

Analiza nizkih pretokov porečja Ljubljance

Klaudija Sapač*, Simon Rusjan*, Mojca Šraj*

Povzetek

V prispevku so predstavljeni rezultati analize nizkih pretokov na 11 vodomernih postajah na reki Ljubljanci in njenih pritokih. Za vsako od postaj smo izračunali nabor različnih kazalnikov nizkih pretokov, ki jih lahko razdelimo v tri skupine: statistike nizkih pretokov, kazalniki sezonskosti nizkih pretokov in recesijska analiza hidrograma. Rezultate, ki smo jih dobili za posamezno postajo, smo interpretirali v smislu povezanosti površinske vode s podzemnimi vodami in obsežnostjo zalog vode na posameznem porečju ter posamezne kazalnike primerjali med seboj. Ugotovili smo, da vsi kazalniki kažejo na največjo povezanost površinske vode s podzemno na postajah Malni (Malenščica) in Bistra (Bistra), medtem ko je najslabša povezava na postaji Mali Otok (Nanoščica). V splošnem so uporabljeni kazalniki med seboj skladni v smislu podobne razlage vpliva hidrogeoloških lastnosti na nizke pretoke, kljub temu pa smo pri nekaterih postajah ugotovili neskladnosti posameznih kazalnikov. Zaradi slednjih je priporočljivo na hidrološko in geološko nehomogenih porečjih, kot je tudi porečje Ljubljance, analizirati večje število kazalnikov, da dobimo celovitejši pogled na razmere nizkih pretokov.

Ključne besede: nizki pretoki, porečje reke Ljubljance, kazalniki nizkih pretokov

Keywords: low flows, Ljubljana river catchment, low-flow indices

Uvod

Nizki pretoki so po definiciji pretoki v času, ko dlje časa ni padavin in veljajo za sezonski pojav ter sestavni del pretočnih režimov vseh rek (WMO, 1974; Smakhtin, 2001). V povezavi z nizkimi pretoki nas ne zanimajo samo njihove vrednosti pretokov, temveč nas pogosto zanima tudi, kdaj v letu se najpogosteje pojavljajo, kako dolgo trajajo, kolikšen del pretoka predstavlja bazni odtok ipd. Posledično so bili v preteklosti razviti številni kazalniki nizkih pretokov in metode za njihovo določitev.

Med osnovna in nepogrešljiva orodja v hidrologiji ter upravljanju vodnih virov spadajo krivulje trajanja pretokov (angl. *flow duration curve*, FDC), ki izražajo razmerje med vrednostjo pretoka in odstotkom časa, ko je bil ta pretok presežen. Pri proučevanju nizkih pretokov je pomemben predvsem del krivulje s pretoki, ki so bili preseženi 50 % časa ali več (pretoki, manjši od Q_{50}). V nekaterih državah (npr. Združeno kraljestvo), se FDC uporabljajo za določanje zahtev za zagotavljanje ekološko sprejemljivih pretokov (npr. Q_{95}) (Acreman in Dunbar, 2004). Veliko informacij o pretočnih razmerah na porečjih pa vsebujejo tudi razmerja med posameznimi vrednostmi pretokov iz krivulje trajanja oziroma njena oblika. Tako se na primer razmerje Q_{90}/Q_{50} lahko uporablja kot kazalnik deleža vode, ki prispeva k površinskemu toku iz podzemnih virov (npr. Caissie in Robichaud, 2009). Tudi indeks baznega odtoka (angl. *baseflow index*, BFI) je kazalnik povezanosti med podzemno in površinsko vodo oziroma med količino baznega odtoka v celotnem odtoku in je eden najpogosteje uporabljenih kazalnikov nizkih pretokov. Beck et al. (2013) so ga izračunali za več kot 3000 porečij na svetu za določitev globalnih vzorcev in razvoj modela za oceno BFI na nemerjenih porečjih. Poleg omenjenih kazalnikov lahko v t.i. skupino statističnih kazalnikov uvrstimo še srednje letne n -dnevne minimalne pretoke (ang. *n-day mean annual*

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

minima, MAMn). Ta vrsta kazalnikov se v nekaterih državah uporablja za določanje pogojev rabe vode; na primer v Združenem kraljestvu za izdajanje dovoljenj za odvzem vode uporabljajo kazalnik MAM7 (Smakthin, 2001).

Pri obravnavi nizkih pretokov je pomembno vedeti tudi, kdaj v letu se najpogosteje pojavljajo (sezonskost). Indeks sezonskosti in razmerje sezonskosti sta dva načina, kako lahko določimo obdobje pojavnosti nizkih pretokov oziroma prevladujoči del leta z nizkimi pretoki. Laaha in Blöschl (2006) sta omenjena kazalnika uporabila na več kot 300 porečjih za regionalizacijo nizkih pretokov v Avstriji.

