

UDK/UDC: 556.06"32":556.536(497.4)

Prejeto/Received: 26.09.2022

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 12.01.2023

DOI: [10.15292/acta.hydro.2022.05](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.05)

Objavljeno na spletu/Published online: 02.02.2023

ANALIZA SEZONSKE IN PROSTORSKE SPREMENLJIVOSTI ZNAČILNIH PRETOKOV REK V SLOVENIJI

ANALYSIS OF SEASONAL AND SPATIAL VARIABILITY OF RIVER FLOW CHARACTERISTICS IN SLOVENIA

Lea Kostevc¹, Mira Kobold^{1,2}, Mojca Šraj^{1,*}

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

² Agencija RS za okolje, Vojkova ulica 1b, 1000 Ljubljana

Izvleček

Nihanja med malimi, srednjimi in velikimi pretoki v Sloveniji so velika, v zadnjih desetletjih pa se kaže še vpliv podnebne spremenljivosti. Zaradi pomanjkanja padavin in njihove neenakomerne časovne in prostorske porazdelitve je suša v Sloveniji vse večji problem, na drugi strani pa opazamo povečanje števila ekstremnih poplavnih dogodkov. V raziskavi je izdelana analiza regionalne raznolikosti in sezonskosti značilnih pretokov, in sicer srednjih malih (sQnp), srednjih (sQs) in velikih pretokov (vQvk) s 50 vodomernih postaj za obdobje 1960–2018 na letni in mesečni časovni skali. Izračunana so razmerja med značilnimi pretoki, rezultati pa so ovrednoteni tako časovno kot prostorsko. Razpon vrednosti razmerja vQvk/sQnp se giblje med približno 20 in 1000, medtem ko je razpon vrednosti razmerja sQs/sQnp med 2 in 20. Enostavno hierarhično razvrščanje vodomernih postaj za srednje male (sQnp) in srednje pretoke (sQs) je dalo podobne rezultate oz. so bile vodomerne postaje v obeh primerih razvrščene v pet enakih skupin. Pri enostavnem hierarhičnem razvrščanju vodomernih postaj glede na vrednosti visokovodnih konic (vQvk) pa so se izoblikovale štiri skupine. V vseh primerih lahko ugotovimo, da je posamezne skupine težko prostorsko opredeliti.

Ključne besede: srednji mali pretoki, srednji pretoki, veliki pretoki, sezonskost, prostorska spremenljivost.

Abstract

The fluctuations between minimum, mean, and high flows in Slovenia are significant, and in recent decades the influence of climate variability is also evident. Due to the lack of precipitation and its uneven temporal and spatial distribution, drought is a growing problem in Slovenia, while on the other hand, the number of extreme flood events is increasing. In the study, the regional diversity and seasonality of characteristic flows, namely mean low (sQnp), mean (sQs), and peak flows (vQvk) from 50 gauging stations are analyzed for the period 1960–2018, applying both an annual and monthly time scale. The ratios between the characteristic flows are calculated, and the results are evaluated both temporally and spatially. The range of values of the ratio vQvk/sQnp varies from about 20 to 1000, while the range of values of the ratio sQs/sQnp is between 2 and 20.

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

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

© Kostevc L. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

Hierarchical clustering of gauging stations for mean low (sQnp) and mean flows (sQs) gave similar results, i.e. gauging stations were clustered into five equal groups in both cases. In the case of hierarchical clustering of gauging stations according to the values of peak flows (vQvk), four groups were formed. However, we can conclude that individual groups are difficult to define spatially in all cases.

Keywords: mean low flows, mean flows, peak flows, seasonality, spatial variability.

1. Uvod

Spremenljivost je ključna značilnost podnebja in hidroloških pojavov. Čeprav so se prva hidrološka opazovanja pojavov začela že nekaj sto let nazaj, je obdobje sistematičnih meritev prekratko, da bi lahko zanesljivo sklepali o redkih pojavih, ki imajo povratno dobo daljšo od sto let (Brilly in Šraj, 2014). Analiza klimatskih podatkov je dobila večjo težo s pojavom različnih mnenj o podnebnih spremembah (npr. Bonacci, 2015). V zadnjih desetletjih lahko zasledimo vedno več poročil o ekstremnih podnebnih pojavih in o škodi, ki jo povzročajo.

Tudi v Sloveniji se v zadnjih desetletjih kaže vpliv podnebne spremenljivosti (ARSO, 2017, 2003; Jurko, 2009; Oblak, 2017; Oblak et al., 2021). Zaradi pomanjkanja padavin oz. njihove neenakomerne časovne in prostorske porazdelitve je suša v zadnjih dveh desetletjih tudi v Sloveniji vse večji problem (ARSO, 2017; Sušnik et al., 2013). Pogostost suš se povečuje (Cunja et al., 2020, 2019; Zalokar et al., 2021), čeprav Slovenija spada med najbolj vodnate države Evrope. Vpliv podnebnih sprememb se kaže predvsem po letu 1990, ko je bila kmetijska suša v Sloveniji razglašena kar 11-krat, od tega kar 9-krat po letu 2000. V večini od teh let je suša dosegla razsežnosti naravne nesreče (ARSO, 2017). Kot vidimo, bo tudi leto 2022 zagotovo vpisano v zgodovino kot eno najbolj sušnih v zgodovini meritev.

Po drugi strani pa v Sloveniji v zadnjih desetletjih opazamo tudi povečanje števila ekstremnih poplavnih dogodkov (Kobold et al., 2012; Oblak et al., 2021; Šraj et al., 2016b). Analize kažejo, da se ekstremni poplavni dogodki pojavljajo bolj pogosto po letu 1990 (Blöschl et al., 2017). Spremembe v velikosti in pogostosti poplav pa niso po celotni Sloveniji enake (Oblak et al., 2021; Šraj et al., 2016a). Tako nekatere vodomerne postaje v Sloveniji izkazujejo pozitivne in spet druge

negativne trende pretokov (Blöschl et al., 2019, 2017; Oblak et al., 2021; Šraj et al., 2019, 2016a; Šraj in Bezak, 2020). Zaradi podnebnih sprememb lahko v Sloveniji pričakujemo predvsem porast hudourniških poplav kot posledico povečanja konvektivnih padavin (Blöschl et al., 2019). Dogodki z ekstremnimi padavinami se bodo z dodatnim segrevanjem zelo verjetno okrepili in postali pogostejši v večini regij Slovenije (ARSO, 2021a).

Spreminja se tudi čas pojava visokih vod. Tudi ta ni enoznačen, saj se visoke vode na nekaterih vodomernih postajah v Sloveniji pojavljajo prej in na drugih spet kasneje (Blöschl et al., 2017). V splošnem pa so pretekle analize pokazale upad pretokov v spomladanskih in poletnih mesecih ter presežke pretokov v jesenskih mesecih (Oblak, 2017; Oblak et al., 2021).

Nihanja med malimi, srednjimi in velikimi pretoki v Sloveniji so velika in značilna za večino hudourniških vodotokov, le pri kraških vodotokih so nihanja manjša (Kolbezen in Pristov, 1998).

Glavni namen raziskave je analiza regionalne raznolikosti in sezonskosti značilnih pretokov v Sloveniji, in sicer srednjih malih (sQnp), srednjih (sQs) in velikih pretokov (vQvk) na letni in mesečni časovni skali, kar do sedaj še ni bilo narejeno. V ta namen so narejeni grafični prikazi letnih vrednosti sQnp, sQs in vQvk za obravnavane vodomerne postaje. Izračunana so razmerja med značilnimi pretoki na letni in mesečni ravni, rezultati pa so ovrednoteni tako časovno kot prostorsko.

2. Podatki in metode

2.1 Podatki

V analizi smo obravnavali mesečne vrednosti značilnih pretokov (sQnp, sQs, vQvk) za obdobje 1960–2018 s 50 vodomernih postaj ARSO (preglednica 1), za katere so bili na voljo omenjeni

podatki (ARSO, 2021b). Obravnavane postaje so razporejene po celi Sloveniji, vendar ne povsod enakomerno, saj je bila njihova vključitev v analizo pogojena s popolnimi nizi podatkov za obravnavano obdobje.

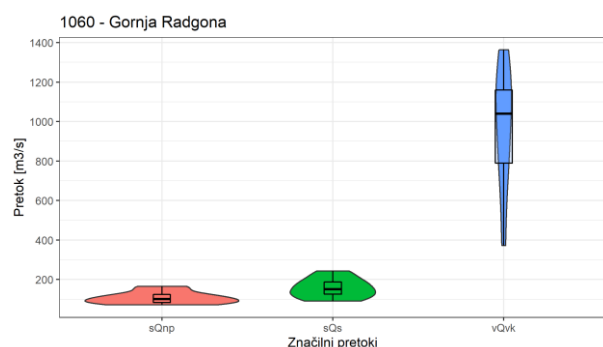
Preglednica 1: Obravnavane vodomerne postaje s pripadajočo površino zaledja (ARSO, 2021b).

Table 1: Considered gauging stations with their catchment area (ARSO, 2021b).

