

HIDROLOŠKA ANALIZA RIJEKE BEDNJE NA VODOMJERNOJ POSTAJI LUDBREG

HYDROLOGICAL ANALYSIS OF THE BEDNJE RIVER AT THE WATER MEASURING STATION LUDBREG

Ognjen BONACCI

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split, HR
obonacci@gradst.hr

Received/Primljeno: 21. 5. 2025.

Accepted/Prihvaćeno: 12. 12. 2025.

Original scientific paper/Izvorni znanstveni rad

UDK / UDC: 556.047(497.523Ludbreg)

556.12(497.523-282.24Bednja)

Tanja ROJE-BONACCI

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split, HR
obonacci@gradst.hr

SAŽETAK

U članku su izneseni rezultati analiza hidrološkog režima rijeke Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg na vremenskoj skali od godine dana. Osim nizova srednjih godišnjih protoka Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg u razdoblju 1947. – 2023. analizirani su i nizovi godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka izmjereni na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju 1982. – 2024. Niz srednjih godišnjih protoka pokazuje statistički neznačajan trend opadanja, dok niz godišnjih oborina ima statistički neznačajan trend porasta. Niz srednjih godišnjih temperatura zraka pokazuje statistički značajan trend porasta. U članku su izračunati godišnji koeficijenti otjecanja u razdoblju 1982. – 2023. Njihov trend je opadajući, ali nije statistički značajan. Definirane su godišnje vrijednosti slijedeća tri indeksa suše: (1) standardiziranog indeksa protoka - SQI; (2) standardiziranog indeks oborina – SPI; (3) novog indeksa suše – NDI. Indeks SQI pokazuje statistički neznačajan niz opadanja. Niz SPI pokazuje statistički neznačajan niz porasta. Niz NDI pokazuje statistički značajan niz opadanja, tj. statistički značajno intenziviranje suše u slivu Bednje.

Ključne riječi: protok, oborine, temperatura zraka, suša, koeficijent otjecanja, rijeka Bednja

Key words: discharge, precipitation, air temperature, drought, runoff coefficient, Bednja River

1. UVOD

Potreba za intenzivnim izučavanjem promjene hidroloških režima na slivovima raznih veličina i u različitim okolišima danas je osobito značajna. Što je sliv manji površine to on brže i drastičnije reagira na klimatske promjene i ljudske intervencije kojima je izložen. Izučavanje hidrološkog funkcioniranja svakog pojedinog sliva ključno je za razumijevanje poplava, suša i utjecaja korištenja zemljišta ili klimatskih promjena na vodne resurse. Bitno je shvatiti kompleksne i dinamične procese koji se zbivaju u svakom pojedinom slivu kako bi se mogle poduzeti učinkovite mjera njegovog održivog razvoja.

Glavni čimbenici koji utječu na hidrološko ponašanje mogu se sistematizirati u slijedeće tri skupine: (1) geološko-hidrogeološka i morfološka svojstva sliva; (2) klimatski čimbenici; (3) ljudske aktivnosti u slivu. Od geološko-hidrogeoloških svojstava bitni utjecaj imaju vrste tla i vegetacije koja se na njima

razvija te nagibi terena i postojanjem depresija u kojima se voda može privremeno retencionirati. Biljni pokrov snažno i izravno utječe na hidrološki ciklus.

Od klimatskih faktora ključnu ulogu igraju količine i raspodjele oborina kao i temperature zraka. Klima kontrolira rasprostranjenost i produktivnost kopnene vegetacije, a tip biljnog pokrova ključni je faktor za evapotranspiraciju i globalno otjecanje (Beaulieu i sur. 2016.).

Od ljudskih intervencija na hidrološka svojstva bitno mogu utjecati urbanizacija, krčenje šuma, promjena korištenja terena, regulacije i kanalizacija vodotoka, izgradnja nasipa, akumulacija i/ili retencija itd. Sve navedeno se osobito brzo i često vrlo negativno uzrokuje snažne hidrološke promjene na malim slivovima.

Posljedice hidroloških promjena najčešće se manifestiraju: (1) povećanom čestinom i snagom naglih bujičnih poplava; (2) smanjivanjem malih voda i presušivanjem tečenja; (3) degradacijom vodnih ekoloških sustava; (4) intenziviranjem erozije i transporta sediment; (5) degradacijom kakvoće vode uslijed dotoka zagađenja iz urbaniziranih i industrijaliziranih površina kao i poljoprivrednih terena.

Promjene klime kao i ostalih prethodno spomenutih čimbenika snažno utječu na obrazac, učestalost i veličinu protoka. Nepouzdanost je kvantificirati u kojoj će mjeri promjene utjecati na obrasce protoka i poplave malih slivova zbog nedostupnosti ili neadekvatnosti hidrometeoroloških i drugih podataka za kalibraciju hidroloških modela i zbog prilagođavanja metoda maloj razini (Tsegaw i sur. 2020.).

Analiza promjena hidroloških režima na 140 slivova u području Mediterana ukazala je na tendencija smanjenja vodnih resursa uzrokovana antropogenim i klimatskim pritiscima te pojava ekstremnijeg režima oborina. Slivovi pokazuju vrlo heterogene odgovore tijekom vremena i u raznim dijelovima prostora, što rezultira ograničenjima u hidrološkom modeliranju i velikim nesigurnostima u predviđanjima (Merheb i sur. 2016.).