V hidrologiji se pogosto uporabljajo tudi analize recesijskih krivulj, to je padajočih delov hidrograma, ki so tesno povezane z analizami baznega odtoka. Oblika padajočega dela hidrograma vsebuje informacijo, kako hitro bo pretok upadal, če dlje časa ne bo padavin, na kar vplivajo predvsem geološke lastnosti porečij (Smakthin, 2001).

Za 11 vodomernih postaj na porečju Ljubljanice in njenih pritokov so v prispevku predstavljeni rezultati naslednjih kazalnikov: indeksa baznega odtoka (BFI), srednjih n-dnevni letnih minimumov ($n=1, 7, 30, 90$), Q_{50} , Q_{70} , Q_{90} , indeksa in razmerja sezonskosti ter recesijskih konstant, ki so rezultat analize padajočega dela hidrograma. Rezultati so nato interpretirani v smislu povezanosti površinske vode s podzemnimi vodami in obsežnostjo zaloga vode na posameznem porečju. Kobold in Brilly (1994), ki sta izvedla analize nizkih pretokov za 11 porečij v Sloveniji, sta namreč ugotovila, da imajo kazalniki nizkih pretokov najboljšo povezavo ravno z geologijo porečja.

Metode

Izračuni kazalnikov so bili narejeni s pomočjo programa R (R Core Team, 2018) in paketa *lfstat* (Koffler et al., 2016). Za analizo nizkih pretokov na porečju Ljubljanice smo uporabili podatke o dnevni pretokih (ARSO, 2018) za 11 vodomernih postaj (Preglednica 1, Slika 1). V literaturi ni enotnega priporočila glede dolžine podatkovnega niza, potrebnega za analizo nizkih pretokov, zato smo za izračun kazalnikov izbrali celotno razpoložljivo obdobje podatkov za posamezno vodomerno postajo. Vključitev vodomerne postaje v analizo je temeljila na merilih, da so podatki na voljo vsaj za 25-letno obdobje z dodatnim pogojem, da je postaja obratovala v letu 2016, ki je bilo v času analize zadnje leto z razpoložljivimi podatki, ter da v podatkovnem nizu ne manjkajo podatki za več kot 5 let zaporedoma. Podatki o dolžini niza za posamezno vodomerno postajo so prikazani v Preglednica 1.

Za vsako od izbranih lokacij smo izračunali nabor kazalnikov nizkih pretokov. Indeks baznega odtoka (BFI) predstavlja delež volumna baznega odtoka v celotnem odtoku in lahko dosega vrednosti med 0 in 1, pri čemer so vrednosti bližje 0 značilne za porečja z bolj hudourniški in/ali neprepustno geološko podlago, medtem ko so vrednosti bližje 1 bolj značilne za porečja z dobro prepustno geološko podlago in velikimi zalogami vode v porečju (WMO, 2008). Podroben postopek izračuna je predstavljen v WMO (2008). Na enak način interpretiramo tudi razmerje Q_{90}/Q_{50} , ki ga izračunamo na podlagi vrednosti pretokov iz krivulje trajanja (FDC). Poleg omenjenega razmerja smo v prispevku za vsako od postaj izračunali še vrednosti pretokov, ki so v obravnavanih obdobjih bili preseženi 50, 70 in 90 % časa (Q_{50} , Q_{70} , Q_{90}).

