

PROMJENE PROTOČNIH REŽIMA NAJVEĆIH SAVSKIH I DRAVSKIH PRITOKA U HRVATSKOM ZAGORJU I GORNJOJ PODRAVINI 1961. – 2020.

CHANGES IN DISCHARGE REGIMES OF THE LARGEST SAVA AND DRAVA TRIBUTARIES IN HRVATSKO ZAGORJE AND GORNJA PODRAVINA REGIONS (NORTHWESTERN CROATIA) IN 1961-2020 PERIOD

Danijel OREŠIĆ

Sveučilište u Zagrebu,
Prirodoslovno-matematički fakultet,
Geografski odsjek
Marulićev trg 19/II, 10000 Zagreb, HR
doresic@geog.pmf.hr

Received/Primljeno: 16. 1. 2024.

Accepted/Prihvaćeno: 18. 6. 2024.

Original scientific paper/Izvorni znanstveni rad

UDK / UDC 911.2:556(497.522)“1961/2020”

556.3(497.522:497.525)“19/20”

Anita FILIPČIĆ

Sveučilište u Zagrebu,
Prirodoslovno-matematički fakultet,
Geografski odsjek
Marulićev trg 19/II, 10000 Zagreb, HR
filipcic@geog.pmf.hr

SAŽETAK

Najveći savski i dravski pritoci na području Hrvatskog zagorja i Gornje Podravine jesu Krapina, Sutla, Bednja i Plitvica. S obzirom na raspoloživost podataka o protocima 1961. – 2020., analiza promjene protočnih režima obavljena je na trima reprezentativnim hidrološkim postajama: Ludbreg na Bednji, Kupljenovo na Krapini i Zelenjak na Sutli. Uspoređene su vrijednosti mjesečnih srednjaka i modulnih koeficijenata iz dvaju uzastopnih klimatološki standardnih 30-godišnjih razdoblja – 1961. – 1990. i 1991. – 2020. Promjene protočnih režima uspoređene su s promjenama u godišnjem hodu mjesečnih količina padalina, srednjih mjesečnih temperatura zraka i srednjih mjesečnih broja dana sa snježnim pokrivačem na odabranim meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka. U novijem razdoblju došlo je do pada srednjih mjesečnih protoka u gotovo svim mjesecima, najviše u toplom dijelu godine. Smanjenje protoka u proljeće pod utjecajem je povećanja temperatura zraka, ali i znatnog smanjenja proljetnih padalina, posebno snijega. Ljetni pad protoka uglavnom je pod utjecajem statistički značajnog povećanja srednjih mjesečnih temperatura zraka. Smanjenje uloge snijega i veća uloga kiša na prijelazu iz jeseni u zimu uzrokuju izravnije otjecanje te je u protočnom režimu svih analiziranih postaja prosinacski maksimum postao izraženiji.

Ključne riječi: protok, protočni režim, klimatske promjene, Krapina, Bednja, Sutla, hidrogeografija, hidrologija, klimatologija

Key words: flow, flow regime, climate change, Krapina, Bednja, Sutla, hydrogeography, hydrology, climatology

1. UVOD

Cilj je ovoga rada razmotriti kretanje srednjeg godišnjeg protoka te analizirati promjene protočnoga režima na najvećim savskim i dravskim pritocima u Hrvatskom zagorju i Gornjoj Podravini u razdoblju od 1961. do 2020. godine uspoređujući protočne režime posljednjih dvaju uzastopnih klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. S obzirom na duljinu mjerenja protoka, to je bilo moguće na postajama na Bednji, Krapini i Sutli. Protočni režim tipično opisuje godišnji hod srednjih mjesečnih protoka te kretanje i varijabilnost drugih karakterističnih hidroloških veličina koje su odraz geografskih obilježja porječja (Beckinsale, 1969., Riđanović, 1993., Čanjevac, 2013.). U radu se također uspoređuju promjene protočnih režima s promjenama u režimima padalina i temperature zraka u istom razdoblju, odnosno u posljednjim dvama uzastopnim klimatološki standardnim razdobljima na odabranim meteorološkim postajama u regiji.

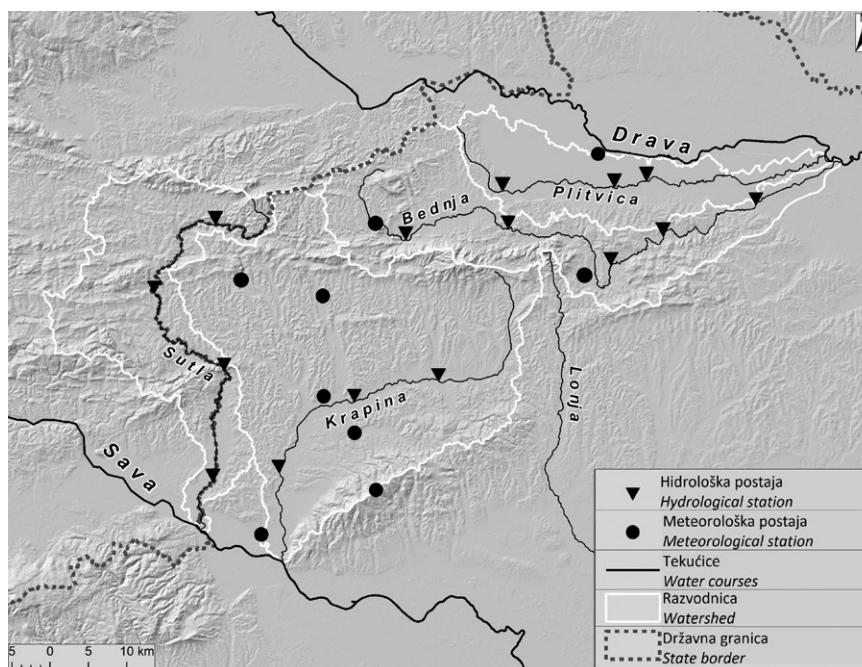
1.1. Istraživano područje

Budući da je cilj bio razmotriti protočne režime koji su odraz prilika u Hrvatskom zagorju i Gornjoj Podravini, bilo je potrebno promotriti protočne režime najvećih savskih i dravskih pritoka koji teku ovim krajevima i čija se porječja steru u tim krajevima. Nisu razmatrane hidrološke postaje izravno na Dravi i Savi s obzirom na to da je njihov protočni režim ponajprije odraz prilika u uzvodnijim dijelovima njihovih porječja. Hrvatsko zagorje i Gornja Podravina tradicionalne su regije na sjeverozapadu Hrvatske (Kurtek, 1966., Feletar, 1988., Ilić et al., 1993., Klemenčić, 2017.). Duljinom i površinom porječja u tim se dvjema regijama ističu dravski pritoci Bednja i Plitvica te savski pritoci Krapina i Sutla. U hidrografskom pogledu ta četiri porječja obuhvaćaju znatan dio Gornje Podravine i veliku većinu Zagorja te se mogu smatrati istraživanim područjem (sl. 1). Ovom prilikom nije razmatran nizvodniji dio Gornje Podravine s obzirom na to da ga uvelike čine manja porječja dravskih pritoka Glibokog i Koprivnice (izviru na Kalniku) te Komarnice (izvire na Bilogori). Također, nije razmatran izvorišni dio porječja Lonje (na kojem i nema postaja) kao ni razmjerno malo porječje Lužnice između Sutle i Krapine.

U klimi Hrvatskog zagorja i Gornje Podravine prevladavajuću ulogu imaju kontinentski utjecaji, a prema klasifikaciji po Köppenu istraživano područje ima klimatski tip Cfb, odnosno ima umjereno toplu vlažnu klimu s toplim ljetom¹ (Filipčić, 1998.; Šegota i Filipčić, 2003.). Mjesne razlike uvjetovane su ponajprije nadmorskom visinom i reljefom. Najveći dio istraživanog područja ima srednju godišnju temperaturu zraka 10 – 11 °C, oko stupanj hladniji je brdski prostor sjeverno od Ivanšćice, a izoterma od 9 °C ocrta istaknute gore (vršni dijelovi najviših gora 7 – 8 °C). Padaline su raspoređene tijekom cijele godine pa nema klimatski sušnog razdoblja. Najveći dio istraživanog područja prima od 900 do 1000 mm padalina godišnje, dok vršni dijelovi gora primaju od 1100 do 1200 mm padalina godišnje.

S obzirom na humidnu klimu kao i činjenicu da prevladavaju slabo propusne klastične stijene, mreža tekućica dobro je razvijena. Od odabranih porječja najveće je ono rijeke Krapine, glavne sabirnice voda južnog Zagorja. Ona je duga 68 km s porječjem od 1236 km². Izvire u istočnom dijelu Ivanšćice, kod naselja Podrute, teče razmjerno širokom dolinom između obronaka Medvednice i Ivanšćice do proširenja kod Zaboka-Velikog Trgovišća, odakle nastavlja na jug i ulijeva se u Savu kraj Podsuseda. Najvažniji prtok joj je Krapinčica koja izvire u Maceljskom gorju. Uglavnom u južnom Zagorju prostire se i razmjerno uska, lijeva strana porječja Sutle, duge 94 km, s porječjem od 581 km², od čega 130 km² u Hrvatskoj. Izvire na južnim obroncima Maceljskog gorja, teče uglavnom podnevničkim smjerom i ulijeva se u Savu kod Drenja Brdovečkog. Najveći dio sjevernog Zagorja te dio Gornje Podravine odvodnjava rijeka Bednja, duga 106 km, s porječjem od 604 km², koje se proteže sjeverno od Ivanšćice i Kalnika, od Maceljskog gorja na zapadu do podravske nizine na istoku. Bednja izvire u sjevernom podnožju Ravne gore, a ulijeva se u Dravu kod Malog Bukovca. U Gornjoj Podravini je drugi najveći dravski prtok Plitvica, a ta je rijeka duga 69 km i s površinom porječja od približno 270 km². Izvire na

¹ Srednja temperatura najhladnijeg mjeseca nije niža od -3 °C, a najmanje jedan mjesec ima srednju temperaturu višu od 10 °C (oznaka C). Ljeto je toplo (oznaka b), odnosno srednja temperatura najtoplijeg mjeseca niža je od 22 °C, ali barem četiri mjeseca imaju srednju temperaturu barem 10 °C. Padaline su raspoređene tijekom cijele godine pa nema sušnog razdoblja (oznaka f).



Sl. 1. Hidrološke postaje na četiri rijeke s najvećim porječjima u gornjoj Podravini i Hrvatskom zagorju (Plitvica, Bednja, Krapina i Sutla) te meteorološke postaje u tim porječjima ili u njihovoj blizini. Odabrane hidrološke i meteorološke postaje za ovo istraživanje su uokvirene

Fig. 1. Hydrological stations on four rivers with largest catchments in Gornja Podravina and Hrvatsko zagorje regions, meteorological stations in or near the catchments. Hydrological and meteorological stations selected in this research are framed

obroncima Maceljskog gorja, teče uglavnom na jugoistok. Kod Cerja Tužnoga izlazi iz pobrđa te sljedećih 50-ak km teče kao nizinska tekućica dravskom ravnicom na istok, usporedo s Dravom u koju se ulijeva nešto uzvodnije od ušća Bednje.

