

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Petek, M., Kobold, M., Šraj, M. 2015. Določanje kazalnikov nizkih pretokov : prikaz na primeru vodomerne postaje Kokra I na reki Kokri. V: Kuhar, M. (ur.), et al. 20. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 29. januar 2015. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2014 : zbornik del. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 81-91.

http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2015/8%20SZGG_2015_Petek_Kobold_Sraj.pdf

Določanje kazalnikov nizkih pretokov – prikaz na primeru vodomerne postaje Kokra I na reki Kokri

Manca Petek*, Mira Kobold*, Mojca Šraj*

Povzetek

Zaradi neugodne razporeditve padavin tekom leta, suša in z njo povezano pomanjkanje vode v zadnjih letih predstavlja velik problem tudi za Slovenijo. V hidrologiji pojem nizki pretoki pomeni stanje pretoka v vodotoku, ki sledi daljšemu obdobju pomanjkanja padavin. Kot taki so nizki pretoki sestavni del pretočnih režimov vodotokov, njihovo poznavanje pa je pomemben del učinkovitega gospodarjenja z vodami. Nizki pretoki so v prispevku predstavljeni z vidika izračuna glavnih kazalnikov nizkih pretokov. V prispevku smo na primeru merjenih pretokov na vodomerni postaji Kokra I na reki Kokri prikazali izračun omenjenih kazalnikov z uporabo programskega okolja R in paketa *lfstat*, temu pa je dodana še analiza in komentar rezultatov.

Ključne besede: hidrologija, nizki pretoki, kazalniki nizkih pretokov, Kokra, sezonskost, recesijska krivulja

Key words: hydrology, low-flows, low-flow indices, Kokra River, seasonality, recession curve

Uvod

Nizki pretoki in z njimi suša predstavljajo eno od pomembnejših področij hidrologije, suša pa že dolgo časa ni zgolj domena hidrologov in agronomov, saj blaženje njenih posledic zahteva povezovanje različnih strok. Sušo različni viri v literaturi v splošnem interpretirajo kot obdobje pomanjkanja vode in vodnih virov, medtem ko je natančnejša definicija pogosto subjektivna. Beran & Rodier (1985) definirata sušo kot neprekinjeno obdobje pomanjkanja vode in naravnih vodnih virov, bodisi v obliki padavin, pretoka v vodotokih ali stanja podtalnice, ki prizadene širše geografsko območje. V svoji prostorski razširjenosti se suše razlikujejo od poplav, saj običajno prizadenejo bistveno večja območja. Hisdal in Tallaksen (2000) povzameta štiri različne kategorije suše: meteorološko, ki se odraža v daljši odsotnosti padavin in je običajno glavni vzrok za razvoj suše; hidrološko, ki se odraža v nizkih vodostajih površinskih in podzemnih virov vode; kmetijsko, ki se kaže v pomanjkanju potrebne vlažnosti zemljine za rastline; ter socialno-ekonomsko, ki se odraža v povezavi suše s povpraševanjem po določeni dobrini. Pomanjkanje dobrin kot posledica kmetijske suše se namreč kaže v neravnovesju med ponudbo in povpraševanjem. Meteorološka suša se pojavi prva in je povod za razvoj drugih. Sledi ji agrometeorološka ter kot zadnja še hidrološka, saj se pretoki v vodotokih počasneje odzivajo na pomanjkanje padavin. Obnavljanje vodnih virov sledi v obratni smeri, saj se ob pojavu padavin najprej obnovijo vodne zaloge v tleh in vodotokih, kot zadnje pa se obnovijo zaloge podtalnice (Kobold in Sušnik, 2003). Beran in Rodier (1985) definirata razliko med hidrološko sušo in nizkimi pretoki. Glavna značilnost suše je deficit vode za nek določen namen, medtem ko so nizki pretoki sestavni del suše, vendar predstavljajo samo eno od njenih dimenzij, t.j. njeno intenziteto.

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

Posledice spreminjanja vremenskih trendov v Evropi sta v povezavi z nizkimi pretoki analizirala Feyen in Dankers (2009). Ugotovila sta, da naj bi do konca stoletja v skladu z enim od možnih scenarijev prišlo do bistvenih sprememb mehanizmov nizkih pretokov vodotokov; ti naj bi se pojavljali bolj pogosto in v večjih obsegih, predvsem v južni Evropi. Nasprotno pa so Hisdal in sodelavci (2000) ugotovili, da ni jasnih dokazov o tem, da so suše v Evropi postale intenzivnejše in pogostejše, so pa zaznali spremembe trendov padavin v odvisnosti od njihovega prostorskega pojavljanja. Kljub nezanesljivim napovedim pa ti izsledki dajejo še večjo težo učinkovitejšemu upravljanju z vodnimi viri.