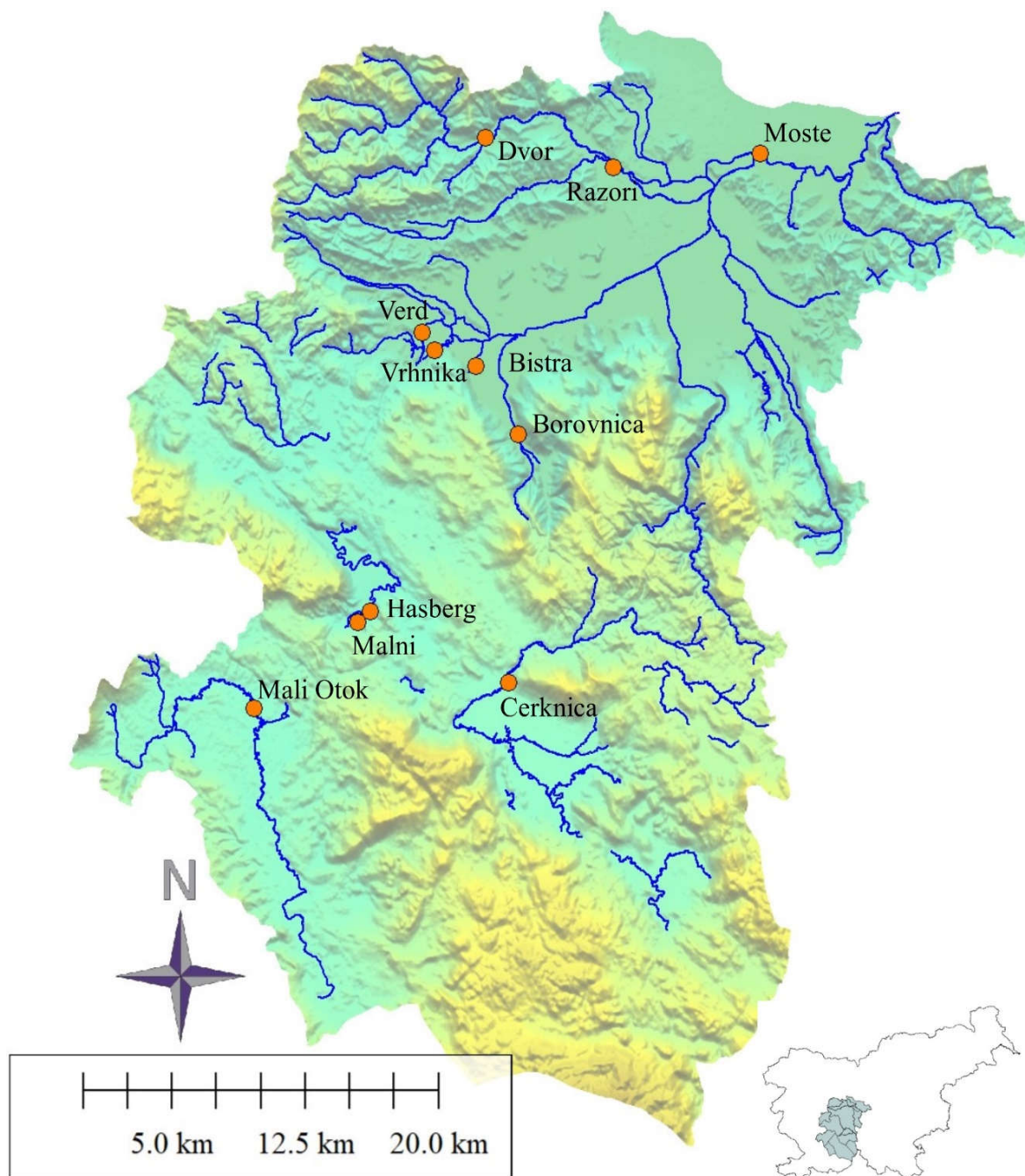
Preglednica 1 – Seznam vodomernih postaj, vključenih v analizo nizkih pretokov

Šifra vodomerne postaje	Ime postaje	Vodotok	Obdobje podatkov	Q_{sr} [m^3/s]
-------------------------	-------------	---------	------------------	----------------------

5030	Vrhnika	Ljubljana	1961-2016	24,00
5078	Moste I	Ljubljana	1924-2016	55,05
5240	Verd I	Ljubljana	1952-2016	6,76
5270	Bistra	Bistra	1970-2016	5,04
5330	Borovnica	Borovnišica	1954-2016	7,49
5500	Dvor	Gradašica	1979-2016	2,31
5540	Razori	Šujica	1954-2016	1,43
5770	Cerknica I	Cerknišica	1954-2016	1,03
5840	Mali Otok	Nanošica	1989-2016	1,48
5880	Hasberg	Unica	1926-2016	22,20
5910	Malni	Malenšica	1961-2016	6,56

Naslednji kazalniki, ki smo jih izračunali, so srednji letni minimalni pretoki (MAM) za trajanja 1, 7, 30 in 90 dni, ki so pogosto uporabljeni kazalniki pri analizah nizkih pretokov (WMO, 2008). Izračunamo jih tako, da za vsako leto obravnavanega obdobja s pomočjo drsečega povprečja računamo povprečja za bloke pretokov, ki so dolgi n-dni, pri čemer smo za n vzeli 1, 7, 30 in 90. Srednja vrednost letnega minimalnega pretoka za določeno trajanje v obravnavanem obdobju je nato enaka srednji vrednosti MAMn posameznih let. MAM1 je dejansko povprečje absolutnih letnih minimumov. Da smo omogočili medsebojno primerjavo kazalnikov MAMn in vrednosti s krivulje trajanja med posameznimi postajami, smo izračunane pretoke delili s srednjim pretokom na posamezni postaji (Preglednica 1). Pri MAMn smo izračunali še razmerja MAMn/MAM7, ki smo jih zrisali na graf, na podlagi katerega smo ocenili gradient med posameznimi razmerji. Gustard et al. (1992) so namreč s tem postopkom ugotovili, da večji gradienti med MAMn/MAM7 kažejo na manjši doprinos podzemnih virov vode k površinskim vodam in obratno.