1.2. Prethodna istraživanja

Nedostaje hidroloških znanstvenih radova koji bi se bavili specifično nekom od navedenih rijeka. O osnovnim značajkama režima Krapine pisao je Orešić (1995.), no nije se bavio promjenama protočnog režima. Za istraživanu problematiku najvažniji su znanstveni radovi koji se bave dugoročnim promjenama protočnih režima u širem području, a koji uključuju i područje koje je ovdje istraživano, odnosno neku od odabranih tekućica. U tom smislu relevantni su hidrogeografski radovi Čanjevca (2012.) o promjenama protočnih režima u hrvatskom dijelu porječja Dunava te Čanjevca i Orešića (2018.) o promjenama protočnih režima hrvatskih rijeka u razdoblju od 1961. do 2009. U prvom je radu (Čanjevca, 2012.) analizirano 12 postaja među kojima su dvije iz istraživanog područja, Zelenjak na Sutli i Tuhovec na Bednji, a uspoređene su odlike režima iz razdoblja 1980. – 2009. s klimatološki standardnim razdobljem 1961. – 1990. U drugom je radu (Čanjevca i Orešić, 2018.) među 8 analiziranih reprezentativnih postaja odabrana postaja Tuhovec na Bednji kao reprezentativna za peripanonski kišno-snežni režim, a promjene režima prate se usporedbom uzastopnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2009. Rezultati obaju radova pokazuju da je na obje spomenute postaje u novije doba (u odnosu na protočni režim 1961. – 1990.) uočen pad srednjih godišnjih protoka te primjetno smanjenje udjela protoka u toplom dijelu godine, posebno u travnju i svibnju, kao i povećanje udjela protoka u prosincu. Kod Zelenjaka na Sutli zbog prosinačkog je povećanja protoka sekundarni maksimum pomaknut sa studenoga na prosinac, dok je kod Tuhovca na Bednji prosinac čak postao mjesec primarnog maksimuma (u klimatološki standardnom razdoblju 1961. – 1990. to je bio ožujak).

O dugoročnim trendovima promjene protoka slovenskih rijeka piše Ulaga (2002.), koja je obradila podatke za 53 hidrološke postaje u Sloveniji u 45-godišnjem nizu 1955. – 1999., među ostalima i za postaju Rakovec na Sutli. Međutim, nisu obrađivane promjene režima, nego trendovi srednjih godišnjih te godišnjih minimalnih i maksimalnih protoka. Za postaju Rakovec u navedenom je razdoblju zabilježen blagi porast srednjih godišnjih protoka (+0,03 m³/godišnje, bez naznake statističke značajnosti).

Iako se bavi samo promjenama u suvremenom nestandardnom razdoblju od trideset godina (1980. – 2009.), relevantan je hidrološki rad Barbalića i Kuspilića (2014.) koji analizira trendove 33 hidrološka

parametra na 84 hidrološke postaje u hrvatskom dijelu porječja Dunava. Među njima je 18 postaja na većim i manjim tekućicama Gornje Podravine i Hrvatskog zagorja (uključujući 3 na Dravi). Na njih 17 u navedenom razdoblju trend srednjih godišnjih protoka nije statistički značajan (iznimka je Novigrad Podravski na Komarnici s opadajućim trendom). U analizi trendova srednjih mjesečnih protoka na po četiri postaje zabilježen je statistički značajan negativni trend svibanjskih i lipanjskih protoka. Za razumijevanje problematike važan je zaključak toga opsežnog istraživanja da razmatrani indikatori upozoravaju na produljenje sušnih ljetnih razdoblja te većina promjena odgovara scenarijima o klimatskim promjena koji predviđaju povećanje suša te intenzivnije i učestalije ekstreme (Barbalić i Kuspilić, 2014.). Do sličnog zaključka dolaze i Čanjevac i Orešić (2015.) koji razmatraju trendove godišnjih i sezonskih protoka hrvatskih rijeka (53 postaje na 39 tekućica) u nešto novijem, ali kraćem razdoblju 1990. – 2009., među ostalima i iz istraživanog područja. Zaključuju da na 31 postaji postoji pad srednjih godišnjih protoka, koji je statistički značajan na četiri postaje, među kojima je postaja Mlačine na Glibokom (na kojoj je zabilježen i statistički značajan ljetni pad protoka).

Relevantni su klimatološki radovi koji se bave elementima vodne bilance, a ističu se dva rada i opet širega prostornog obuhvata: u radu Zaninovića i Gajić-Čapke (2000.) zaključuje se da je tijekom 20. st. u nizinskoj Hrvatskoj došlo do blagog porasta srednje godišnje temperature zraka, smanjenja količine padalina i povećanja potencijalne evapotranspiracije, sa statistički značajnim trendom od 1987. U radu Pandžića i dr. (2009.) zaključuje se da u razdoblju 1951. – 2000. postoji pozitivan trend temperature zraka, potencijalne i stvarne evapotranspiracije te negativan trend otjecanja u gotovo cijeloj Hrvatskoj.

1.3. Izvori podataka i metode

U radu je određeno razdoblje za istraživanje promjene protoka 1961. – 2020., koje se može podijeliti na dva klimatološki standardna tridesetogodišnja razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine. Za sveukupno razdoblje utvrđeni su linearni trendovi srednjeg godišnjeg protoka te maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka na odabranim hidrološkim postajama. Promjene protočnih režima utvrđene su usporedbama vrijednosti mjesečnih srednjaka i modulnih koeficijenata iz dvaju uzastopnih klimatološki standardnih tridesetogodišnjih podrazdoblja. Utvrđene promjene protočnih režima uspoređene su s promjenama u godišnjem hodu mjesečnih količina padalina, srednjih mjesečnih temperatura zraka i srednjih mjesečnih broja dana sa snježnim pokrivačem na reprezentativnim meteorološkim postajama.

Za statističku analizu vremenskih nizova korišteni su MSExcel i statistička aplikacija XLSTAT. Homogenost nizova provjerena je Pettittovim testom (Pettitt, 1979.) uz signifikantnost $\alpha = 0,05$. Svi nizovi srednjih godišnjih i srednjih mjesečnih protoka homogeni su za sva razmatrana razdoblja. Statistička značajnost trendova provjerena je Mann-Kendallovim testom (Mann, 1945.; Kendall, 1975.), a u radu je odabrana uobičajena 95-postotna razina pouzdanosti testa (signifikantnost $\alpha = 0,05$).

Hidrološki podaci preuzeti su od Sektora za hidrologiju DHMZ-a (Baza hidroloških podataka - HIS2000, DHMZ, n.d.). Na rijeci Bednji ima 5 aktivnih postaja, na Plitvici 3, na Krapini su aktivne 3 hidrološke postaje i na Sutli 2 (sl. 1, tab. 1). Za potrebe ovoga istraživanja najvažnije je bilo da postoji homogeni i potpun (ili gotovo potpun) niz podataka o protocima na hrvatskim² hidrološkim postajama na odabranim rijekama u 60-godišnjem razdoblju 1961. – 2020. Ako je na istoj rijeci njih više došlo u obzir, odabrana je najnižvodnija. Tako su u analizu promjena protoka uključene tri postaje: Ludbreg na Bednji, Kupljenovo na Krapini i Zelenjak na Kupi.

Nijedna hidrološka postaja na rijeci Plitvici nije mogla biti uključena jer da se na njima premalo godina mjerio protok da bi se obavila analiza promjene protočnih režima.

Kako bi se usporedili obilježja i promjene u protočnom režimu s obilježjima i promjenama u režimu padalina i temperature zraka za odabrane meteorološke postaje, korišteni su podaci iz digitalne baze podataka DHMZ-a (upisani podaci od 1981.), nadopunjeni podacima Meteoroloških godišnjaka I (bivšeg Saveznog hidrometeorološkog zavoda SFRJ). Od aktivnih meteoroloških postaja u četirima odabra-

² Osim hrvatskih, u istraživanom području aktivne su još dvije slovenske hidrološke postaje na Sutli: Rogatec i Rakovec. Ni jedna ni druga nemaju potpun niz podataka o protocima u razdoblju 1961. – 2020., iako se podaci postaje Rakovec uobičajeno nadopunjuju podacima bivše postaje Rakovec I (1965. - 2014.).

Tab. 1. Osnovni podaci o hrvatskim hidrološkim postajama DHMZ-a na odabranim dravskim (Bednja, Plitvica) i savskim pritocima (Krapina, Sutla) s razdobljima mjerenja protoka / *Basic data on Croatian hydrological service stations on selected Drava tributaries (Bednja, Plitvica) and Sava tributaries (Krapina, Sutla) with discharge recording periods*

Postaja / Station	Tekućica / Watercourse	Mjerenje protoka od / Discharge recording from	N = godina motrenja Q / years monitored Q 1961.-2020.	Kota nula vodokaza / Gauge zero elevation	Udaljenost od ušća / River kilometres	Površina slijevnog područja / Drainage area
5140 Lepoglava	Bednja	1987. –	N = 34	219,310 m	–	89,8 km ²
5075 Željeznica	Bednja	1959. –	N = 60	196,828 m	71 km	308 km ²
5143 Ključ	Bednja	1987. –	N = 34	173,090 m	–	415,7 km ²
5065 Tuhovec	Bednja	1958. – 1975.; 1979. –	N = 56	162.850 m	31,9 km	469,5 km ²
5089 Ludbreg	Bednja	1947. –	N = 60	147,350 m	12,2 km	547 km²
5179 Krkanec	Plitvica	2016. – 2017.; 2019.; 2021. –	N = 3	173,827 m	–	–
5083 Knežinec Donji	Plitvica	1975. – 1984.	N = 10	162,990 m	–	126,5 km ²
5171 Vidovićevo mlin	Plitvica	2003. –	N = 18	159,105 m	–	–
3330 Zlatar Bistrica	Krapina	1968. – 1999.; 2001. – 2018.; 2020. –	N = 51	152,178 m	56,3 km	228 km ²
3387 Bračak	Krapina	1993. – 2017.; 2020. –	N = 26	139,570	38 km	469,6 km ²
3054 Kupljenovo	Krapina	1964. –	N = 57	128,877 m	13,8 km	1150 km²
3391 Bratkovec	Sutla	1993. – 2014.; 2016. –	N = 27	188,037 m	–	–
3127 Zelenjak	Sutla	1958. –	N = 60	162,460 m	29,8 km	455 km²

Izvor / source: HIS2000, DHMZ

Tab. 2. Osnovni podaci o odabranim meteorološkim postajama u istraživanom području s potpunim ili gotovo potpunim podacima temperature zraka i količine padalina u razdoblju 1961. – 2020. / *Basic data on selected meteorological stations in the researched area having complete or almost complete air temperature and precipitation amounts data in 1961-2020 period*

Postaja / Station	Geografske koordinate / Geographic coordinates	Nadmorska visina / elevation above sea	Godina početka rada / established	N = broj godina s potpunim podacima u razdoblju 1961. - 2020. / number of years with full records in 1961-2020 period on:		
				temperature zraka / air temperature	količine padalina / precipitation	br. dana sa snježnim pokr. / no. of days with snow cover
Puntijarka	φ: 45° 54' 27" N λ: 15° 58' 6" E	991 m	1892.	N = 59	N = 59	N = 58
Stubičke Toplice	φ: 45° 58' 31" N λ: 15° 55' 26" E	180 m	1952.	N = 54	N = 54	N = 53
Varaždin	φ: 46° 16' 58" N λ: 16° 21' 50" E	167 m	1936.	N = 60	N = 60	N = 60

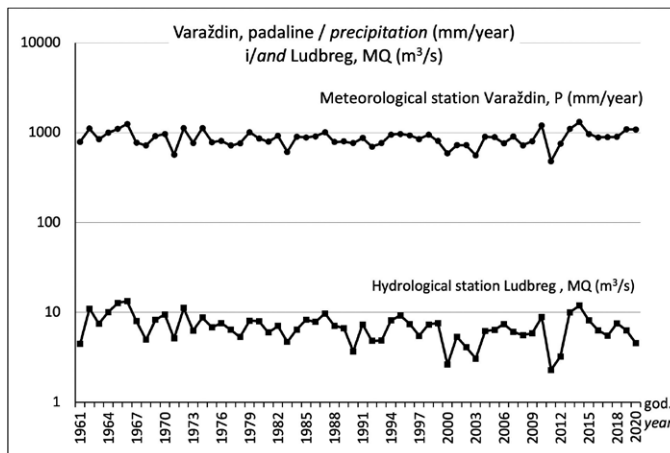
Izvor / source: Digitalna baza DHMZ-a; Meteorološki godišnjak i SHZ

nim porječjima ili na njihovim granicama (sl. 1) tri su glavne meteorološke postaje: Krapina, Puntijarka i Varaždin, uz klimatološke postaje Bednju, Novi Marof, Pregradu, Stubičke Toplice, Šibice i Zabok. Među njima potpune ili gotovo potpune nizove temperature zraka i padalina u razdoblju 1961. – 2020.³ (tab. 2) imaju postaje Varaždin u Gornjoj Podravini, Stubičke Toplice u Zagorju te Puntijarka na Medvednici, koja odražava prilike na vršnim dijelovima gora istraživanog područja te je stoga također uvrštena.

