

UDK/UDC: 519.2:532.533(497.4)

Prejeto/Received: 06. 02. 2015

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 22. 06. 2015

ANALIZA NIZKIH PRETOKOV VODOTOKOV V SLOVENIJI Z UPORABO PROGRAMA R IN PAKETA LFSTAT

LOW-FLOW ANALYSIS OF STREAMFLOWS IN SLOVENIA USING R SOFTWARE AND LFSTAT PACKAGE

Manca Petek¹, Mira Kobold², Mojca Šraj^{1,*}

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

² Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

Izvleček

Poznavanje in napovedovanje nizkih pretokov predstavlja eno pomembnejših nalog učinkovitega upravljanja z vodami. Zaradi neugodne razporeditve padavin tekom leta, predstavlja suša in z njo povezano pomanjkanje vode v zadnjih letih tudi za Slovenijo velik problem. Za natančno in učinkovito analizo nizkih pretokov je treba analizirati več kazalnikov, hkrati pa morajo biti rezultati takih analiz pravilno ovrednoteni. V članku smo predstavili glavne kazalnike nizkih pretokov ter izvedli njihov izračun za 55 vodomernih postaj v Sloveniji. Med izbranimi kazalniki so indeks baznega odtoka, nekatere statistike nizkih pretokov (srednji letni n-dnevni minimum ter srednji, 70-, 90-, in 95-odstotni pretok), indeks sezonskosti in razmerje sezonskosti ter recesijska konstanta. Za izračun in analizo obravnavanih kazalnikov smo uporabili programsko orodje R in temu namenjen paket *lfstat*. Rezultati so predstavljeni tako analitično kot grafično, obenem pa je med kazalniki izvedena korelacijska analiza za ovrednotenje razmerij med njimi.

Ključne besede: nizki pretoki, kazalniki nizkih pretokov, indeks baznega pretoka, statistike, sezonskost, recesijska krivulja.

Abstract

Understanding and predicting low flows are among the most important tasks of effective water management. Due to the unfavourable distribution of rainfall throughout the year, drought and associated water scarcity have been a great problem also in Slovenia in recent years. For accurate and efficient analysis of low flows it is necessary to analyse several indices; furthermore the results of such analyses should be properly evaluated. In the article main low-flow indices are presented and calculated for 55 gauging stations in Slovenia. Among the presented indices are base flow index, some low-flow statistics such as mean annual minima of n days, mean, 70-, 90-, and 95-percentile flow; the seasonality index, seasonality ratio and recession analysis together with the recession constant. The R package *lfstat* was used for calculations and analyses. The results are presented both analytically and graphically and also correlation analysis was carried out to indicate the relationship among the calculated indices.

Keywords: low flows, low flow indices, base flow index, statistics, seasonality, recession curve.

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

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

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

1. Uvod

Beran in Rodier (1985) definirata sušo kot neprekinjeno obdobje pomanjkanja vode ter vodnih virov za določen namen, ki pa se lahko kaže v pomanjkanju padavin, pretokih v vodotokih ali višini podzemne vode. Za razliko od poplav lahko suše prizadenejo bistveno obsežnejša območja (Fleig et al., 2006). Sušo različne interesne skupine občutijo različno ter tudi v različnih časovnih intervalih, zato v grobem ločimo več kategorij (Hisdal in Tallaksen, 2000): meteorološko, agrometeorološko oz. kmetijsko, socialno-ekonomsko in hidrološko sušo. Slednja se kaže v nizkih pretokih vodotokov, ki pa predstavljajo zgolj eno od njenih dimenzij. Poleg nizkih pretokov so sestavni del hidrološke suše tudi nižje gladine podzemne vode, posledice naštetega pa se kažejo v manjših zalogah vode za pitje, namakanje, energetske in industrijske potrebe in drugo (Fleig et al., 2006).

Hidrološka suša se torej odraža v nizkih pretokih, ki so definirani kot pretoki vode v vodotoku med daljšo odsotnostjo padavin (Smakhtin, 2001). Za razliko od suše je nizek pretok sestavni del pretoka v vodotoku in se kot tak pojavlja na letni, sezonski ali celo mesečni ravni. Podatke srednjih dnevnih pretokov lahko za potrebe opisa režima nizkih pretokov analiziramo na več načinov, za kar imamo na voljo tudi več kazalnikov, s katerimi opišemo različne vidike nizkih pretokov. V praksi se uporabljajo številni kazalniki, ki so po navadi v literaturi analizirani ločeno, saj predstavljajo kompleksne izračune, osnovane na številnih analizah podatkov. Strnjeno so vsi kazalniki, njihov izračun in značilnosti, opisani v priročniku World Meteorological Organization (2009). Ta nudi pregled nad stanjem analiz v svetu, daje napotke za nadaljnje analize ter v splošnem predstavlja osnovo za pristop k analizi nizkih pretokov. Podobno predstavi to vejo hidrologije tudi Smakhtin (2001), ki ponudi pregled stanja na področju obravnavanja nizkih pretokov.

V članku smo predstavili glavne kazalnike nizkih pretokov, in sicer indeks baznega odtoka, nekatere statistike nizkih pretokov (srednji letni *n*-dnevni minimum ter srednji, 70-, 90-, in 95-odstotni

pretok), indeks sezonskosti, razmerje sezonskosti ter recesijsko konstanto, dobljeno s pomočjo recesijske analize po dveh metodah.

Indeks baznega odtoka je pomemben del številnih hidroloških študij (Kobold in Brilly, 1994; Young et al., 2000; Beck et al., 2013), podobno kot ostale statistike nizkih pretokov. Ravno tako široko uporabljeni so tudi grafični prikazi, kot je krivulja trajanja, ki se uporablja na več področjih upravljanja voda (WMO, 2009), in s pomočjo katere določimo *n*-odstotni pretok. V povezavi z nizkimi pretoki se pogosto uporablja analiza deficita vodnega toka (Fleig et al., 2006; Hisdal in Tallaksen, 2000), stopnjo upadanja vode v vodotokih ob odsotnosti padavin pa opisuje analiza recesijskih krivulj (Tallaksen, 1989). Nizki pretoki in njihovo pojavljanje so tesno povezani s pomanjkanjem padavin in se največkrat pojavljajo v kombinaciji z nadpovprečnimi temperaturami zraka, ko je povečano izhlapevanje, zmanjšana infiltracija vode, odtok in napajanje vodonosnikov. Drugi razlog za njihovo pojavljanje so lahko nizke temperature ter snežne padavine, ki se akumulirajo in ne odtečejo, ter tako povzročijo nizke pretoke. V odvisnosti od teh procesov pretoke delimo na zimske in poletne nizke pretoke, kompleksnejše razmejitev pa omogočajo določitve pretočnih režimov (Hrvatin, 1998; Zgonik, 2008). Sezonske trende v pojavljanju nizkih pretokov v hidrologiji opiše analiza sezonskosti z indeksom (Young et al., 2000) in razmerjem sezonskosti (Laaha in Blöschl, 2006).

Glavni cilji študije so: (i) predstaviti najpogostejše uporabljene kazalnike nizkih pretokov, (ii) predstaviti in testirati programsko orodje R in paket *lfstat* za analizo nizkih pretokov, (iii) izdelati kompleksno analizo nizkih pretokov vodomernih postaj državnega hidrološkega monitoringa v Sloveniji, (iv) ugotoviti medsebojne povezave med kazalniki ter (v) podati praktične ugotovitve raziskave za določanje razpoložljivih količin vode v smislu vodne direktive in načrta upravljanja voda.

2. Podatki in metode

V analizo smo zajeli dnevne pretoke 55 vodomernih postaj v Sloveniji (ARSO, 2014)

(slika 1). Izbrane so bile na podlagi dolžine njihovega niza podatkov in reprezentativnosti, zaradi katere so primerne za primerjavo različnih značilnosti vodozbirnih območij. Izbrane vodomerne postaje imajo vsaj 30-letni niz meritev dnevnih pretokov, ki ni prekinjen več kot eno leto. Literatura v tem primeru ne daje natančnih navodil glede zahtevane dolžine časovnih nizov, temveč predlaga, da se ta izbere na podlagi posamezne študije oz. primera (WMO, 2009). Pri vseh postajah smo analize zaključili z letom 2012, dolžine posameznih nizov pa so različne; od 33 (postaja 8180 – Solkan I) do 95 (postaja 3060 – Jesenice) let (Petek, 2014). V kolikor so bile za isto lokacijo navedene različne šifre oz. imena postaj (kot je primer Soče v Solkanu), nismo združevali podatkov, ampak smo upoštevali podatke zadnje delujoče vodomerne postaje.