Časovno komponento nizkih pretokov v smislu njihove pojavnosti v delu leta lahko opišemo z uporabo indeksa in razmerja sezonskosti (Laaha and Blöschl, 2006). Medtem ko je indeks sezonskosti, ki ga grafično predstavimo v polarnem koordinatnem sistemu, kazalnik z bolj podrobnimi informacijami o pojavnosti nizkih pretokov, je kazalnik razmerja sezonskosti bolj splošen, ker daje informacijo samo o tem, ali nizki pretoki prevladujejo v poletnem ali zimskem času. Slednje nam pove vrednost razmerja med pretokom, preseženim 95 % časa v poletnem delu leta, in pretokom, preseženim 95 % časa v zimskem delu leta. Tako vrednosti razmerja sezonskosti, ki so manjše od 0, kažejo, da na porečju nizki pretoki prevladujejo poleti, vrednosti, večje od 1 pa, da dominirajo pozimi. Indeks sezonskosti da za rezultat dan v letu (D), ko se statistično gledano pojavljajo nizki pretoki. Poleg tega je rezultat tudi vektor r, ki lahko doseže vrednosti med 0 in 1. Vrednosti vektorja bližje 0 kažejo na veliko spremenljivost datuma pojava, medtem ko se z vrednostmi proti 1 ta spremenljivost zmanjšuje.



Slika 1 – Območje porečja Ljubljance z označenimi izbranimi vodomernimi postajami, katerih podatke o dnevni pretokih smo uporabili v analizi nizkih pretokov

Informacijo o tem, kako občutljivo je porečje na obdobje brez padavin in kako hitro bo upadal pretok, lahko dobimo z analizo padajočega dela hidrograma (angl. *hydrograph recession analysis*). Pri recesijski analizi želimo modelirati padajoči del krivulje hidrograma tako, da se čim bolj prilega analitičnemu izrazu funkcije Q_t , ki jo lahko opišemo z eksponentno enačbo 1. reda (Preglednica 2), pri čemer je Q_t odtok iz zaloge vode v porečju brez dotoka. V literaturi najdemo različne metode za parametrizacijo in identifikacijo lastnosti padajočega dela hidrograma, v prispevku pa podajamo rezultate po metodah glavne recesijske krivulje (angl. master recession curve, MRC) in metode z izračunom parametrov za posamezne segmente padajočega dela hidrograma (angl. individual recession segment,

IRS). Za izdelavo glavne recesijske krivulje (MRC) je v paketu lfstat (Kofler et al., 2016) uporabljena korelacijska metoda, pri kateri se na graf zrišejo točke (Q_{t-1} , Q_t) (Langbein, 1938), nato pa se skozi točke zriše prilegajoča premica po metodi najmanjših kvadratov, ki ima naklon k in presečišče navpične osi v izhodišču koordinatnega sistema. Recesijska konstanta C , glavni rezultat recesijske analize, se nato izračuna kot razmerje med spremembo časa in naravnim logaritmom naklona prilegajoče premice (Preglednica 2). Pri metodi IRS je postopek enak, s to razliko, da se za vsak posamezen segment upadanja hidrograma posebej izračuna recesijska konstanta. Končni rezultat je potem srednja vrednost vseh posameznih recesijskih konstant. V prispevku prikazujemo rezultate, ki so bili izračunani z naslednjimi računskimi kriteriji, priporočenimi v literaturi (npr. Tallaksen, 1989, Smakthin, 2001, WMO, 2008): dolžina segmenta 5 dni in začetek analize padajočega dela hidrograma pri Q_{70} , ki je bil izračunan za celo obdobje podatkov. Računski kriteriji in njihov vpliv na vrednosti recesijskih konstant so bili podrobneje obravnavani v Sapač et al. (2019).

Pregled kazalnikov nizkih pretokov, uporabljenih v tem prispevku, je z enačbami ali kratkim opisom postopka za izračun predstavljen v preglednici 2.

Preglednica 2 – Postopki določitve oziroma izračuna kazalnikov nizkih pretokov, uporabljenih v tem prispevku

Kazalnik	Postopek določitve in/ali enačba za izračun
BFI	$BFI = \frac{V_{base}}{V_{total}}$, pri čemer sta V_{base} in V_{total} volumen baznega oziroma celotnega pretoka v strugi reke (Gustard et al., 1992).
Q_{50} , Q_{70} , Q_{90} , Q_{90}/Q_{50}	Pretok, ki je presežen 50, 70, 90 % obravnavanega časa.
MAMn	Minimalna vrednost povprečij pretokov "n-tih" zaporednih dni v letu.
Razmerje sezonskosti	$SR = \frac{q_{95S}}{q_{95W}}$, pri čemer sta q_{95S} in q_{95W} pretoka, presežena 95 % časa poleti (1. april–30. november) oziroma pozimi (1. december–31. marec).
Indeks sezonskosti	$\theta = \frac{D2\pi}{365}$ in $\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$, pri čemer je D zaporedni dan po julijanskem koledarju (od 1 do 365/366), r in θ sta polarni, x in y pa kartezični koordinati polarnega koordinatnega sistema (Laaha and Blöschl, 2006).
Recesijske konstante	$Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{C}}$ in $C = \frac{\Delta t}{\ln(k)}$, pri čemer je Q_0 začetni pretok, Q_t pretok v času t , C recesijska konstanta, k pa naklon prilegajoče se premice na grafu odvisnosti Q_t in Q_{t-1} (Tallaksen, 1995, WMO, 2008).

