodomernih postaj, še posebej primerna metoda regionalni algoritem momentov  $L$  (Hosking in Wallis, 1997). Ta metoda parametre ocenjuje z izenačevanjem vzorca momentov  $L$  porazdelitve z vzorcem momentov  $L$ , izračunanih iz podatkov. Glede na predpostavko, da je regija homogena, lahko razmerja momentov  $L$ , izračunana iz podatkov različnih lokacij, kombiniramo in dobimo njihova povprečja za regijo.

## 3. Rezultati in razprava

Pri hidrološki regionalizaciji visokih voda v Sloveniji smo upoštevali podatke o letnih konicah pretokov, izmerjene na 112 vodomernih postajah v Sloveniji (slika 1). Te podatke smo najprej preverili. Če je bilo manjkajočih vrednosti v nizu več kot 10 %, postaje v nadaljevanju nismo več upoštevali. Izstopajočih vrednosti nismo zasledili. Mero neskladnosti smo izračunali za različne

skupine podatkov: glede na porečja, glede na površino hidrometričnega zaledja ter za vse postaje skupaj. Mera neskladnosti je bila presežena v 5 primerih (slika 4). Največja je bila za postajo Orešje v skupini vseh postaj. Glede na rezultate je bila ta vodomerna postaja tudi najbolj neskladna, saj je njena mera neskladnosti v prav vsaki skupini preseгла zgornjo mejo. Kljub temu je iz nadaljnje analize nismo izključili, smo bili pa nanjo v nadaljevanju še posebej pozorni.



**Slika 4:** Mera neskladnosti za vse postaje, vključene v analizo.

**Figure 4:** Discordancy measure for all water gauging stations included in the analysis.

Oblikovanje hidroloških regij za tako veliko število podatkov, kot v primeru analize za Slovenijo, poteka v več korakih. Najprej smo z izbranim postopkom (hierarhična metoda, metoda voditeljev in subjektivna metoda) določili začetne regije, ki smo jih z različnimi prilagoditvami oblikovali tako, da bi dosegle čim boljšo homogenost. Regije smo nato dokončno oblikovali med računanjem mere heterogenosti.

Na podlagi momentov L smo iz podatkov o letnih visokovodnih konicah izračunali statistične lastnosti postaj (slika 5), potrebne pri računu mere heterogenosti H. Povprečne srednje vrednosti vzorca  $l_1$  je znašalo 202, povprečne koeficienta variacije  $t$  0,22, koeficienta asimetrije  $t_3$  0,17 in koeficienta sploščenosti  $t_4$  0,17.

### 3.1 Hidrološka regionalizacija

Pri regionalizaciji z metodo razvrščanja upoštevamo fizične lastnosti vodomernih postaj.

Zaradi številnih lastnosti, ki bi jih lahko upoštevali, lahko hitro pride do prevelikega števila izbranih spremenljivk, uporabili pa naj bi le tiste, ki najbolj opišejo obravnavani problem (Ferligoj, 1989). Glede na to, da je Slovenija kljub dokaj majhni površini izredno raznolika, smo se odločili, da bomo upoštevali tiste lastnosti, ki najbolj vplivajo na pretok. Med fizičnimi lastnostmi vodomernih postaj smo za regionalizacijo z metodo razvrščanja izbrali: površino zaledja vodomerne postaje, koto »0« (nadmorska višina nulte kote vodomerne letve), zemljepisno širino in dolžino vodomerne postaje ter povprečno letno količino padavin na območju zaledja vodomerne postaje (Bat et al., 2008). Vrednosti atributov smo standardizirali, površino zaledja pa smo pred tem zaradi velikega razpona vrednosti še logaritmirali. Ker ima površina zaledja velik vpliv na pretok, smo za zagotovitev njenega večjega vpliva na regionalizacijo vrednosti pomnožili s tri. Podoben način sta uporabila tudi Hosking in Wallis (1997).

Delitev vodomernih postaj v hidrološke regije, ki še niso nujno homogene, smo izvedli na tri različne načine, z dvema metodama razvrščanja (Wardovo metodo in metodo voditeljev) ter s subjektivno metodo.

Pri regionalizaciji z metodama razvrščanja (Wardova metoda in metoda voditeljev) smo vsako metodo uporabili trikrat, z različnim številom spremenljivk. Najprej smo upoštevali vse spremenljivke (zemljepisna dolžina in širina, koto »0«, letne padavine, površina zaledja), potem pa smo izločili padavine in nato še površino zaledja. Tako smo oblikovali hidrološke regije na podlagi podatkov s petimi, štirimi in na koncu še s tremi spremenljivkami (preglednici 1 in 2).