2.1 Programsko orodje R in paket *lfstat*

Za analize podatkov, izračune kazalnikov in grafične predstavitve smo uporabili programsko orodje R, ki je odprtokodno, brezplačno ter zmogljivo orodje za statistične analize (R-project, 2014). V zadnjih letih se vedno bolj pogosto uporablja tudi za različne hidrološke izračune (Omuto in Gumbe, 2009; Šraj et al., 2012; Thiemić et al., 2013; Bezak et al., 2015). R je obenem programski jezik, program pa s pomočjo različnih t.i. paketov (ang. *packages*) nudi razširitve obstoječih funkcij. Odvisno od vrste statistične analize ti paketi omogočajo specifične izračune ter v mnogih pogledih olajšajo delo uporabnikom. Novi paketi pa nastajajo neprestano zaradi velike razširjenosti programa in angažiranosti uporabnikov R skupnosti. Analizi nizkih pretokov je namenjen poseben paket *lfstat*, razvit na univerzi BOKU na Dunaju (Koffler in Laaha, 2014), ki s svojim naborom funkcij (preglednica 1) sledi priročniku World Meteorological Organization (2009). Paket uporabniku nudi uporabne funkcije za izračun kazalnikov ter izris nekaterih grafov, specifičnih za analizo nizkih pretokov. Omogoča

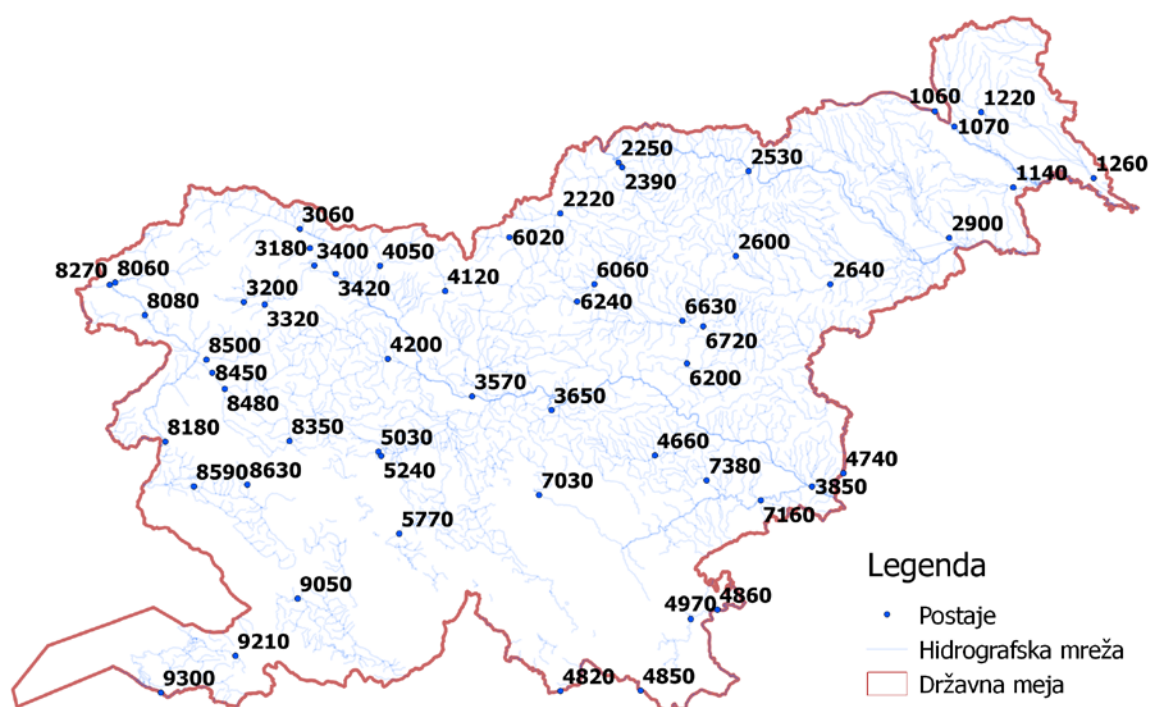
torej oceno statistik ekstremnih vrednosti, osnovnih kazalnikov nizkega pretoka, kot so indeks baznega odtoka (BFI), letni n-dnevni minimum, srednji pretok v obdobju, deficit odtoka, ter analizo sezonskosti in recesijske krivulje. Nudi pa tudi nekatere metode regionalizacije, ki jih v prispevku posebej ne obravnavamo. Pomembna lastnost tako programskega orodja R, kot paketa *lfstat* so grafični prikazi, kot je hidrogram skupaj z baznim odtokom, prikaz deficita odtoka, recesijske krivulje, krivulje trajanja ter drugi.

2.2 Indeks baznega odtoka (BFI)

Pomemben kazalnik nizkih pretokov je t.i. bazni odtok, definiran kot del pretoka, ki doteka v strugo ob daljših obdobjih brez padavin ali brez taljenja snežne odeje, torej predvsem kot posledica izcejanja podzemnih voda ali tudi iztoka iz jezer ali taljenja ledenikov (Mikoš et al., 2002). Med kazalnike, močno povezane z baznim odtokom, spada indeks baznega odtoka (BFI), ki predstavlja razmerje med baznim odtokom in celotnim pretokom v vodotoku:

$$BFI = \frac{V_{bazni}}{V_{celotni}}, \quad (1)$$

kjer V predstavlja volumen odtoka. Določitev baznega odtoka po metodi BFI poteka tako, da se podatki o dnevnem pretoku najprej razporedijo v 5-dnevne serije. Za vsako serijo se določi minimalni pretok, nato pa določi prevoje teh minimumov, ki jih z ravnimi linijami povežemo v hidrogram baznega odtoka (slika 2). Vsaki dnevni vrednosti pretoka na ta način določimo vrednost baznega pretoka, indeks BFI pa se izračuna iz razmerja med baznim in celotnim pretokom (WMO, 2009). Nekateri drugi načini izločanja baznega pretoka in določitve BFI so opisani v Kovačič (2012). Uporaba različnih metod lahko privede do odstopanj med rezultati. Predstavljeni postopek določanja BFI je integriran v programski paket *lfstat* (preglednica 1).



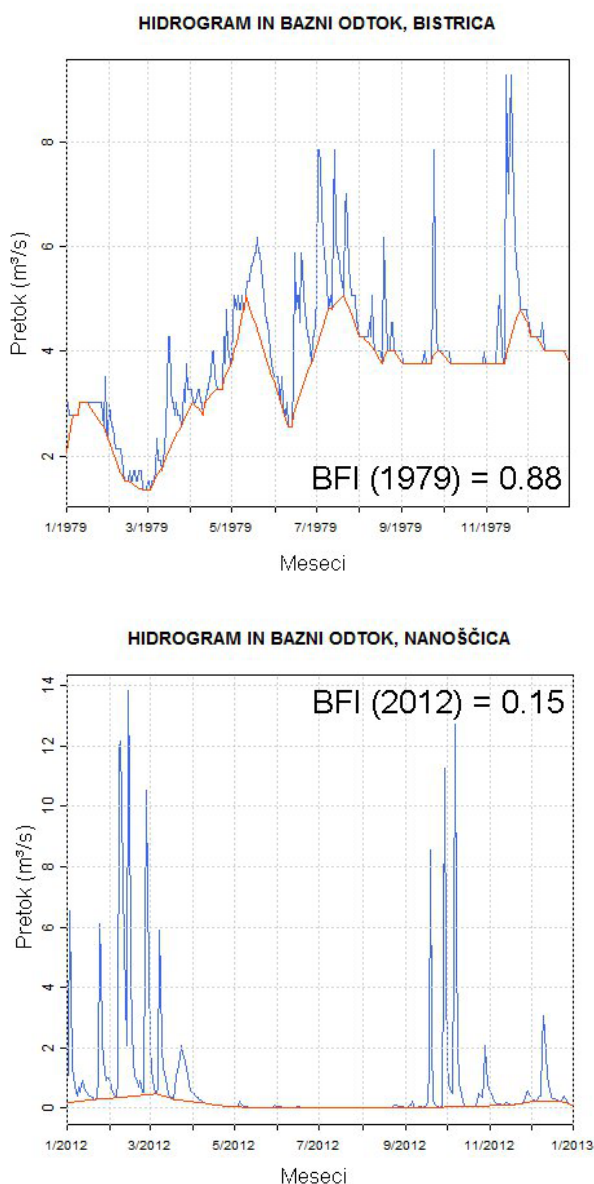
Slika 1: Analizirane vodomerne postaje v Sloveniji.

Figure 1: Gauging stations in Slovenia considered in analysis.

Preglednica 1: Nekatere funkcije paketa lfstat s pripadajočimi zahtevanimi vhodnimi parametri.

Table 1: Some functions of the lfstat package together with required input parameters.