Šifra/ Code	Vodomerne postaja/ Gauging station	Vodotok/ River	Površina zaledja/Area [km ²]
1060	Gornja Radgona	Mura	10197.2
1140	Pristava	Ščavnica	272.77
1220	Polana	Ledava	209.37
2250	Otiški Vrh	Meža	552.6
2652	Videm	Dravinja	767.34
2754	Tržec	Polskava	189.16
2900	Zamušani	Pesnica	479.76
3180	Podhom	Radovna	166.8
3200	Sveti Janez	Sava Bohinjka	94.35
3400	Mlino	Jezernica	8.57
3420	Radovljica	Sava	907.96
3570	Šentjakob	Sava	2284.75
3660	Litija	Sava	4849.67
3850	Čatež	Sava	10232.42
4050	Preska	Tržiška Bistrica	121.5
4120	Kokra	Kokra	113.1
4200	Suha	Sora	568.86
4230	Zminec	Poljanska Sora	306.52
4480	Nevlje	Nevljica	82.21
4671	Martinja vas	Mirna	186.02
4750	Rakovec	Sotla	561.3
4820	Petrina	Kolpa	467.31

4860	Metlika	Kolpa	1966.27
4969	Gradac	Lahinja	218.89
5030	Vrhnika	Ljubljana	1135.12
5078	Moste	Ljubljana	1777.96
5540	Razori	Šujica	46.95
6060	Nazarje	Savinja	457.11
6200	Laško	Savinja	1668.16
6240	Kraše	Dreta	100.82
6300	Šoštanj	Paka	131.64
6420	Šoštanj	Velunja	31.75
6630	Levec	Ložnica	102.89
6691	Črnomla	Voglajna	54.73
7029	Podbukovje	Krka	346.92
7160	Podbočje	Krka	2252.98
7308	Rožni Vrh	Temenica	80.51
7340	Prečna	Prečna	295.19
8060	Log Čezsoški	Soča	324.76
8080	Kobarid	Soča	437.06
8180	Solkan	Soča	1580.35
8270	Žaga	Učja	50.19
8350	Podroteja	Idrijca	111.25
8450	Hotešk	Idrijca	443.51
8500	Bača pri Modreju	Bača	143.06
8561	Vipava	Vipava	131.92
8601	Miren	Vipava	588.29
8630	Ajdovščina	Hubelj	93.14
9050	Cerkvenikov mlyn	Reka	332.12
9210	Kubed	Rizana	204.66

Na sliki 1 je primer prikaza mesečnih vrednosti značilnih pretokov (sQnp, sQs, vQvk) za obdobje 1960–2018 za vodomerno postajo Gornja Radgona (šifra 1060). Podobni prikazi za ostale obravnavane vodomerne postaje so dostopni v Kostevc (2022).



Slika 1: Prikaz razponov mesečnih vrednosti $sQnp$, sQs in $vQvk$ za primer vodomerne postaje Gornja Radgona (1060) v obravnavanem obdobju (Kostevc, 2022).

Figure 1: Presentation of the range of the monthly $sQnp$, sQs , and $vQvk$ values for the Gornja Radgona gauging station (1060) in the considered period (Kostevc, 2022).

2.2 Metode

Analizo sezonskosti smo izdelali na osnovi preračunanih specifičnih pretokov, s katerimi najbolje ponazorimo regionalne značilnosti, in s pomočjo kart jakosti (angl. *heatmap*), ki omogočajo grafično predstavitev rezultatov, kjer so posamezne vrednosti prikazane z različno barvno skalo (The R Graph Gallery, 2018). V našem primeru svetlejše barve prikazujejo dogodke z nižjimi pretoki (oz. sušna obdobja), temnejše barve pa dogodke z višjimi pretoki (mokra obdobja). Pri grafičnem prikazu je treba upoštevati, da funkcija *heatmap* v programskem orodju R zaradi nazornosti prikaza normalizira vrednosti na posamezno lokacijo (The R Graph Gallery, 2018). Normalizacija sledi standardni normalni porazdelitvi (od posamezne vrednosti je odštet srednja vrednost in vse skupaj deljeno s standardno deviacijo), zato v grafičnem prikazu dobimo tako pozitivne kot negativne vrednosti. Za omenjeno analizo smo uporabili enostavno funkcijo *heatmap* (funkcija brez parametrov), ki je vgrajena v osnovni statistični paket programskega orodja R (R Core Team, 2021).

Dodatno smo za natančnejšo analizo sezonske in prostorske raznolikosti specifičnih značilnih pretokov v Sloveniji izvedli še enostavno hierarhično razvrščanje v skupine s pomočjo dendrogramov, ki jih že omenjena funkcija

Heatmap v programskem orodju R omogoča kot hitro dodatno analizo (The R Graph Gallery, 2018). Razvrščanje v skupine poteka po principu podobnosti posameznih enot, tako da so v posamezno skupino razvrščene enote, ki so si glede na določene kriterije podobne. Mera podobnosti je bila v tem primeru evklidska razdalja, ki jo uporablja večina algoritmov za razvrščanje (Hosking in Wallis, 1997), uporabljena metoda razvrščanja pa Wardova metoda.

Vse analize in izrise grafov smo izdelali s pomočjo programskega orodja R (R Core Team, 2021) in uporabo paketov *ggplot2* (Wickham, 2016), *gplots* (Warnes, 2015) in *RColorBrewer* (Neuwirth, 2022). Prostorski prikazi in analize pa so bili izdelani s programskim orodjem za statistične analize Orange (Demšar et al., 2013).

3. Rezultati

3.1 Razmerja značilnih pretokov in njihova prostorska porazdelitev

Razmerja značilnih pretokov za obdobje 1960–2018 smo izračunali glede na male obdobjne pretoke ($sQnp$) in so prikazana v preglednici 2.

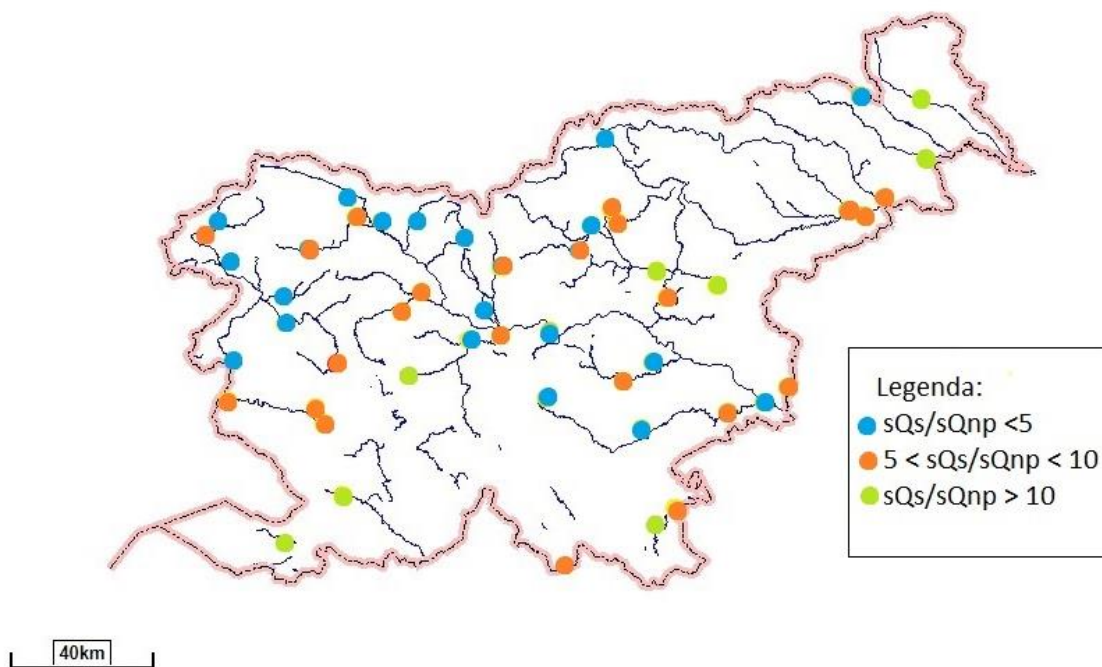
Preglednica 2: Vrednosti $sQnp$ in razmerja značilnih pretokov obdobja 1960–2018 za obravnavane vodomerne postaje.

Table 2: $sQnp$ values and ratios of characteristic flows of the period 1960–2018 for the considered gauging stations.

Vodomerne postaja/ Gauging station	$sQnp$ [m ³ /s]	$sQs/sQnp$ [-]	$vQvk/sQnp$ [-]
Gornja Radgona	61,5	2,6	22,2
Pristava	0,22	10,2	291,2
Polana	0,11	11,0	738,5
Otiški Vrh	4,08	3,1	91,0
Videm	1,72	6,2	170,7
Tržec	0,39	6,0	201,3
Zamušani	0,59	8,7	252,5
Podhom	1,87	4,3	60,5
Sveti Janez	0,95	8,5	230,0