Združevanje postaj med seboj je v vsakem primeru drugačno. Razlike v sestavi hidroloških regij so večje pri Wardovi metodi, pri kateri se, pri različnem številu upoštevanih spremenljivk, večina vodomernih postaj v posameznih regijah povsem premeša. Vodomerne postaje, ki so na primer pri razvrščanju s tremi spremenljivkami združene v eno regijo, pri razvrščanju s štirimi spremenljivkami padejo vsaka v drugo, le redke pa še zmeraj ostanejo skupaj v isti regiji. Pri metodi voditeljev z upoštevanjem različnega števila

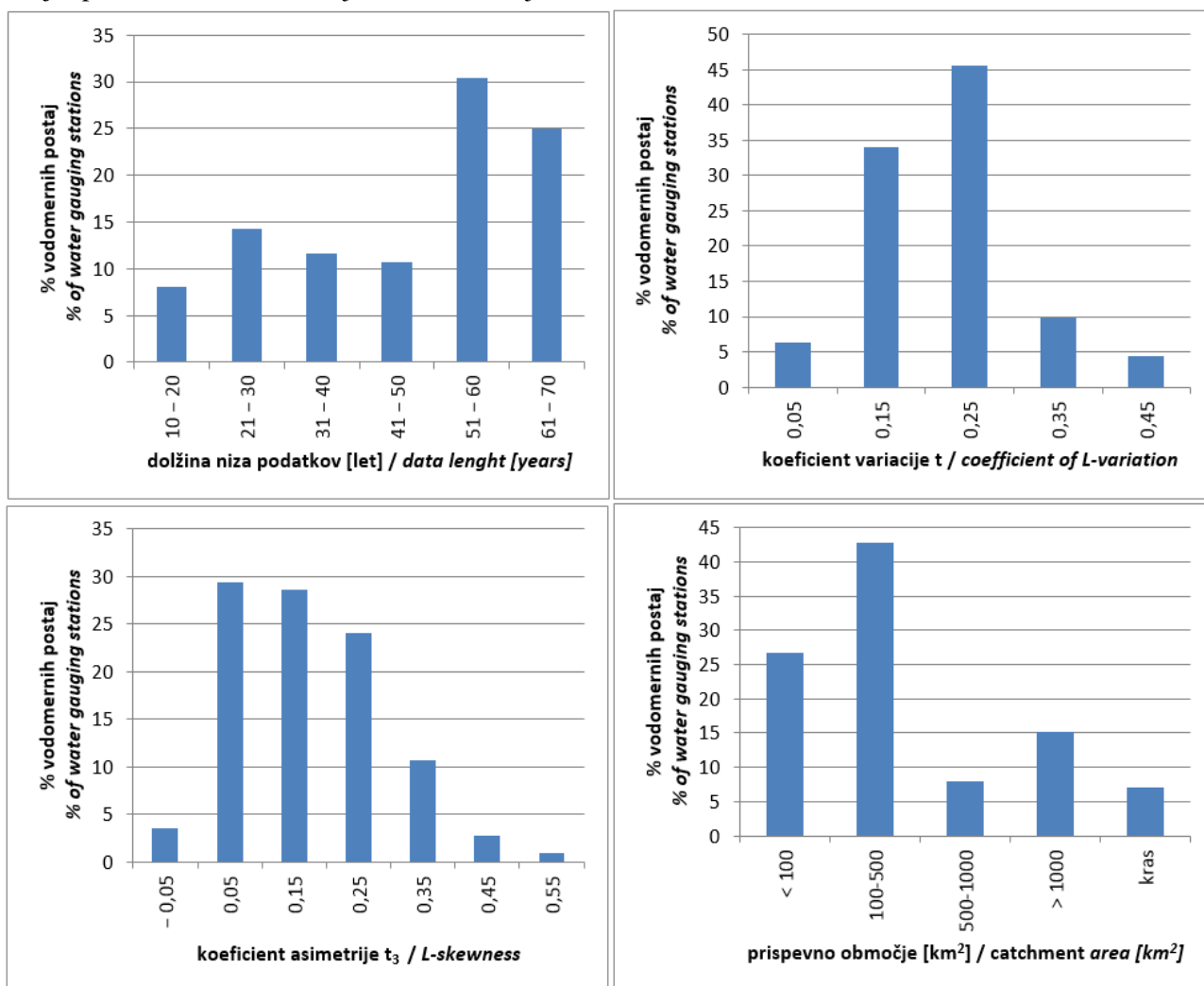


spremenljivk spremembe v sestavi hidroloških regij niso tako velike. Razvrstitev vodomernih postaj po hidroloških regijah z uporabo obeh metod je pri upoštevanju istega števila spremenljivk zelo podobna, predvsem pri upoštevanju štirih spremenljivk, ko v obeh primerih dobimo 6 regij.

Glede na rezultate metod razvrščanja smo se odločili, da bomo končne homogene hidrološke regije oblikovali z metodo voditeljev z upoštevanjem štirih spremenljivk. Metoda voditeljev je namreč iterativna in da ob vsaki ponovitvi nekoliko drugačne rezultate, zato smo sklepali, da bo odziv regij na spremembe boljši. Štiri spremenljivke (zemljepisna širina in dolžina, kota 0 in površina zaledja) pa smo izbrali zato, ker imajo padavine na razvrščanje relativno majhen

vpliv, hkrati pa so odvisne tudi od ostalih spremenljivk (predvsem od nadmorske višine s katero naraščajo in zemljepisne dolžine, saj se v splošnem povečujejo od vzhoda proti zahodu). Tako smo na koncu oblikovali 9 homogenih hidroloških regij (slika 6).