Kazalnik/ Index	Funkcija/ Function	Dodatni vhodni parametri/ Additional input parameters
<i>BFI</i>	<i>BFI</i>	/
<i>MAM_n</i>	<i>MAM</i>	<i>n</i>
<i>Q_{sr}</i>	<i>meanflow</i>	/
<i>Q95, Q90, Q70</i>	<i>Qxx</i>	<i>xx</i>
Recesijska konstanta <i>C</i> po metodi MRC	<i>recession</i>	method = MRC, seglength, threshold (<i>Q_{xx}</i>), peaklevel [0-1], plotMRC (T/F)
Recesijska konstanta <i>C</i> po metodi IRS	<i>recession</i>	method = IRS, seglength, threshold (<i>Q_{xx}</i>), peaklevel [0-1], trimIRS (0/0.1)
Indeks sezonskosti	<i>seasindex</i>	<i>Q₉₅</i>
Razmerje sezonskosti <i>RS</i>	<i>seasratio</i>	datum, ki definira razmejitev med sezonami, <i>Q₉₅</i>



Slika 2: Dva primera izločanja baznega odtoka z nizko in visoko vrednostjo BFI.

Figure 2: Two examples of the baseflow separation with low and high value of BFI.

Vrednost indeksa *BFI* se giblje med 0 in 1 in se spreminja v odvisnosti od prepustnosti tal, po katerih teče vodotok (slika 2). V primeru slabo prepustnih tal je indeks baznega odtoka običajno manjši od 0,20, medtem ko je pri bolj prepustnih tleh z večjo možnostjo infiltracije vode lahko njegova vrednost nad 0,90. Na vrednost indeksa torej močno vpliva prepustnost podlage, pa tudi nizvodna prisotnost jezer in zajezev kakor tudi splošne podnebne značilnosti območja (WMO,

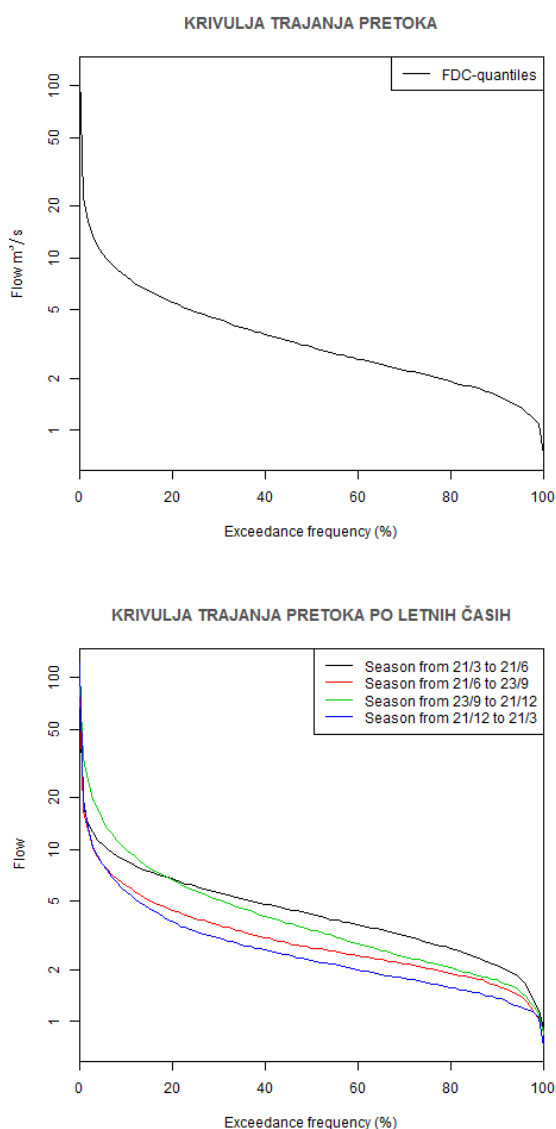
2009; Kovačič, 2012). Izračune *BFI* za posamezne slovenske vodotoke so med drugim izvedli že Kobold in Brilly (1994), Janža (2006), ter Kovačič (2012).

2.3 Statistike nizkih pretokov

Pomembne in pogosto uporabljene kazalnike nizkih pretokov predstavljajo tudi vrednosti t.i. statistik nizkih pretokov. Mednje prištevamo srednji pretok v obdobju, ki je ena izmed najbolj pogosto uporabljenih statistik v hidrologiji, saj je njen izračun iz podatkov srednjih dnevni pretokov enostaven (aritmetično povprečje) in nudi hitro primerjavo med različnimi vodotoki. Lahko ga določimo za izbrane mesece ali obdobja, najpogosteje pa se izračuna posebej za vsako koledarsko ali hidrološko leto razpoložljivih podatkov.

Poleg srednjega pretoka so statistike nizkih pretokov tudi 70-, 90- in 95- odstotni pretok (Q_{70} , Q_{90} , Q_{95}). Q_{95} predstavlja pretok, ki je presežen 95 odstotkov časa (WMO, 2009). Določimo ga z razporejanjem podatkov o pretoku ter določitvi vrednosti, ki presega petindevetdeset odstotkov vseh vrednosti, ali pa s pomočjo uporabe krivulje trajanja pretokov (slika 3). Q_{90} in Q_{70} se izračunata analogno.

Pogosto uporabljena statistika nizkega pretoka je tudi n -dnevni srednji letni minimum (ang. *mean annual minima*, *MAM*), ki ga za posamezno leto ocenimo iz niza podatkov srednjih dnevni pretokov z določitvijo najmanjšega pretoka določenega trajanja: 1, 7, 10, 30 ali 90 dni (WMO, 2009). Precej razširjen je t.i. MAM_7 , to je najmanjši povprečni pretok 7-dnevnega trajanja. Uporabo MAM_7 priporoča tudi Smakhtin (2001), saj 7-dnevno obdobje omogoča izločitev variacij v pretoku na dnevni ravni, prav tako se s tem zmanjšajo morebitne napake pri meritvah. MAM_1 in MAM_{30} sta pogosto uporabljena v vzhodni Evropi in Rusiji za oceno poletnih in zimskih sušnih pretokov (Smakhtin, 2001), medtem ko sta 7- in 10-dnevni letni minimum uporabna pri ocenah potencialnih območij, primernih za namakanje (WMO, 2009). V predstavljeni študiji smo uporabili 1- in 7-dnevno obdobje.



Slika 3: Primer krivulj trajanja za celotno obdobje in za posamezne letne čase (vodomerna postaja Kokra I).

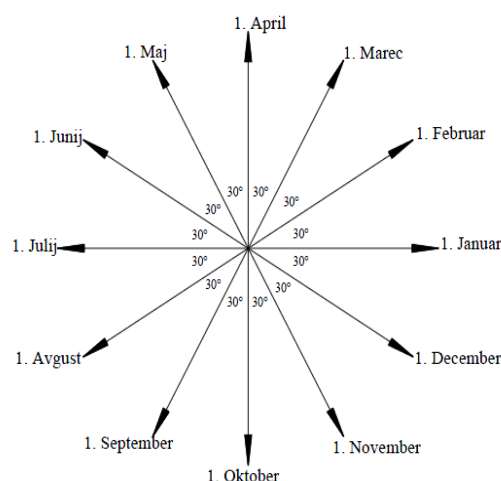
Figure 3: Example of the flow duration curves for entire period and for individual seasons (gauging station Kokra I).

2.4 Razmerje sezonskosti in indeks sezonskosti

Pojavljanje nizkih pretokov čez leto je značilnost posameznega dela vodotoka, mehanizem tega pa podrobneje obravnavajo analize sezonskosti. Mednje spadata dva kazalnika; prvi je razmerje sezonskosti in drugi indeks sezonskosti. Razmerje sezonskosti (RS), je numerična predstavitev razmerja med poletnimi in zimskimi nizkimi pretoki:

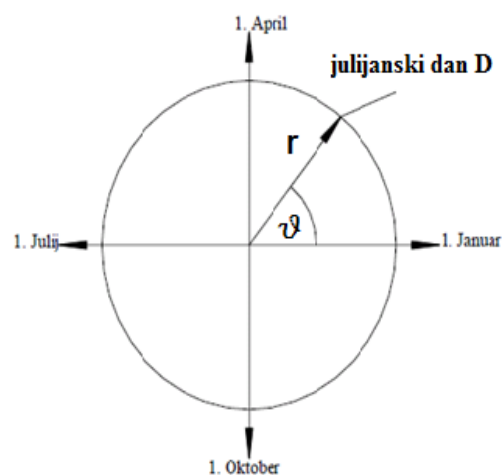
$$RS = \frac{Q_{95_{poletni}}}{Q_{95_{zimski}}} \quad (2)$$

Če je razmerje večje od 1, gre za prevladujoč zimski režim nizkih pretokov, obratno pa za poletni. Za ločnico med obdobjema smo uporabili 1. april in 1. december, kot predlagata Laaha in Blöschl (2006), ki sta enako metodologijo uporabila za vodotoke v Avstriji.



Slika 4: Grafični prikaz indeksa sezonskosti po mesecih (Srebrnič, 2005).

Figure 4: Graphical representation of the seasonality index (Srebrnič, 2005).