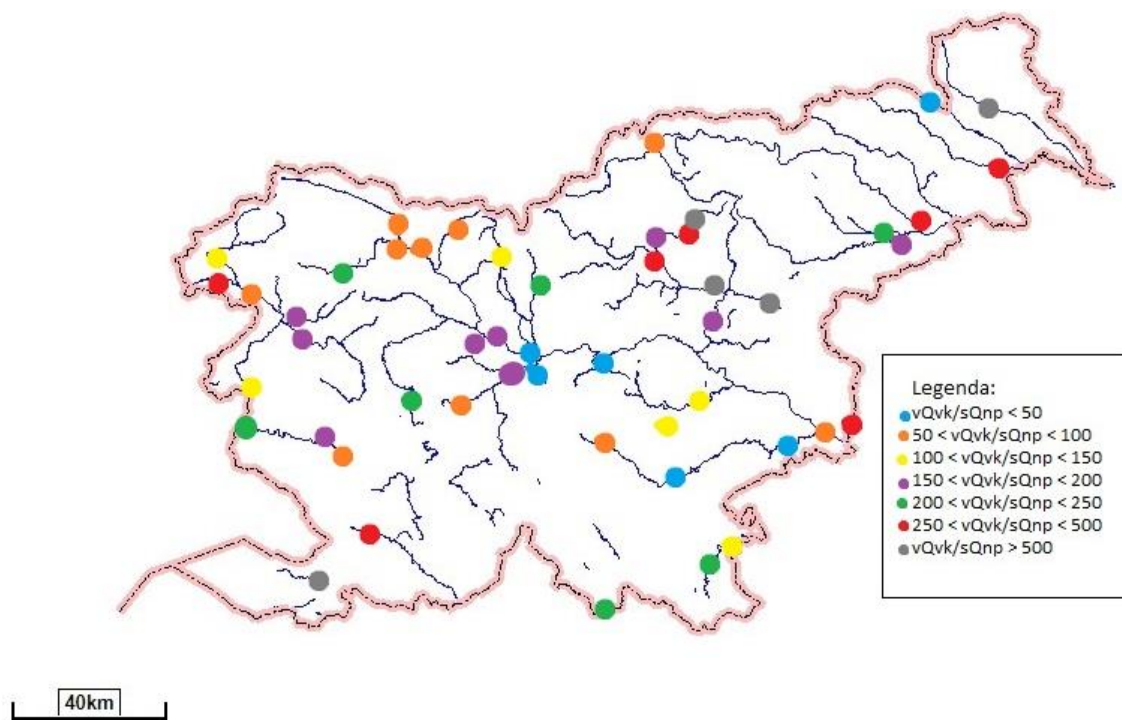
Mlino	0,08	5,0	63,1	Žaga	0,59	5,8	377,7
Radovljica	9,91	4,5	81,7	Podroteja	1,63	5,6	215,1
Šentjakob	29,1	3,1	48,9	Hotešk	4,95	4,8	176,7
Litija	46,9	3,5	49,3	Bača pri Modreju	1,44	4,8	183,2
Čatež	76,0	3,7	50,2	Vipava	1,17	5,6	75,4
Preska	2,32	2,2	84,2	Miren	2,03	8,9	215,3
Kokra	1,36	3,2	138,4	Ajdovščina	0,37	7,9	159,1
Suha	3,70	5,4	185,5	Cerkvenikov mlin	0,63	13,1	487,2
Zminec	2,04	5,4	165,1	Kubed	0,19	21,6	847,4
Nevlje	0,33	5,3	210,6	Nihanja med malimi, srednjimi in velikimi vodami so v Sloveniji velika in značilna za večino vodotokov, kar jim poudarja hudourniško naravo (Kolbezen in Pristov, 1998). Vrednosti razmerja $sQs/sQnp$ se gibljejo od 2,2 do 21,6 (preglednica 2). Najmanjšo vrednost izkazuje vodomerna postaja Preska na Tržiški Bistrici (4050), največjo pa vodomerna postaja Kubed na Rižani (9210). Z namenom prostorskega pregleda rezultatov smo vrednosti razmerij $sQs/sQnp$ razdelili v tri razrede glede na razpon vrednosti in jih prikazali na karti Slovenije (slika 2). Iz prikaza je razvidno, da se najmanjše vrednosti razmerja ($sQs/sQnp < 5$) pojavljajo v Posočju, na Savi, na Krki, Meži in Muri. Vrednosti med 5 in 10 so zaznane na Vipavi, Podroteji, Savi Bohinjki, Kolpi, Paki, Dreti, Dravinji in Pesnici. Vrednosti nad 10 pa imajo reke Rižana, Reka, Ljubljana na Vrhniki, Lahinja, Ložnica, Voglajna, Ščavnica in Ledava. Razpon vrednosti razmerja $vQvk/sQnp$ je precej večji in se giblje med 22,2 in 1112,9. Rezultat je pričakovan, saj imajo visokovodne konice $vQvk$ na vseh vodomernih postajah velik razpon vrednosti (slika 1). Najmanjšo vrednost razmerja ima vodomerna postaja Gornja Radgona (1060) na Muri, največjo pa vodomerna postaja Črnlolica (6691) na Voglajni (preglednica 2). Ker je razpon vrednosti razmerja velik, smo vrednosti v tem primeru razdelili v sedem razredov (slika 3). Kot lahko vidimo, v tem primeru posamezne razrede težje pripišemo določeni regiji ali vodotoku, saj se npr. tako najnižje ($vQvk/sQnp < 5$) kot najvišje			
Martinja vas	0,68	3,9	113,7				
Rakovec	0,91	8,7	308,8				
Petrina	2,82	9,2	248,1				
Metlika	9,17	7,7	121,6				
Gradac	0,44	12,9	228,5				
Vrhnika	2,40	10,1	50,4				
Moste	7,77	7,1	45,7				
Razori	0,31	4,5	198,2				
Nazarje	3,50	4,8	184,9				
Laško	7,80	5,0	180,3				
Kraše	0,75	5,4	343,8				
Šoštanj (Paka)	0,40	5,8	344,2				
Šoštanj (Velunja)	0,05	7,8	518,9				
Levec	0,13	12,7	931,7				
Črnlolica	0,06	13,8	1112,9				
Podbukovje	1,64	4,9	74,0				
Podbočje	10,1	5,3	46,2				
Rožni Vrh	0,14	5,9	127,8				
Prečna	1,50	2,9	30,9				
Log Čezsoški	5,59	4,4	102,2				
Kobarid	8,00	4,3	97,3				
Solkan	20,5	4,6	122,1				

($vQ_{vk}/sQ_{np} > 500$) vrednosti razmerja večinoma pojavljajo v vzhodni polovici države.



Slika 2: Prikaz razmerja značilnih pretokov sQ_s/sQ_{np} na karti Slovenije (Kostevc, 2022).

Figure 2: Presentation of the ratio of characteristic flows sQ_s/sQ_{np} on the map of Slovenia (Kostevc, 2022).



Slika 3: Prikaz razmerja značilnih pretokov vQ_{vk}/sQ_{np} na karti Slovenije (Kostevc, 2022).

Figure 3: Presentation of the ratio of characteristic flows vQ_{vk}/sQ_{np} on the map of Slovenia (Kostevc, 2022).

3.2 Sezonskost značilnih specifičnih pretokov

Analizo sezonskosti smo izdelali na osnovi preračunanih specifičnih značilnih pretokov (značilni pretok deljen s površino zaledja). Iz grafičnega prikaza pripravljenih kart jakosti (angl. *heatmap*) in ob upoštevanju pripadajoče legende lahko za vsako vodomerno postajo in posamezno časovno obdobje zelo hitro vizualno identificiramo sušna (rumeno-oranžni odtenki) oz. mokra obdobja (rdeče-modri odtenki) (obdobja z negativnimi oz. s pozitivnimi vrednostmi). Ker pa so šifre posameznih vodomernih postaj vezane na porečja (na grafičnem prikazu prikazane v naraščajočem vrstnem redu), lahko sušna oz. mokra obdobja identificiramo tudi širše prostorsko.

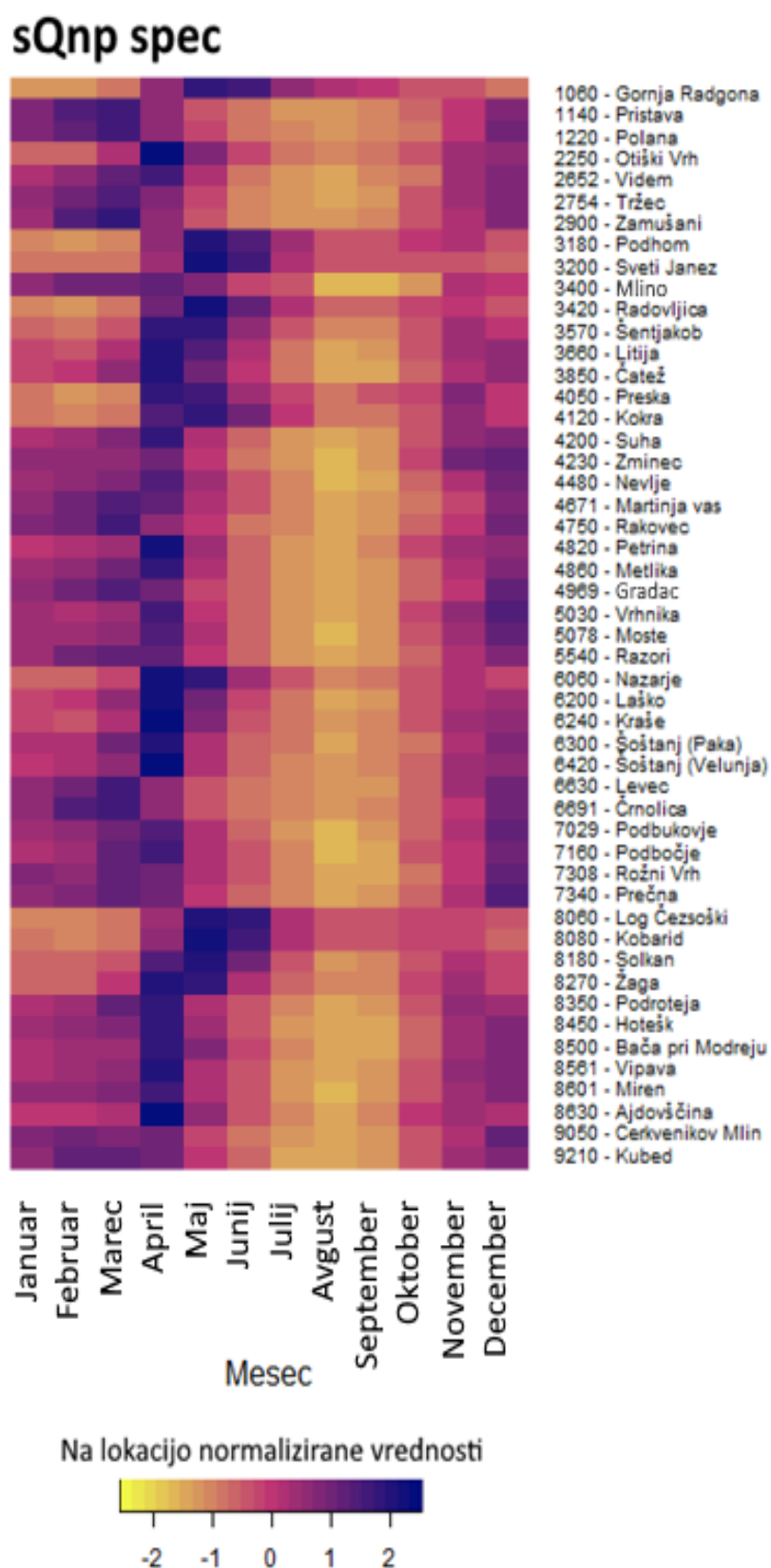
V primeru srednjih malih specifičnih mesečnih pretokov (sQnp) (slika 4) lahko hitro opazimo, da v obravnavanem obdobju 1960–2018 izstopa mesec april, ki se kaže kot izrazito vodnat mesec (seveda z vidika malih mesečnih pretokov) praktično po celi Sloveniji, podobno pa so meseci julij, avgust in september za večino obravnavanih vodomernih postaj precej suhi meseci in nakazujejo relativno majhno vodnatost vodotokov v poletnih mesecih.