Za regionalizacijo pa smo poleg metod razvrščanja uporabili tudi subjektivno metodo. Za izhodišče smo privzeli, da želimo čim bolj sklenjene hidrološke regije. Pri delitvi smo sproti preverjali doseženo homogenost. Tako smo oblikovali deset hidroloških regij (slika 7), v katerih je bilo v vsaki med 6 in 20 vodomernih postaj. Homogenost smo uspeli doseči za osem regij, regija 1 je bila mogoče heterogena, regija 10 pa zagotovo heterogena.



Slika 5: Statistične in fizične lastnosti obravnavanih vodomernih postaj.

Figure 5: Statistical and physical properties of selected water gauging stations.

**Preglednica 1:** Rezultati Wardove metode razvrščanja.

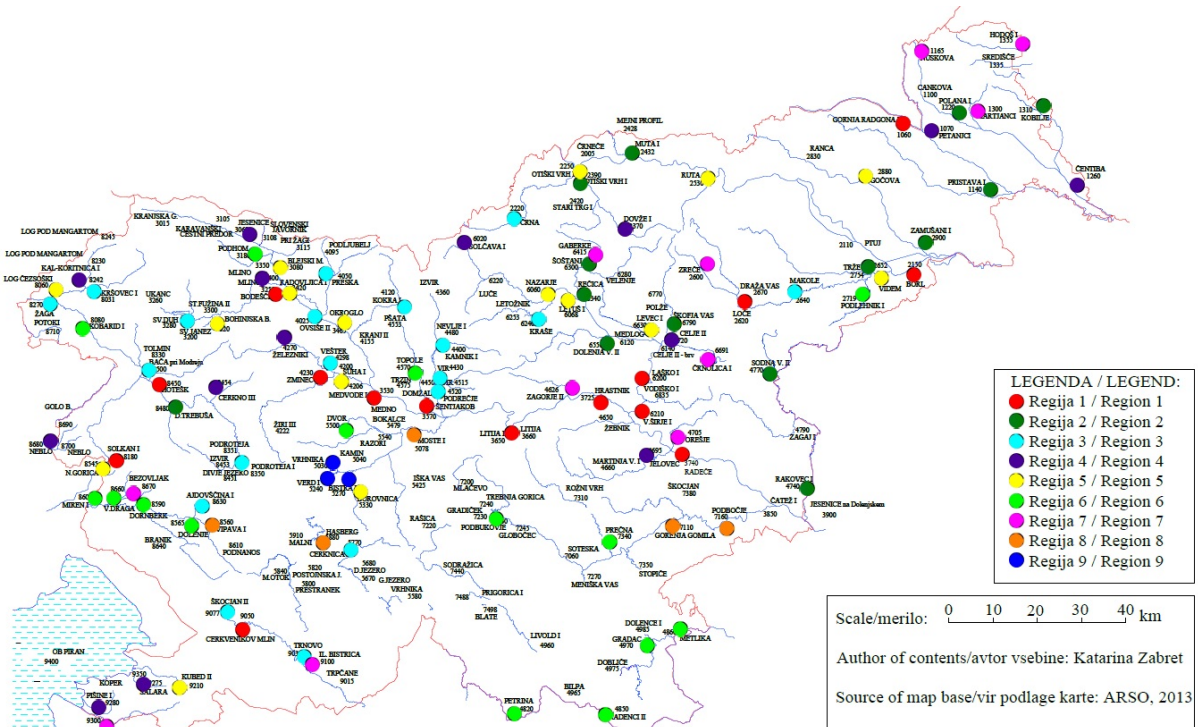
**Table 1:** Results of hierarchical clustering.

Regija <i>Region</i>	3 spremenljivke <i>3 variables</i>		4 spremenljivke <i>4 variables</i>		5 spremenljivk <i>5 variables</i>	
	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H
1	15	9,36	16	13,10	14	12,30
2	9	9,59	19	4,38	15	2,10
3	11	2,44	10	8,03	12	9,19
4	16	10,39	13	6,23	18	10,02
5	18	10,91	23	6,87	18	5,93
6	18	4,78	26	3,54	14	3,55
7	25	19,96			7	1,05
Povprečje <i>Average</i>	16	9,63	17,83	7,03	14	6,31