Slika 5: Grafični prikaz indeksa sezonskosti po mesecih.

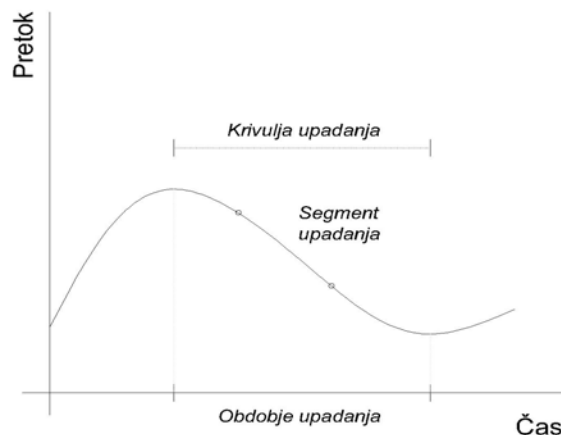
Figure 5: Graphical representation of the seasonality index.

Drugi izmed obravnavanih kazalnikov sezonskosti je indeks sezonskosti, s katerim grafično prikažemo dan pojava vsakoletnega nizkega pretoka (slika 4). Indeks sezonskosti grafično prikazuje vektor, ki s kotom θ določa dan v letu (D), ko se pojavi nizki pretok, spremenljivost v pojavljanju slednjih pa določa dolžina vektorja r (slika 5). Enotski krog namreč ponazarja 365 dni s pričetkom na pozitivnem delu abscisne osi ter vrtenju v nasprotni smeri urinega kazalca, pri čemer 1. dan ponazarja 1. januar, 365. dan pa 31. december. Dolžina vektorja r predstavlja brezdimenzijsko mero razpršenosti podatkov, višja vrednost pa pomeni, da se je večina ekstremnih dogodkov nizkega pretoka zgodila na dan izračuna. Vrednosti blizu 0 po drugi strani nakazujejo na veliko časovno variabilnost v pojavljanju nizkih pretokov, kar zmanjša uporabno vrednost parametra (Young et al., 2000). Natančneje je metodo izrisa vektorja predstavil Burn (1997). Izračun indeksa sezonskosti je sicer pogosto povezan z regionalizacijo ter napovedovanjem trendov za območja s pomanjkljivimi nizi podatkov (Laaha in Blöschl, 2006; Burn, 1997).

2.5 Recesijska krivulja

S pomanjkanjem padavin se pretoki zmanjšujejo, stopnja upadanja pa je značilnost posameznega vodotoka. Obdobje upadanja pretoka ter pripadajoč padajoči del hidrograma lahko analiziramo z metodo recesijske krivulje (slika 6), ki vsebuje informacije o prispevnem deležu podzemnih virov k odtoku in s tem tudi o lastnostih in dinamiki podtalnice (Tallaksen, 1995), zato je uporabna na več področjih urejanja in upravljanja voda. Z analizo nizkih pretokov in tudi napovedjo le-teh, tako lahko pomaga pri zasnovi in upravljanju namakalnih sistemov (določanju potrebnih in razpoložljivih količin vode), oskrbi z vodo, uporabi v energetske namene ipd. Za vodotoke, katerih stopnja upadanja je postopna in dolgotrajna, je značilen izraziti vpliv podzemnih voda ali jezer na odtok, medtem ko je hiter upad pretoka značilen za vodotoke na neprepustni podlagi, pogosto z manjšo sposobnostjo infiltracije vode (Tallaksen, 1995). Oblika recesijske krivulje se razlikuje tudi med letnimi časi, saj je evapotranspiracija v toplem

obdobju leta večja, čemur sledi višja stopnja upadanja (Tallaksen, 1995).

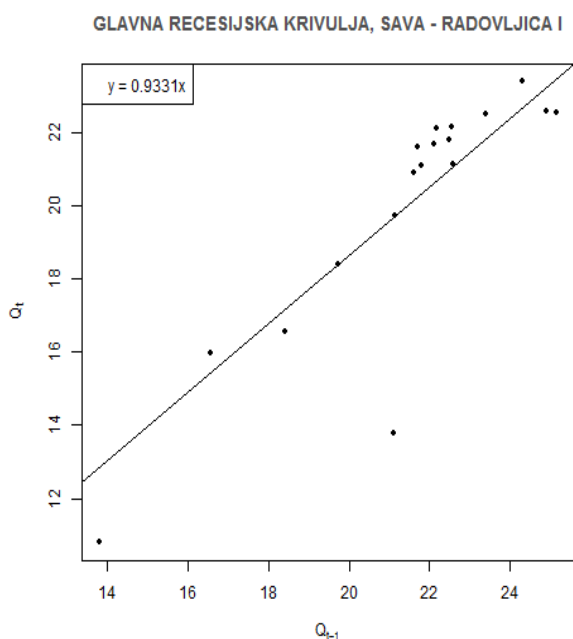


Slika 6: Recesijska krivulja.

Figure 6: Recession curve.

Za analizo recesijske krivulje sta bili zaradi variabilnosti v stopnjah upadanja in težavnosti določitve segmentov upadanja razviti dve skupini metod; prve konstruirajo glavno recesijsko krivuljo (MRC), druge pa pri izračunu stopnje upadanja k uporabljajo individualne recesijske segmente (IRS) (WMO, 2009; Tallaksen, 1995). Analizo v vsakem primeru začnemo z določitvijo kriterijev in zahtev za izbiro segmentov upadanja iz danih podatkov o pretoku. Začetna vrednost je lahko definirana z absolutnim pragom, kar pomeni, da se obdobje upadanja začne, ko pretok pade pod določeno vrednost. Spremenljiva vrednost začetka obdobja upadanja pa je lahko določena s pretokom, ki se začne po določenem času od padavinskega dogodka ali konice pretoka (WMO, 2009). Glavna recesijska krivulja zaobide problem variabilnosti podatkov tako, da konstruira t.i. srednjo recesijsko krivuljo, s čimer je informacija o variabilnosti zabrisana. Podatki so združeni, na absciso se vrisuje pretok Q_{t-1} v prvem časovnem intervalu, na ordinato pa pretok Q_t v naslednjem časovnem intervalu. Nato se s čim boljšim prilaganjem izrisanim točkam zasnuje premica (slika 7). S predpostavko, da recesijska premica seka graf v izhodišču, lahko razberemo recesijski parameter oz. stopnjo upadanja, k (Tallaksen, 1995):

$$k = \frac{Q_t}{Q_{t-1}}. \quad (3)$$



Slika 7: Primer glavne recesijske krivulje ($k = 0,933$) (vodomerna postaja Radovljica I).

Figure 7: An example of the main recession curve ($k = 0,933$) (gauging station Radovljica I).

Po metodi IRS je spremenljivost odsekov zajeta s približkom recesijskega modela za vsak posamezen segment upadanja. Recesijsko analizo po metodi IRS torej izvedemo s kvantitativnim izračunom za posamezne odseke upadanja (Tallaksen, 1995). Priporočena dolžina segmentov v literaturi je 5 do 7 dni (Tallaksen, 1989; WMO, 2009).

Rezultat obeh načinov izračuna, ki ju podrobneje razlaga priročnik WMO (2009), je konstanta upadanja C v dnevih:

$$C = \frac{-\Delta t}{\ln(k)}. \quad (4)$$

Recesijska konstanta je vrednost, ki ponazarja mero upadanja. Določimo jo tako po metodi MRC kot tudi po metodi IRS, končna primerjava med vrednostma po eni in drugi metodi pa naj bi prinesla zadovoljive rezultate. Natančnejši postopki določitve segmentov upadanja, njihove priporočene vrednosti ter določitve ostalih parametrov obeh navedenih metod, so predstavljeni v Tallaksen (1995) in WMO (2009).

3. Rezultati

Z različnimi funkcijami smo s programskim orodjem R za podatke o srednjih dnevni pretokih 55 vodomernih postaj v Sloveniji izračunali kazalnike nizkih pretokov (preglednica 2).

3.1 Indeks baznega odtoka (BFI)

BFI se je v dosedanjih študijah kazalcev nizkih pretokov izkazal kot primeren pokazatelj geološke podlage in na splošno prepustnosti tal. Ker je odvisen tudi od podnebja (v aridnih območjih je njegova vrednost skoraj 0, v tropskih pa dosega vrednosti blizu 1) se za zmerno podnebje brez izrazitega sušnega obdobja, kamor spada Slovenija, predvidevajo vrednosti okoli 0,5 (Beck in sod., 2013). Povprečna vrednost indeksa baznega odtoka *BFI* za vse analizirane postaje v Sloveniji znaša 0,52, kar se dobro ujema z vrednostjo, ki jo predvideva Beck et al. (2013). Ker pa *BFI* ni odvisen zgolj od podnebja, temveč tudi od prepustnosti tal in drugih dejavnikov (WMO, 2009; Kovačič, 2012), so vrednosti indeksa *BFI* za posamezne vodomerne postaje različne (preglednica 2) in se gibljejo od 0,29 (Kubed II - 9210) do 0,82 (Jesenice - 3060). Nizke vrednosti kažejo predvsem sredozemske in kraške reke Rižana (9210), Dragonja (9300) in Reka (9050), medtem ko ima najvišjo vrednost indeksa Sava Dolinka pri Jesenicah (3060). Standardna deviacija vrednosti *BFI* za vse obravnavane postaje znaša 0,14. Nihanja vrednosti *BFI* med posameznimi vodotoki so rezultat interakcije več dejavnikov, katerih vpliv sta za nekatere slovenske vodotoke podrobneje analizirala tudi Janža (2006) in Kovačič (2012).