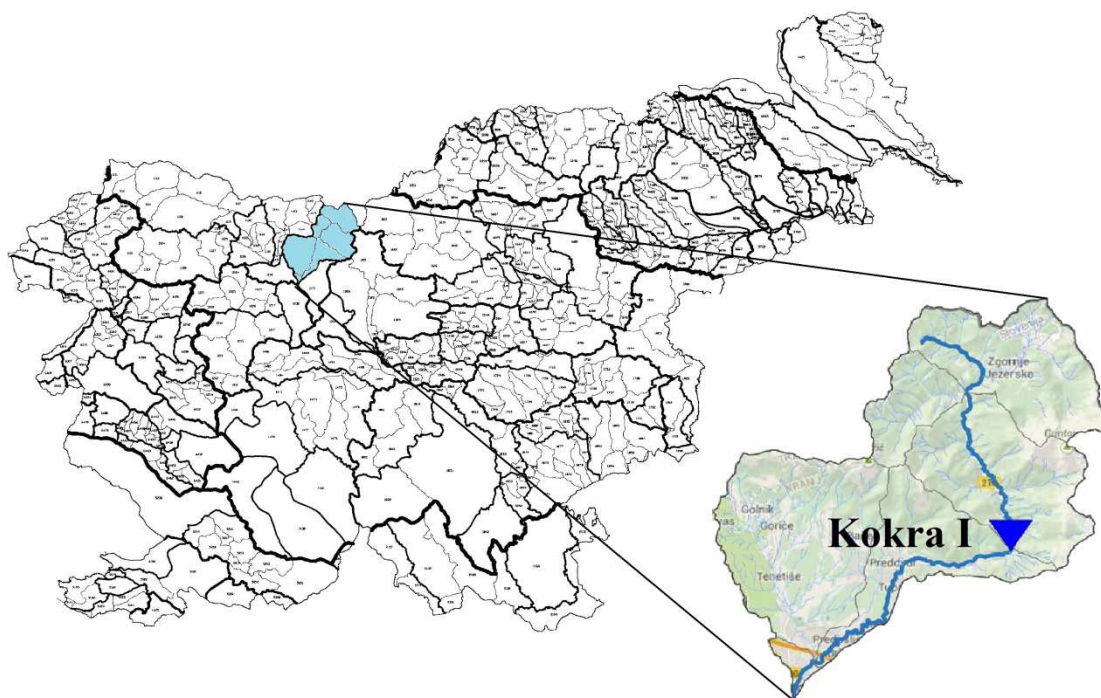
Kazalniki nizkega pretoka so v literaturi večinoma analizirani ločeno, saj predstavljajo kompleksne izračune, osnovane na številnih analizah podatkov. Svetovna meteorološka organizacija je v letu 2009 (WMO, 2009) izdala pomemben dokument na področju analize in napovedovanja nizkih pretokov, t.i. priročnik za določanje in napovedovanje nizkih pretokov (ang. *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*). Priročnik vsebuje opis metodologij, ki se uporabljajo za analize nizkih pretokov in primere njihovih izračunov. Sledi torej napredku hidrologije na tem področju in predstavlja osnovo za pristop k analizi nizkih pretokov. Na osnovi izdanega priročnika (WMO, 2009) je bil na dunajski univerzi BOKU izdelan paket *lfstat* (Koffler & Laaha, 2014), ki znotraj programskega okolja R omogoča izračun kazalnikov nizkega pretoka, njihovo grafično predstavitev in primerjavo. Program R je primeren predvsem zaradi prostega dostopa in odprtosti, kar omogoča integracijo t.i. paketov, ki jih prispevajo uporabniki nenehno rastoče R skupnosti (R-project, 2014).

Analize nizkih pretokov in določanje njihovih kazalnikov so nujne za celostno upravljanje z vodotoki, pravilno gospodarjenje z vodnimi viri, načrtovanje in upravljanje javne oskrbe z vodo, odločanje v zvezi z odvzemi in rabo vode, ohranjanje ekosistema ipd. Rezultati analiz dolgoletnih nizov pa se uporabljajo tudi kot predhodno opozorilo o morebitnih naravnih ali umetnih spremembah v režimu nizkih pretokov.

Podatki in metodologija

Kot ilustracijo uporabe programa R ter znotraj njega paketa *lfstat* za analizo nizkih pretokov, smo uporabili podatke o dnevni vrednosti pretokov z vodomerne postaje Kokra I na istoimenskem vodotoku (slika 1). V analizah so uporabljeni podatki od leta 1957 do leta 2012 (ARSO, 2014). Uporabljen niz je brez manjkajočih vrednosti pretoka, kar omogoča verodostojno in zanesljivo analizo podatkov.

Kokra je alpska reka, ki izvira v Karavankah, na približno 1400 m nadmorske višine. Od tam teče po dolini mimo Preddvora proti Kranju, kjer se izlije v Savo (slika 1). Površina prispevne površine reke do vodomerne postaje Kokra I znaša 113,1 km², sicer pa celotno porečje Kokre meri 224 km² (Globevnik, 1998). Gornvodno od vodomerne postaje Kokra I ima vodotok značilen hudourniški značaj in geološko tu prevladujejo karbonatne kamnine. Od Preddvora do Kranja pa prevladujejo aluvialne naplavine in prodni zasipi, padec struge se bistveno umiri. Hidravlika toka na celotnem vodotoku regulirajo številni jezovi, pragovi, drče, nekaj objektov je namenjeno tudi za energetske izrabo vodnega toka (Globevnik, 1998).