**Preglednica 2:** Rezultati razvrščanja z metodo voditeljev.

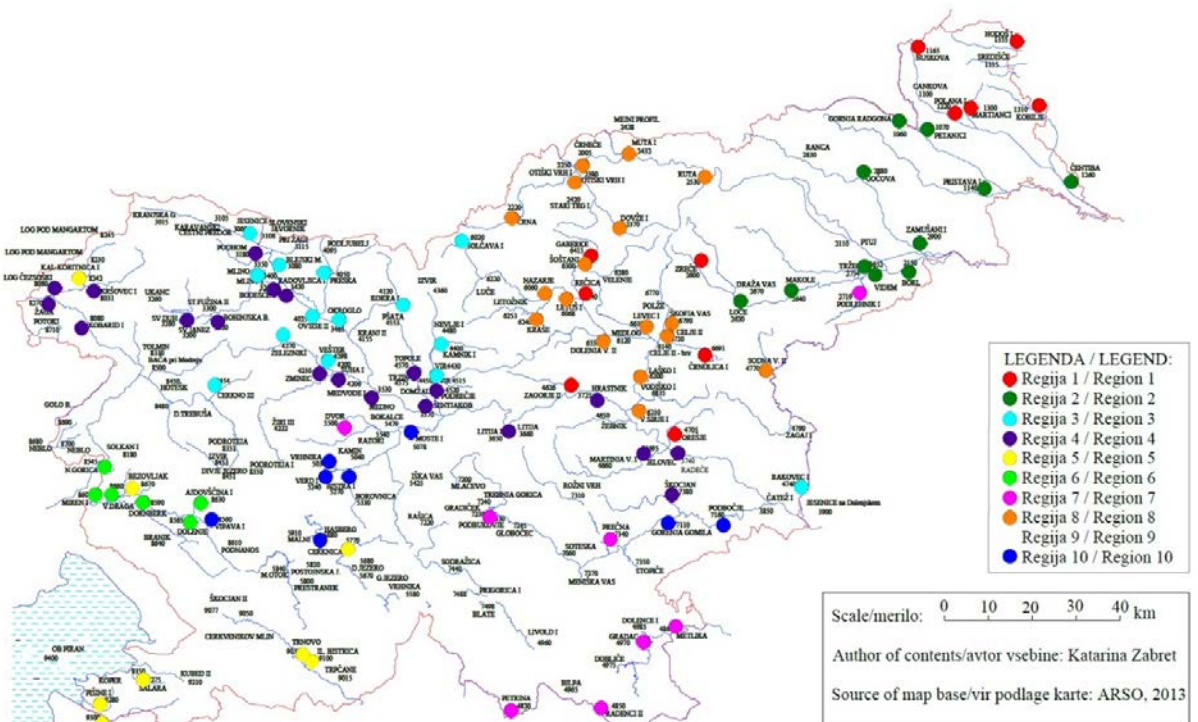
**Table 2:** Results of K-means.

Regija <i>Region</i>	3 spremenljivke <i>3 variables</i>		4 spremenljivke <i>4 variables</i>		5 spremenljivk <i>5 variables</i>	
	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H
1	18	1,11	25	11,41	15	11,78
2	16	12,12	15	15,33	14	8,56
3	15	9,47	17	8,55	19	2,12
4	14	11,40	6	0,87	22	6,23
5	28	18,85	30	4,30	19	4,49
6	21	7,40	11	2,64	9	3,41
Povprečje <i>Average</i>	18,67	10,06	17,33	7,18	16,33	6,10



*Slika 6: Homogene hidrološke regije, oblikovane na podlagi rezultatov metode voditeljev in upoštevanja štirih spremenljivk.*

*Figure 6: Homogeneous hydrological regions formed according to the results of the K-means and taking into account four variables.*



*Slika 7: Hidrološke regije, oblikovane z uporabo subjektivne metode.*

*Figure 7: Hydrological regions formed with subjective partitioning.*

**Preglednica 3:** Lastnosti homogenih hidroloških regij glede na izbrani metodi razvrščanja.

**Table 3:** Properties of homogeneous hydrological regions according to selected partitioning method.

Regija <i>Region</i>	Metoda voditeljev <i>K-means</i>		Subjektivna metoda <i>Subjective partitioning</i>	
	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H	št. VP v regiji <i>nr. of stations</i>	H
1	15	0,45	11	<b>1,65</b>
2	14	0,66	11	0,80
3	19	0,80	14	0,07
4	14	0,10	20	0,17
5	16	0,05	8	0,10
6	15	0,13	6	0,13
7	11	0,51	8	0,79
8	<b>5</b>	0,79	17	0,91
9	<b>3</b>	-1,21	9	0,10
10			8	<b>6,25</b>
Povprečje / <i>Average</i>	12,4	0,25	11,2	1,10

Z metodo voditeljev smo določili devet homogenih hidroloških regij, ki združujejo od 3 do 19 vodomernih postaj. V dveh regijah (regiji 8 in 9) je bilo število postaj manjše od priporočene vrednosti, saj je znašalo le 3 oz. 5 (preglednica 3). Glede na ta kriterij so bolj ustrezni rezultati subjektivne metode. Če pa za kriterij vzamemo mero heterogenosti H, vidimo, da so pri metodi voditeljev vse vrednosti H manjše od ena, kar pomeni, da je bila za vse regije dosežena homogenost (preglednica 3). Najvišja vrednost H znaša 0,79, povprečje pa 0,25. Z uporabo subjektivne metode pa je v dveh primerih (regiji 1 in 10) vrednost H večja od 1, predvsem za regijo 10 je ta meja močno presežena (preglednica 3). Razlog za tako veliko nehomogenost te hidrološke regije so tri "kritične" vodomerne postaje (Vrhnika, Verd in Bistra), ki imajo zaradi kraškega zaledja specifične lastnosti. Glede na vrednosti mere heterogenosti H so boljši rezultati dobljeni z

metodo voditeljev, ki problem treh kritičnih postaj rešuje z oblikovanjem samostojne regije 9.