3.2 Statistike nizkih pretokov

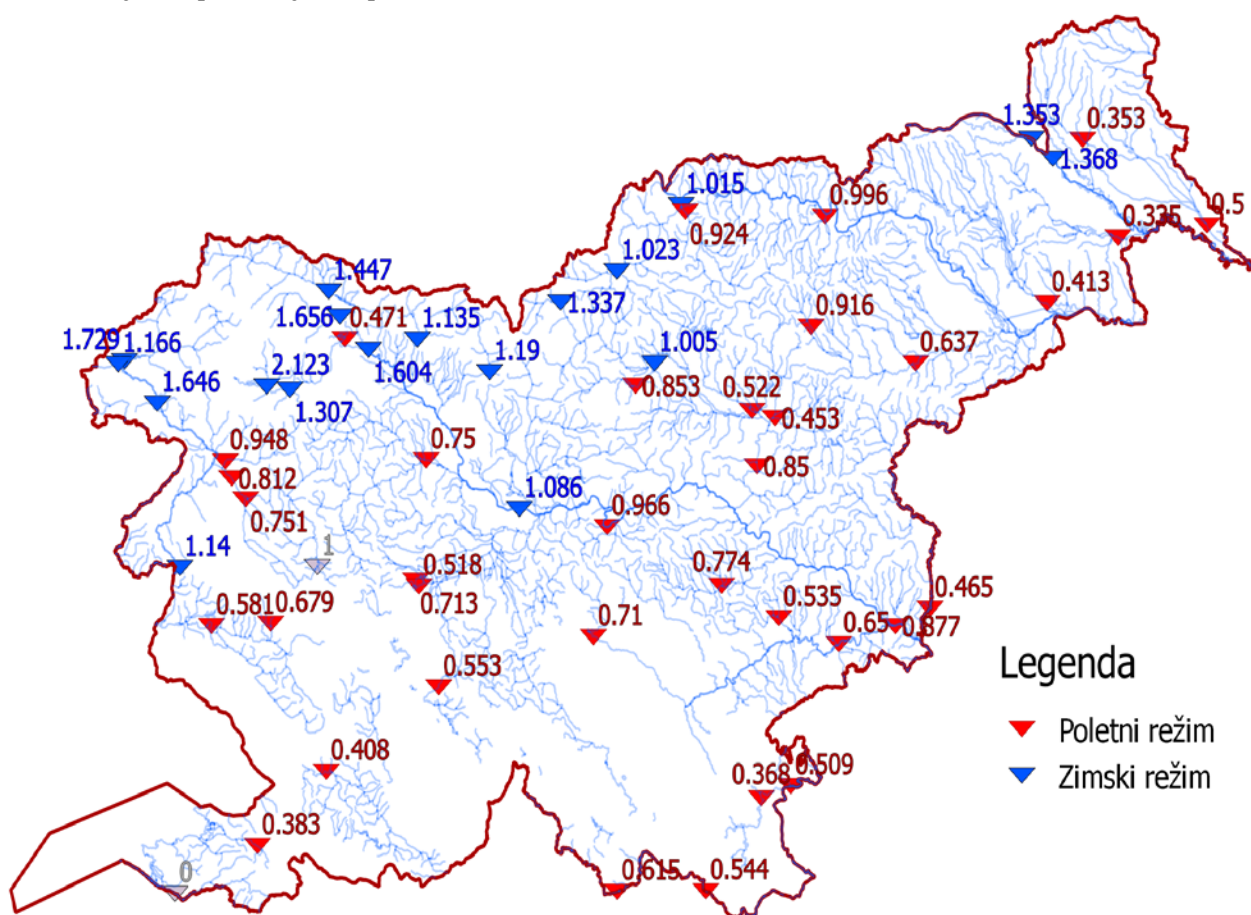
V analizo so bili zajeti tako manjši kot veliki vodotoki, kar nakazuje velika razlika v vrednostih nekaterih statistik; najmanjši srednji letni minimum MAM_1 namreč znaša $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ (Podkaštel I - 9300), največji pa $72,05 \text{ m}^3/\text{s}$ (Čatež I - 3850). Povprečna vrednost srednjega pretoka za vse analizirane postaje znaša $31,83 \text{ m}^3/\text{s}$. Povprečno najnižje vrednosti statistik ima MAM_1 ,

sledi mu MAM_7 in Q_{95} , ter analogno vse ostale povprečne vrednosti statistik (preglednica 2).

3.3 Razmerje sezonskosti in indeks sezonskosti

Vrednosti razmerja sezonskosti RS za vse analizirane vodomerne postaje so grafično predstavljene na sliki 8. Srednja vrednost RS za vse obravnavane postaje, ki je manjša od 1 (0,867), kaže na prevladujoč poletni režim nizkih pretokov v Sloveniji. Nanj ima glavni vpliv povečana evapotranspiracija in pomanjkanje padavin. Najnižje razmerje sezonskosti ima reka Dragonja (Podkaštel I - 9300), ki je pod močnim vplivom poletnih minimumov in večkrat tudi presahne. Njen sloves sredozemske reke potrjuje tudi najvišja vrednost indeksa sezonskosti r , ki znaša 0,899 in kaže na majhno spremenljivost pretokov. Nekateri,

predvsem alpski vodotoki, pa so zaradi svoje lege pod vplivom zimskih nizkih pretokov (slika 8), kar je posledica akumulacije snežnih padavin v zimskem času. Sava Bohinjka na vodomerni postaji Sveti Janez ima med vsemi najbolj izrazit zimski režim nizkih pretokov, saj znaša vrednost RS 2,123. Enako kaže tudi indeks sezonskosti, ki ima vrednost dneva nastopa nizkega pretoka 35 (4. februar), z dokaj majhno spremenljivostjo pojavljanja nizkih pretokov, saj znaša parameter r 0,777. Vektorji indeksa sezonskosti za obravnavane postaje so prikazani na sliki 9 in podobno kot razmerje sezonskosti kažejo, da so slovenski vodotoki v splošnem izrazito pod vplivom poletnih minimumov (srednja vrednost julijanskega dneva D pojava nizkega pretoka je 212).



Slika 8: Razmerje sezonskosti RS za obravnavane vodomerne postaje v Sloveniji.

Figure 8: Seasonality ratio values RS for considered gauging stations in Slovenia.

Preglednica 2: Izračunane vrednosti kazalnikov nizkih pretokov za izbrane vodomerne postaje v Sloveniji.

Table 2: Calculated values of low flow indices for selected gauging stations in Slovenia.