Rezultati in diskusija

Rezultati kazalnikov nizkih pretokov za vsako od 11 obravnavanih vodomernih postaj na porečju Ljubljanske so zbrani v Preglednica 3. Lahko opazimo, da kazalniki za postaji Malni in Bistra izkazujejo največji delež podzemnih voda pri površinskemu toku. Porečji Malenščice in Bistre se nahajata na pretežno karbonatnih kamninah z razpoklinsko poroznostjo, za katere je značilna visoka prepustnost (Petrič, 2010).

Preglednica 3 – Rezultati kazalnikov nizkih pretokov. Pri vsakem od kazalnikov so krepko označene vrednosti, ki glede na vrednost kazalnika izkazujejo najboljšo povezavo s površinskimi vodami in največje zaloge vode v porečju, podčrtano pa vrednosti, ki izkazujejo najmanjše zaloge vode v porečju ter slabo povezavo s podzemno vodo. Pri kazalnikih MAM1, MAM7, MAM30, MAM90, Q₅₀, Q₇₀, Q₉₀ so podane relativne vrednosti glede na dolgoletni srednji pretok.

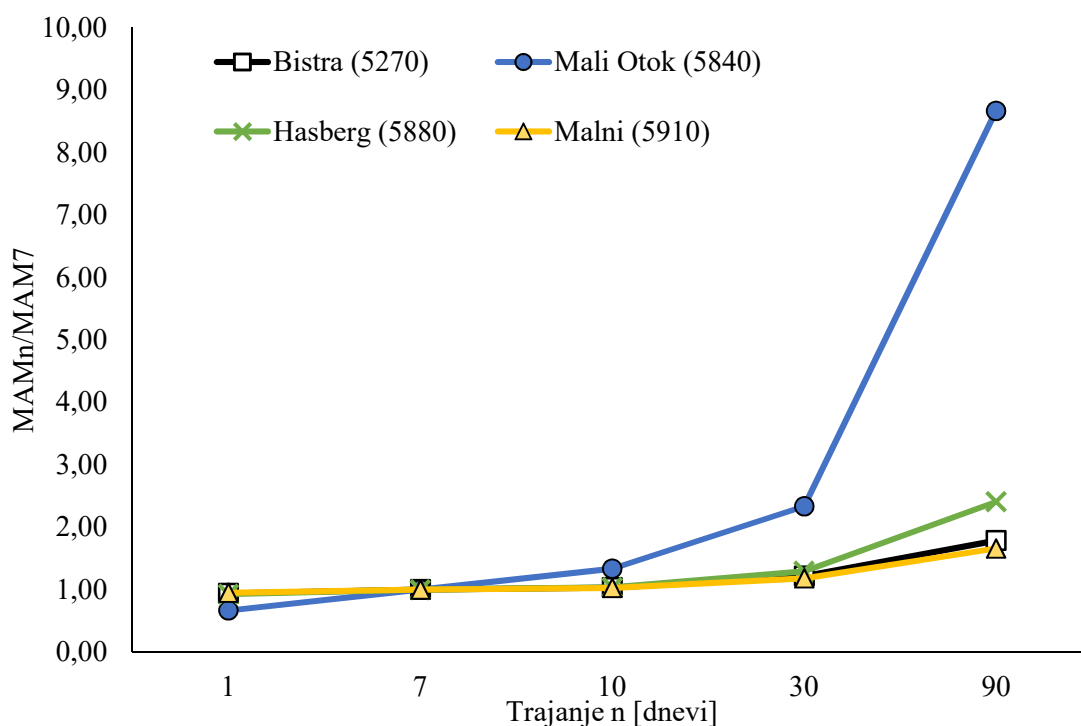
Kazalnik	Vodomerna postaja										
	Vrhnika	Moste I	Verd I	Bistra	Borovnica	Dvor	Razori	Cerknica I	Mali Otok	Hasberg	Malni
BFI	0.55	0.56	0.67	0.85	0.47	0.5	0.47	<u>0.41</u>	<u>0.22</u>	0.63	0.91
MAM1	0.10	0.14	0.14	0.28	0.14	0.21	0.22	<u>0.08</u>	<u>0.01</u>	0.09	0.33
MAM7	<u>0.11</u>	0.16	0.15	0.30	0.15	0.23	0.23	0.13	<u>0.02</u>	0.10	0.35
MAM30	<u>0.16</u>	0.22	0.20	0.37	0.19	0.28	0.28	0.21	<u>0.05</u>	0.13	0.41
MAM90	<u>0.34</u>	0.39	0.37	0.54	0.36	0.38	0.42	0.36	<u>0.18</u>	0.25	0.58
Q ₅₀	0.60	0.68	0.79	1.01	<u>0.52</u>	0.59	0.57	0.58	<u>0.30</u>	0.61	1.06
Q ₇₀	0.31	0.40	0.49	0.78	<u>0.29</u>	0.40	0.40	0.34	<u>0.12</u>	0.31	0.84
Q ₉₀	0.14	0.20	0.22	0.43	0.17	0.26	0.23	0.15	<u>0.02</u>	<u>0.13</u>	0.46
Q ₉₀ /Q ₅₀	0.23	0.3	0.28	0.43	0.32	0.43	0.4	0.26	<u>0.07</u>	<u>0.21</u>	0.43
SI _θ	4.32	4.21	4.28	4.38	4.27	4.12	<u>4.03</u>	4.24	<u>3.79</u>	4.3	4.56
SI _r	0.66	0.71	0.63	0.74	0.47	0.63	0.42	0.65	0.66	0.51	0.7
SR	0.69	0.56	0.56	0.49	0.69	0.76	0.82	0.54	0.11	0.51	0.64
RK MRC	7.65	9.55	9.09	20.17	8.01	11.82	8.30	<u>3.46</u>	<u>2.54</u>	10.95	18.99
RK IRS	9.86	13.06	12.77	28.24	13.07	16.78	10.91	<u>5.63</u>	<u>3.41</u>	12.62	22.70