### 3.2 Izbira najustreznejše verjetnostne porazdelitve

Za vsako homogeno hidrološko regijo, definirano z metodo voditeljev, smo v naslednjem koraku izbrali najustreznejšo verjetnostno porazdelitev. Pri tem smo upoštevali nove lastnosti hidrološke regije, ki jih definirajo lastnosti posameznih vodomernih postaj, združenih v tej regiji. Glede na upoštevanje regionalnih vrednosti momentov L in njihovih razmerij smo najbolj ustrezne porazdelitve določili s kombinacijo dveh metod, ki sta se izkazali za najbolj uporabni (Chavoshi Borujeni in Azmin Sulaiman, 2009; Haile, 2011; Millington et al., 2011): regionalna mera ustreznosti Z ter graf razmerij L-momentov.

Za vsako regijo smo izračunali vrednost regionalne mere ustreznosti  $Z$  za naslednje porazdelitve: generalizirano logistično porazdelitev (GLO), generalizirano porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV), logaritemsko normalno porazdelitev (LN3), Pearsonovo III porazdelitev (PE3) in generalizirano Pareto porazdelitev (Pareto). Porazdelitev je bila izbrana kot ustrezna, če je absolutna vrednost  $Z$  znašala manj kot 1,64 (preglednica 4) (Hosking in Wallis, 1997).

Najbolj primerno porazdelitev glede na diagram razmerij L-momentov smo določili tako, da smo na diagram z že vrisanimi teoretičnimi krivuljami tri-parametrskih porazdelitev dodali točke s koordinatami, ki so enake povprečnim regionalnim razmerjem momentov L posameznih regij (slika 8). Za najbolj ustrezno porazdelitev je bila izbrana tista, katere krivulja je bila najbližja točki regije (preglednica 4).

### 3.3 Ocena parametrov in kvantilov izbrane verjetnostne porazdelitve

Zadnji korak hidrološke regionalizacije visokovodnih konic je ocena parametrov in kvantilov. Ocenjujejo se za cele regije in so pravzaprav standardizirani kvantili visokovodnih konic na vodomernih postajah (Parida et al., 1998).

Ocena kvantilov temelji na poznavanju parametrov verjetnostne porazdelitve. Zato smo najprej za vsako izmed izbranih porazdelitev izračunali njene parametre, pri čemer smo izhajali iz vrednosti momentov L in razmerij momentov L za regije. Ocenjene parametre izbranih porazdelitev smo nato uporabili še za oceno kvantilov (preglednica 5).

Vrednosti kvantilov se, glede na rezultate analiz drugih avtorjev, gibljejo znotraj pričakovanih vrednosti. Presenetljivo je le to, da ne izstopajo vrednosti osme ali devete regije, ki imata zelo malo elementov, temveč sedme. V primeru povratnih dob enega in dveh let so vrednosti ocenjenih kvantilov sedme regije najnižje, za druge povratne dobe pa najvišje.

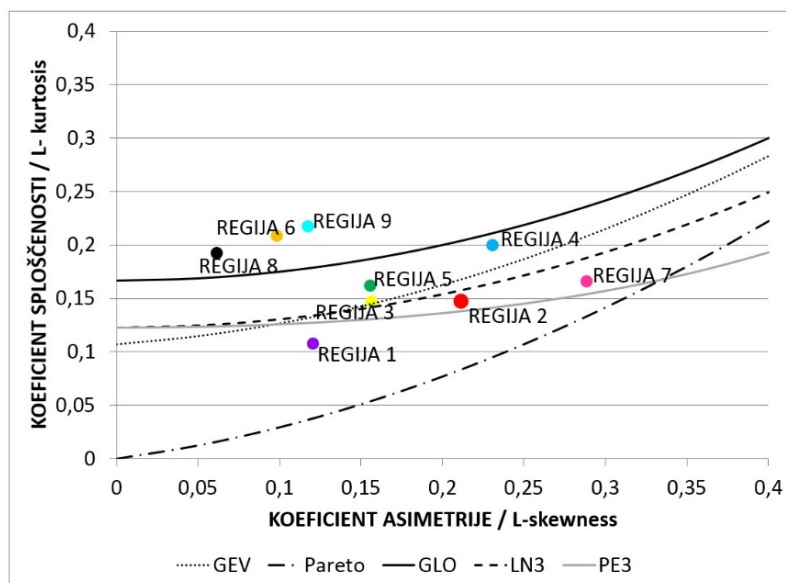
### 3.4 Primerjava rezultatov različnih regionalizacij za Slovenijo

Subjektivna delitev hidroloških regij (slika 7) je kot rezultat dala dokaj sklenjene regije, ki jih lahko primerjamo z drugimi regionalizacijami, narejenimi za Slovenijo.

V primerjavi z ekohidrografskimi regijami tipa B v Sloveniji (Brilly et al., 2003) lahko 6 od 10 hidroloških regij umestimo v eno ekohidrografsko regijo. Tako hidrološka regija 2 sovпада z ravninskim in gričevnatim eko-hidrografskim območjem, hidrološki regiji 3 in 8 s prialpskim eko-hidrografskim območjem, hidrološka regija 7 s kraškimi eko-hidrografskim območjem donavskega porečja in hidrološki regiji 5 in 6 s primorskim eko-hidrografskim območjem. Hidrološka regija 1, ki je sestavljena iz dveh območij, se prav tako uvršča tudi v dve ekohidrografski regiji: prialpsko ter ravninsko in gričevnato. Preostale hidrološke regije (4, 9 in 10) pa so razporejene čez več ekohidrografskih regij, saj potekajo v smeri zahod – vzhod, medtem ko predvsem na zahodnem delu države prevladuje oblika ekohidrografskih regij v smeri sever – jug. Ne glede na to lahko zaključimo, da hidrološke regije dobro sovpadajo z ekohidrografskimi regijami v Sloveniji. To je tudi smiselno, saj so bile ekohidrografske regije oblikovane na podlagi naravnih pogojev z upoštevanjem nadmorske višine na goratih območjih in geološke formacije na območjih z izrazitimi kraškimi pojavi (Brilly et al., 2003).