Pri srednjih specifičnih pretokih (sQs) (slika 5) izstopa mesec november kot izrazito vodnat mesec (seveda z vidika srednjih pretokov) na večini vodomernih postaj. Med precej vodnate mesece bi lahko uvrstili tudi marec, april in december, in sicer na večini obravnavanih vodomernih postaj. Med izjeme zgoraj opisanega spada npr. vodomerna postaja Gornja Radgona (1060) na reki Muri, kjer vidimo, da so bili manj vodnati jesensko-zimski meseci, vodnatost pa se je začela povečevati v

spomladanskih mesecih in dosegla višek v mesecu maju. Podobno dinamiko sezonskosti srednjih pretokov lahko opazimo še za vodomerne postaje Podhom (3180), Sveti Janez (3200), Radovljica (3420), Log Čezsoški (8060) in Kobarid (8080), torej v zgornjem delu porečja Save in v porečju Soče. Med najmanj vodnatimi meseci pa praktično po celi Sloveniji izstopa avgust, kjer so bile na večini obravnavanih vodomernih postaj zabeležene najnižje vrednosti srednjih pretokov (slika 5).

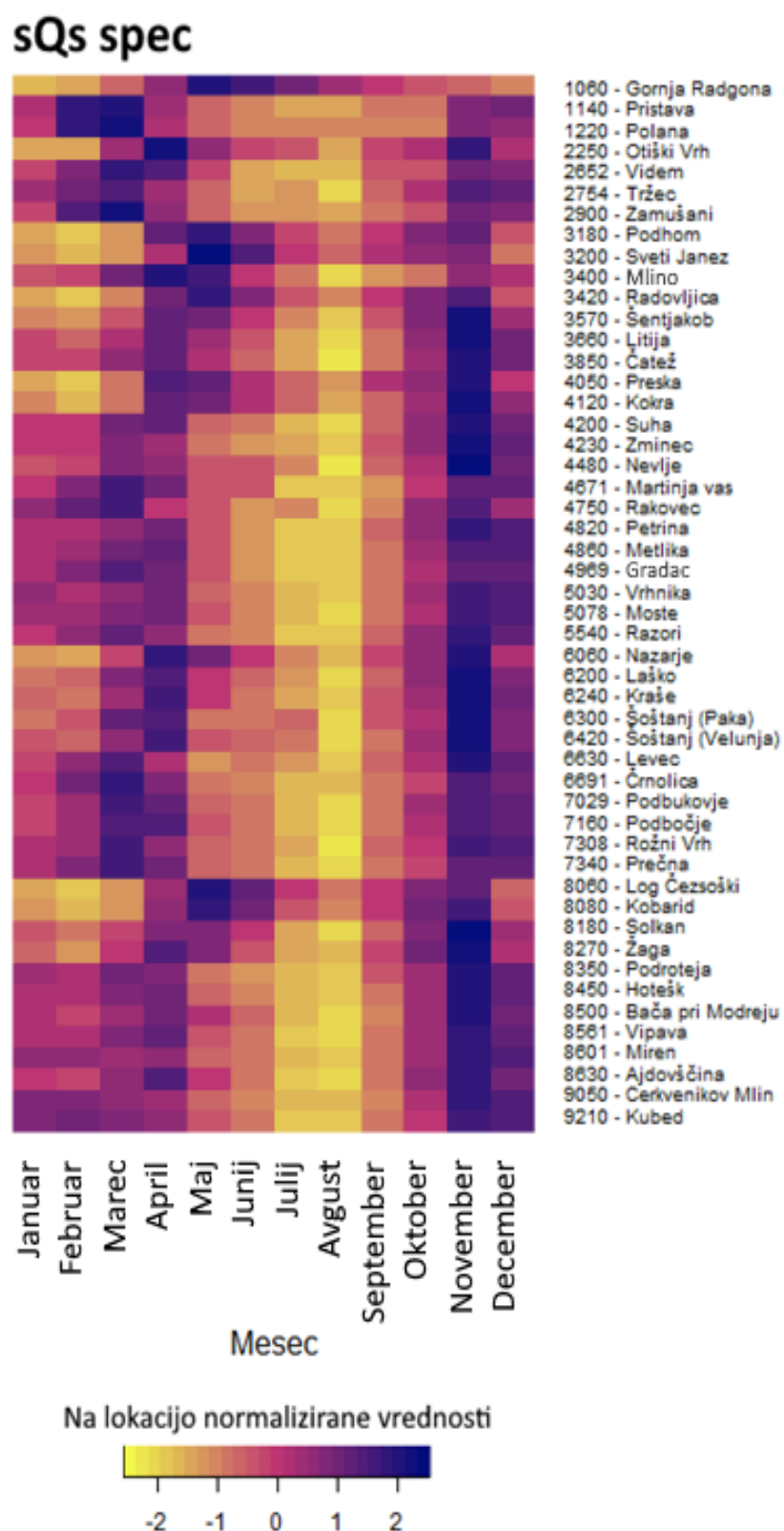
Rezultati srednjih specifičnih pretokov so skladni s pretočnimi režimi, ki večinoma kažejo na spomladanski in jesenski višek ter poletni in zimski nižek, le Mura in Drava, ki imata snežni režim, imata največ vode od maja do julija (Frantar in Hrvatini, 2008; Kolbezen in Pristov, 1998).

Iz prikaza specifičnih pretokov visokovodnih konic (vQvk) (slika 6) je razvidno, da se v prvi polovici leta visoke vode v Sloveniji večinoma ne pojavljajo. Najvišje vrednosti specifičnih pretokov visokovodnih konic praktično po celi Sloveniji beležimo v drugi polovici leta, in sicer predvsem v mesecih september, oktober in november. Le redke vodomerne postaje beležijo izrazito nizke visokovodne konice, saj je izrazito rumena barva na sliki 6 zelo redka. Ena od takih izjem je npr. vodomerna postaja Podhom (3180) na Radovni, ki izkazuje izrazito nizke vrednosti specifičnih pretokov visokovodnih konic v mesecu juliju. Podobno ima vodomerna postaja Levec (6630) na Ložnici najnižje vrednosti februarja, vodomerni postaji Gornja Radgona (1060) na Muri in Zamušani (2900) na Pesnici pa imata najnižje visokovodne konice meseca januarja.