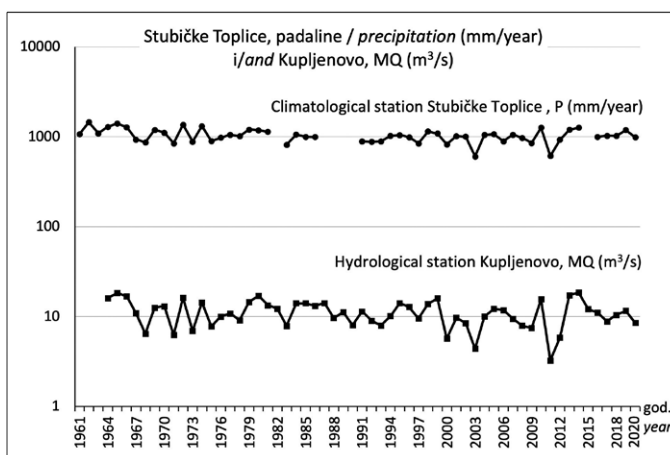
2. REZULTATI I RASPRAVA

2.1. Srednji, maksimalni i minimalni godišnji protoci 1961. – 2020.

Kretanje srednjih godišnjih protoka povezano je s kretanjem godišnjih količina padalina. Za sjeverni dio istraživanog područja kao relevantna meteorološka postaja odabrana je glavna postaja Varaždin, a za južni dio izabrana je klimatološka postaja Stubičke Toplice. Za ilustraciju njihove relevantnosti u tom pogledu uspoređeni su nizovi godišnjih količina padalina na meteorološkoj postaji Varaždin i srednjih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Ludbreg na rijeci Bednji (sl. 2) te na meteorološkoj postaji Stubičke Toplice i hidrološkoj postaji Kupljenovo na rijeci Krapini (sl. 3). Jasno se uočava da su kretanja godišnjih količina padalina i godišnjih srednjih protoka na odabranim postajama uvelike usklađena.

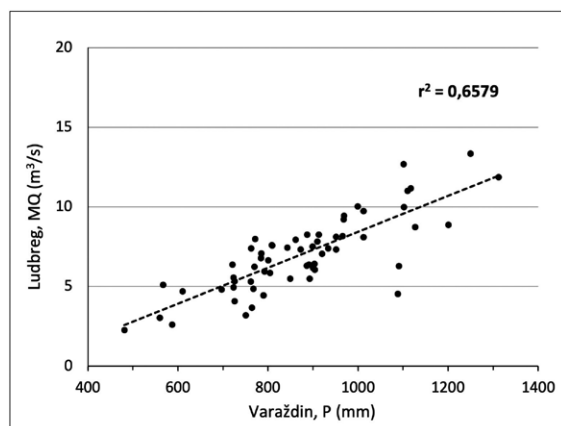


Sl. 2. Usporedba kretanja godišnjih količina padalina na glavnoj meteorološkoj postaji Varaždin (mm) i srednjih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Ludbreg na Bednji (m³/s) u razdoblju 1961. – 2020. godine. Izvor podataka: DHMZ / Comparison of the annual precipitation amounts on Varaždin main meteorological station (mm) and mean annual discharges on Ludbreg hydrological station (m³/s) in 1961 – 2020 period. Data source: DHMZ

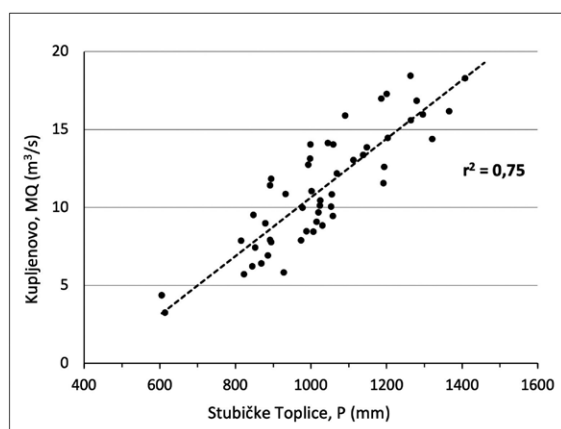


Sl. 3. Usporedba kretanja godišnjih količina padalina na klimatološkoj postaji Stubičke Toplice (mm) i srednjih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Kupljenovo na Krapini (m³/s) u razdoblju 1961. – 2020. godine. Izvor podataka: DHMZ / Comparison of the annual precipitation amounts on climatological station Stubičke Toplice (mm) and mean annual discharges on Kupljenovo hydrological station (m³/s) in 1961 – 2020 period. Data source: DHMZ

³ Postaja Krapina nije mogla biti odabrana s obzirom na nehomogenost i nepotpunost podataka; radila je 6/1963. – 4/1988. kao klimatološka postaja na jednoj lokaciji, a od 9/1993. postavljena je kao glavna postaja na posve drugoj lokaciji. Od klimatoloških postaja s tog područja Bednja ima podatke od 2006., Pregrada od 1992., za Novi Marof nisu bili dostupni podaci prije 1981., za Zabok nisu bili dostupni podaci od 1964. do 1991., a za Šibice prije 1995. Postaja Kostel ukinuta je 1987.



Sl. 4. Odnos godišnjih količina padalina (P , mm) na meteorološkoj postaji Varaždin i srednjih godišnjih protoka (MQ , m^3/s) na hidrološkoj postaji Ludbreg na rijeci Bednji u razdoblju 1961. – 2020. (broj parova podataka 60). Izvor podataka: DHMZ / *The relationship between annual precipitation (P , mm) at the Varaždin meteorological station and mean annual discharges (MQ , m^3/s) at the Ludbreg hydrological station on the Bednja River in 1961 – 2020 period (number of data pairs 60). Data source: DHMZ*



Sl. 5. Odnos godišnjih količina padalina (P , mm) na meteorološkoj postaji Stubičke Toplice i srednjih godišnjih protoka (MQ , m^3/s) na hidrološkoj postaji Kupljenovo na rijeci Krapini u razdoblju 1961. – 2020. (broj parova podataka 51). Izvor podataka: DHMZ / *The relationship between annual precipitation (P , mm) at the Stubičke Toplice meteorological station and mean annual discharges (MQ , m^3/s) at the Kupljenovo hydrological station on the Krapina River in 1961 – 2020 period (number of data pairs 51). Data source: DHMZ*

Osim toga, vidljivo je i da nema znatnijih razlika u kretanjima godišnjih količina padalina između odabranih postaja u sjevernom i južnom dijelu istraživanog područja, pa nema ni većih razlika u kretanju srednjih godišnjih protoka između odabranih dravskih i savskih porječja.

Koliki je utjecaj padalina na protok na odabranim parovima meteoroloških i hidroloških postaja, procijenjeno je jednostavnom linearnom regresijom koja pokazuje pozitivne odnose (sl. 4 i 5). Koeficijent linearne korelacije godišnjih padalina u Varaždinu i srednjih godišnjih protoka u Ludbregu na rijeci Bednji iznosi $r = 0,81$ s koeficijentom determinacije $r^2 = 0,6579$, te za niz od 60 parova podataka daje statistički značajnu vezu (uz signifikantnost $\alpha = 0,05$). Iz vrijednosti koeficijenta determinacije slijedi da se 66 posto varijabilnosti srednjih godišnjih protoka može objasniti varijabilnošću godišnjih padalina. U slučaju odnosa godišnjih padalina u Stubičkim Toplicama i srednjih godišnjih protoka u Kupljenovu na rijeci Krapini (niz od 51 parova podataka daje statistički značajnu vezu) koeficijent linearne korelacije $r = 0,87$ i koeficijent determinacije $r^2 = 0,75$, odnosno čak 75 posto varijabilnosti srednjih godišnjih protoka može se objasniti varijabilnošću godišnjih padalina. Dakle, u oba slučaja pokazuje se čvrsta veza⁴.

Na sve tri odabrane rijeke, odnosno na odabranim hidrološkim postajama (sl. 6-8), primjetan je pad srednjih godišnjih protoka u cjelokupnom 60-godišnjem razdoblju od 1961. do 2020. godine. Prema linearnim trendovima pad srednjeg godišnjeg protoka iznosi -45 l/s godišnje na postaji Ludbreg na rijeci Bednji (srednji protok 1961. – 2020. je 7003 l/s), na postaji Kupljenovo na rijeci Krapini -47 l/s godišnje (srednji protok 1964. – 2020. je 11215 l/s) te na postaji Zelenjak na rijeci Sutli -39 l/s godišnje (srednji protok 1961. – 2020. je 6662 l/s). Prema Mann-Kendallovu testu (u daljnjem tekstu MK) na postajama na rijekama Bednji i Sutli (postaja Ludbreg MK $p = 0,018$, Sen nagib -43 l/s⁵ te postaja Zele-

⁴ Prema Šošić i Serdar (1994.) vrijednost Pearsonova koeficijenta korelacije r od 0,80 je granica od korelacije srednje jačine prema čvrstoj korelaciji. Prema Chaddockovoj ljestvici vrijednost koeficijenta r od 0,64 je granica između veze srednje jakosti i čvrste veze, a u hidrologiji se općenito smatra da je korelacijski odnos značajan ako je koeficijent determinacije r^2 veći od 0,6 (Chaddock, 1925.; Žugaj, 2010.).

⁵ Mann-Kendallov test je primijenjen uz uobičajenu signifikantnost $\alpha = 0,05$, pa je prema tomu trend statistički značajan kad je p -vrijednost manja od 0,05. Sen nagib (Sen slope) je neparametrijska procjena nagiba koja se izračunava kao medijan nagiba svih parova točaka u vremenskom nizu. Kao neparametarska, ta je ocjena neosjetljiva na nedostajuće podatke u vremenskim serijama.

njak MK $p = 0,017$, Sen nagib -37 l/s) pad srednjih godišnjih protoka potvrđen je kao statistički značajan trend, što nije potvrđeno na postaji Kupljenovo na Krapini (MK $p = 0,101$, Sen nagib -37 l/s).

Kod maksimalnih godišnjih protoka u promatranom razdoblju nije potvrđen statistički značajan trend na Bednji (postaja Ludbreg MK $p = 0,848$) i Krapini (postaja Kupljenovo MK $p = 0,563$), no na Sutli je zabilježen statistički značajan trend prilično intenzivnog pada (postaja Zelenjak MK $p = 0,000$, Sen nagib -992 l/s, a prema linearnom trendu -1124 l/s godišnje).