Primerjava s podnebnimi tipi v Sloveniji (Ogrin, 1996) pa ne da tako dobrih in očitnih rezultatov. Submediteransko podnebje se namreč razteza v ozkem pasu vzdolž zahodne meje Slovenije z Italijo, v katerem se nahaja le deset vodomernih postaj, ki so večinoma uvrščene v 5. in 6. hidrološko regijo. Podobno se ozek pas gorskega podnebja razteza ob severo-zahodni meji Slovenije, kjer je petnajst vodomernih postaj iz hidroloških regij 3, 4 in 8. Preostalih 80 % vodomernih postaj, vključenih v analizo, pa se nahaja na območju zmerno-kontinentalnega podnebja.





*Slika 8: Uporaba diagrama razmerij momentov L za izbiro ustrezne porazdelitve.*

*Figure 8: Use of L-moment ratio diagram for choosing the most suitable probability distribution.*

*Preglednica 4: Najustreznejše porazdelitve za regije glede na splošne podatke regij.*

*Table 4: The most suitable probability distribution for the hydrologic regions.*

	Regionalna mera ustreznosti Z <i>Goodness of fit measure Z</i>	Diagram razmerij momentov L <i>L-moment ratio diagram</i>	Izbrana porazdelitev <i>Chosen probability distribution</i>
Regija 1 / <i>Region 1</i>	PE3	PE3	<b>PE3</b>
Regija 2 / <i>Region 2</i>	PE3	PE3	<b>PE3</b>
	GEV LN3		
Regija 3 / <i>Region 3</i>	PE3	GEV LN3	<b>LN3</b>
	GEV		
	LN3		
Regija 4 / <i>Region 4</i>	GLO	GLO	<b>GLO</b>
	GEV		
Regija 5 / <i>Region 5</i>	GEV	GEV	<b>GEV</b>
	LN3		
Regija 6 / <i>Region 6</i>	/	GLO	<b>GLO</b>
	GEV		
Regija 7 / <i>Region 7</i>	LN3	PE3	<b>PE3</b>
	PE3		
	Pareto		
Regija 8 / <i>Region 8</i>	/	GLO	<b>GLO</b>
Regija 9 / <i>Region 9</i>	/	GLO	<b>GLO</b>

**Preglednica 5:** Ocenjeni kvantili glede na splošne podatke regij.

**Table 5:** Estimated quantiles for general region data.

<b>Verjetnost Probability</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,999</b>
Regija 1 / <i>Region 1</i>	0,5877	0,9573	1,4674	1,8492	1,9980	2,4552
Regija 2 / <i>Region 2</i>	0,4617	0,8953	1,6751	2,3406	2,6131	3,4854
Regija 3 / <i>Region 3</i>	0,5452	0,9371	1,5363	2,0099	2,1986	2,7889
Regija 4 / <i>Region 4</i>	0,4817	0,8887	1,6640	2,3421	2,6222	3,5246
Regija 5 / <i>Region 5</i>	0,5672	0,9409	1,5095	1,9579	2,1363	2,6942
Regija 6 / <i>Region 6</i>	0,7019	0,9752	1,3300	1,5863	1,6848	1,9834
Regija 7 / <i>Region 7</i>	0,2849	0,7965	1,9841	3,1056	3,5805	5,1389
Regija 8 / <i>Region 8</i>	0,8177	0,9907	1,1943	1,3326	1,3843	1,5374
Regija 9 / <i>Region 9</i>	0,9078	0,9907	1,1042	1,1888	1,2217	1,3226

Pri delitvi Slovenije na hidrološke regije imajo večji vpliv od podnebja fizične lastnosti vodotokov in njihovih porečij. Te lastnosti so bile namreč upoštevane tudi pri delitvi v ekohidrografske regije, ki se dokaj dobro ujemajo s hidrološkimi regijami, dobljenimi na podlagi subjektivne metode.

#### 4. Sklep

Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic se izvaja v štirih korakih (Hosking in Wallis, 1997; Kavčič, 2013). Za vsakega izmed njih je na voljo več različnih metod, katero izberemo pa je odvisno predvsem od tega, kakšen je cilj analize. Naš namen je bil v sklopu hidrološke regionalizacije primerjati najpogostejše metode regionalizacije, ki so bile za take analize že uporabljene v svetu in izbrati najprimernejšo za slovenski prostor.