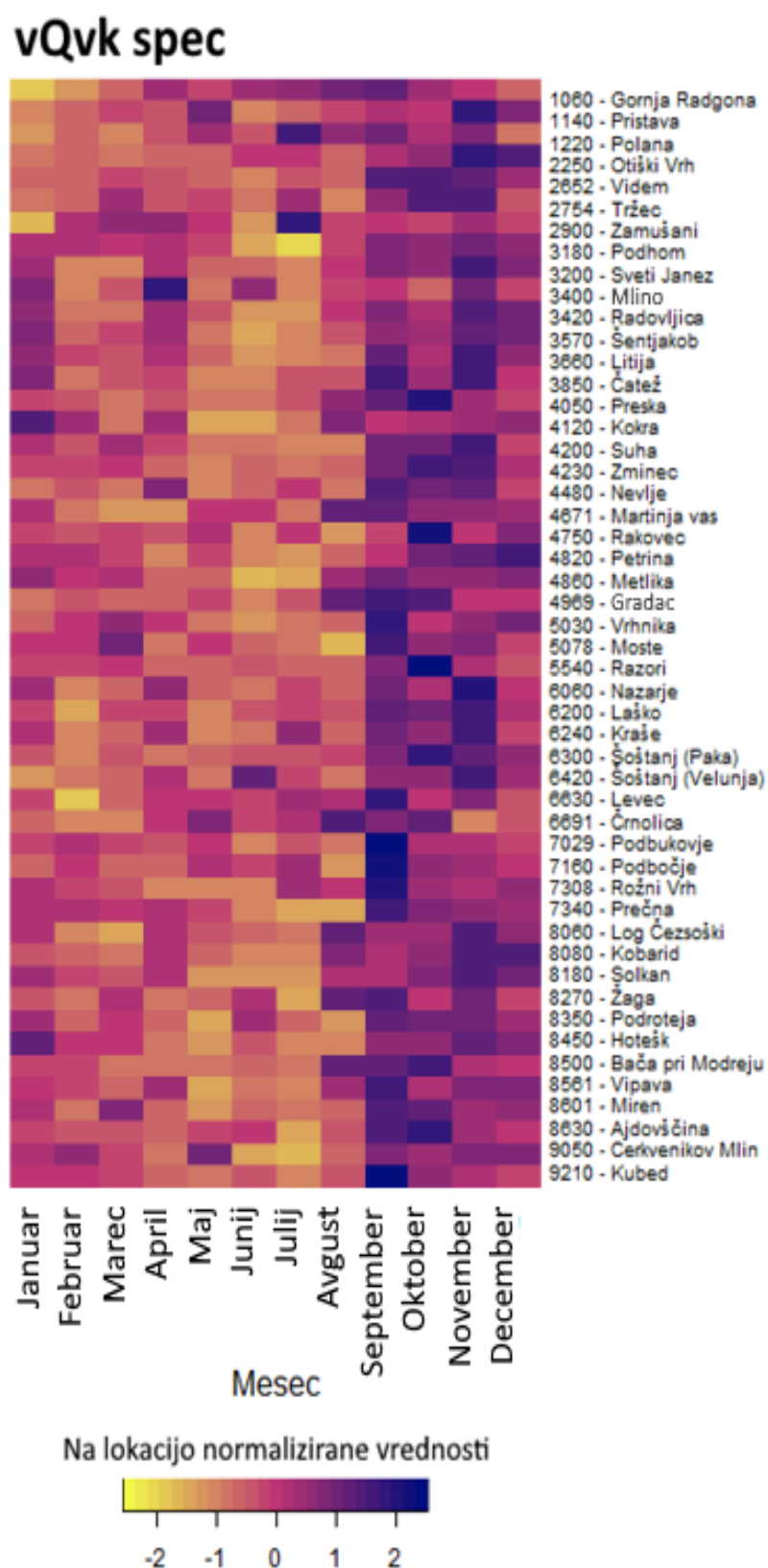
Slika 4: Karta jakosti za normalizirane vrednosti srednjih malih mesečnih specifičnih pretokov (*sQnp_spec*) v obravnavanem obdobju 1960–2018 (Kostevc, 2022).

Figure 4: Heatmap for normalized values of mean low monthly specific flows (*sQnp_spec*) in the considered period 1960–2018 (Kostevc, 2022).



Slika 5: Karta jakosti za normalizirane vrednosti srednjih mesečnih specifičnih pretokov (*sQs_spec*) v obravnavanem obdobju 1960–2018 (Kostevc, 2022).

Figure 5: Heatmap for normalized values of mean monthly specific flows (*sQs_spec*) in the considered period 1960–2018 (Kostevc, 2022).



Slika 6: Karta jakosti za normalizirane vrednosti mesečnih specifičnih pretokov visokovodnih konic (vQvk_spec) v obravnavanem obdobju 1960–2018 (Kostevc, 2022).

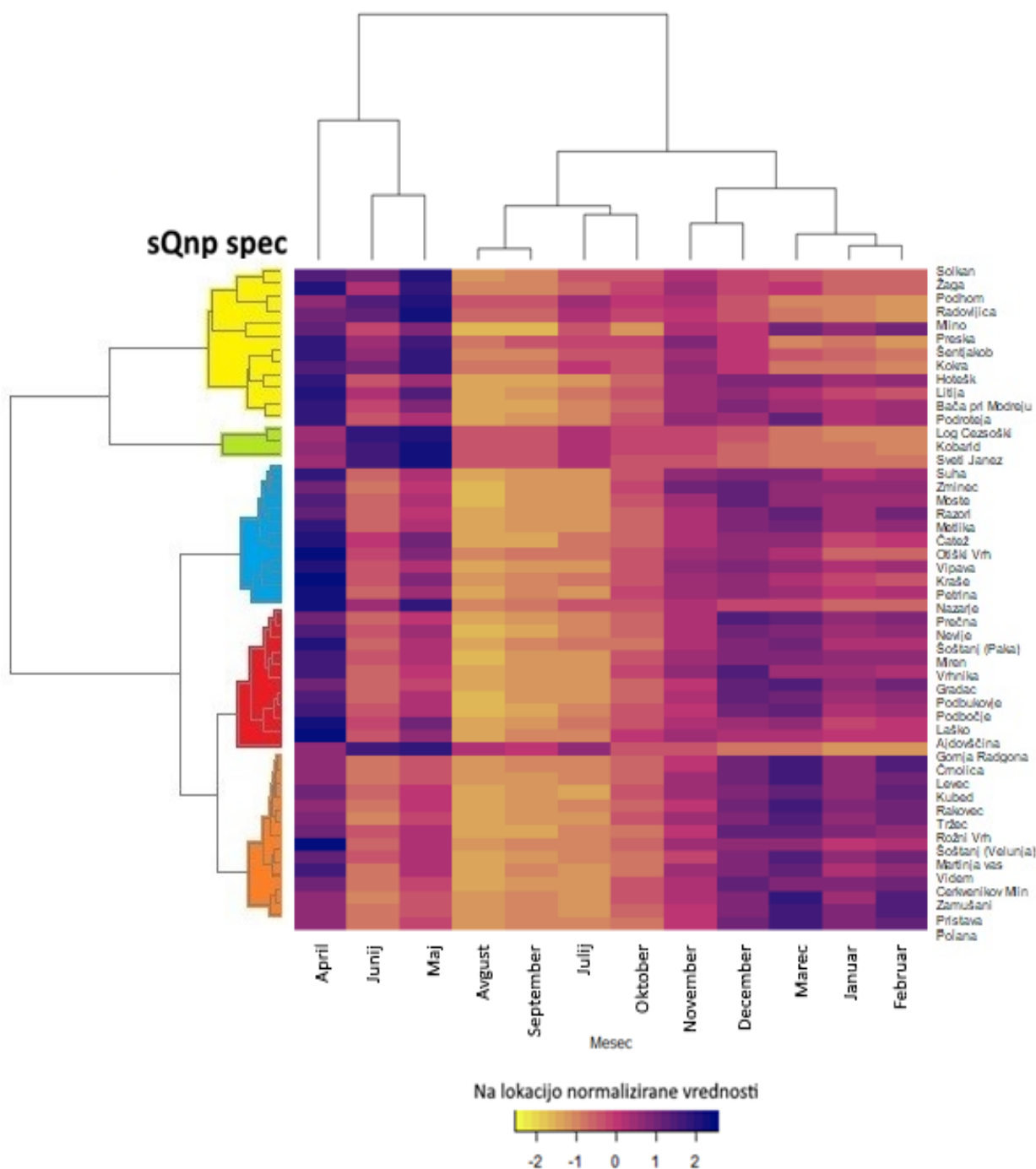
Figure 6: Heatmap for normalized values of monthly specific peak flows (vQvk_spec) in the considered period 1960–2018 (Kostevc, 2022).

4. Analiza in razprava

Izračunana razmerja značilnih pretokov in analiza njihove prostorske razporeditve so dali pomembne nove informacije o prostorski spremenljivosti značilnih pretokov v Sloveniji. Dodatne informacije o sezonski spremenljivosti smo dobili z analizo sezonskosti značilnih specifičnih pretokov. Za natančnejšo analizo sezonske in prostorske raznolikosti specifičnih značilnih pretokov v Sloveniji smo dodatno izvedli enostavno hierarhično razvrščanje v skupine in rezultate prikazali s pomočjo dendrogramov.

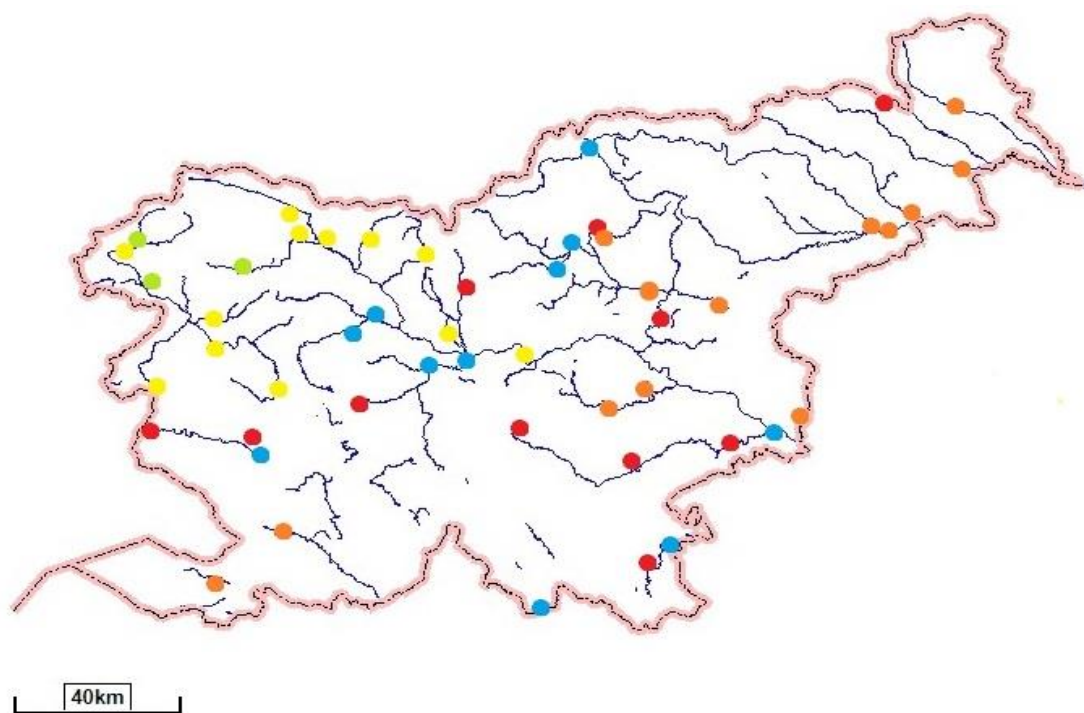
Na sliki 7 je prikazan dendrogram hierarhičnega razvrščanja v skupine za srednje male specifične pretoke, na sliki 8 pa pripadajoča prostorska razporeditev tako dobljenih skupin vodomernih postaj. Iz slike 7 je razvidno, da je program vodomerne postaje glede na srednje male specifične pretoke avtomatsko razdelil v pet skupin. V prvo (rumeno) skupino so razvrščene vodomerne postaje Podhom (3180), Mlino (3400), Radovljica (3420), Šentjakob (3570), Litija (3660), Preska (4050), Kokra (4120), Solkan (8180), Žaga (8270), Podroteja (8350), Hotešk (8450) in Bača pri Modreju (8500). Ugotovimo lahko, da so bili pri vseh postajah te skupine meseci april, maj in junij bolj vodnati meseci, bolj suha meseca pa sta bila