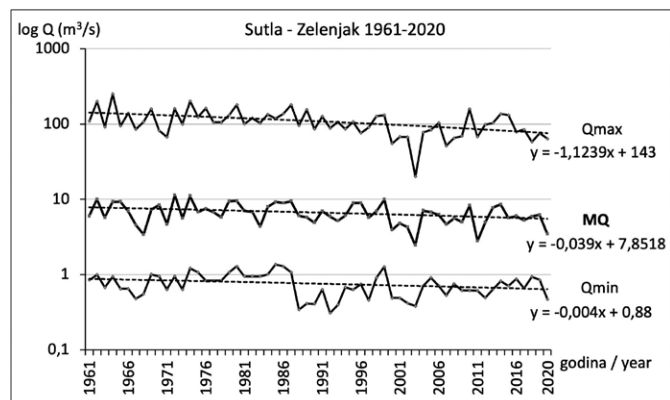
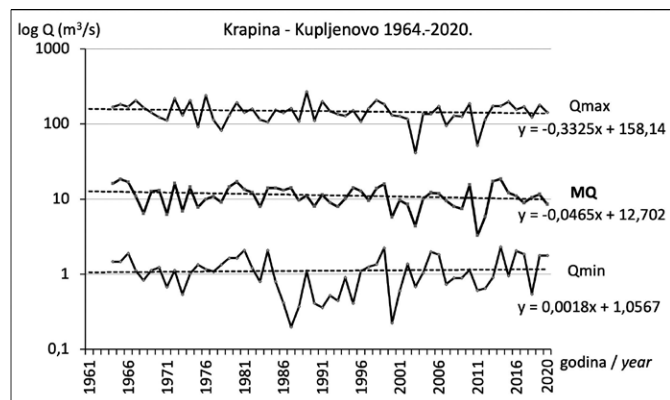
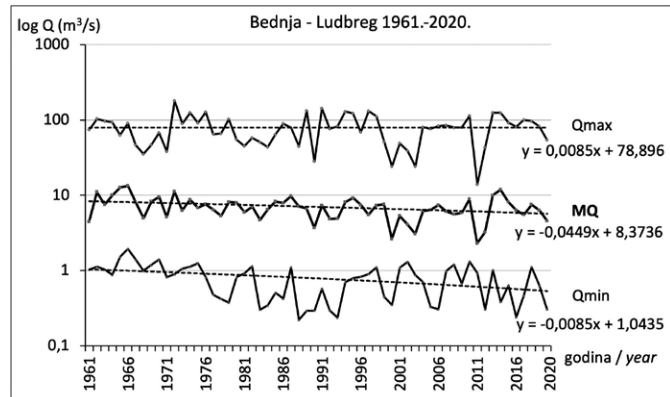
Kod minimalnih godišnjih protoka u promatranom razdoblju na Bednji je potvrđen statistički značajan trend pada (postaja Ludbreg MK $p = 0,007$, Sen nagib $-7,6$ l/s, a prema linearnom trendu $-8,5$ l/s godišnje), na Sutli je zabilježen pad, ali nije potvrđen statistički značajan trend (postaja Zelenjak MK $p = 0,083$), dok je kretanje minimalnih godišnjih protoka na Krapini bilo stagnantno.

Usporedo s prikazanim kretanjem godišnjih srednjih, maksimalnih i minimalnih protoka na odabranim hidrološkim postajama promotreno je kretanje godišnjih količina padalina i kretanje srednjih godišnjih temperatura zraka na odabranim meteorološkim postajama u istraživanom području. To su postaje Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka.

Postaja Stubičke Toplice nema posve potpune podatke (podaci godišnjih količina padalina i srednjih godišnjih temperatura zraka za 54 godine od mogućih 60 u razdoblju 1961. – 2020.), ali je kretanje postojećih podataka razmjerno usklađeno s kretanjima na ostalim dvjema odabranim postajama koje imaju potpune nizove.

Prikazani nizovi godišnjih količina padalina (sl. 9-11) homogeni su u cjelokupnom razdoblju 1961. – 2020. te nisu potvrđeni statistički značajni trendovi na odabranim postajama u istraživanom području. Kretanje je stagnantno na postaji Varaždin (po stopi od oko $-0,1$ mm/10 godina), vrlo blagi pad bilježi se na postaji Puntijarka (po stopi $-8,5$ mm/10 godina), a blagi pad zabilježen je i na postaji Stubičke Toplice ($-28,8$ mm/10 godina).

Za razliku od nizova godišnjih količina padalina, nizovi srednje godišnje temperature zraka pokazali su se nehomogenima. Nije neobično da dugi temperaturni nizovi, poput ovog od 60

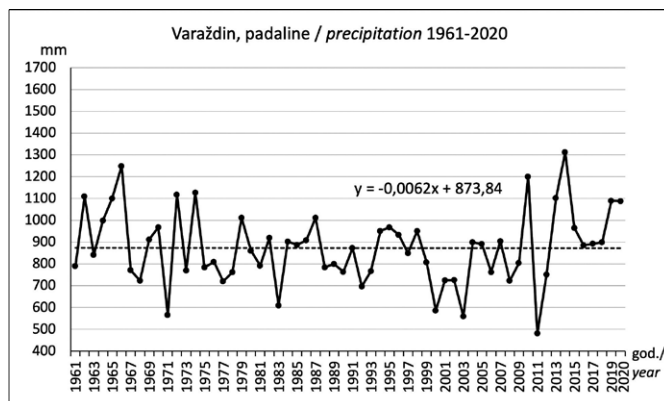
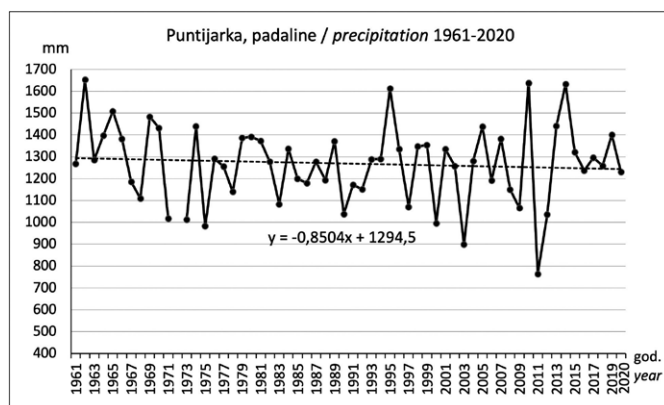
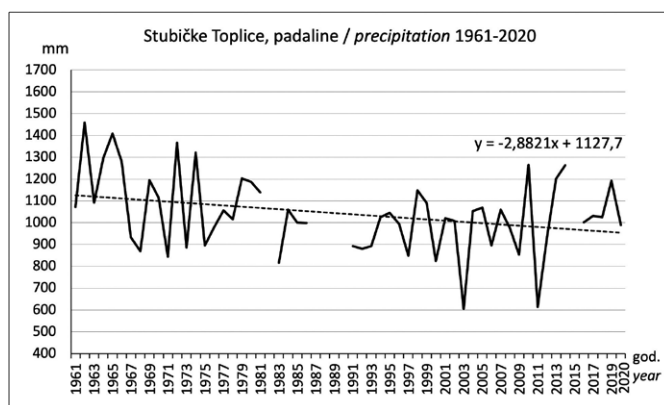


Sl. 6-8. Srednji godišnji protoci (MQ), godišnji maksimalni protoci (Qmax) i godišnji minimalni protoci (Qmin) na postajama Ludbreg na rijeci Bednji, Kupljenovo na rijeci Krapini i Zelenjak na rijeci Sutli u razdoblju 1961. – 2020. godine. Izvor podataka: DHMZ / Mean annual discharges (MQ), annual maksima (Qmax) and annual minima (Qmin) on Ludbreg station on Bednja River, Kupljenovo station on Krapina River and Zelenjak station on Sutla River in 1961 – 2020 period. Data source: DHMZ

godina, nisu homogeni, posebno na sjevernoj hemisferi na kojoj je izrazitije zatopljenje od kraja 20. st. prepoznato kao klimatološki signal. Na razini Hrvatske je porast srednjih godišnjih temperatura zraka izražen od kraja 1980-ih, što dovodi do prijeloma u tim nizovima (Bonacci, 2010.). Na sve tri odabrane postaje u istraživanom području bilježi se statistički značajan (uz MK p-vrijednosti od 0,000 na svim postajama) porast srednje godišnje temperature zraka u cjelokupnome razdoblju uz stope od oko 0,3 do oko 0,4 °C po dekadi. Razdvoje li se nizovi podataka koji su od 1961. do 2020. zabilježeni na odabranim postajama na dva homogena dijela s prijelomnom točkom prema Pettittovu testu (Pettitt, 1979.), očito je da je većina porasta nastupila u novijem razdoblju (sl. 12-14).

Navedeno je u skladu s dosadašnjim relevantnim klimatološkim istraživanjima (Pandžić et al.,

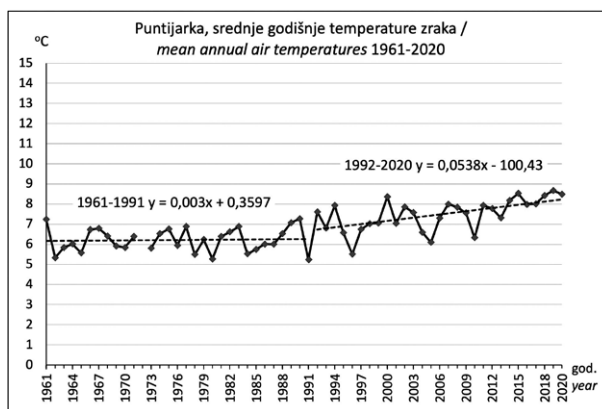
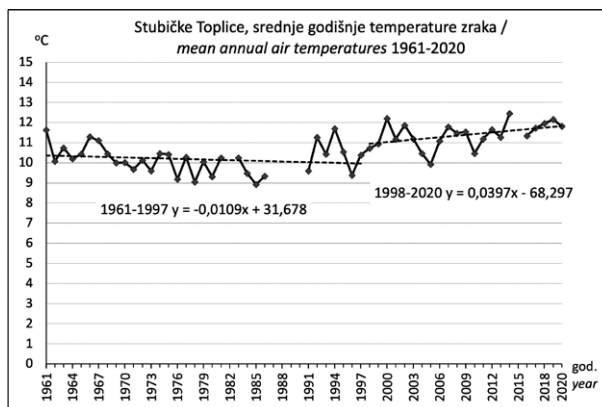
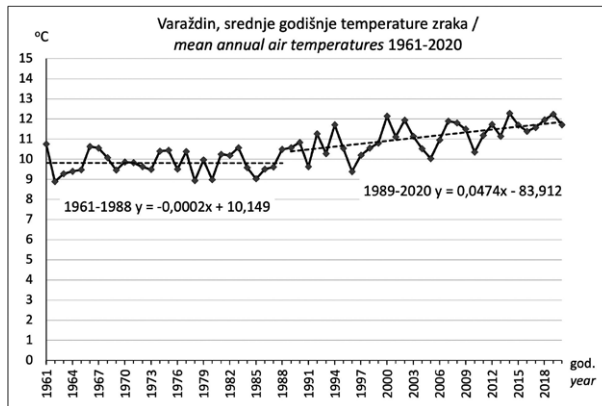
2009.; Zaninović i Gajić-Čapka, 2000.; Bonacci, 2010.; Filipčić et al., 2013.; Gajić-Čapka et al., 2015.) prema kojima je u većini Hrvatske (a svakako u zapadnom dijelu unutrašnjosti) dugo-ročno primjetan blagi pad godišnjih količina padalina te statistički značajan porast srednje godišnje temperature zraka. Može se zaključiti da je opažen pad srednjih godišnjih protoka na odabranim rijekama pod utjecajem klimatskih promjena, a posebno porasta srednje godišnje temperature zraka, što dovodi do veće evaporacije i time smanjenja otjecanja.