Slika 1: Lokacija obravnavane vodomerne postaje Kokra I na reki Kokri

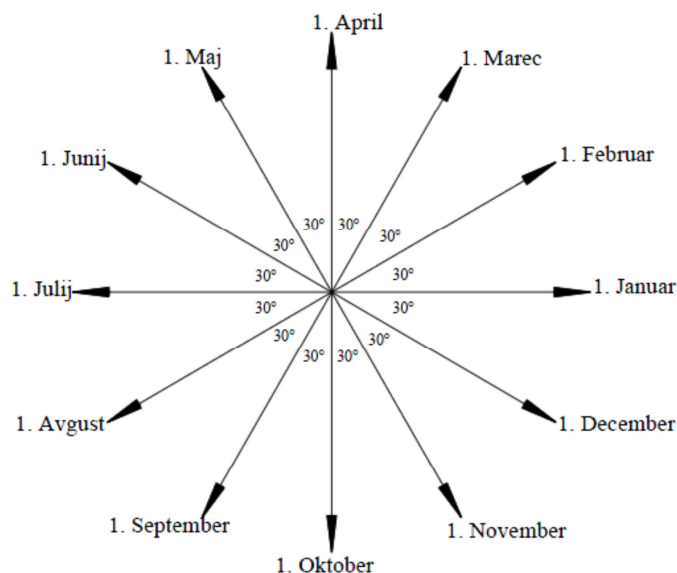
Za izračun kazalnikov nizkega pretoka smo uporabili že prej omenjeno programsko okolje R in temu namenjen paket *lfstat* (Koffler & Laaha, 2014). Med kazalnike nizkih pretokov v prvi vrsti spadajo osnovne statistike nizkih pretokov, kot je npr. srednji pretok Q_{sr} , ki kot tak predstavlja najosnovnejšo vrednost za primerjavo med različnimi vodotoki. V isto skupino spadajo tudi 70-, 90- in 95-odstotni pretok (Q_{xx}), ki predstavljajo pretoke, presežene enak odstotek časa. Druga možnost za njihovo določitev je, da jih razberemo iz krivulj trajanja. Srednji letni n -dnevni minimum (MAM) je ravno tako kazalnik nizkega pretoka in sestavni del številnih hidroloških študij, izračunamo pa ga lahko za različne časovne n -dnevne intervale, ter na koncu določimo povprečno vrednost vseh let (WMO, 2009). V praksi se uporabljajo 1, 7, 10, 30 in 90-dnevni intervali. Za izračun omenjenih kazalnikov smo v programskem okolju R uporabili funkcije *meanflow*, Q_{xx} in MAM , za vse pa smo izbrali tudi ustrezne vhodne parametre (Petek, 2014).

Osredotočili smo se tudi na izračun kazalnikov, povezanih z baznim pretokom, t.j. pretokom, ki izvira iz podzemnih virov. Eden teh je indeks baznega odtoka (BFI), ki predstavlja razmerje med baznim in celotnim pretokom v vodotoku. Vrednost indeksa se lahko giblje med 0 in 1 in je odvisen predvsem od značilnosti porečja (Brilly & Kobold, 1994; Kovačič, 2012). Izračun BFI smo v programskem okolju R izvedli z istoimensko funkcijo. Bazni pretok bistveno vpliva tudi na obliko t.i. krivuljo trajanja pretoka, ki prikazuje odstotek časa, v katerem je določena vrednost pretoka presežena (Smakhtin, 2001). Od baznega pretoka je odvisna tudi oblika krivulje trajanja, izris katere je možen z za to predvideno funkcijo FDC . Od baznega toka in značilnosti upadanja pretoka je odvisna tudi recesijska krivulja, ki predstavlja padajoči del hidrograma in ponazarja stopnjo upadanja posameznega vodotoka z recesijsko konstanto C v dnevih. Večji del analiz na tem področju je izvedla Tallaksen (1995, 1989), WMO (2009) pa sistematično podaja razlike med metodo glavne recesijske krivulje (MRC) in individualnih recesijskih segmentov (IRS). Ustrezno dolžino segmentov in vhodni parameter *peaklevel* lahko v

programu R določimo s pomočjo funkcij *recessionplot* in *seglenplot*. Natančnejši postopek analize recesijskih krivulj pa je predstavljen v WMO (2009) in Petek (2014).

Obdobja v letu, ko ima pretok vodotoka vrednost, manjšo od neke določene meje, imenujemo deficit vodnega toka (WMO, 2009). V povezavi z njegovim določanjem se pogosta uporablja metoda mejne vrednosti, s katero določimo trajanje, volumen, magnitudo in minimalni pretok deficita, ravno tako pa določimo čas njegovega začetka in konca. Ker lahko med posameznimi obdobji deficita pride do medsebojne odvisnosti (npr. obdobje deficita pretrga zgolj krajši padavinski dogodek), se v praksi uporabljajo različni postopki razvrščanja, kot so postopek drsečega povprečja (MA) (Fleig et al., 2006), algoritem zaporednih konic (SPA) (Hisdal & Tallaksen, 2000) ter metoda medčasovnega dogodka (IT) (Fleig et al., 2006), ki se pogosto pojavlja skupaj s postopkom volumskega kriterija (IC) (Hisdal & Tallaksen, 2000). Ustrezno metodo v programu R izberemo z argumentom »pooling«. Za mejno vrednost izberemo eno od statistik Q_{xx} , rezultat analize pa se izpiše v obliki preglednice z rezultati o trajanju, volumnu, intenziteti, minimalnem pretoku ter datum začetka in konca sušnega pretoka.