avgust in september. Vse vodomerne postaje te skupine so na območju severozahodne in nekatere tudi osrednje Slovenije (slika 8). V drugo (zeleno) skupino so razvrščene samo tri vodomerne postaje, in sicer Sveti Janez (3200), Log Čezsoški (8060) in Kobarid (8080). Vsem trem vodomernim postajam je skupna velika vodnatost aprila in maja in ne zelo izrazita suša v poletnih mesecih. Najbolj suhi meseci so za te vodomerne postaje januar, februar in marec. Vse tri vodomerne postaje pa so na skrajnem severozahodu Slovenije (slika 8). Ugotovimo lahko, da je sezonskost vodomernih postaj prve in druge skupine precej podobna, kar je razvidno tudi iz osnovne hierarhije, saj sta obe skupini na naslednjem nivoju povezani v isto skupino. V tretjo (modro) skupino so razvrščene vodomerne postaje Otiški Vrh (2250), Čatež (3850), Suha (4200), Zminec (4230), Petrina (4820), Metlika (4860), Moste (5078), Razori (5540), Kraše (6240), Nazarje (6060) in Vipava (8561). Ugotovimo lahko, da so na vodomernih postajah te skupine poletni meseci (julij, avgust pa tudi september) med bolj suhimi, medtem ko je najbolj moker mesec april oz. spomladanski meseci. Prostorska razporeditev vodomernih postaj te skupine ni enoznačna, saj so večinoma razpršene po celotnem osrednjem delu Slovenije, in sicer od juga do severa (slika 8).



Slika 7: Dendrogram hierarhičnega razvrščanja srednjih malih mesečnih specifičnih pretokov (sQnp_spec) v obravnavanem obdobju 1960–2018 (Kostevc, 2022).

Figure 7: Dendrogram of hierarchical clustering of mean low monthly specific flows (sQnp_spec) in the considered period 1960–2018 (Kostevc, 2022).



Slika 8: Prostorski prikaz rezultatov hierarhičnega razvrščanja srednjih malih mesečnih specifičnih pretokov (*sQnp_spec*) v obravnavanem obdobju 1960–2018. Barve vodomernih postaj so usklajene z barvami skupin na sliki 7 (Kostevc, 2022).

Figure 8: Spatial representation of the results of hierarchical clustering of mean low monthly specific flows (*sQnp_spec*) in the considered period 1960–2018. The colors of the gauging stations are aligned with the colors of the groups in Figure 7 (Kostevc, 2022).

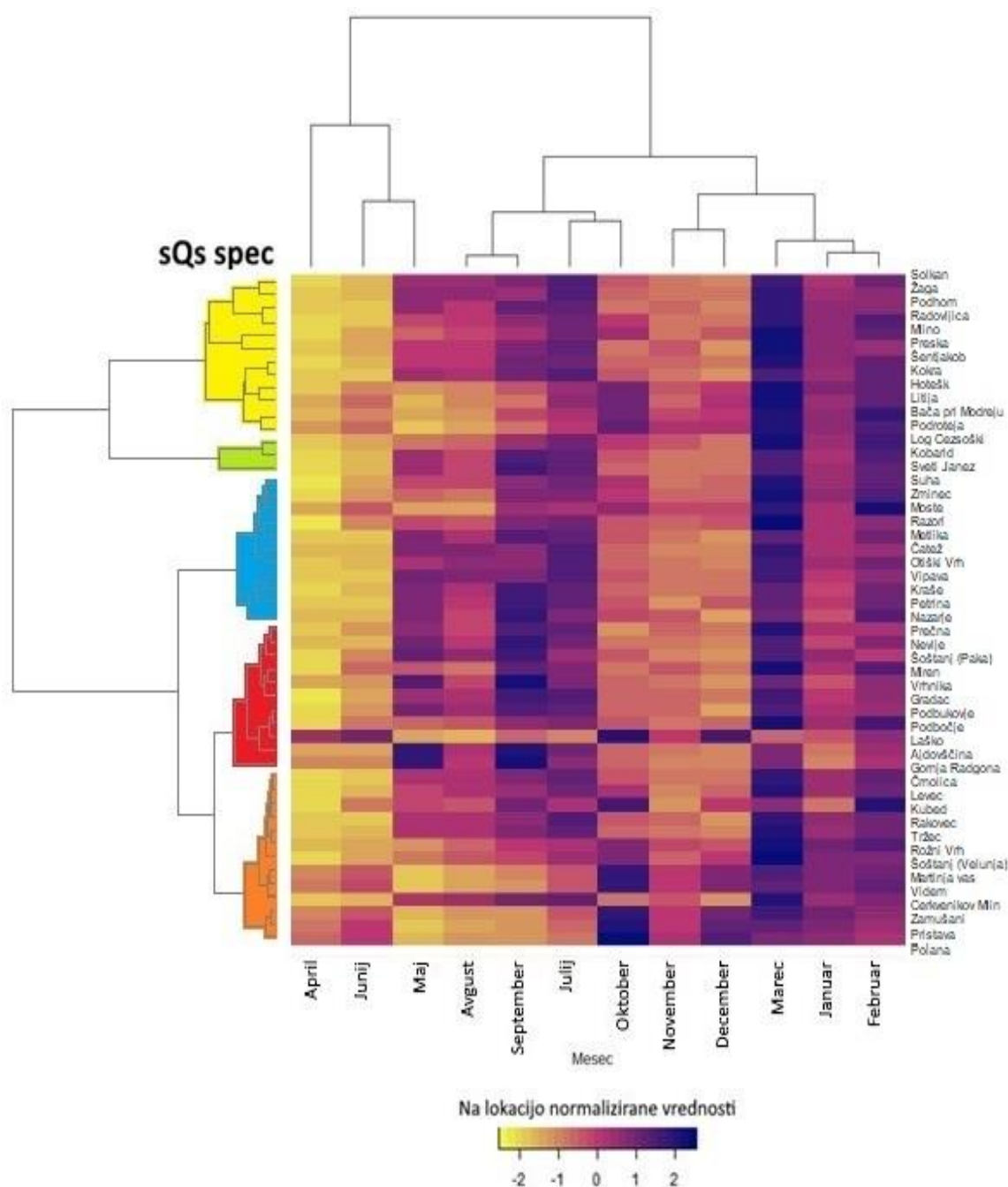
Gornja Radgona (1060), Nevlje (4480), Gradac (4969), Vrhnika (5030), Laško (6200), Šoštanj (Paka) (6300), Podbukovje (7029), Podbočje (7160), Prečna (7340), Miren (8601) in Ajdovščina (8630) so vodomerne postaje, razvrščene v četrto (rdečo) skupino. V obravnavanem obdobju te postaje izkazujejo izrazito nizko vodnatost v poletnem obdobju, spomladi in jeseni pa je vodnatost večja in višek doseže aprila (slika 7). Med postajami te skupine najbolj izstopa postaja Gornja Radgona (1060), kar lahko vidimo tudi iz dendrograma na sliki 7. Zanj je značilna največja vodnatost maja in junija, pa tudi poletni meseci niso tako suhi kot na drugih postajah te skupine, so pa zato zimski meseci bolj sušni. Vodomerne postaje te skupine so razpršene praktično po celi Sloveniji (slika 8). Vodomerne postaje pete (oranžne) skupine se nahajajo v vzhodni polovici države (slika 8), z izjemo dveh, in sicer Cerkevnikovega mlina (9050) na reki Reki in Kubeda (9210) na Rižani. Ostale

vodomerne postaje te skupine so Pristava (1140), Polana (1220), Videm (2652), Tržec (2754), Zamušani (2900), Martinja vas (4671), Rakovec (4750), Šoštanj (Velunja) (6420), Levec (6630), Črnlolica (6691) in Rožni Vrh (7308) (slika 7). Vodomerne postaje te skupine v obravnavanem obdobju izkazujejo izrazito nizke vrednosti pretokov poleti in veliko vodnatost v spomladanskih (marec, april) in zimskih mesecih (december do februar) (slika 7). Tudi za zadnji dve skupini vodomernih postaj lahko ugotovimo podobnosti v sezonskosti, kar je razvidno tudi iz osnovne hierarhije na sliki 7, saj sta obe skupini na naslednjem nivoju povezani v isto skupino.