Pri regionalizaciji smo z uporabo subjektivne metode dobili dokaj sklenjene regije z boljšim razmerjem postaj in slabšo mero heterogenosti kot pri razvrščanju z metodo voditeljev, ko so bile regije s sicer boljšo mero heterogenosti veliko bolj

razpršene. Pri hidrološki regionalizaciji sicer ni nujno, da so regije sklenjene in da tvorijo neko zaključeno območje, kot je to značilno za geografske regije. Hosking in Wallis (1997) celo predlagata, naj hidrološke regije oblikujemo tako, da ne bodo sklenjene, saj se na ta način izognemo možnosti, da bodo podatki s posameznih postaj med seboj odvisni.

Spremenljivke, ki smo jih pri razvrščanju uporabili, dobro opišejo najbolj osnovne lastnosti vodomernih postaj. Pri izbiri spremenljivk za razvrščanje je potrebno paziti, da te med seboj niso odvisne (kot na primer padavine in zemljepisna dolžina v Sloveniji) in da dobro opišejo obravnavani primer. Za nadaljnje analize predlagamo še upoštevanje kamninske sestave tal, naklona rečne struge ali zaledja postaje in delež poraščenosti zaledja z gozdom.

Čeprav smo želeli izbrati in predlagati najprimernejšo metodo regionalizacije, smo ugotovili, da je za to potrebno postaviti določene smernice in cilje, ki jim pri razvrščanju sledimo. Če je cilj oblikovati čim bolj sklenjene hidrološke regije, predlagamo uporabo subjektivne metode, ki se dobro ujema z ekohidrografskimi regijami,

metode razvrščanja pa so primernejše za doseganje dobre homogenosti hidroloških regij.

Preostala dva koraka hidrološke regionalizacije smo izvedli za primer hidroloških regij, definiranih z metodo voditeljev. Uporabljeni metodi za izbiro najustreznejše verjetnostne porazdelitve sta dokaj enostavni in relativno hitri v primerjavi z ostalimi, vendar pa omogočata le upoštevanje tri-parametrskih porazdelitev, kar pa je glede na priporočila o uporabi porazdelitev z več kot dvema parametroma zaradi večje robustnosti (Hosking in Wallis, 1997) sprejemljivo. Prav tako je ta korak bolj smiselno izvesti za celotno regijo kot z upoštevanjem posameznih postaj, saj je zaradi velike količine podatkov možnost napak veliko večja (Kavčič, 2013).

V prispevku smo prikazali primer hidrološke regionalizacije visokovodnih konic za vodomerne postaje v Sloveniji. Ker je šlo za prvo uporabo te analize pri nas, smo se pri izbiri metod opirali predvsem na tuje izkušnje, ki pa jih v nadaljevanju že lahko dopolnimo z izkušnjami te študije.

Prednost hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz je v tem, da z združevanjem podatkov lahko v določenih primerih dosežemo boljše rezultate. Z večjo točnostjo lahko napovemo pretoke z zelo velikimi povratnimi dobami tudi za postaje, katerih podatkovni nizi so kratki in znašajo le nekaj let. Za take lokacije s kratkimi podatkovnimi nizi ali celo brez meritev namreč poznamo fizične lastnosti, ki smo jih upoštevali pri regionalizaciji (npr. nadmorska višina, zemljepisna širina in dolžina, površina prispevnega območja) in glede na te lastnosti jih lahko uvrstimo v določeno regijo, za katero smo določili najbolj ustrezno verjetnostno porazdelitev, ki jo uporabimo za oceno pričakovanih pretokov na tej lokaciji. Tako v regije lahko kasneje dodajamo tudi nove postaje, ki so šele začele z delovanjem. Zaradi skupnih podatkov lahko tudi za njih že predvidimo pretoke z večjimi povratnimi dobami.

## Viri

ARSO. (2013).  
[http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski\\_arhiv.html](http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html) (Pridobljeno 4. 3. 2013).

Bat, M., Dolinar, M., Frantur, P., Hrvat, M., Kobold, M., Kurnik, B., Nadbath, M., Ožura, V., Uhan, J., Ulaga, F. (2008). *Vodna bilanca Slovenije 1971-2000*. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 119 p. (in Slovenian)

Bezak, N., Brilly, M., Šraj, M. (2014a). Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis, *Hydrological Sciences Journal* 59(5), 959–977.

Bezak, N., Brilly, M., Šraj, M. (2014b). Flood frequency analyses, statistical trends and seasonality analyses of discharge data: a case study of the Litija station on the Sava River, *Journal of flood risk management*, in press. DOI: 10.1111/jfr3.12118

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. (1999). *Vodne ujme, Varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi*. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, 186 p. (in Slovenian).

Brilly, M., Urbanc-Berčič, O., Tome, D., Vidmar, A., Globevnik, L., Šraj, M. (2001). Določitev ekoregij v Sloveniji kot podlaga za gospodarjenje z vodami = Differentiation of ecoregions in Slovenia as a starting point for water management). Unpublished report, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana (in Slovenian).

Brilly, M., Globevnik, L., Vidmar, A. (2003). Določitev ekohidrografskih območij v Republiki Sloveniji = Determination of Ecohydrographical regions in Slovenia, *Acta hydrotechnica* 21(34), 23–36.

Brilly, M., Šraj, M. (2005). *Osnove hidrologije*. Univerzitetni učbenik. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, 309 p.

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.