Pojavljanje nizkih pretokov čez leto smatramo kot sezonsko lastnost posameznega vodotoka. V povezavi s slednjo lahko v programu R s funkcijo *sbplot* določimo pretočni režim vodotoka. Posebej nizkim pretokom namenjena kazalnika sezonskosti pa sta indeks sezonskosti in razmerje sezonskosti. Prvi na enostaven, grafičen način prikaže dan pojava nizkega pretoka na enotskem krogu (slika 2) (Burn, 1997) ter njegovo variabilnost (dolžina vektorja r). Skladno s tem je indeks sezonskosti sestavljen iz kota Θ , ki pomeni dan nastopa nizkega pretoka (v radianih), preračunanega julijanskega dneva D ter dolžine vektorja r . Razmerje sezonskosti pa je numerična predstavitev razmerja med poletnimi in zimskimi nizkimi pretoki; vrednosti manjše od 1 vodotok uvrščajo v poletni režim nizkih pretokov, večje pa v zimskega. Laaha in Blöschl (2006) za ločnico pri izbiri obdobj predlagata 1. april in 1. december. Indeks sezonskosti smo v programu R izračunali s pomočjo funkcije *seasindex*, razmerje sezonskosti pa s funkcijo *seasratio*. Pri slednjem smo upoštevali ločitev obdobj po Laaha in Blöschl (2006).



Slika 2: Grafični prikaz indeksa sezonskosti po mesecih (Srebrnič, 2005)

Rezultati in analiza

V nadaljevanju smo za vodomerno postajo Kokra I najprej izračunali vrednosti statistik za posamezna leta podatkov, povprečne vrednosti statistik za celotno obravnavano obdobje (preglednica 1), povprečne vrednosti statistik za posamezne mesece obravnavanega obdobja (preglednica 2) in prikazali korelacijo med izračunanimi nizi kazalnikov (preglednica 3).

Preglednica 1: Povprečne vrednosti statistik nizkega pretoka in indeksa baznega odtoka BFI za pretoke vodomerne postaje Kokra I (1957-2012)

| MAM_1 [m ³ /s] | MAM_7 [m ³ /s] | MAM_{10} [m ³ /s] | MAM_{30} [m ³ /s] | MAM_{90} [m ³ /s] | Q_{sr} [m ³ /s] | Q_{90} [m ³ /s] | Q_{95} [m ³ /s] | Q_{70} [m ³ /s] | BFI |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|
| 1.345 | 1.413 | 1.447 | 1.645 | 2.267 | 4.304 | 1.715 | 1.564 | 2.293 | 0.630 |

Vrednosti posameznih statistik so relativno majhne, najvišjo vrednost logično dosega srednji pretok, medtem ko je vrednost MAM_1 komaj nad kubičnim metrom pretoka (preglednica 1). Z baznim pretokom je povezan izračunani kazalnik BFI , katerega vrednost (0.630) nakazuje na opazen prispevek podzemnih virov k pretoku. Gre torej za vodotok, ki ima zmožnost vzdrževanja pretoka kljub majhni vodnatosti.

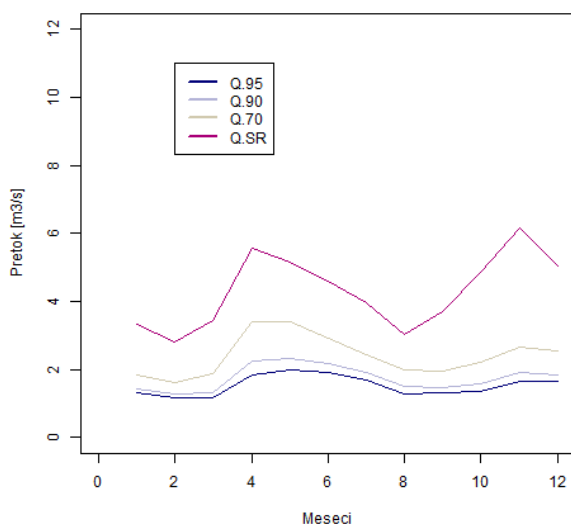
Poleg izračuna statistik za celotno obravnavano obdobje, smo izračun naredili tudi po posameznih mesecih. Rezultati so prikazani v preglednici 2 in na sliki 3. Izris značilnih pretokov različnih pogostosti pojavljanja (slika 3) pokaže značilne ekstreme Kokre skozi leto. Opazen je porast pretoka v mesecu aprilu, ki je posledica taljenja snega v Alpah. Povečan delež pretoka je opazen tudi v novembru in decembru, glavna minimuma pa sta v avgustu in februarju; slednji je posledica snežnih padavin, ki povzročijo zmanjšanje odtoka.

Srednji letni minimumi (MAM) si po velikosti sledijo po vrsti, odvisno od števila izbranih dni za grupiranje podatkov. Med Q_{95} , Q_{90} , MAM_{10} in MAM_{30} ni znatnih razlik, vendar analiza korelacije (preglednica 3) pokaže, da imajo za vsa obravnavana leta podatkov najvišjo stopnjo korelacije srednji letni minimumi med seboj, a povezanost pada z večanjem n ; MAM_1 je tako najtesneje povezan z MAM_7 in najmanj z MAM_{90} , MAM_{30} pa najbolj z MAM_{10} in MAM_{90} , manj pa z MAM_1 . Analogno je tudi pri 70-, 90- in 95-odstotnem ter srednjem pretoku. Med obema skupinama kazalnikov imata najvišjo stopnjo korelacije MAM_{30} in Q_{95} ter MAM_{10} in Q_{95} (preglednica 3).