Šifra postaje	BFI [-]	MAM ₁ [m ³ /s]	MAM ₇ [m ³ /s]	Q _{sr} [m ³ /s]	Q ₉₅ [m ³ /s]	Q ₉₀ [m ³ /s]	Q ₇₀ [m ³ /s]	Θ [rad]	D [-]	R [-]	RS [-]	C _{MRC,6} [dnevi]	C _{IRS,6} [dnevi]
1060	0,78	59,1	62,4	155,3	67,8	74,3	100,2	0,114	7	0,68	1,353	17,0	19,5
1070	0,79	62,1	65,9	161,0	71,0	78,7	105,9	0,202	12	0,751	1,368	21,9	25,2
1140	0,44	0,2	0,3	1,9	0,3	0,4	0,7	3,85	224	0,754	0,335	5,2	7,5
1220	0,40	0,1	0,1	1,2	0,2	0,2	0,4	4,112	239	0,712	0,353	3,6	7,8
1260	0,60	1,1	1,2	4,5	1,4	1,7	2,4	3,922	228	0,779	0,500	10,0	16,6
2220	0,62	0,6	0,6	2,1	0,7	0,8	1,1	4,889	284	0,103	1,023	12,2	14,0
2250	0,65	4,1	4,3	12,3	4,8	5,2	7,0	3,993	232	0,139	1,015	13,3	15,0
2390	0,58	1,2	1,3	4,6	1,5	1,7	2,4	4,101	238	0,359	0,924	10,5	12,1
2530	0,62	0,6	0,6	2,0	0,7	0,8	1,1	4,44	258	0,225	0,996	13,0	14,5
2600	0,69	0,2	0,3	0,8	0,3	0,4	0,5	3,67	213	0,412	0,916	6,0	6,7
2640	0,54	1,2	1,3	4,7	1,4	1,6	2,3	3,883	226	0,724	0,637	10,7	13,1
2900	0,39	0,6	0,7	5,1	0,8	0,9	1,6	3,811	221	0,833	0,413	8,7	10,2
3060	0,82	4,4	4,6	11,1	4,9	5,4	7,5	0,805	47	0,729	1,447	19,7	24,8
3180	0,61	1,9	1,9	8,2	2,2	2,5	4,0	0,741	43	0,844	1,656	13,7	15,4
3200	0,49	0,9	1,0	8,2	1,2	1,4	2,7	0,604	35	0,777	2,123	11,7	13,0
3320	0,40	0,4	0,4	3,2	0,5	0,6	0,9	2,868	167	0,104	1,307	4,0	6,5
3400	0,67	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,2	4,364	254	0,417	0,471	1,8	2,3
3420	0,57	9,6	12,6	44,3	14,1	16,5	24,3	0,37	22	0,605	1,604	11,0	13,5
3570	0,63	28,9	31,8	89,5	35,0	38,5	51,5	5,786	336	0,228	1,086	13,2	15,0
3650	0,63	47,0	51,1	163,1	56,9	63,7	90,6	4,522	263	0,286	0,966	11,7	13,7
3850	0,60	72,1	76,6	261,9	86,3	97,1	139,0	4,165	242	0,457	0,877	15,1	16,9
4050	0,72	2,3	2,5	5,0	2,6	2,8	3,4	6,183	359	0,308	1,135	7,1	7,7
4120	0,63	1,4	1,4	4,3	1,6	1,7	2,3	0,465	27	0,195	1,19	12,5	13,2
4200	0,49	3,7	4,0	19,7	4,6	5,4	8,3	4,197	244	0,616	0,75	11,0	12,6
4660	0,50	0,7	0,7	2,6	0,8	0,9	1,2	4,282	249	0,598	0,774	10,5	13,2
4740	0,37	0,9	1,0	8,5	1,2	1,5	2,6	3,938	229	0,815	0,465	7,0	8,4

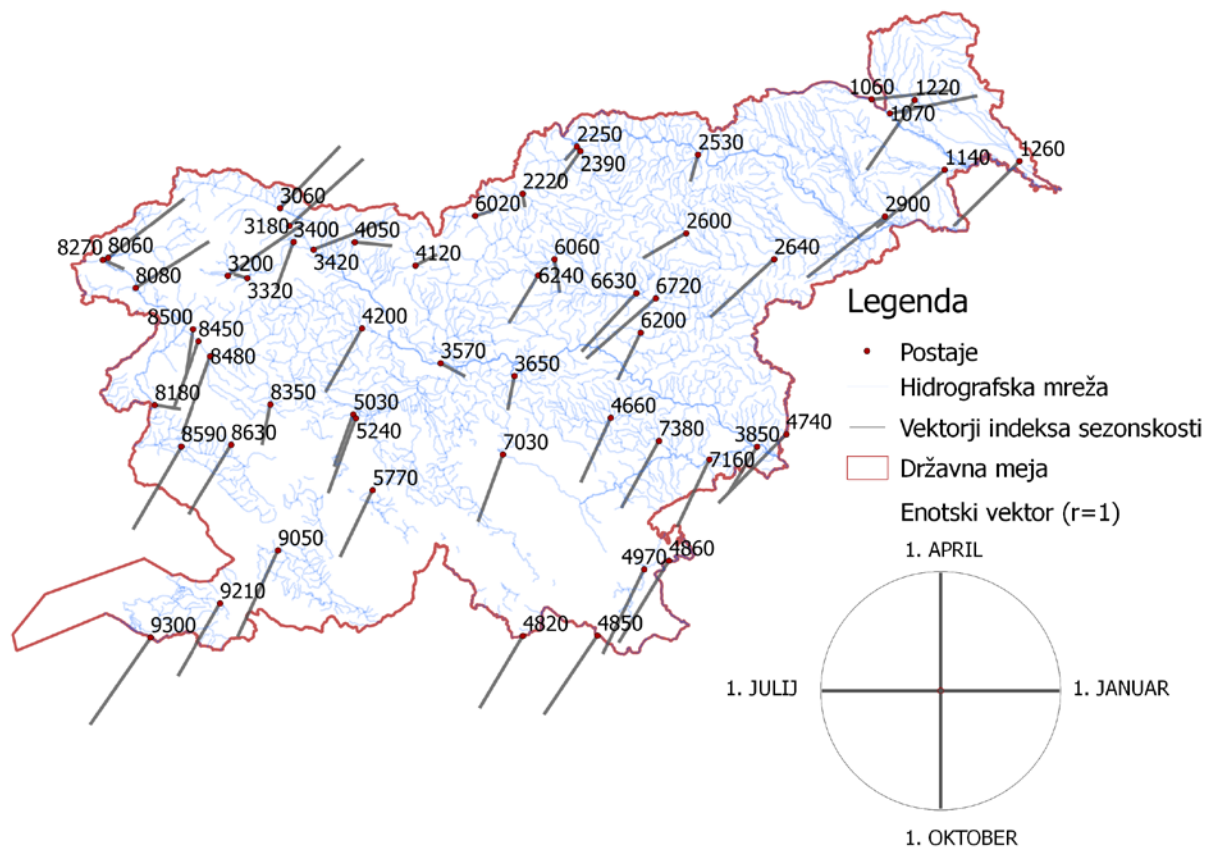
Šifra postaje	BFI [-]	MAM_1 [m ³ /s]	MAM_7 [m ³ /s]	Q_{sr} [m ³ /s]	Q_{95} [m ³ /s]	Q_{90} [m ³ /s]	Q_{70} [m ³ /s]	Θ [rad]	D [-]	R [-]	RS [-]	$C_{MRC,6}$ [dnevi]	$C_{IRS,6}$ [dnevi]
4820	0,36	2,9	3,1	25,8	3,6	4,4	7,8	4,177	243	0,707	0,615	10,7	12,0
4850	0,38	5,4	5,8	47,9	6,8	7,9	14,3	4,121	239	0,804	0,544	10,5	11,8
4860	0,41	9,1	9,9	74,3	11,7	13,9	25,4	4,165	242	0,811	0,509	10,8	13,2
4970	0,35	0,5	0,5	5,7	0,6	0,8	1,5	4,261	248	0,795	0,368	6,5	9,0
5030	0,54	2,4	2,6	23,9	3,2	4,0	8,1	4,366	254	0,464	0,713	9,0	10,4
5240	0,67	1,0	1,0	6,7	1,3	1,7	3,5	4,362	253	0,674	0,518	11,1	12,8
5770	0,40	0,1	0,1	1,0	0,2	0,2	0,4	4,264	248	0,624	0,553	4,0	6,9
6020	0,63	0,4	0,4	2,2	0,5	0,6	1,0	0,315	18	0,145	1,337	9,9	11,1
6060	0,53	3,5	3,7	17,5	4,3	5,0	7,9	4,877	283	0,281	1,005	11,1	12,9
6200	0,49	7,99	8,6	39,1	10,1	11,6	17,6	4,263	248	0,439	0,850	12,1	13,7
6240	0,46	0,74	0,8	4,1	1,0	1,1	1,7	4,165	242	0,467	0,853	9,8	12,4
6630	0,31	0,13	0,2	1,5	0,2	0,3	0,4	3,963	230	0,672	0,522	5,0	7,1
6720	0,33	0,27	0,3	3,2	0,4	0,5	0,9	3,861	224	0,774	0,453	5,7	7,9
7030	0,50	1,65	1,7	8,0	2,0	2,2	3,5	4,362	253	0,602	0,710	11,0	13,1
7160	0,48	9,59	10,4	54,6	12,0	14,0	21,7	4,27	248	0,626	0,650	9,7	12,2
7380	0,45	0,27	0,3	1,8	0,4	0,4	0,7	4,206	244	0,646	0,535	5,4	9,2
8060	0,63	5,45	5,7	25,2	6,6	7,6	12,0	0,666	39	0,811	1,729	17,8	18,8
8080	0,59	7,68	8,0	34,2	9,1	10,3	16,1	0,562	33	0,731	1,646	16,5	18,7
8180	0,50	18,8	21,6	87,2	23,7	26,8	38,5	6,121	356	0,209	1,140	6,4	10,9
8270	0,41	0,6	0,6	3,4	0,7	0,8	1,2	5,86	340	0,183	1,166	12,0	15,5
8350	0,33	1,51	1,6	8,1	1,7	1,8	2,3	4,514	262	0,342	1,000	10,6	13,1
8450	0,44	4,95	5,2	23,4	5,7	6,2	8,8	4,36	253	0,61	0,812	11,4	14,4
8480	0,50	0,61	0,6	2,7	0,7	0,8	1,2	4,369	254	0,699	0,751	8,0	12,0
8500	0,56	1,5	1,6	6,9	1,9	2,1	3,2	4,559	265	0,416	0,948	8,9	12,0
8590	0,38	1,83	2,0	14,9	2,2	2,7	4,6	4,185	243	0,813	0,581	10,1	11,8
8630	0,42	0,37	0,4	2,9	0,5	0,6	1,0	4,165	242	0,686	0,679	8,8	10,5
9050	0,33	0,59	0,7	8,0	0,8	1,0	1,7	4,279	249	0,804	0,408	7,1	11,2
9210	0,29	0,19	0,2	3,9	0,3	0,3	0,8	4,188	243	0,708	0,383	4,3	6,0
9300	0,30	0,02	0,0	1,0	0,0	0,0	0,1	4,107	239	0,899	0,000	6,2	6,0