Đurović, B., Mikoš, M. (2004). Preventivno obvladovanje tveganj zaradi naravnih nevarnosti – postopki v alpskih državah in Sloveniji = Preventive management of risks due to natural hazards – Procedures in the alpine countries and in Slovenia, *Acta hydrotechnica* 22(36), 17–35.

Ferligoj, A. (1989). *Ravzrščanje v skupine, teorija in uporaba v družboslovju*. Jugoslovansko združenje za sociologijo, Sekcija za metodologijo in statistiko, Ljubljana, 182 p.

- Haile, A.T. (2011). Regional Flood Frequency Analysis in Southern Africa. Unpublished Master Thesis, University of Oslo, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 113 p.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, 224 p.
- 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-datascreeing.doc](http://www.geography.unt.edu/.../week2handout-datascreeing.doc) (Pridobljeno 5. 3. 2013.).
- Kachroo, R.K., Mkhanda, S.H., Parida, B.P. (2000). Flood frequency analysis of southern Africa: I. Delineation of homogeneous regions, *Hydrological Sciences Journal* **45(3)**, 437–447.
- Karim, A., Chowdhury, J.U. (1995). A comparison of four distributions used in flood frequency analysis in Bangladesh, *Hydrological Sciences Journal* **40**, 55–66.
- Kavčič, K. (2013): Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji. Unpublished graduation thesis, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, 113 p. (in Slovenian).
- Kladnik, D. (1996). Naravnogeografske členitve Slovenije = Natural-geographical divisions of Slovenia, *Geografski vestnik* **68**, 123–159. (in Slovenian).
- Kobold, M., Zgonc, A., Sušnik, M. (2005). Nezanosljivost padavinskih meritev in napovedi pri modeliranju hudourniških poplav = Uncertainty of precipitation measurements and redictions in flash flood modelling, *Acta hydrotechnica* **23(39)**, 79–98.
- Košmelj, K. Breskvar Žaucer L. (2006). Metode za razvrščanje enot v skupine; osnove in primer, *Acta agriculturae Slovenica* **87(2)**, 299–310.
- Kučič, K. (2007). Metoda momentov pri verjetnostni analizi visokih vod. Unpublished graduation thesis, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, 85 p. (in Slovenian).
- Mikoš, M., Brilly, M., Ribičič, M. (2004). Poplave in zemeljski plazovi v Sloveniji = Floods and landslides in Slovenia, *Acta hydrotechnica* **22(37)**, 113–133.
- 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. London, Ontario, Canada, The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering: 52 p.
- Ogrin, D. (1996). Podnebni tipi v Sloveniji = The climate types in Slovenia, *Geografski vestnik* **68**, 39–56. (in Slovenian).
- 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**, 1–12.
- Pearson, C.P. (1991). Regional Flood Frequency Analysis for Small New Zeland Basins 2. Flood Frequency Groups, *Journal of Hydrology* (New Zeland) **30**, 77–92.
- Plut, D. (1999). Regionalizacija Slovenije po sonaravnih kriterijih, *Geografski vestnik* **71**, 9–25. (in Slovenian).
- Roald, L.A. (1989). Application of regional flood frequency analysis to basins in northwest europe. V: Roald, L. (ur.), Nordseth, K. (ur.), Anker Hassel, K. (ur.). V: FRIENDS in Hydrology: proceedings of an international conference at Bolkesjø, Norway, April 1-6, 1989. IAHS Publication 187. Oxfordshire.
- Robson, A.J., Reed, D.W. (1999). *Statistical procedures for flood frequency estimation, Volume 3 of the Flood Estimation Handbook*. Center for Ecology & Hydrology. Wallingford, 338 p.
- Schaefer, M.G. (1990). Regional analyses of precipitation annual maxima in Washington state, *Water Resources Research* **26**, 119–131.
- Scott. (2015). [http://onlinestatbook.com/2/advanced\\_graphs/q-q\\_plots.html](http://onlinestatbook.com/2/advanced_graphs/q-q_plots.html) (Pridobljeno 22. 12. 2015).
- Statistični urad Republike Slovenije. (2015). [http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=2708901S&ti=&path=../Database/Okolje/27\\_okolje/05\\_Nesrece/27089\\_ocenjena\\_skoda/&lang=2](http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=2708901S&ti=&path=../Database/Okolje/27_okolje/05_Nesrece/27089_ocenjena_skoda/&lang=2) (Pridobljeno 21. 12. 2015).
- Šebenik, U., Brilly, M., Šraj, M. (2014). Analiza sušnih razmer s pomočjo standardiziranega padavinskega indeksa (SPI), *Acta Geographica Slovenica* (accepted 7. 10. 2014).
- 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(42)**, 41–58. (in Slovenian).
- Uprava RS za zaščito in reševanje. (2015). <http://www.sos112.si/slo/page.php?src=og12.htm> (Pridobljeno 21. 12. 2015).

Wiltshire, S.E. (1985). Grouping basins for regional flood frequency analysis, *Hydrological Sciences Journal* **30(1)**, 151–159.

Zakon o vodah (ZV-1). Uradni list Republike Slovenije 67/2002. Ljubljana.

Zorn, M., Komac, B. (2011). Damage caused by natural disasters in Slovenia and globally between 1995 and 2010, *Acta Geographica Slovenica* **51(1)**, 7–41.