Preglednica 2 - Izračunane povprečne statistike nizkega pretoka po posameznih mesecih za pretoke vodomerne postaje Kokra I (1957-2012)

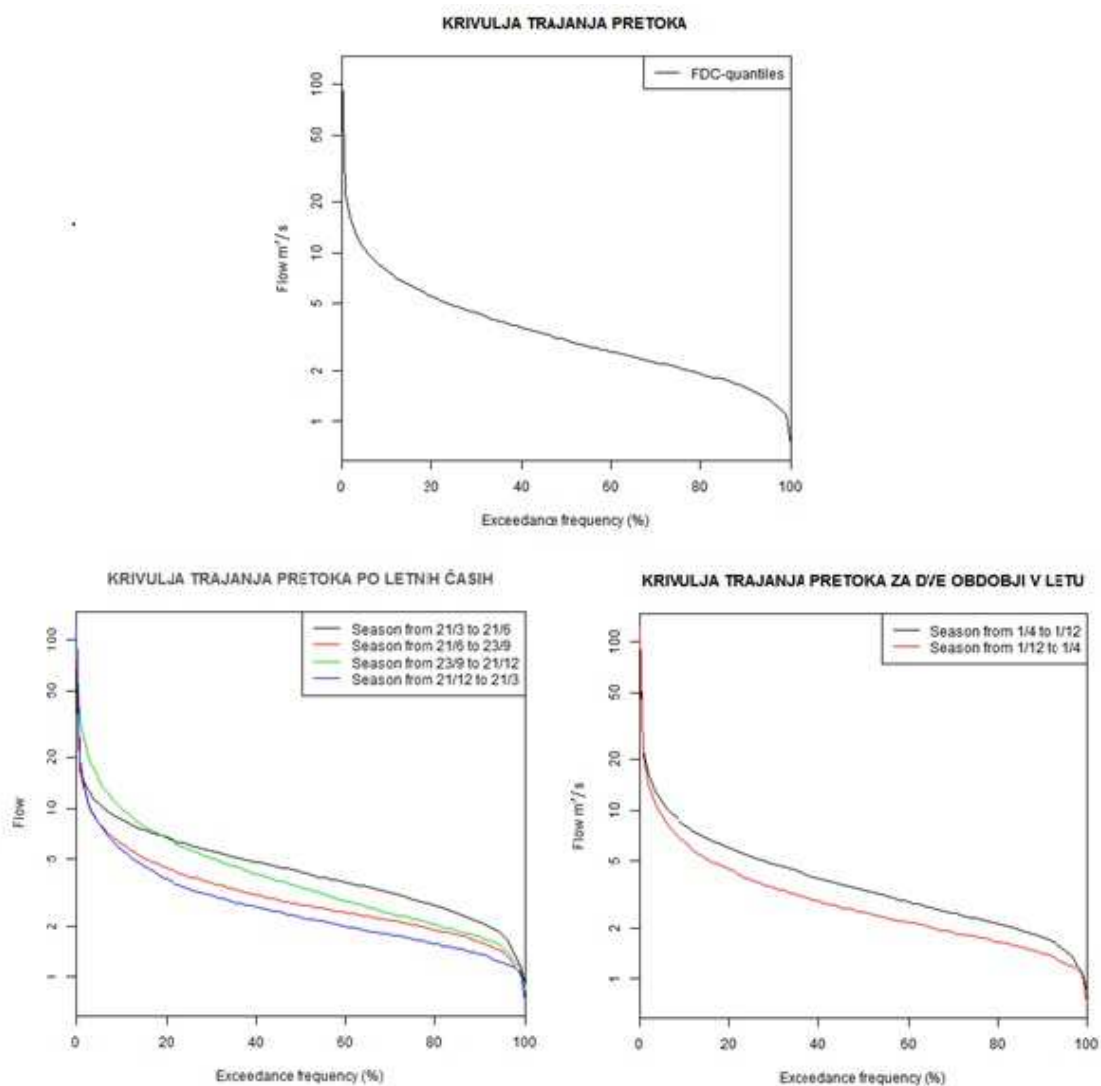
| Mesec | BFI | MAM_1 | MAM_7 | Q_{SR} | Q_{95} | Q_{90} | Q_{70} |
|-------|------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.63 | 1.80 | 1.92 | 3.32 | 1.31 | 1.44 | 1.82 |
| 2 | 0.53 | 2.15 | 2.32 | 2.79 | 1.18 | 1.28 | 1.61 |
| 3 | 0.50 | 2.55 | 2.76 | 3.46 | 1.17 | 1.32 | 1.88 |
| 4 | 0.54 | 2.31 | 2.58 | 5.55 | 1.83 | 2.24 | 3.40 |
| 5 | 0.69 | 1.67 | 1.75 | 5.15 | 1.98 | 2.33 | 3.42 |
| 6 | 0.65 | 1.81 | 1.90 | 4.61 | 1.90 | 2.15 | 2.92 |
| 7 | 0.64 | 2.90 | 3.25 | 3.94 | 1.68 | 1.91 | 2.42 |
| 8 | 0.72 | 3.19 | 3.49 | 3.01 | 1.27 | 1.51 | 1.99 |

| | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|
| 9 | 0.69 | 2.80 | 3.10 | 3.68 | 1.30 | 1.48 | 1.93 |
| 10 | 0.69 | 2.28 | 2.56 | 4.87 | 1.35 | 1.56 | 2.20 |
| 11 | 0.72 | 1.90 | 2.06 | 6.16 | 1.66 | 1.90 | 2.67 |
| 12 | 0.60 | 1.87 | 2.00 | 5.05 | 1.66 | 1.82 | 2.53 |



Slika 3: Prikaz povprečnega 95-, 90-, 70-odstotnega in srednjega pretoka po mesecih za obravnavano obdobje 1957-2012 za vodomerno postajo Kokra I