RK – recesijska konstanta.

Postaja Mali Otok je pri vseh kazalnikih prepoznana kot ena od tistih z najmanjšim deležem podzemne vode oziroma z najslabšo povezanostjo podzemnih in površinskih voda, kar lahko pojasnimo s prevladujočimi neprepustnimi kamninami na porečju (Kolbezen in Pristov, 1998). Pri postajah Cerknica I podobno izkazujejo kazalniki BFI, MAM1 in recesijske konstante, pri postaji Vrhnika so to MAM7, MAM30 in MAM90 in pri postaji Borovnica Q₅₀ in Q₇₀.

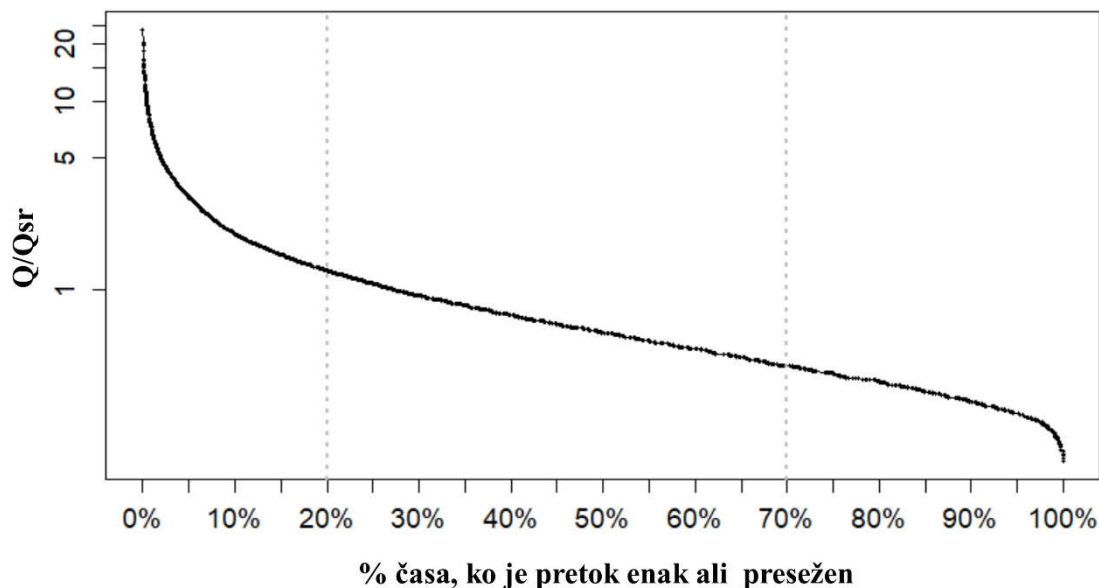
V nadaljevanju so na kratko povzeti rezultati posameznih kazalnikov. Izračunane vrednosti BFI v povprečju kažejo na približno 50-odstotni delež baznega odtoka v skupnem odtoku. Več kot 85-odstotni delež je opazen pri postajah Malni in Bistra, medtem ko pri Malem Otoku delež znaša približno petino. Relativno glede na srednjo vrednost pretoka izraženi MAM_n se gibljejo v razponu $MAM1/Q_{sr} = 0,01$ pri Malem Otoku do $MAM90/Q_{sr}=0,58$ pri postaji Malni. Grafi relativnih vrednosti MAM_n glede na vrednost MAM7 (