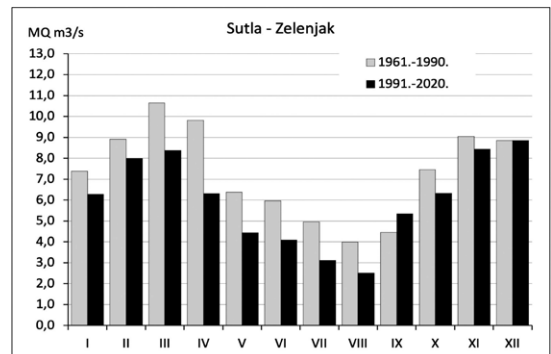
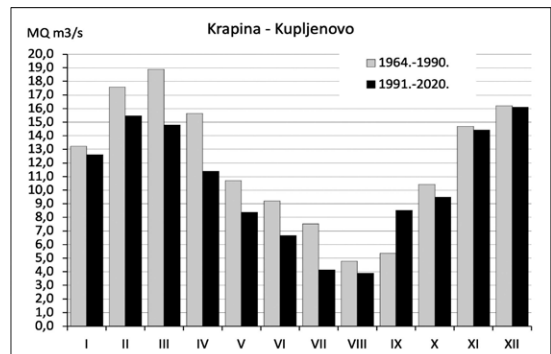
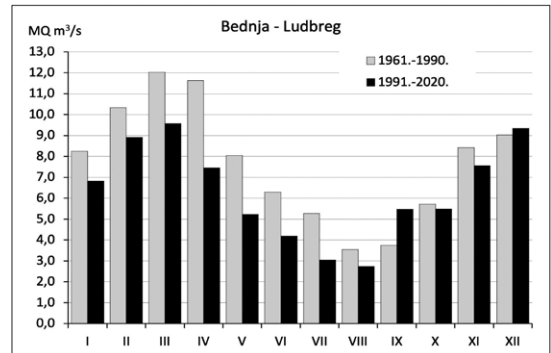
Sl. 9-11. Godišnje količine padalina (mm) na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka u razdoblju 1961. – 2020. godine. Izvor podataka: DHMZ / Annual precipitation (mm) at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations in 1961 – 2020 period. Data source: DHMZ

2.2. Promjene godišnjeg hoda srednjih mjesečnih protoka

Savski i dravski pritoci u Hrvatskom zagorju i Gornjoj Podravini prema tipu protočnog režima pripadaju u tekućice s peripanonskim kišno-snježnim režimom (Čanjevac, 2013.). Peripanonski kišno-snježni režim općenito ima dva maksimuma i dva minimuma tijekom godine. Maksimumi se uobičajeno javljaju u studenome ili prosincu, te u ožujku ili travnju, a koji je primaran nije presudno, katkad su vrlo bliski. Primarni minimum uobičajeno se javlja u kolovozu, a sekundarni u siječnju ili veljači. Ovaj najheterogeniji tip režima oslikava, uz različite veličine tekućica i njihovih porječja, raznolikost klimatskih uvjeta otjecanja na mezoregionalnoj i mikroregionalnoj razini. Kao što je uvedno napomenuto, promjene protočnih režima razmotrit će se usporedbom obilježja protočnih režima iz dvaju uzastopnih klimatološki standardnih razdoblja, 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine.



Sl. 12-14. Srednje godišnje temperature zraka (°C) na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka u razdoblju 1961. – 2020. godine. Izvor podataka: DHMZ / Mean annual air temperatures (°C) at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations in 1961 – 2020 period. Data source: DHMZ



Sl. 15-17. Usporedba protočnih režima na postajama Ludbreg na Bednji, Kupljenovo na Krapini i Zelenjak na Sutli u razdobljima 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine, izražena godišnjim hodom srednjih mjesečnih protoka (MQ) u m³/s; Izračunato prema podacima DHMZ-a / Comparison of discharge regimes at hydrological stations Ludbreg on Bednja River, Kupljenovo on Krapina River and Zelenjak on Sutla River in 1961 – 1990 and 1991 – 2020 periods expressed as annual course of mean monthly discharges (MQ) in m³/s; Calculated from the source data by DHMZ

Kako bi se utvrdile promjene protočnih režima na ovdje odabranim rijekama, uspoređeni su srednji mjesečni protoci (tab. 3-5 sl. 15-17) i modulni koeficijenti⁶ (tab. 4-6, sl. 18-20) iz dvaju uzastopnih klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. na svim trima odabranim hidrološkim postajama. U skladu s već utvrđenim statistički značajnim trendom 1961. – 2020., u usporedbi dvaju

⁶ Modulne koeficijente uveo je hidrolog Pardé (1933.). Izraz za izračun modulnog koeficijenta za svaki mjesec je: $M_k = \frac{SQ \text{ mj.}}{SQ \text{ god.}}$, odnosno srednji protok svakog mjeseca dijeli se sa srednjim godišnjim protokom.

Tab. 3. Trendovi srednjih mjesečnih protoka 1961. – 2020. (N = 60) te usporedba srednjih mjesečnih protoka (m³/s) iz 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine za hidrološku postaju Ludbreg na Bednji*Tab. 3. Trends of mean monthly discharges in 1961-2020 period (N = 60) and comparison of mean monthly discharges (m³/s) in 1961 – 1990 and 1991 – 2020 periods at Ludbreg hydrological station on Bednja River*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god/y
1961 - 2020. Sen slope	-0,06	-0,06	-0,07	-0,14	-0,07	-0,05	-0,03	-0,01	-0,01	0,01	-0,04	-0,02	-0,04
1961. - 2020. p-value*	0,05	0,24	0,19	0,00	0,01	0,01	0,02	0,26	0,64	0,63	0,39	0,65	0,02
1961. - 1990. MQ	8,25	10,33	12,03	11,62	8,04	6,29	5,26	3,55	3,74	5,71	8,41	9,02	7,69
1991. - 2020. MQ	6,82	8,91	9,57	7,45	5,22	4,20	3,04	2,74	5,47	5,49	7,56	9,35	6,32
Razlika / Difference (m ³ /s)	-1,43	-1,42	-2,46	-4,17	-2,82	-2,09	-2,22	-0,81	1,73	-0,22	-0,85	0,33	-1,37
Razlika / Difference (%)	-17,3	-13,8	-20,5	-35,9	-35,1	-33,2	-42,2	-22,8	46,1	-3,9	-10,1	3,7	-17,8

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

* statistički značajan trend je istaknut podebljano (MK test uz signifikantnost $\alpha = 0,05$) / statistically significant trend in bold**Tab. 4.** Trendovi srednjih mjesečnih protoka 1964. – 2020. (N = 57) te usporedba srednjih mjesečnih protoka (m³/s) iz razdoblja 1961. – 1990. (od 1964., N = 27) i 1991. – 2020. godine za hidrološku postaju Kupljenovo na Krapini*Tab. 4. Trends of mean monthly discharges in 1961 – 2020 period (N = 57) and comparison of mean monthly discharges (m³/s) 1961 – 1990 (records starting 1964, N = 27) and 1991 – 2020 periods at Kupljenovo hydrological station on Krapina River*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god/y
1964. - 2020. Sen slope	-0,06	-0,06	-0,06	-0,18	-0,05	-0,04	-0,04	-0,02	-0,01	0,03	0,00	-0,02	-0,06
1964. - 2020. p-value*	0,37	0,46	0,36	0,00	0,23	0,21	0,15	0,36	0,62	0,37	0,96	0,79	0,10
1964. - 1990. MQ	13,23	17,59	18,89	15,65	10,70	9,21	7,51	4,78	5,35	10,42	14,69	16,23	12,02
1991. - 2020. MQ	12,61	15,46	14,80	11,40	8,35	6,66	4,15	3,90	8,52	9,49	14,43	16,11	10,49
Razlika / Difference (m ³ /s)	-0,62	-2,13	-4,09	-4,25	-2,35	-2,55	-3,36	-0,88	3,17	-0,93	-0,26	-0,12	-1,53
Razlika / Difference (%)	-4,7	-12,1	-21,7	-27,2	-22,0	-27,7	-44,7	-18,4	59,3	-8,9	-1,8	-0,7	-12,7

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

* statistički značajan trend je istaknut podebljano (MK test uz signifikantnost $\alpha = 0,05$) / statistically significant trend in bold

uzastopnih 30-godišnjih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020 došlo je do pada srednjeg godišnjeg protoka na sve tri postaje, za približno 18% na postajama Ludbreg na Bednji i Zelenjak na Sutli te za 13% na postaji Kupljenovo na Krapini.

Promatrajući srednje mjesečne protoke u cjelokupnom razdoblju 1961. – 2020. na svim postajama trendovi su negativni za većinu mjeseci, a posebno u travnju (vidi travnjske Sen nagibe tab. 3-5). Travnjski negativni trendovi statistički su značajni na svim hidrološkim postajama. Na postaji Ludbreg na Bednji negativni trendovi statistički su značajni od travnja do srpnja, a na postaji Zelenjak na Sutli u

Tab. 5. Trendovi srednjih mjesečnih protoka 1961. – 2020. (N = 60) te usporedba srednjih mjesečnih protoka (m³/s) iz razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine za hidrološku postaju Zelenjak na Sutli

Tab. 5. Trends of mean monthly discharges in 1961 – 2020 period (N = 60) and comparison of mean monthly discharges (m³/s) 1961 – 1990 and 1991 – 2020 periods at Zelenjak hydrological station on Sutra River

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god/y
1961. - 2020. Sen slope	-0,04	-0,02	-0,05	-0,12	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	0,02	-0,03	-0,03	-0,04
1961. - 2020. p-value*	0,09	0,57	0,16	0,00	0,02	0,14	0,06	0,04	0,63	0,27	0,47	0,45	0,02
1961. - 1990. MQ	7,39	8,90	10,64	9,81	6,38	5,96	4,96	3,98	4,45	7,45	9,04	8,85	7,32
1991. - 2020. MQ	6,28	7,99	8,37	6,31	4,44	4,10	3,12	2,51	5,35	6,32	8,43	8,85	6,01
Razlika / Difference (m ³ /s)	-1,11	-0,91	-2,27	-3,50	-1,94	-1,86	-1,84	-1,47	0,90	-1,13	-0,61	0,00	-1,31
Razlika / Difference (%)	-15,0	-10,2	-21,3	-35,7	-30,4	-31,2	-37,1	-36,9	20,2	-15,2	-6,7	0,0	-17,9

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

* statistički značajan trend istaknut je podebljano (MK test uz signifikantnost $\alpha = 0,05$) / statistically significant trend in bold

Tab. 6. Usporedba modulnih koeficijenata srednjih mjesečnih protoka iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine za hidrološku postaju Ludbreg na Bednji

Tab. 6. Comparison of modular coefficients in consecutive climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Ludbreg hydrological station on Bednja River

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1961. - 1990. MK	1,073	1,344	1,564	1,511	1,046	0,818	0,685	0,461	0,487	0,743	1,094	1,173
1991. - 2020. MK	1,080	1,410	1,515	1,179	0,826	0,664	0,481	0,433	0,866	0,868	1,197	1,479
Razlika / Difference (%)	0,7	4,9	-3,2	-22,0	-21,0	-18,8	-29,7	-6,0	77,9	16,9	9,4	26,1

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

travnju, svibnju i srpnju. U skladu s tim trendovima u usporedbi mjesečnih srednjaka iz dvaju uzastopnih klimatološki standardnih 30-godišnjih razdoblja vidljiv je pad u gotovo svim mjesecima na svim postajama, a najviše u proljetnim i ljetnim mjesecima (od ožujka do rujna, najviše u srpnju: Zelenjak -37,1%, Ludbreg -42,2%, Kupljenovo -44,7%). Na svim postajama rujna je jedini mjesec u kojem je registriran izrazit porast srednjeg mjesečnog protoka (Zelenjak +20,2%, Ludbreg +46,1%, Kupljenovo +59,3%). To je posljedica nekoliko pojava ekstremno visokih rujanskih voda u istraživanom području u novije doba, a prouzročile su ih obilne kišne padaline (1998., 2010., 2014., 2017.) (ovaj utjecaj obilnih rujanskih kiša na otjecanje u porječju Bednje spominju Leskovar i dr., 2021.). To potvrđuje i znatan porast varijabilnosti i asimetričnosti nizova srednjih rujanskih protoka na svim postajama⁷. U razdoblju 1961. – 1990. na svim postajama najvarijabilniji i najviše asimetričan niz srednjih mjesečnih protoka bio je listopad, dok je u razdoblju 1991. – 2020. to mjesec rujna.