Izris krivulje trajanja za vodomerno postajo Kokra I za celotno obravnavano obdobje je prikazan na sliki 4a. Iz oblike krivulje trajanja izvemo veliko o naravi toka vodotoka. V hidrologiji nizkih pretokov se za analizo uporablja predvsem del krivulje, ki predstavlja pretoke, manjše od tistih, preseženih 50 odstotkov časa. Položna krivulja v tem delu pove, da podzemni viri znatno pripevajo k pretoku v vodotoku. To lahko v neki meri sklepamo tudi iz slike 4a. Z izrisom krivulj za vsak letni čas posebej (slika 4b) lahko ugotovimo večjo spremenljivost v pretokih skozi leto; najvišji del krivulje, torej največji pretoki, so značilni za pomlad, ko se sneg v višjih legah tali in pride do povečanega odtoka. Zima ima na drugi strani najmanjše pretoke prav zaradi akumulacije snežnih padavin, jesen pa je bolj vodnata od poletja. Krivulji za dve obdobji (slika 4c) v letu (enaki, kot pri računu razmerja sezonskosti) kažeta podobne karakteristike kot slika 4b; obstaja znatna razlika med pretoki v poletnem in zimskem času.



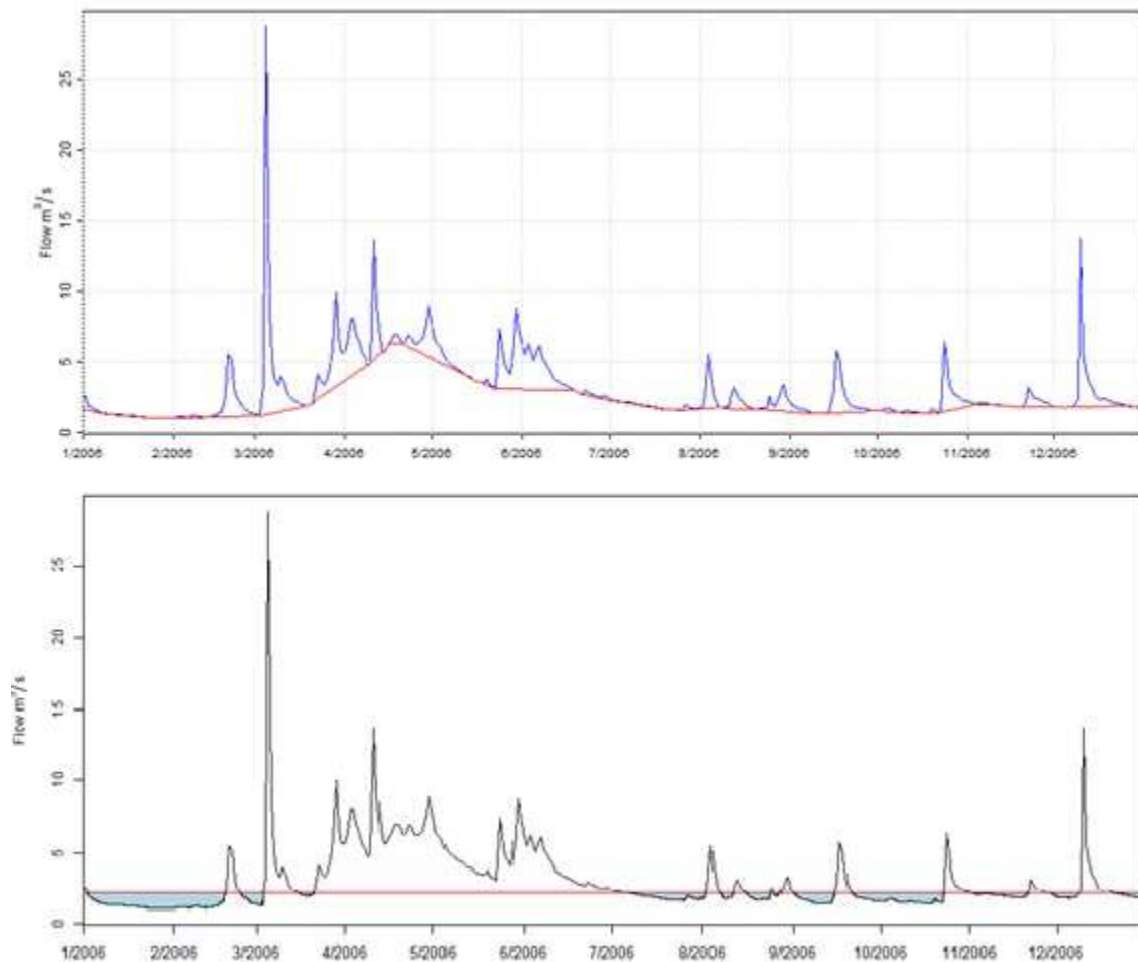
Slika 4: Izris krivulje trajanja za vse podatke o pretokih (a), ločeno na letne čase (b) ter za dve obdobji leta (c)