Slika 2) potrjujejo, da je Mali Otok postaja z najmanjšim doprinosom podzemne vode, medtem ko sta Malni in Bistra postaji z največjim doprinosom podzemne vode k površinskemu toku. Zanimivo je, da je naslednja postaja, ki ima glede na ta kazalnik najmanjši doprinos podzemne vode, postaja Hasberg, ki je geografsko zelo blizu postaje Malni. Razlog za razlike med sosednjima postajama lahko razložimo na podlagi ugotovitev Ravbar et al. (2012), ki so s sledilnimi testi ugotovili, da je med obema izvirooma bistvena razlika v dinamiki napajanja, slednja pa je pogojena predvsem s hidrogeološkimi lastnostmi obeh porečij.



Slika 2 – Razmerja MAM_n/MAM_7 , iz katerih je razviden gradient, s katerim lahko kvalitativno ocenimo doprinos podzemnih voda k površinskemu toku.

Pri kazalnikih, ki izhajajo iz FDC, bomo poudarili predvsem razmerje Q_{90}/Q_{50} . Čeprav so ga nekateri avtorji (npr. Caissie in Robichaud, 2009) uporabili kot kazalnik baznega odtoka, pri čemer višje vrednosti kažejo na bolj stabilen tok oziroma večji delež baznega odtoka, so na vseh postajah porečja Ljubljanice vrednosti razmerja Q_{90}/Q_{50} manjše od BFI, v nekaterih primerih celo za več kot pol. Ne glede na to pa lahko tudi s tem kazalnikom potrdimo iste postaje z najmanjšim ali največjim doprinosom podzemne vode k površinskemu toku. Poleg tega lahko opazimo, da imata relativno visoko vrednost razmerja tudi postaji Dvor in Razori, ki se nahajata na porečjih s tipično hudourniškim vodotokoma Gradaščico in Šujico, čemur lahko pripišemo tudi razlog za visoke vrednosti. Po padavinskem dogodku namreč pretok hitro naraste ne glede na predhodno vlažnost porečij in nato tudi hitro upade. V podatkovnem nizu je tako malo ekstremno visokih vrednosti pretokov, kar se nato odraža v obliki krivulje trajanja pretokov oziroma razmerju Q_{90}/Q_{50} (Slika 3).



Slika 3 – Brezdimenzijska krivulja trajanja za postajo Dvor (5500), pri čemer so na vertikalni osi relativni pretoki glede na dolgoletni srednji pretok v logaritemskem merilu

Razmerje sezonskosti je na vseh postajah nižje od 1, kar kaže na prevladujoče poletne nizke pretoke. To potrjujejo tudi indeksi sezonskosti (Preglednica 4), ki kažejo, da se nizki pretok (Q_{95}) po navadi zgodi med avgustom in koncem septembra z velikostjo vektorja r , ki izkazuje spremenljivost izračunanega datuma. Glede na indekse sezonskosti lahko pričakujemo, da se bodo nizki pretoki najprej pojavili na postaji Mali Otok (8. avgust), sledijo Razori (22. avgust), Dvor (28. avgust) in Moste (2. september). Najpozneje lahko nizke pretoke pričakujemo na postajah Bistra (12. september) in Malni (22. september). Zanimivo je, da čas pojava nizkega pretoka ne kaže odvisnosti od relativne lokacije v porečju, kar hkrati potrjuje izrazito hidrogeološko nehomogenost porečja.

Preglednica 4 – Indeksi sezonskosti s polarnima koordinatama in najverjetnejšim dnevom dogodka ter razmerje sezonskosti za posamezno vodomerno postajo (VP)

Ime VP	Šifra VP	theta θ	D		r	Razmerje sezonskosti
			(zaporedni dan v letu)	D (datum)		
Vrhnika	5030	4.3237	251.17	8. september	0.48	0.69
Moste	5080	4.2145	244.83	2. september	0.71	0.56
Verd	5240	4.2808	248.68	6. september	0.63	0.56
Bistra	5270	4.3818	254.54	12. september	0.74	0.49
Borovnica	5330	4.2670	247.88	5. september	0.47	0.70
Dvor	5500	4.1228	239.50	28. avgust	0.63	0.76
Razori	5540	4.0289	234.05	22. avgust	0.42	0.82
Cerknica	5770	4.2384	246.22	3. september	0.65	0.54
Mali Otok	5840	3.7857	219.91	8. avgust	0.66	0.11
Hasberg	5880	4.2977	249.66	7. september	0.80	0.51
Malni	5910	4.5612	264.97	22. september	0.70	0.64

Iz rezultatov recesijske analize je razvidno, da daje metoda IRS pri vseh postajah višje rezultate recesijskih konstant kot metoda IRC, kar so ugotovili tudi Sapač et al. (2019). Ne glede na to pa so tudi recesijske konstante skladne z rezultati ostalih kazalnikov glede postaj na porečju Ljubljane z največjim oziroma najmanjšim doprinosom podzemnih vod k površinskemu toku. Vrednosti se po metodi MRC gibljejo od 2,54 in 3,46 dneva na postajah Mali Otok in Cerknica, do 18,99 in 20,17 dneva na postajah Malni in Bistra. Pri metodi IRS so vrednosti od 3,41 in 5,63 na postajah Mali Otok in Cerknica, do 22,70 in 28,24 na postajah Malni in Bistra.