Zanimivo je, da nobena od obravnavanih postaj kljub temu nima dneva nastopa nizkega pretoka v juliju (preglednica 2), prevladujeta namreč avgust in september. Nekateri izmed analiziranih vodotokov imajo kljub temu prevladujoč zimski minimum, kar je posledica akumulacije snežnih padavin. Med reke, ki kažejo zimski režim nizkih pretokov, spada reka Mura na vodomernih postajah Petanji in Gornja Radgona, ki ima tudi najmanjšo vrednost D med vsemi analiziranimi postajami. Poleg nje kažejo zimski režim nizkih pretokov še Kokra, Sava pri Radovljici in Šentjakobu, Soča, Učja, Sava Dolinka, Sava Bohinjka, Radovna, Drava in Tržiška Bistrica (sliki 8 in 9). Zanimiva je Savinja, ki ima na vodomerni postaji Solčava I srednji dan nizkega pretoka v januarju, na postajah Nazarje in Laško I pa sta izrazita poletna minimuma. Pri tem pa je treba poudariti, da ima parameter r v primeru Solčave I majhno vrednost, 0,145 (preglednica 2), kar pomeni, da je

spremenljivost v pojavljanju nizkih pretokov velika ter da Savinja v splošnem ne kaže tipičnega režima zimskih nizkih pretokov. Vodotoki v južnem delu Slovenije so pod izrazitim vplivom poletnih minimumov, tudi vrednosti r oz. dolžine vektorjev so pri teh vodotokih večje.

3.4 Recesijska krivulja

Za izbran mejni pretok Q_{70} smo s pomočjo izračuna glavne recesijske krivulje in individualnih segmentov upadanja izračunali recesijske konstante v odvisnosti od izbrane dolžine trajanja segmentov v dnevih, torej za 4, 5, 6 in 7 dni. Vrednosti konstant obeh metod se najbolj razlikujeta pri dolžini segmenta 4 dni, najmanj pa pri segmentih trajanja 6 dni. Za nadaljnjo analizo je bila izbrana 6-dnevna dolžina segmentov, saj je tudi v literaturi priporočena dolžina segmentov 5 do 7 dni (Tallaksen, 1989; WMO, 2009).



Slika 9: Indeks sezonskosti r za obravnavane vodomerne postaje v Sloveniji.

Figure 9: Seasonality index r for considered gauging stations in Slovenia.

Za recesijsko konstanto C velja, da izraža sposobnost posameznega vodotoka, da vzdržuje svoj pretok. Višja vrednost konstante tako pomeni, da je vodotok bolj dovzeten za pomanjkanje padavin ter ima večji doprinos podzemnih virov k pretoku. Srednja vrednost recesijske konstante C za vse obravnavane vodomerne postaje v Sloveniji znaša 10 dni po metodi MRC in 12,3 dni po metodi IRC, medtem ko je razpon vrednosti od 1,8 dneva (Mlino I – 3400; po metodi MRC) do 25,2 dneva (Petanjci – 1070; po metodi IRS) (preglednica 2).

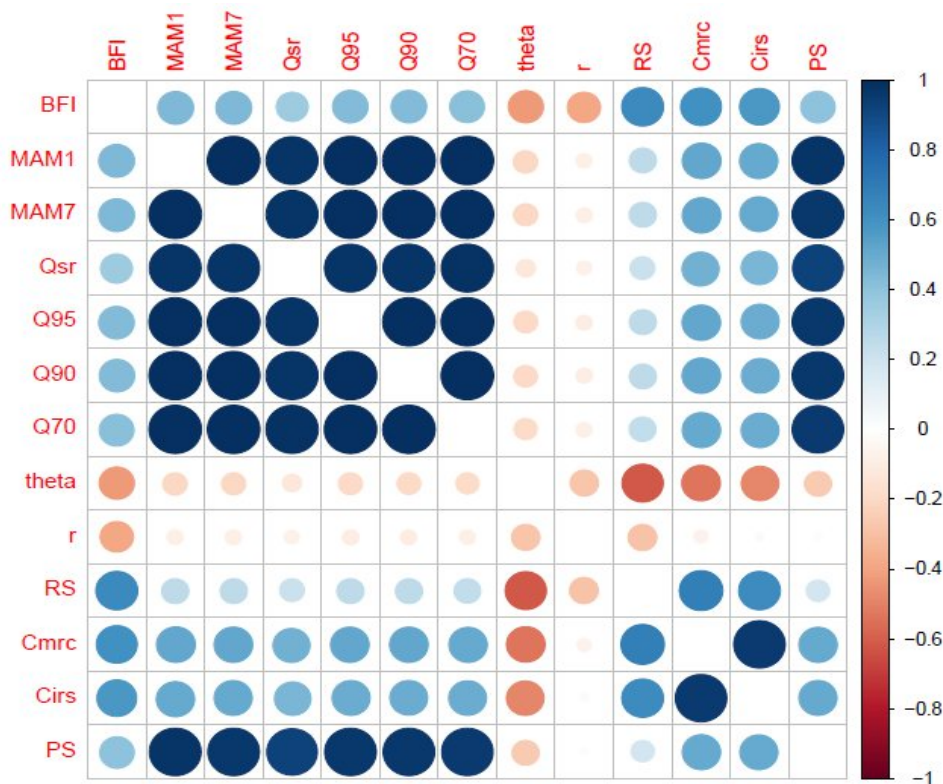
4. Analiza rezultatov in razprava

Za analizo povezanosti kazalnikov nizkih pretokov je bila uporabljena linearna korelacija, rezultati pa so prikazani s korelacijsko matriko na sliki 10.

Najmočnejše so med seboj povezane osnovne statistike nizkih pretokov; torej srednji pretok, 95-, 90- in 70-odstotni pretok ter MAM_7 , ki kažejo visoko stopnjo korelacije (višjo od 0,8). Razvidno je, da so statistike nizkih pretokov zelo močno

povezane z velikostjo prispevnega območja (PS), ki igra pomembno vlogo tudi pri vrednostih recesijske konstante. Vzrok za to je dejstvo, da pomeni večja površina prispevnega območja manjšo občutljivost vodotokov na pomanjkanje padavin.

Indeks sezonskosti (kot Θ) je pričakovano močno povezan z razmerjem sezonskosti RS , korelacija med njima je negativna (slika 10). Velika vrednost razmerja sezonskosti predstavlja zimski režim nizkih pretokov, kar je povezano z majhnimi vrednostmi kota Θ oz. dnevom nastopa nizkega pretoka D . V večini primerov se poletni režimi nizkih pretokov indeksa sezonskosti ujemajo s poletnimi režimi razmerja sezonskosti (RS manjše od 1), razen v nekaterih primerih (postaje 2220, 2250, 6060, 8350 in 3320), ko je razmerje sezonskosti enako 1,0 ali je produkt med enotskim vektorjem r indeksa sezonskosti in razmerjem sezonskosti manjši od 0,15. Izjema je reka Dragonja, ki ima vrednost kazalnika RS zaradi izrazitih poletnih minimumov enako 0.



Slika 10: Korelacijska matrika izračunanih kazalnikov nizkih pretokov (velikost kroga prikazuje vrednost korelacije, barva pa njeno pozitivno (modra) ali negativno (rdeča) vrednost).

Figure 10: Correlation matrix of calculated low flow indices (the size of a circle represents the value of correlation, while the colour indicates whether it is positive (blue) or negative (red)).

Močna je tudi povezanost razmerja sezonskosti RS z indeksom baznega odtoka (slika 10). Višji BFI predstavlja večji delež baznega toka v razmerju s pretokom v vodotoku, kar zmanjša občutljivost vodotoka na pomanjkanje padavin. Tako recesijski konstanti C_{MRC} in C_{IRS} kot tudi BFI izkazujejo močno stopnjo korelacije z razmerjem sezonskosti RS , ki je običajno višja za vodotoke z zimskim režimom nizkih pretokov. Vodotoki z razmerjem sezonskosti večjim od 1, ki nakazuje zimski režim nizkih pretokov, imajo višje vrednosti recesijskih konstant. Srednje močna pa je korelacija med recesijskima konstantama ter ostalimi kazalniki, z izjemo indeksa sezonskosti r .