Preglednica 3 - Korelacijska matrika statistik nizkega pretoka

| | MAM₁ | MAM₇ | MAM₁₀ | MAM₃₀ | MAM₉₀ | Q_{sr} | Q₉₀ | Q₉₅ | Q₇₀ |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| MAM₁ | 1 | 0.933 | 0.921 | 0.838 | 0.65 | 0.501 | 0.801 | 0.862 | 0.608 |
| MAM₇ | 0.933 | 1 | 0.995 | 0.92 | 0.712 | 0.555 | 0.871 | 0.942 | 0.658 |
| MAM₁₀ | 0.921 | 0.995 | 1 | 0.942 | 0.739 | 0.589 | 0.895 | 0.956 | 0.692 |
| MAM₃₀ | 0.838 | 0.92 | 0.942 | 1 | 0.818 | 0.645 | 0.952 | 0.973 | 0.778 |
| MAM₉₀ | 0.65 | 0.712 | 0.739 | 0.818 | 1 | 0.6 | 0.879 | 0.846 | 0.816 |
| Q_{sr} | 0.501 | 0.555 | 0.589 | 0.645 | 0.6 | 1 | 0.684 | 0.654 | 0.767 |
| Q₉₀ | 0.801 | 0.871 | 0.895 | 0.952 | 0.879 | 0.684 | 1 | 0.969 | 0.862 |
| Q₉₅ | 0.862 | 0.942 | 0.956 | 0.973 | 0.846 | 0.654 | 0.969 | 1 | 0.789 |
| Q₇₀ | 0.608 | 0.658 | 0.692 | 0.778 | 0.816 | 0.767 | 0.862 | 0.789 | 1 |

Iz hidrograma na sliki 5 (zgoraj) so razvidna relativno velika nihanja v pretoku, ki se lahko ob padavinskih dogodkih poveča tudi za faktor 10 ali več glede na bazni odtok. Kokra je hudourniški vodotok, ki je močno odvisen tudi od hudourniških pritokov, zato se pretok naglo odzove na padavinske dogodke. Na sliki 5 spodaj je prikazan isti hidrogram z zaznamimi obdobji deficita pretoka. Po priporočilu WMO (2009) je bila v raziskavi za določitev deficita uporabljena metoda mejne vrednosti skupaj s postopkom drsečega povprečja (MA) in medčasovnega dogodka (IT). Prvi naj bi bil uporaben tako za vodotoke, ki se na spremembe v členih vodne bilance odzivajo hitreje, kot za tiste, katerih odzivni čas je daljši. Za mejno vrednost je bil izbran pretok Q_{70} .

Za mejni pretok Q_{70} smo izračunali tudi vrednost recesijske konstante C po metodi glavne recesijske krivulje (MRC) in po metodi individualnih recesijskih segmentov (IRS) z upoštevanjem različnih dolžin segmentov upadanja (preglednica 4). Ugotovili smo, da gre v primeru Kokre za najmanjša odstopanja med rezultati obeh metod pri upoštevanju dolžine segmentov 6 dni, zato smo to dolžino uporabili tudi v nadaljnjih analizah. Največje odstopanje pa kaže dolžina segmentov 4 dni (Petek, 2014).

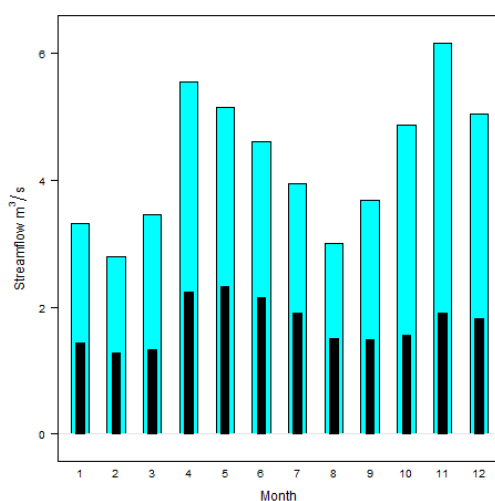


Slika 5: Primer hidrograma z baznim odtokom (a) in hidrograma z zaznamimi obdobji deficita pretoka (b) za leto 2006

Preglednica 4 - Izračun recesijskih konstant po metodah MRC in IRS za različne dolžine segmentov (mejni pretok Q_{70})

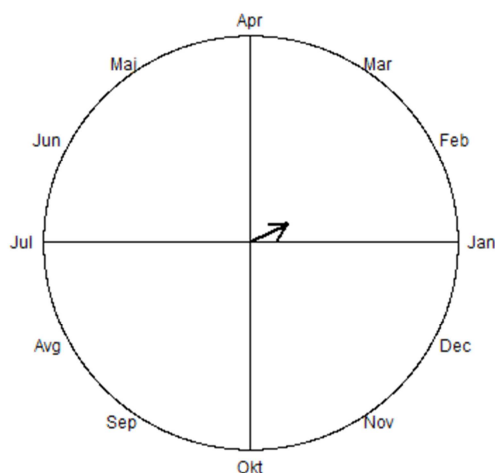
| Dolžina segmentov | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|------|------|------|------|
| C_{MRC} | 12.6 | 12.3 | 12.5 | 13.4 |
| C_{IRS} | 17.8 | 14.4 | 13.2 | 14.4 |

V skladu s prikazanim režimom toka na sliki 6 (funkcija *splot*) smo Kokro uvrstili v skupino alpskega sredogorskega snežno-dežnega režima. Zanj je značilno, da sta si zimski in poletni minimum podobna, več vode pa se pojavlja med aprilom in junijem ter v novembru (Hrvatini, 1998), kar smo ugotovili že iz osnovnih statistik. Nižji vodostaji so značilni med julijem in septembrom ter decembrom in marcem, ko so tovrstni vodotoki pod vplivom zimskih minimumov.



Slika 6: Pretočni režim reke Kokre

Zadnji med izračunanimi kazalniki so kazalniki sezonskosti. Sem spada tudi že prej omenjen indeks sezonskosti, ki je grafično prikazan na sliki 7. Puščica uvršča Kokro med vodotoke, ki imajo dan nastopa nizkega dogodka konec januarja, vendar kratka dolžina vektorja r nakazuje na to, da je variabilnost v pojavljanju nizkih pretokov čez leto velika.