⁷ Rujanski koeficijenti varijacije i asimetrije: Ludbreg 1961. – 1990. CV = 0,60, skew = 0,80; 1991.-2020. CV = 1,24, skew = 2,82; Kupljenovo 1961.-1990. CV = 0,65, skew = 1,01, 1991.-2020. CV = 1,35, skew = 2,12; Zelenjak 1961.-1990. CV = 0,65, skew = 1,34, 1991.-2020. CV = 1,14, skew = 1,88

Tab. 7. Usporedba modulnih koeficijenata srednjih mjesečnih protoka iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. (od 1964., N = 27) i 1991. – 2020. godine za hidrološku postaju Kupljenovo na Krapini*Tab. 7. Comparison of modular coefficients in consecutive climatological standard periods 1961 – 1990 (record started 1964, N = 27) and 1991 – 2020 at Kupljenovo hydrological station on Krapina River*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1964. – 1990. MK	1,100	1,463	1,571	1,302	0,890	0,766	0,625	0,398	0,445	0,867	1,222	1,350
1991. – 2020. MK	1,202	1,474	1,411	1,087	0,796	0,635	0,395	0,372	0,812	0,905	1,376	1,536
Razlika / Difference (%)	9,3	0,8	-10,2	-16,5	-10,6	-17,1	-36,8	-6,5	82,5	4,4	12,6	13,8

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

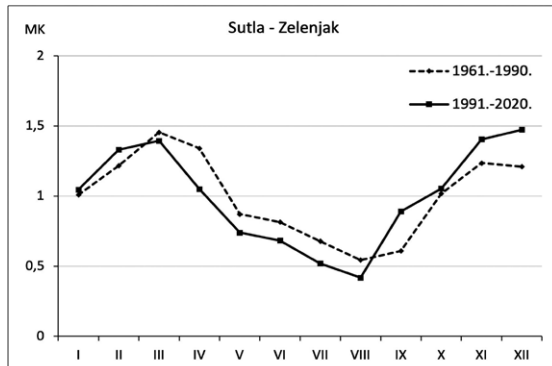
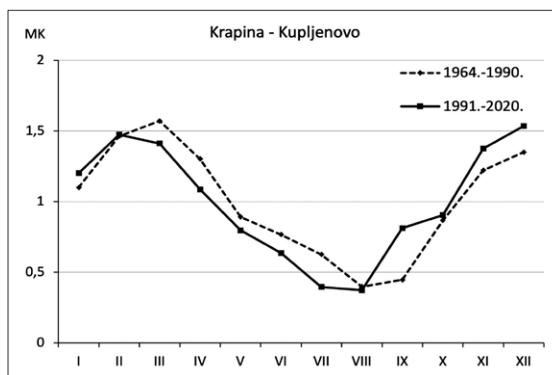
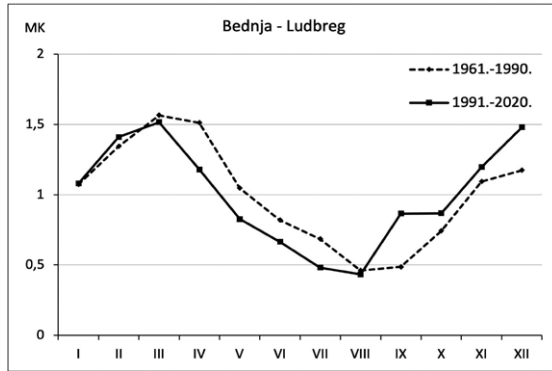
Tab. 8. Usporedba modulnih koeficijenata srednjih mjesečnih protoka iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine za hidrološku postaju Zelenjak na Sutli*Tab. 8. Comparison of modular coefficients in consecutive climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Zelenjak hydrological station on Sutla River*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1961. - 1990. MK	1,010	1,217	1,454	1,341	0,871	0,814	0,678	0,544	0,609	1,018	1,236	1,209
1991. - 2020. MK	1,046	1,330	1,394	1,050	0,740	0,682	0,519	0,418	0,890	1,053	1,404	1,474
Razlika / Difference (%)	3,6	9,3	-4,1	-21,7	-15,0	-16,2	-23,5	-23,2	46,1	3,4	13,6	21,9

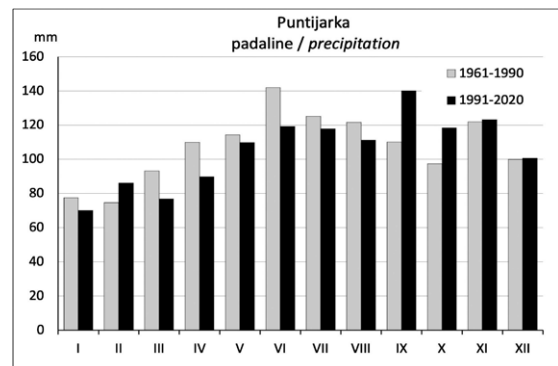
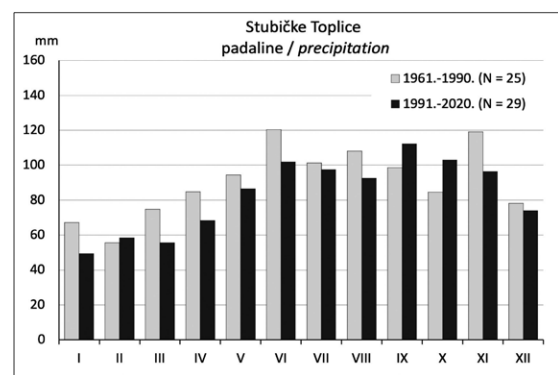
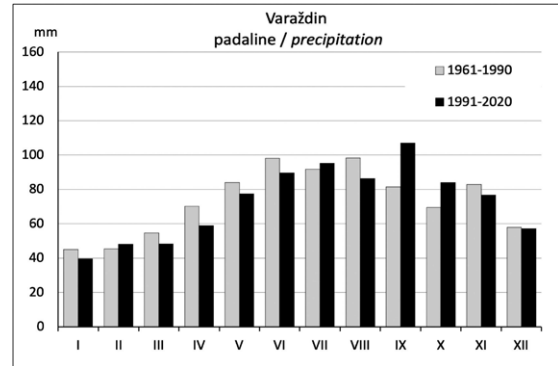
Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

Za razumijevanje promjena protočnih režima još su važnije promjene modulnih koeficijenata s obzirom na to da s pomoću njih možemo lako pratiti promjene u godišnjoj (pre)raspodjeli protoka po mjesecima. Prema podacima (tab. 4-6, sl. 18-20) kod odabranih rijeka je u razdoblju 1991. – 2020. u odnosu na razdoblje 1961. – 1990. došlo do preraspodjele protoka tijekom godine, iako se tip protočnog režima nije promijenio (prema tipologiji Čanjec, 2013). Na sve tri postaje došlo je do smanjenja modulnih koeficijenata od ožujka do kolovoza, tj. dogodio se pad udjela protoka proljetnih i ljetnih mjeseci, a posebno u srpnju (na Sutli i u kolovozu). Također, na sve tri hidrološke postaje je uz viši rujanski modulni koeficijent (u rujnu je registriran i izrazit porast protoka zbog već spomenutih razloga) zabilježen i porast modulnih koeficijenata na prijelazu iz jeseni u zimu (studeni i posebno prosinac). Iako u prosincu nije bilo velikih apsolutnih promjena, preraspodjela protoka je takva da je maksimum u prosincu u novijem 30-godišnjem razdoblju postao izjednačen s prije jasnim primarnim ožujskim maksimumom (Bednja) ili veći od njega. Tako su primarni i sekundarni maksimumi zamijenili mjesta (Krapina i Sutla). Primarni minimum ostao je u kolovozu, ali najniže su vrijednosti srednjih mjesečnih protoka i modulnih koeficijenata pomaknute s kolovoza i rujna na srpanj i kolovoz. Općenito je primjetan određeni pomak na ranije (»ulijevo«, sl. 18-20) u godišnjoj raspodjeli protoka.

Naposljetku, za istraživanja dva klimatološki standardna 30-godišnja razdoblja, 1961. – 1990. i 1991. – 2020., uspoređeni su srednjaci mjesečnih količina padalina i srednje mjesečne temperature zraka kao i broj dana sa snježnim pokrivačem (≥ 1 cm) na odabranim meteorološkim postajama u istraživanom području.



Sl. 18-20. Usporedba protočnih režima na postajama Ludbreg na Bednji, Kupljenovo na Krapini i Zelenjak na Sutli u razdobljima 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine, izražena godišnjim hodom modulnih koeficijenata srednjih mjesečnih protoka; Izračunato prema podacima DHMZ-a
Fig. 18-20. Comparison of discharge regimes at hydrological stations Ludbreg on Bednja River, Kupljenovo on Krapina River and Zelenjak on Sutla River in 1961 – 1990 and 1991 – 2020 periods expressed by modular (Pardé) coefficients; Calculated from the source data by DHMZ



Sl. 21-23. Usporedba srednjih mjesečnih količina padalina (mm) iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka / Comparison of mean monthly precipitation (mm) in climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations

U godišnjem hodu srednjih mjesečnih padalina (tab. 9, sl. 21-23) na sve tri postaje bilježi se smanjenje količine padalina u novijem 30-godišnjem razdoblju u svim proljetnim mjesecima, što je doprinijelo apsolutnom i relativnom smanjenju proljetnih protoka na glavnim zagorskim rijekama. Relativno najveće smanjenje srednjih mjesečnih padalina je u ožujku i/ili travnju, što odgovara istaknutom smanjenju srednjeg protoka u travnju. Na meteorološkim postajama došlo je i do određenog smanjenja

Tab. 9. Usporedba srednjih mjesečnih količina padalina (mm) iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991.– 2020. godine na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka*Tab. 9. Comparison of mean monthly precipitation (mm) in climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god/y
Varaždin													
1961. - 1990.	45	45	55	70	84	98	92	98	81	69	83	58	879
1991. - 2020.	40	48	48	59	77	90	95	86	107	84	77	57	868
Razlika / Diff. (%)	-11,1	5,9	-11,8	-16,0	-7,9	-8,6	3,6	-12,2	31,4	20,9	-7,5	-1,2	-1,3
Stubičke Toplice													
1961. - 1990.	67	56	75	85	94	120	101	108	99	85	119	78	1099
1991. - 2020.	49	58	56	68	86	102	97	93	112	103	96	74	989
Razlika / Diff. (%)	-26,9	3,6	-25,3	-20,0	-8,5	-15,0	-4,0	-13,9	13,1	21,2	-19,3	-5,1	-10,0
Puntijarka													
1961. - 1990.	78	75	93	110	114	142	125	121	110	97	122	100	1274
1991. - 2020.	70	86	77	90	110	119	118	111	140	118	123	101	1262
Razlika / Diff. (%)	-10,3	14,7	-17,2	-18,2	-3,5	-16,2	-5,6	-8,3	27,3	21,6	0,8	+1,0	-0,9

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

količine padalina ljeti, što doprinosi nižim ljetnim protocima, ali svakako u kombinaciji s porastom ljetnih srednjih temperatura zraka (tab. 10, sl. 24-26). S druge strane, na sve tri meteorološke postaje zabilježen je porast prosječne količine padalina u rujnu i listopadu u novijem 30-godišnjem razdoblju, što je utjecalo na jesenske nešto više modulne koeficijente na glavnim zagorskim rijekama, a posebno na apsolutno i relativno visoki rujanski protok u novijem razdoblju. Povećanje udjela protoka na prijelazu iz jeseni u zimu u novijem 30-godišnjem razdoblju očito nije odraz promjena u srednjim mjesečnim količinama padalina u studenom i prosincu, nego uzroke treba tražiti u promjeni oblika padalina i izravnijem otjecanju.