V primeru srednjih pretokov (*sQs_spec*) je rezultat hierarhičnega razvrščanja vodomernih postaj po skupinah (slika 9) enak kot v primeru srednjih malih pretokov, kar pomeni, da je razporeditev posameznih vodomernih postaj v skupine ostala enaka. Kljub vsemu pa lahko vidimo, da so razlike

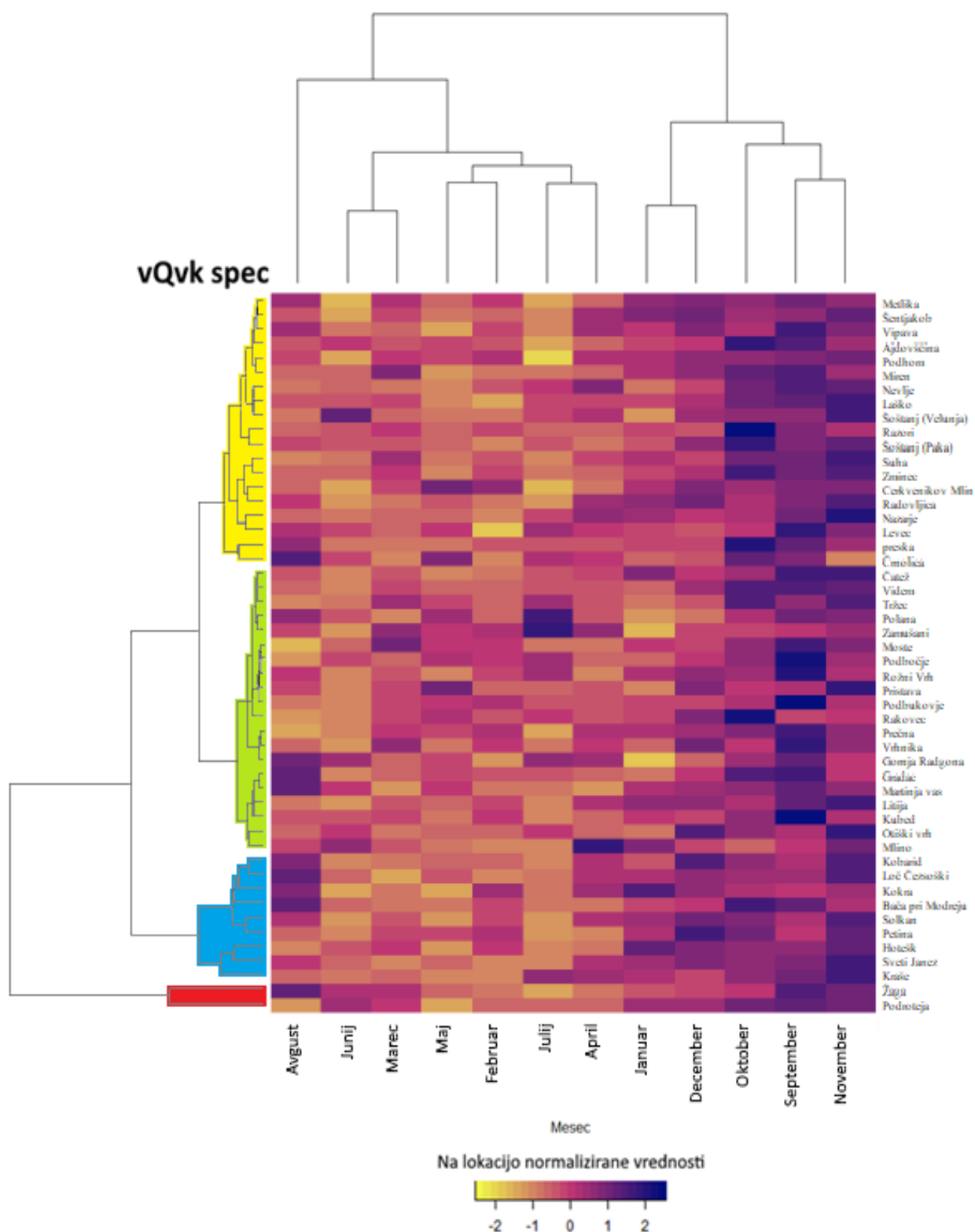
v vrednostih med meseci precej drugačne. Najbolj suha meseca sta v primeru srednjih pretokov april in junij, najbolj vodnat mesec pa je na večini obravnavanih postaj marec (slika 9). Od opisanega

najbolj izstopa vodomerna postaja Laško (6200) na Savinji, kjer je najbolj suh mesec avgust, najbolj mokra pa sta oktober in december.



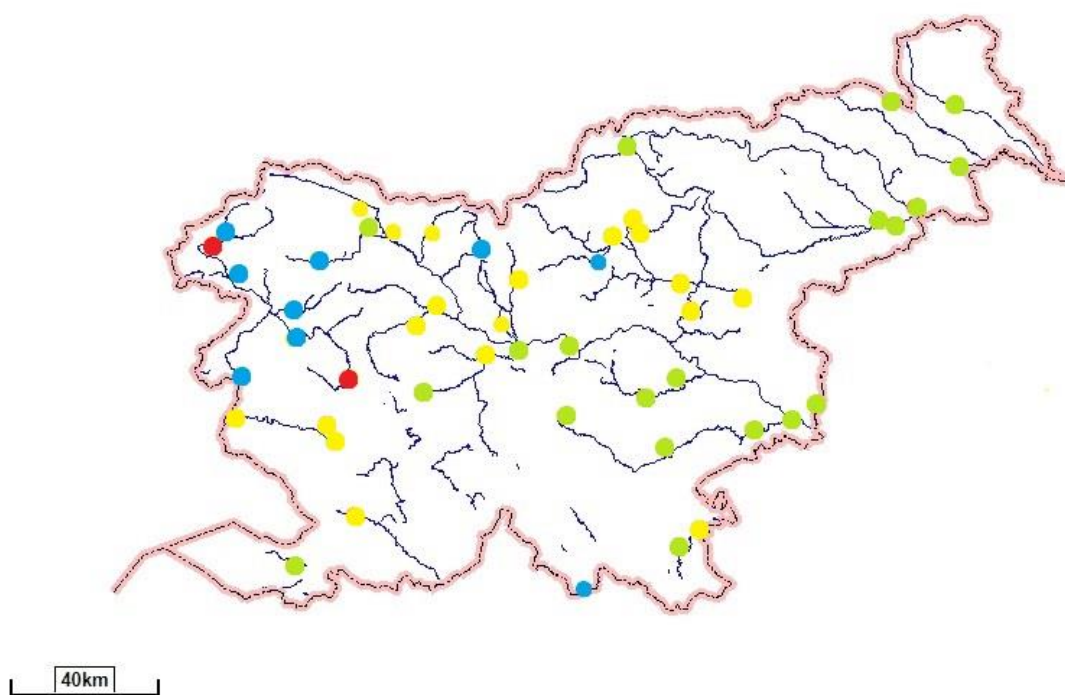
Slika 9: Dendrogram hierarhičnega razvrščanja srednjih mesečnih specifičnih pretokov (*sQs_spec*) v obravnavanem obdobju 1960–2018 (Kostevc, 2022).

Figure 9: Dendrogram of hierarchical clustering of mean monthly specific flows (*sQs_spec*) in the considered period 1960–2018 (Kostevc, 2022).



Slika 10: Dendrogram hierarhičnega razvrščanja mesečnih specifičnih pretokov visokovodnih konic (vQvk_spec) v obravnavanem obdobju 1960–2018 (Kostevc, 2022).

Figure 10: Dendrogram of hierarchical clustering of monthly specific peak flows (vQvk_spec) in the considered period 1960–2018 (Kostevc, 2022).



Slika 11: Prostorski prikaz rezultatov hierarhičnega razvrščanja mesečnih specifičnih pretokov visokovodnih konic (vQvk_spec) v obravnavanem obdobju 1960–2018. Barve vodomernih postaj so usklajene z barvami skupin na sliki 10 (Kostevc, 2022).

Figure 11: Spatial representation of the results of hierarchical clustering of monthly specific peak flows (vQvk_spec) in the considered period 1960–2018. The colors of the gauging stations are aligned with the colors of the groups in Figure 10 (Kostevc, 2022).

Rezultat enostavnega hierarhičnega razvrščanja vodomernih postaj glede na vrednosti mesečnih specifičnih pretokov visokovodnih konic (vQvk_spec) pa je spet precej drugačen. Vodomerne postaje so se v tem primeru razporedile v štiri skupine (slika 10).