Slika 7: Grafični prikaz indeksa sezonskosti

Razmerje sezonskosti predstavlja razmerje med poletnimi in zimskimi pretoki (enačba 1).

$$\frac{Q_{95}(1.4.-30.11.)}{Q_{95}(1.12.-31.3.)} = 1.1896 \quad (1)$$

Izračunana vrednost razmerja sezonskosti za Kokro je večja od 1, kar tako kot prejšnji kazalniki, postavlja Kokro v prevladujoč zimski režim nizkih pretokov. Vrednost Q_{95} je bila izbrana v skladu z literaturo (Laaha in Blöschl, 2006). Vrednost razmerja sezonskosti je pričakovana, saj Kokra spada med vodotoke, katerih pretoki so zaradi zimskih padavin v obliki snega, v hladni polovici leta manjši.

Zaključki

V prispevku smo predstavili najpogosteje uporabljene kazalnike nizkih pretokov, ki se uporabljajo v hidroloških študijah po svetu. Podatke o pretokih za primer vodomerne postaje Kokra I, dostopne na spletni strani Agencije za okolje Republike Slovenije, smo s programskim orodjem R ter paketom *lfstat* analizirali s pomočjo različnih funkcij in rezultate predstavili v obliki kazalnikov nizkega pretoka.

Kokra je relativno majhen vodotok, ki se hitro odziva na padavine in je pod vplivom hudourniških pritokov, zato so vrednosti osnovnih statistik, kot so MAM_1 , MAM_7 , Q_{SR} , Q_{70} , Q_{90} in Q_{95} , nizke. Njihove vrednosti se v manjšem obsegu spreminjajo med leti ter tudi povprečno med meseci. Pri ugotavljanju povezav med kazalniki je bila najvišja stopnja korelacije ugotovljena med srednjimi letnimi minimumi (MAM). Relativno visoka vrednost indeksa baznega odtoka BFI kaže, da je Kokra vodotok, ki ima kljub majhni vodnatosti zmožnost vzdrževanja pretoka zaradi opaznega prispevka podzemnih virov. V prispevku so prikazane tudi spremembe režima pretoka med letnimi časi, ki imajo za posledico različne oblike krivulje trajanja. Za izračun deficita vodnega toka smo primerjali dve metodi in sicer metodo drsečega povprečja (MA) in metodo medčasovnega dogodka (IT) ter njun vpliv na končni izračun. Ugotovili smo, da gre v primeru Kokre za najmanjša odstopanja med rezultati obeh metod pri upoštevanju dolžine segmentov 6 dni, največje odstopanje pa kaže dolžina segmentov 4 dni. V nadaljevanju je bil ugotovljen zimski režim nizkih pretokov z razmerjem med zimskimi in poletnimi pretoki večjim od 1 in nastopom dneva nizkega pretoka v januarju.

Kot orodje za obdelavo podatkov na področju analize nizkih pretokov in iskanje povezav med kazalniki se je kot zadovoljiv izkazal program R in nizkim pretokom namenjen paket *lfstat*. Ta ima sicer nekaj manjših pomanjkljivosti, predvsem pri personalizaciji grafičnih prikazov in pisanju rezultatov v zankah, kjer se v hitrosti ne izkaže najbolje. Kljub temu pa lahko ugotovimo, da orodje nudi odličen pripomoček za kompleksne izračune na dolgih nizih podatkov.

Literatura

- ARSO (2014). Arhiv površinskih voda. Agencija Republike Slovenije za okolje. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (Pridobljeno 6. 6. 2014.)
- Beran, M., Rodier, J.A. (1985). Hydrological aspects of drought: a contribution to the International Hydrological Programme. Paris, Unesco.

- Burn, D.H. (1997). Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures, *Journal of Hydrology* 202, 212–230.
- Feyen, L., Dankers, R. (2009). Impact of global warming on streamflow drought in Europe, *Journal of Geophysical research*, 114, p. 1-17.
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., and Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics, *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 535–552. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/535/2006/hess-10-535-2006.pdf> (24.10.2014)
- Globevnik, L. (ur.). (1998). Načrt urejanja povodja, vodnogospodarsko načrtovanje v okvirih približevanja Evropski uniji: načrt urejanja povodja Kokre, Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, 103 str.
- 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 str.
- Hrvatini, M. (1998). Pretočni režimi v Sloveniji, *Geografski zbornik* 38, 59-87.
- Kobold, M., Brilly, M. (1994). Low flow discharge analysis in Slovenia. FRIEND '97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource, 119-131.
- Kobold, M., Sušnik, M. (2003). Hidrološke razmere površinskih voda opazovanih slovenskih rek v letu 2003. Mišičev vodarski dan, 2003: 1-9.
- Koffler, D. in Laaha, G. (2014). Package '*lfstat*', Calculation of Low Flow Statistics for daily stream flow data, 37 str. <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. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 105 str.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows, *Hydrological Processes* 18, 3851–3878.
- Petek, M. (2014). Analiza nizkih pretokov vodotokov v Sloveniji. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 68 str.
- R-project, (2014). R software, 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. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 137 str.
- Tallaksen, L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis, *Journal of Hydrology* 165, 349–370.
- Tallaksen, L.M. (1998). Analysis of time variability in recessions, FRIENDS in Hydrology IAHS Publication, 187, p.85-96
- WMO (2009). Manual of Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50. (WMO-No. 1029). Ženeva, 136 str.