Zaključki

V prispevku so prikazani rezultati različnih kazalnikov nizkih pretokov za 11 vodomernih postaj na hidrogeološko nehomogenem porečju Ljubljane, ki smo jih interpretirali v povezavi z znanimi hidrogeološkimi lastnostmi. Kot je bilo pričakovati zaradi nehomogenosti, vrednosti kazalnikov variirajo od postaje do postaje. Ne glede na to pa ugotavljamo, da so kazalniki v splošnem skladni med seboj v smislu interpretacije kvalitativne ocene doprinosa podzemnih virov vode k površinskemu toku. Vsi kazalniki kažejo na največji prispevek k površinskemu toku iz podzemnih virov na postajah Bistra in Malni. Razloge lahko pripišemo hidrogeološkim lastnostim, ki omogočajo dobro povezavo med podzemnimi in površinskimi vodami ter veliko prepustnost vode. Obratno je večina kazalnikov pokazala za postajo Mali Otok. Ne glede na splošno skladnost kazalnikov pri postajah z največjim in najmanjšim ocenjenim doprinosom podzemne vode pa smo na nekaterih drugih postajah opazili neskladnosti med kazalniki. Na postajah Dvor in Razori, ki ležita na hudourniških porečjih, kazalnik Q_{90}/Q_{50} ni skladen z ostalimi kazalniki, medtem ko na postaji Hasberg neskladnost izkazujejo MAMn kazalniki. Na podlagi rezultatov te raziskave je zato priporočljiva celovita analiza nizkih pretokov, s čimer se lahko z večjo gotovostjo izognemo posledicam napačne interpretacije posameznih kazalnikov.

Literatura

- Acreman, M., Dunbar, M.J. (2004). Defining environmental river flow requirements - a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 8, 861–876.
- ARSO. (2018). Arhiv hidroloških podatkov. Površinske vode - dnevne vednosti. URL http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (pridobljeno 6. 5. 2018).
- 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 Resour. Res.* 49, 7843–7863. <https://doi.org/10.1002/2013WR013918>
- Caissie, D., Robichaud, S. (2009). Towards a better understanding of the natural flow regimes and streamflow characteristics of rivers of the Maritime Provinces. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2843, viii+53.
- Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J.M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom, Report No. 108. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Koffler, A.D., Gauster, T., Laaha, G., Gauster, M.T. (2016). Package 'lfstat.' p. 63.
- Kobold, M., Brilly, M. (1994). Low flow discharge analysis in Slovenia. *FRIEND '97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource*, 119–131.
- Kolbezen, P., Pristov, J. (1998). Surface streams and water balance of Slovenia 1961-1990. Ministry of Environment and Spatial Planning, Hydrometeorological Institute of Slovenia, Ljubljana, p. 98.

- Laaha, G., Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrol. Process.* 20, 3851–3878. <https://doi.org/10.1002/hyp.6161>
- Langbein, W.B. (1938). Some channel storage studies and their application to the determination of infiltration. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 19, 435–447.
- Petrič, M. (2010). Case Study: Characterization, exploitation, and protection of the Malenščica karst spring, Slovenia, in: Kresic, N., Stevanovic, Z. (Eds.), *Groundwater Hydrology of Springs*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 428–441. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00021-9>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria.
- Ravbar, N., Barberá, J.A., Petrič, M., Kogovšek, J., Andreo, B. (2012). The study of hydrodynamic behaviour of a complex karst system under low-flow conditions using natural and artificial tracers (the catchment of the Unica River, SW Slovenia). *Environ. Earth Sci.* 65, 2259–2272. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1523-4>
- Sapač, K., Rusjan, S., Šraj, M. (2019). Influence of calculation criteria on the values of low-flow recession constants in a non-homogenous catchment in Slovenia. *Acta Hydrotechnica* 32, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.01>
- Smakhtin, V.U. (2001). Low flow hydrology: A review. *J. Hydrol.* 240, 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Tallaksen, L.M. 1989. Analysis of time variability in recessions. *IAHS-AISH Publ.* 187, 85–96.
- Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- WMO (1974). *International glossary of hydrology*. Paris, UNESCO and Geneva, WMO, p. 393.
- WMO (2008). *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*, in: *Operational Hydrology Report*. WMO, Geneva, Switzerland, p. 136. <https://doi.org/WMO-No.1029>.