U cjelokupnom 60-godišnjem razdoblju 1961. – 2020. na sve tri odabrane meteorološke postaje bilježi se manji ili veći porast srednjih mjesečnih temperatura zraka u svim mjesecima, po najvećim apsolutnim vrijednostima i statistički značajnim trendovima u siječnju i kolovozu (tab. 10). Usporedba mjesečnih srednjaka temperature zraka dvaju uzastopnih 30-godišnjih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. pokazuje da je apsolutno zatopljenje izrazito u svim ljetnim mjesecima (tab. 10, sl. 24-26). Topliji proljetni i ljetni srednjaci u novijem razdoblju (uz manje količine padalina) zasigurno su utjecali na apsolutno i relativno manje protoke. U novijem su razdoblju također viši mjesečni srednjaci temperature zraka zimi, apsolutno najviše u siječnju, pa tako na postajama Varaždin i Stubičke Toplice srednja siječanjska temperatura zraka više nije ispod ništice. Gleda li se relativna promjena srednjaka, ona je na svim postajama najizrazitija u zimskim mjesecima (na postaji Puntijarka i u ožujku). Zimsko zatopljenje od odlučujućeg je utjecaja na smanjenje broja dana sa snijegom, odnosno snježnim pokrivačem (sl. 27-30). Smanjenje udjela snijega u otjecanju na prijelazu iz jeseni u zimu i veća uloga kiša dovodi do izravnijeg otjecanja i povećanja modulnih koeficijenata na glavnim zagorskim rijekama u studenome, a posebno u prosincu, povećavajući ulogu zimskoga maksimuma u protočnom režimu. S druge strane, općenito manje snijega tijekom zime utječe na smanjenje modulnih koeficijenata otjecanja u proljeće, smanjujući ulogu proljetnoga maksimuma u protočnom režimu.

Tab. 10. Trendovi srednjih mjesečnih temperatura 1961. – 2020. i usporedba srednjih mjesečnih temperatura zraka (°C) iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka

Tab. 10. Trends of mean monthly air temperatures in 1961 – 2020 period and comparison of mean monthly air temperatures (°C) in climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations

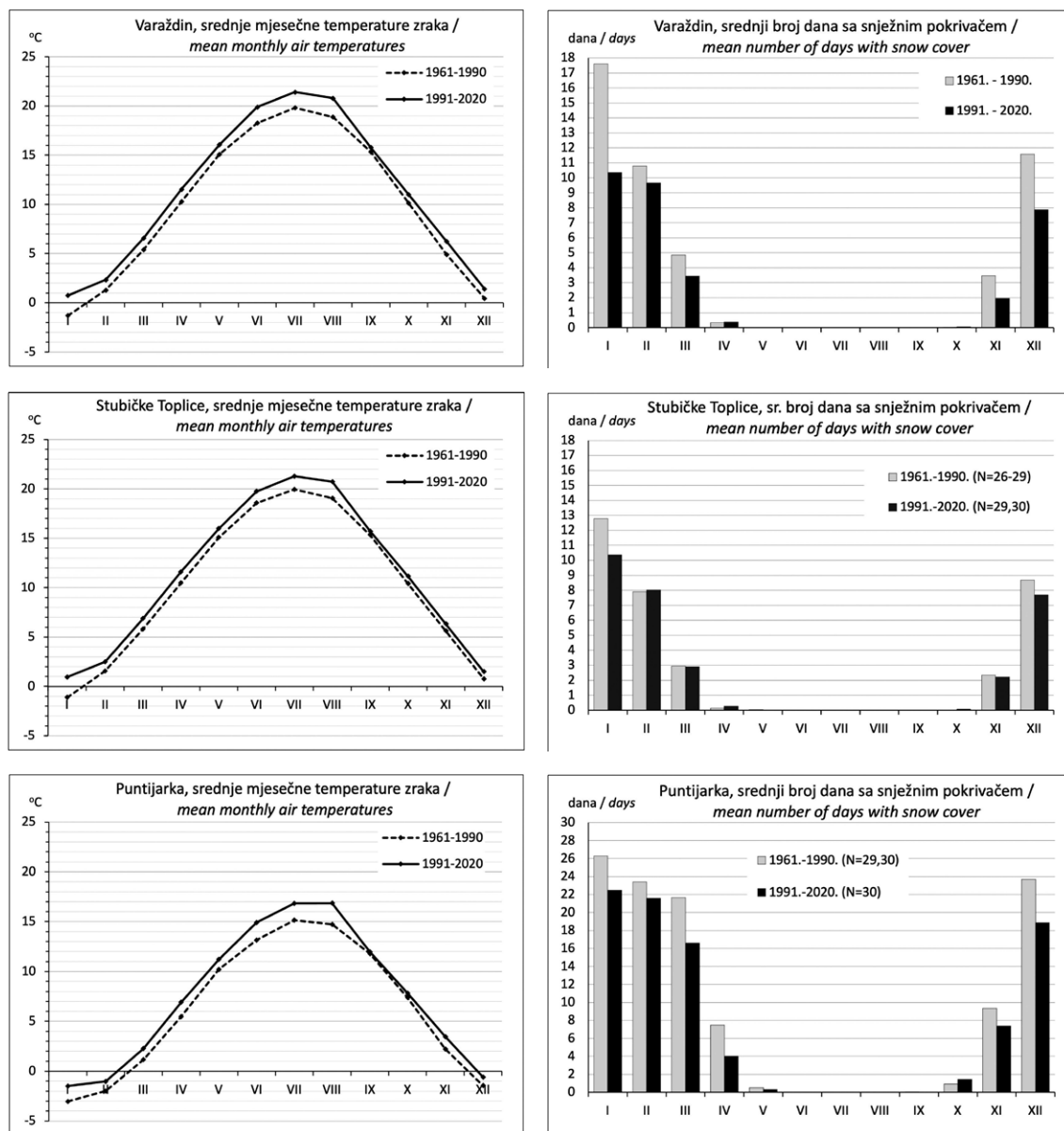
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god/y
Varaždin													
1961. - 2020. Sen slope	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,01	0,03	0,04	0,05	0,04
1961. - 2020. p-value*	0,00	0,13	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,20	0,01	0,04	0,00	0,00
1961. - 1990.	-1,3	1,3	5,4	10,3	15,1	18,3	19,8	18,9	15,3	10,1	4,9	0,5	9,9
1991. - 2020.	0,8	2,4	6,6	11,6	16,1	19,9	21,5	20,9	15,9	11,1	6,3	1,4	11,2
Razlika / Diff. (°C)	2,0	1,1	1,2	1,3	1,0	1,7	1,7	2,0	0,5	0,9	1,3	1,0	1,3
Razlika / Diff. (%)	161,5	84,6	22,2	12,6	6,6	8,7	8,6	10,6	3,9	9,9	28,6	180,0	13,1
Stubičke Toplice**													
1961. - 2020. Sen slope	0,05	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,05	0,00	0,02	0,02	0,04	0,03
1961. - 2020. p-value*	0,01	0,24	0,11	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,82	0,14	0,29	0,01	0,00
1961. - 1990.	-1,1	1,6	5,8	10,5	15,1	18,6	20,0	19,0	15,3	10,4	5,6	0,8	10,1
1991. - 2020.	0,9	2,5	6,9	11,6	16,0	19,7	21,3	20,7	15,7	11,1	6,3	1,5	11,1
Razlika / Diff. (°C)	2,1	0,9	1,1	1,1	0,9	1,1	1,3	1,7	0,3	0,7	0,7	0,7	1,0
Razlika / Diff. (%)	181,8	56,3	19,0	10,5	6,0	5,9	6,5	8,9	2,6	6,7	12,5	87,5	9,9
Puntijarka													
1961. - 2020. Sen slope	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,05	0,06	0,07	0,01	0,02	0,03	0,05	0,04
1961. - 2020. p-value*	0,01	0,18	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,50	0,10	0,04	0,00	0,00
1961. - 1990.	-3,0	-2,0	1,2	5,5	10,2	13,2	15,2	14,7	11,8	7,4	2,2	-1,4	6,2
1991. - 2020.	-1,5	-1,0	2,3	6,9	11,2	14,9	16,8	16,8	12,0	7,8	3,5	-0,6	7,4
Razlika / Diff. (°C)	1,6	1,0	1,1	1,5	1,0	1,8	1,7	2,1	0,2	0,4	1,2	0,9	1,2
Razlika / Diff. (%)	100,0	100,0	91,7	25,5	9,8	12,9	10,5	14,3	1,7	5,4	59,1	133,3	19,4

Izračunato prema podacima DHMZ-a / Calculated from the source data by DHMZ

* statistički značajan trend istaknut je podebljano (MK test uz signifikantnost $\alpha = 0,05$) / statistically significant trend in bold, ** nedostaje 1-4 podataka u pojedinim mjesečnim nizovima / 3-4 records missing in the monthly series

3. ZAKLJUČAK

U 60-godišnjem razdoblju 1961. – 2020. bilježi se trend pada srednjih godišnjih protoka na Bednji, Krapini i Sutli, koji se pokazao statistički značajnim na hidrološkim postajama Ludbreg na Bednji i Zelenjak na Sutli. U usporedbi dvaju uzastopnih 30-godišnjih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. došlo je do pada srednjeg godišnjeg protoka na sve tri odabrane hidrološke postaje, za približno 18% na postajama Ludbreg na Bednji i Zelenjak na Sutli te za 13% na postaji Kupljenovo na Krapini. Maksimalni godišnji protoci 1961. – 2020. stagnantni su (na Bednji i Krapini) ili negativni (na statistički



SI. 24-26. Usporedba srednjih mjesečnih temperatura zraka (°C) iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka / Comparison of mean monthly air temperatures (°C) in climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations

SI. 27-29. Usporedba srednjih mjesečnih broja dana sa snježnim pokrivačem (≥ 1 cm) iz klimatološki standardnih razdoblja 1961. – 1990. i 1991. – 2020. godine na meteorološkim postajama Varaždin, Stubičke Toplice i Puntijarka / Comparison of mean monthly number of days with snow cover (≥ 1 cm) in climatological standard periods 1961 – 1990 and 1991 – 2020 at Varaždin, Stubičke Toplice and Puntijarka meteorological stations

značajan trend pada na Sutli). Minimalni godišnji protoci stagnantni su (na Krapini) ili negativni (na Sutli i statistički značajno na Bednji).