V prvo (rumeno) skupino so razvrščene vodomerne postaje Podhom (3180), Radovljica (3420), Šentjakob (3570), Preska (4050), Suha (4200), Zminec (4230), Nevlje (4480), Metlika (4860), Razori (5540), Nazarje (6060), Laško (6200), Šoštanj (Paka) (6300), Šoštanj (Velunja) (6420), Levec (6630), Črnlolica (6691), Vipava (8561), Miren (8601), Ajdovščina (8630) in Cerkvenikov mlin (9050). Najvišje visokovodne konice se v tej skupini pojavljajo v jesenskih mesecih (od septembra pa vse do novembra), najmanjše visokovodne konice pa lahko na teh postajah pričakujemo februarja in julija (slika 10). Iz prostorskega prikaza rezultatov na sliki 11 je

razvidno, da so vodomerne postaje te skupine razporejene po osrednjem delu severne Slovenije ter v jugozahodnem delu države. V drugo (zeleno) skupino so razvrščene vodomerne postaje Čatež (3850), Videm (2652), Tržec (2754), Polana (1220), Zamušani (2900), Moste (5078), Podbočje (7160), Rožni Vrh (7308), Pristava (11409), Podbukovje (7029), Rakovec (4750), Prečna (7340), Vrhnika (5030), Gornja Radgona (1060), Gradac (4969), Martinja vas (4671), Litija (3660), Kubeč (9210), Otiški Vrh (2250) in Mlino (3400). Tudi pri tej skupini se najvišje visokovodne konice pojavljajo predvsem v jesenskih mesecih (september do november), se pa na nekaterih postajah te skupine pogosto pojavljajo tudi julija in avgusta. Najnižje visokovodne konice se v tej skupini pojavljajo januarja in junija. Postaje te skupine so razporejene praktično po celotnem ozemlju Slovenije (slika 11). V tretjo (modro) skupino so razvrščene vodomerne postaje Sveti Janez (3200),

Kokra (4120), Petrina (4820), Kraše (6240), Log Čezsoški (8060), Kobarid (8080), Solkan (8180), Hotešk (8450) in Bača pri Modreju (8500) (slika 10). Na večini vodomernih postaj te skupine se najvišje visokovodne konice pojavljajo od septembra do decembra, poleg tega pa tudi v avgustu. Iz prostorskega prikaza rezultatov na sliki 11 je razvidno, da je večina vodomernih postaj te skupine v severozahodnem delu države, z izjemo vodomerne postaje Petrina (4820) na jugu ter postaj Kraše (6240) in Kokra (4120) v severnem delu države. V četrto (rdečo) skupino sta razvrščeni samo dve vodomerni postaji, in sicer Žaga (8270) in Podroteja (8350), obe s porečja Soče (sliki 10 in 11). Zanju je značilno pojavljanje najvišjih visokovodnih konic v jesenskih mesecih, z izjemo postaje Žaga (8270), kjer se visoke vode pojavljajo tudi v avgustu.

Ugotovimo lahko, da je pojav visokih vod po Sloveniji časovno in prostorsko razporejen precej neenakomerno. Do podobnih ugotovitev je prišla tudi Kobold (2015), ki je ugotovila, da se visoke vode in poplave pojavljajo različno po Sloveniji in nikoli ne nastopijo hkrati po celi državi niti na posameznih porečjih.

5. Zaključki

Rezultati analiz mesečnih vrednosti značilnih pretokov (sQnp, sQs, vQvk) za obdobje 1960–2018 s 50 vodomernih postaj ARSO kažejo velik razpon vrednosti visokovodnih konic na vseh obravnavanih vodomernih postajah. Razpon vrednosti razmerja vQvk/sQnp se giblje med približno 20 in 1000, medtem ko je razpon vrednosti razmerja sQs/sQnp med 2 in 20, kar pomeni, da so zaradi hudourniške narave nihanja med malimi, srednjimi in velikimi pretoki v Sloveniji lahko velika, zlasti na rekah, ki imajo v sušnih obdobjih zelo nizke pretoke. Dobili smo vpogled v razmerja pretokov rek po Sloveniji, ki pa ne kažejo posebnega regionalnega vzorca.

Hierarhično razvrščanje vodomernih postaj za srednje male (sQnp) in srednje pretoke (sQs) je dalo podobne rezultate oz. so bile vodomerne postaje v obeh primerih razvrščene v pet enakih skupin. Samo dve skupini bi lahko bolj točno prostorsko umestili na severozahod Slovenije, v ostalih treh skupinah so

vodomerne postaje razporejene praktično po celotni Sloveniji. Podobnost srednjih in srednjih malih pretokov kažejo tudi analize trendov (Jurko, 2009; Oblak, 2017; Oblak et al., 2021). Pri hierarhičnem razvrščanju vodomernih postaj glede na vrednosti visokovodnih konic (vQvk) pa so se izoblikovale štiri skupine, ki pa jih je prav tako težko prostorsko točno opredeliti, razen mogoče zadnje skupine z le dvema postajama, ki se obe nahajata v porečju Soče.

Analiza značilnih specifičnih pretokov s hierarhičnim razvrščanjem vodomernih postaj in pripadajočih značilnih specifičnih pretokov (srednjih malih in srednjih pretokov ter visokovodnih konic) v skupine, ki opredeljujejo časovno in prostorsko komponento, daje širšo sliko sezonskih značilnosti kot v preteklosti izdelane analize pretočnih režimov (Frantar in Hrvatin, 2008; Kolbezen in Pristov, 1998).

Zahvala

Agenciji RS za okolje se zahvaljujemo za posredovane podatke. Delo je bilo delno sofinancirano iz raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, ter raziskovalnega programa Slovenske nacionalne komisije za UNESCO (UNESCO IHP C3330-20-456010).

Viri

ARSO. (2021a). Podnebne spremembe 2021: Fizikalne osnove in stanje v Sloveniji. Poročilo IPCC 2021. Povzetek za odločevalce z dodanim opisom stanja v Sloveniji. Ljubljana, Slovenia.

ARSO. (2021b). Arhivski hidrološki podatki [WWW Document]. URL <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/>

ARSO. (2017). Ocena tveganja za sušo. Ljubljana, Slovenia.

ARSO. (2003). Ranljivost slovenskega kmetijstva in gozdarstva na podnebno spremenljivost in ocena predvidenega vpliva. Ljubljana, Slovenia.

Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevca, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero,

- L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science* (80). **357(6351)**, 588–590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, J. L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* **573(7772)**, 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>.
- Bonacci, O. (2015). Climate changes – dilemmas from the past and the present. *Acta hydrotechnica* **28(48)**, 39–47.
- Brilly, M., Šraj, M. (2014). Osnove hidrologije. UL FGG, Ljubljana.
- Cunja, J., Kobold, M., Šraj, M. (2020). Analysis of runoff deficit using the threshold method for the case of three gauging stations in Slovenia. *Acta hydrotechnica* **33(59)**, 113–127. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2020.08>.
- Cunja, J., Kobold, M., Šraj, M. (2019). Časovna in prostorska analiza največjih hidroloških suš v Sloveniji. *Ujma* (33), 95–103.
- Demšar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, Č., Hočevar, T., Milutinovič, M., Možina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Starič, A., Štajdohar, M., Umek, L., Žagar, L., Žbontar, J., Žitnik, M., Zupan, B. (2013). Orange: Data Mining Toolbox in Python. *J. Mach. Learn. Res.* **14**, 2349–2353.
- Frantar, P., Hrvatin, M. (2008). Pretočni režimi, in: Frantar, P. (ur.), Vodna Bilanca Slovenije 1971-2010. MOP, ARSO, Ljubljana, Slovenia, 43–50.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jurko, M. (2009). Statistična analiza trendov značilnih pretokov slovenskih rek. UL FGG.
- Kobold, M. (2015). Hidrološko stanje voda kot posledica vremenskega dogajanja. *Vetrnica* (8), 4–7.
- Kobold, M., Dolinar, M., Frantar, P. (2012). Spremembe vodnega režima zaradi podnebnih sprememb in drugih antropogenih vplivov, v: I. Kongres o Vodah Slovenije 2012, Zbornik prispevkov. Ljubljana, Slovenija, 7–22.
- Kolbezen, M., Pristov, J. (1998). Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Ljubljana.
- Kostevc, L. (2022). Analiza specifičnih značilnih pretokov slovenskih rek. Univerza v Ljubljani.
- Neuwirth, E. (2022). RColorBrewer: ColorBrewer Palettes.
- Oblak, J. (2017). Analiza sezonske spremenljivosti pretokov rek v Sloveniji. UL FGG.
- Oblak, J., Kobold, M., Šraj, M. (2021). The influence of climate change on discharge fluctuations in Slovenian rivers. *Acta Geogr. Slov.* **61(2)**, 155–169. <https://doi.org/10.3986/AGS.9942>.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing.
- Šraj, M., Bezak, N. (2020). Comparison of time trend- and precipitation-informed models for assessing design discharges in variable climate. *J. Hydrol.* **589**, 125374. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125374>.
- Šraj, M., Menih, M., Bezak, N. (2016a). Climate variability impact assessment on the flood risk in Slovenia. *Phys. Geogr.* **37(1)**, 73–87. <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1155389>.
- Šraj, M., Mikoš, M., Bezak, N. (2019). Hidrometeorološki ekstremi in vrednotenje njihovih sprememb na osnovi merjenih podatkov, v: 30. Mišičev vodarski dan. Vodnogospodarski biro, Maribor, 75–81.
- Šraj, M., Viglione, A., Parajka, J., Bloeschl, G. (2016b). The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. *J. Hydrol. Hydromechanics* **64(4)**, 426–437. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0032>.
- Sušnik, A., Gregorič, G., Uhan, J., Kobold, M., Andjelov, M., Petan, S., Pavlič, U., Valher, A. (2013). Drought variability in Slovenia and analysis of drought in 2013, v: 24. Mišičev vodarski dan 2013. Vodnogospodarski biro, Maribor, 102–109.
- The R Graph Gallery (2018). Heatmap [WWW Document]. URL <https://r-graph-gallery.com/heatmap>
- Warnes, G. R. et al. (2015). gplots: various R programming tools for plotting data.
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis, Second. ed. Springer-Verlag, New York, USA.
- Zalokar, L., Kobold, M., Šraj, M. (2021). Investigation of Spatial and Temporal Variability of Hydrological Drought in Slovenia Using the Standardised Streamflow Index (SSI). *Water (Switzerland)* **13(22)**, 3197. <https://doi.org/10.3390/w13223197>.