Vrednosti recesijskih konstant C , izračunanih po obeh metodah (MRC in IRS), kažejo zelo močno stopnjo medsebojne korelacije (več od 0,8), kar kaže na zadovoljivo izbiro vhodnih parametrov.

5. Sklepi

V članku smo predstavili nekatere kazalnike nizkih pretokov, ki se v hidroloških študijah najpogosteje uporabljajo za analize nizkih pretokov. Podatke, dostopne na spletni strani Agencije za okolje Republike Slovenije, smo analizirali s programskim orodjem R ter paketom *lfstat* in rezultate predstavili v obliki kazalnikov nizkega pretoka.

Analiza kazalnikov nizkega pretoka je kompleksen proces, ki za doseg zadovoljivih rezultatov zahteva podrobno analizo. V prispevku smo tako predstavili rezultate prve kompleksnejše analize nizkih pretokov za vodomerne postaje državnega hidrološkega monitoringa v Sloveniji, prikazali značilnosti in obnašanje posameznih kazalnikov nizkih pretokov ter raziskali povezave med njimi.

Kot orodje za iskanje tovrstnih povezav in v splošnem za obdelavo podatkov na področju analize nizkih pretokov, se je programsko orodje R in nizkim pretokom namenjen paket *lfstat* izkazalo kot uporabno. Ima sicer nekaj manjših pomanjkljivosti, predvsem pri urejanju grafičnih prikazov in pisanju rezultatov v zankah, kjer se v hitrosti ne izkaže najbolje. Kljub temu pa predstavlja odličen pripomoček za kompleksne izračune na dolgih nizih podatkov.

Izbrani kazalniki nizkega pretoka so se izkazali za zadovoljivo orodje pri primerjavi med različnimi vodotoki, saj omogočajo hitro členitev vodotokov glede na izbrane kriterije.

Eden od temeljnih ciljev upravljanja voda je tudi ohranjanje in uravnavanje vodnih količin (MOP, 2014), ki se lahko zagotovi z ustrezno presojo nizkih pretokov ter analizo njihovih kazalnikov. Cilj je usklajen z vodno direktivo EU (Direktiva 2000/60/ES, 2000), ki stremi k trajnostni rabi vode ter zaščiti vodnih virov. Hidrološka suša, katere sestavni del so tudi nizki pretoki, se lahko posebej intenzivno kaže v vodooskrbi in energetski izrabi vode, obe področji pa sta izjemno pomembni za zagotavljanje zdravja in kvalitete življenja ljudi.

V skladu s t.i. ukrepom »Analiza razpoložljivih zalog podzemne in površinske vode ter obstoječe in predvidene rabe vode za obdobje do 2021« načrta upravljanja voda za vodni območji Donave in Jadranskega morja je predvidena opredelitev razpoložljivih zalog vodnih virov na območju Slovenije za namene vodooskrbe (IZVRS, 2014). Ukrep zahteva tudi preveritev ustreznosti vodnih zalog za namakanje, odvzem za energetsko rabo ter uporabo vode v industrijski, obrtni, turistični in drugih dejavnostih. Na podlagi tega bodo izdelani predlogi omejitev rabe, podeljevanja vodnih pravic ter določene obveze v zvezi z opazovanjem kritičnih nivojev ter ustreznim obveščanjem.

Analiza nizkih pretokov v Sloveniji je nujna za učinkovito upravljanje voda in realizacijo predvidenih ukrepov, pri čemer priporočamo uporabo več kazalnikov hkrati, kot je prikazano v prispevku. Poleg tega pa za tovrstne analize priporočamo uporabo predstavljenega orodja R in paketa *lfstat*, ki se je v raziskavi izkazal kot zelo učinkovit in uporaben pripomoček.

Viri

ARSO (2014). Arhiv površinskih voda. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (Pridobljeno 15. 6. 2014.).

Beck, H.E., van Dijk, A.I.J.M., Miralles, D.G., de Jeu, R.A.M., Bruijnzeel, L.A., McVicar, T.R., Schellekens, J. (2013). Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394

- catchments, *Water Resources Research* **49**(12), 7843–7863.
- Beran, M., Rodier, J.A. (1985). Hydrological aspects of drought: a contribution to the International Hydrological Programme. UNESCO, Paris, 149 p.
- Bezák, N., Horvat, A., Šraj, M. (2015). Analysis of flood events in Slovenian streams, *Journal of Hydrology and Hydromechanics* **63**(2), 134–144.
- Burn, D.H. (1997). Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures, *Journal of Hydrology* **202**(1-4), 212–230.
- Direktiva 2000/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2000. (2000). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060> (Pridobljeno 4. 4. 2015.)
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics, *Hydrology and Earth System Sciences*, **10**(4), 535–552. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/535/2006/hess-10-535-2006.pdf> (Pridobljeno 24. 10. 2014.)
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M. (2000). Drought Event Definition. V: Hisdal, H. (ur.), Tallaksen, L.M. (ur.). Technical Report to the ARIDE project No. 6. University of Oslo, Department of Geophysics, 41 p.
- Hrvatín, M. (1998). Pretočni režimi v Sloveniji, *Geografski zbornik* **38**, 59–87.
- IZVRS (2014). Ukrep DDU26. http://www.izvrs.si/pregledovalnik_vtpv/maske/DDU/DDU26.pdf (Pridobljeno 19. 3. 2015.)
- Janža, M. (2006). Analiza odvisnosti indeksa baznega odtoka od lastnosti povodja. Geografski informacijski sistemi 2005–2006, Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ter inštitut za antropološke in prostorske študije ZRCSAZU, 103–111.
- Kobold, M., Brilly, M. (1994). Low flow discharge analysis in Slovenia. FRIEND '97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource, 119–131.
- Koffler, D., Laaha, G. (2014). Package 'lfstat', Calculation of Low Flow Statistics for daily stream flow data, 37 p. <http://cran.r-project.org/web/packages/lfstat/lfstat.pdf> (Pridobljeno 22. 10. 2014.)
- Kovačič, T. (2012). Analiza vpliva lastnosti porečja na indeks baznega odtoka = Analysis of the influence of catchment characteristics on baseflow index. Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 105 p. (in Slovenian).
- Laaha, G., Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows, *Hydrological Processes*, **20**(18), 3851–3878.
- Mikoš M., Kranjc A., Rakovec J., Brilly M. (2002). Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Acta hydrotechnica*, **20**(32). <http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (Pridobljeno 27. 10. 2014.)
- MOP (Ministrstvo za okolje in prostor). (2014). Pregled pomembnih zadev upravljanja voda na vodnih območjih Donave in Jadranskega morja. Ljubljana, MOP, 132 p. http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploa ds/podrocja/voda/nuv_II/PZUV.pdf (Pridobljeno 2. 4. 2015.)
- Omuto, C.T., Gumbe, L.O. (2009). Estimating water infiltration and retention characteristics using a computer program in R, *Computers & Geosciences* **35**(3), 579–585.
- Petek, M. (2014). Analiza nizkih pretokov vodotokov v Sloveniji = Low flow analysis of stream flows in Slovenia. Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 68 p. (in Slovenian).
- R-project (2014). R-project, version 3.0.2. <http://www.r-project.org/> (Pridobljeno 20. 2. 2014.)
- Smakhtin, V.U. (2001). Low flow hydrology: a review, *Journal of Hydrology* **240**(3–4), 147–186.
- Srebrnič, T. (2005). Časovna razporeditev padavin in pretokov v Sloveniji z analizo sezonskosti = Time distribution of precipitation and discharges in Slovenia with analysis of seasonality. Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 137 p. (in Slovenian).
- Šraj, M., Bezák, N., Brilly, M. (2012). Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji = The influence of the choice of method on the results of frequency analysis of peaks, volumes and durations of flood waves of the Sava River in Litija, *Acta hydrotechnica* **25**(42), 41–58. (In Slovenian).
- Tallaksen, L.M. (1989). *Analysis of time variability in recessions*. FRIENDS in Hydrology, IAHS Publication, **187**, 85–96.
- Tallaksen, L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis, *Journal of Hydrology* **165**, 349–370.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., De Roo, A. (2013). Hydrological evaluation of a satellite-

based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin, *Journal of Hydrology* **499**, 324–338.

World Meteorological Organization (WMO) (2009). *Manual of Low-flow Estimation and Prediction*. Operational Hydrology Report No. 50. (WMO-No. 1029). Geneva, 136 p.

Young, A.R., Round, C.E., Gustard, A. (2000). Spatial and temporal variations in the occurrence of low flow events in the UK, *Hydrology and Earth System Sciences* **4**, 35-45.

Zgonik, T. (2008). Sezonskost mesečnih pretokov v Sloveniji = Seasonality of monthly discharges in Slovenia. Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 115 p. (in Slovenian).