Na pad srednjih godišnjih protoka na najvećim savskim i dravskim pritocima u Hrvatskom zagorju i Gornjoj Podravini nije toliko utjecalo kretanje godišnjih količina padalina koje su u istraživanom području u razdoblju 1961. – 2020. stagnantne (meteorološka postaja Varaždin ili imaju blagi pad (Stubičke Toplice i Puntijarka) koliko relativno izraženo zatopljenje koje povećava evapotranspiraciju i

smanjuje otjecanje. Sve tri odabrane meteorološke postaje u istraživanom području imaju statistički značajan trend porasta srednje godišnje temperature zraka uz stope od oko 0,3 do oko 0,4 °C po dekadi, a velika većina porasta nastupila je u novijem razdoblju.

Protočni režim Bednje, Krapine i Sutle je peripanonsko kišno-snežni i taj se osnovni tip nije promijenio, ali u tim je protočnim režimima ipak došlo do važnih promjena u usporedbi obilježja iz razdoblja 1991. – 2020. s onima iz razdoblja 1961. – 1990. Na svim trima odabranim hidrološkim postajama došlo je do pada srednjih mjesečnih protoka u novijem razdoblju u gotovo svim mjesecima. Najveći pad protoka kao i pad udjela protoka (niži modulni koeficijenti u novijem razdoblju) bilježi se u proljeće i ljetu, najviše u srpnju. Proljetni pad protoka posljedica je osjetnog pada količine padalina u proljetnim mjesecima, najviše u ožujku i travnju (što se odrazilo u izrazitom padu travanjskog protoka), uz određeno povećanje srednjih temperatura zraka proljetnih mjeseci. Na manje proljetne protoke i relativno smanjenje važnosti proljetnog maksimuma u odnosu na zimski maksimum utjecalo je i smanjenje uloge snijega u protočnom režimu. Na ljetno smanjenje protoka manje je utjecao blagi pad količine padalina, a više statistički značajno zatopljenje ljetnih mjeseci, što je zabrinjavajući trend. Na svim hidrološkim postajama rujan je jedini mjesec u kojem je registriran izrazit porast srednjeg mjesečnog protoka koji je prouzročen povremenim obilnim kišama u novije doba. Više kiša i manje snijega na prijelazu iz jeseni u zimu dovodi do izravnijeg otjecanja te je godišnja preraspodjela protoka uzrok što se prosinački maksimum izjednačuje ili postaje primaran u odnosu na proljetni maksimum. Primarni minimum ostao je u kolovozu, ali su najniže vrijednosti srednjih mjesečnih protoka i modulnih koeficijenata pomaknute s kolovoza i rujna na srpanj i kolovoz. Općenito je primjetan određeni pomak na ranije («ulijevo») u godišnjoj raspodjeli protoka.

Unatoč promjenama u godišnjem hodu srednjih mjesečnih protoka, protočni režim najvećih savskih i dravskih pritoka u Hrvatskom zagorju i Gornjoj Podravini i dalje po tipologiji odgovara peripanonskom kišno-snežnom režimu, jer su glavna obilježja godišnjeg hoda ostala očuvana. Međutim, nastave li se trendovi zatopljenja, što je izgledno i zabrinjavajuće s obzirom na to da se u najvećem dijelu odnose na novije razdoblje, može se očekivati nastavak smanjenja protoka. Posebno zabrinjavaju negativni i statistički značajni opadajući trendovi protoka u toplom dijelu godine. Mali protoci ljeti dovode do mjestimičnog sporijeg otjecanja koritom i porasta temperature vode; mogu dovesti do češće eutrofikacije dijelova toka, mjestimice i anoksije te općenito ugroze živoga svijeta i bioraznolikosti. Pritom ne treba zaboraviti da su znatni dijelovi korita glavnih zagorskih rijeka regulirani, izravnati i obaloutvrđeni, a uz njih je uklonjena obalna vegetacija i sl., što je okolišno nepogodno. Nastavak zimskog zatopljenja znatnije će pogoditi i više predjele regije, što će značiti još manje snježnice u prihrani rijeka. Time se izravno mijenja protok povećavanjem njegovih vrijednosti na prijelazu jeseni u zimu (kišnica) te smanjenjem vrijednosti u proljeće (manjak snježnice).

Rezultati ove regionalne analize u skladu su s prethodnim relevantnim istraživanjima dugoročnih promjena protoka i klimatskih promjena širega prostornoga obuhvata.

ZAHVALA

Autori zahvaljuju Državnom hidrometeorološkom zavodu na ustupljenim podacima i posebno njihovu djelatniku Damiru Mlineku na ljubaznosti i profesionalnosti.

LITERATURA / LITERATURE

1. Barbalić, D., Kuspilić, N. (2014.): Trends of indicators of hydrological alterations / Trendovi indikatora hidroloških promjena, *Građevinar* 66 (7), 613-624, DOI: 10.14256/JCE.1003.2014
2. Beckinsale, R. P. (1969.): River regime, in: Chorley, R. J. (ed.): *Water, Earth and Man*, Methuen, London, 176-192.
3. Bonacci, O. (2010.): Analiza nizova srednjih godišnjih temperatura zraka u Hrvatskoj, *Građevinar* 62 (9), 781-791
4. Chaddock, R. E. (1925.): *Principles and Methods of Statistics*, Houghton Mifflin Company, The Riverside Press (1st Edition), Cambridge, 471 pp.

5. Čanjevac, I. (2012.): Novije promjene protočnih režima u hrvatskom dijelu porječja Dunava, *Hrvatski geografski glasnik* 74 (1), 61-74, DOI: 10.21861/HGG.2012.74.01.04
6. Čanjevac, I. (2013.): Tipologija protočnih režima rijeka u Hrvatskoj, *Hrvatski geografski glasnik* 75 (1), 23-42, DOI: 10.21861/HGG.2013.75.01.02
7. Čanjevac, I. Orešić, D. (2015.): Contemporary changes of mean annual and seasonal river discharges in Croatia, *Hrvatski geografski glasnik*, 77 (1), 7-27, DOI: 10.21861/HGG.2015.77.01.01
8. Čanjevac, I., Orešić, D. (2018.): Changes in discharge regimes of rivers in Croatia, *Acta geographica Slovenica*, 58 (2), 7-18, DOI:10.3986/ags.2004
9. Feletar, D. (1988.): *Podravina*, Muzej grada Koprivnice, Koprivnica, 403 pp.
10. Filipčić, A. (1998.): Klimatska regionalizacija Hrvatske po W. Köppenu za standardno razdoblje 1961. – 1990. u odnosu na razdoblje 1931. – 1960., *Acta Geographica Croatica* 33 (1), 7-14.
11. Filipčić A., Orešić, D., Maradin, M. (2013.): Promjene količine padalina u Hrvatskoj od sredine 20. stoljeća do danas / Changes in precipitation levels in Croatia from the mid 20th century to the present, *Geoadria* 18 (1), 29-39, DOI: 10.15291/geoadria.145
12. Gajić-Čapka, M., Cindrić, K., Pasarić, Z. (2015.): Trends in precipitation indices in Croatia, 1961–2010, *Theoretical and Applied Climatology* 121 (1-2), 167–177, DOI: 10.1007/s00704-014-1217-9
13. Ilić, M., Njegač, D., Orešić, D., Toskić, A. (1993.): Geografska obilježja i osobitosti Hrvatskoga zagorja, *Gazophylacium* 1 (1-2), 13-36.
14. Kendall, M. G. (1975.): *Rank correlation methods*, 4th edition. Charles Griffin, London, 202 pp.
15. Klemenčić, M. (2017.): Što je Hrvatsko zagorje? *Studia lexicographica*, 10/11(19/20), 19-34.
16. Kurtek, P. (1966.): *Gornja hrvatska Podravina*, Školska knjiga, Zagreb, 188 pp.
17. Leskovar, K., Mrakužić, P., Meaški, H. (2021.): Evaluation of remotely sensed precipitation product in a hydrological model of the Bednja watershed, *Građevinar* 73 (4), 335-348, DOI: 10.14256/JCE.3055.2020
18. Mann, H. B. (1945.): Non-parametric test of randomness against trend. *Econometrica* 13 (3), 245-259
19. Orešić, D. (1995.): Osnovne značajke režima tekućica porječja Krapine, *Hrvatski geografski glasnik* 57 (1), 37-52.
20. Pandžić, K., Trninić, D., Likso, T., Bošnjak, T. (2009.): Long-term variations in water balance components for Croatia, *Theoretical and Applied Climatology* 95 (1-2), 39-51, DOI: 10.1007/s00704-007-0366-5
21. Pardé, M. (1933.): *Fleuves et Rivières*, Armand Colin, Paris, 224 pp.
22. Pettitt, A. N. (1979.): A non-parametric approach to the change point problem, *Journal of the Royal Statistical Society Series C, Applied Statistics*, 28, 126-135.
23. Riđanović, J. (1993.): *Hidrogeografija*, Školska knjiga, Zagreb, 215 pp.
24. Šegota, T., Filipčić, A. (2003.): Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, *Geoadria* 8 (1), 17-37, DOI: 10.15291/geoadria.93
25. Šošić, I., Serdar, V. (1994.): *Uvod u statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 363 pp.
26. Ulaga, F. (2002.): Trendi spreminjanja pretokov slovenskih rek, *Dela*, 18, 93-114, DOI: 10.4312/dela.18.93-114
27. Zaninović K., Gajić-Čapka M. (2000.): Changes in Components of the Water Balance in the Croatian Lowlands, *Theoretical and Applied Climatology*, 65 (1-2), 111-117. DOI: 10.1007/s007040050008
28. Žugaj, R. (2010.): *Velike vode malih slivova*, Rudarsko-geološki-naftni fakultet, Zagreb.77 pp.

IZVORI / SOURCES

1. *Baza hidroloških podataka / Hydrological database - HIS2000 (online)*, DHMZ (Croatian Meteorological and Hydrological Service), n.d., <https://hidro.dhz.hr>
2. *Digitalna baza podataka meteoroloških postaja RH (Digital database)*, DHMZ (Croatian Meteorological and Hydrological Service), Zagreb (putem zahtjeva na e-mail: usluge@cirus.dhz.hr)
3. *Meteorološki godišnjak I (Meteorological yearbook I)*, Savezni hidrometeorološki zavod (Federal Meteorological Bureau), Beograd, godišta (years) 1961. – 1985.

SUMMARY

The largest tributaries of the Sava and the Drava rivers in the area of Hrvatsko zagorje region and Upper Podravina are the Krapina, the Sutla, the Bednja, and the Plitvica rivers. Given the availability of flow data from 1961-2020, the analysis of changes in flow regimes was conducted at three representative hydrological stations: Ludbreg on the Bednja River, Kupljenovo on the Krapina River, and Zelenjak on the Sutla River. The values of monthly averages and modular coefficients from two consecutive climatological standard thirty-year periods, 1961-1990 and 1991-2020, were compared. Changes in flow regimes were compared with changes in the annual pattern of monthly precipitation amounts, average monthly air temperatures, and the average number of days with snow cover at selected meteorological stations Varaždin, Stubičke Toplice, and Puntijarka. In the more recent period, there has been a decline in average monthly flows in almost all months, most significantly in the warm part of the year. The decrease in spring flows is influenced by rising air temperatures and a significant reduction in spring precipitation, especially snow. The summer flow decline is mainly influenced by the statistically significant increase in average monthly air temperatures. The reduced role of snow and the increased role of rain in the transition from autumn to winter causes more direct runoff, making the December maximum more pronounced in the flow regimes of all analyzed stations.