Yildiz i sur. (2024.) naglašavaju da promjena i/ili varijacija klime u kombinaciji s geološko-hidrogeološkim i morfološkim karakteristikama sliva te utjecajima ljudskih aktivnosti u slivu osobito snažno i relativno brzo utječu na hidrološke sustave u regijama poput Hrvatske, koja je poznata po svojoj raznolikoj geografiji i klimatskoj varijabilnosti. Ovaj rad ima za cilj da pridoneše detaljnijim saznanjima o promjenama hidroloških procesa na jednoj nevelikoj, ali značajnoj rijeci kao što je Bednja. Analizama iznesenim u ovom radu pokušalo se ustanoviti koliko na srednje godišnje protoke utječu godišnje oborine, a koliko srednje godišnje temperature zraka te kakovi se trendovi suša javljaju na ovom slivu. Pri tome se pretpostavlja da će ova saznanja biti od koristi za susjedne slivove koji su podvrgnuti sličnim prirodnim i antropogenim utjecajima.

2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Razni vidovi vezani s problematikom sliva i rijeke Bednje tretirani su u brojnim objavljenim radovima. Čestina objavljivanja porasla je osobito u posljednjih desetak godina, što jasno ukazuje na značaj ovog sliva i vodotoka.

Zaninović i Gajić Čapka (2020.) su analizirale promjene komponenti vodne bilance u regiji hrvatskih nizina u koje pripada i sliv Bednje. Rezultati pokazuju značajno povećanje potencijalne i realne evapotranspiracije te smanjenje otjecanja i sadržaja vode u tlu u analiziranoj regiji tijekom dvadesetog stoljeća.

Hidrološki režim Bednje na vodomjernim postajama Lepoglava, Željeznica, Tuhovec i Ludbreg okarakteriziran je kao kišno-snežni peripanonski režim (Čanjevac 2013.). Peripanonski kišno-snežni režim složeni je režim sa po dva maksimuma i minimuma tijekom godine.

Uspoređujući standardno tridesetogodišnje razdoblje (1961. – 1990.) i tridesetogodišnje razdoblje (1980. – 2009.) ustanovljena je promjena protočnog režima Bednje na vodomjernoj postaji Tuhovec (Čanjevac 2012.). Očitovala se kroz redistribuciju protoka unutar godine, povećanje jesenskih i zimskih te smanjenje ljetnih protoka te pojavom pomaka u mjesecima javljanja maksimuma i minimuma. Čanjevac i Orešić (2015.) i Čanjevac i Orešić (2018.) su definirali promjene srednjih godišnjih i sezonskih protoka na vodomjernim postajama Tuhovec i Lepoglava na rijeci Bednji u razdoblju 1990. – 2009. Sličnu analizu usporedbe standardnog tridesetogodišnjeg razdoblja (1961. – 1990.) i tridesetogodišnje razdoblje (1991. – 2020.) na podacima vodomjerne postaje Ludbreg objavili su Orešić i sur. (2024.).

Konstatirano je da je u recentnom razdoblju došlo do pada srednjih mjesečnih protoka u gotovo svim mjesecima, najviše u toplom dijelu godine.

Evaluacija daljinski opaženog produkta oborina u hidrološkom modelu sliva Bednje tretirana je u radu Leskovar i sur. (2021.).

Hidrološki potencijal rijeke Bednje razmatran je kao mogućnost upotrebe u pametnim hidroenergetskim hibridnim sustavima koji se sastoji od male hidroelektrane i solarne fotonaponske elektrane kao dijela energetskeg unosa za realizaciju pametnih gradova (Đurin i sur. 2020.).

Istraživanjem transformacije srednjih dnevnih protoka na pet vodomjernih postaja duž toka rijeke Bednje u razdoblju 2007. – 2018. utvrđene su visoke korelacije protoka između pet vodomjernih postaja duž rijeke Bednje. Korištene su metode korelacije, unakrsne korelacije i RAPS metoda. Vrijednosti koeficijenta korelacije kretale su se između 0,85 i 0,97 za srednje dnevne protoke, te između 0,88 i 0,99 za RAPS vrijednosti (Đurin i sur. 2023.).

Yildiz i sur. (2024.) su analizirali utjecaj klimatskih promjena na protok rijeke Bednje na pet vodomjernih postaja. Korištenjem sezonskih Mann-Kendallov-ih (MK) testova procijenjeni su ukupni trendovi protoka. Sezonska MK analiza identificirala je značajne trendove smanjenja, prvenstveno tijekom ljeta. Analiza je otkrila nagle promjene na postajama duž toka rijeke Bednje, uključujući ranije pomake u razdoblju 1951. – 1968. i novije i razdoblju 2013. – 2015. Analizirajući hidrološke karakteristike rijeke Bednje za potrebe korištenja njenih hidropotencijala utvrđeno je da oni imaju bujične karakteristike (Kos i sur. 2021.).

Petrić (2011.) je objavio rad o naseljima u porječju rijeke Bednje tijekom srednjeg i početkom ranog novog vijeka.

Vilenica i sur. (2022.) su predstavili rezultate istraživanja vodencvjetova na hidromorfološki izmijenjenoj nizinskoj rijeci Bednji. Zabilježene su 22 vrste. Duž riječnog toka zabilježen je značajan porast u broju vrsta vodencvjetova. Najviši broj vrsta zabilježen je na lokaciji s umjerenim hidromorfološkim promjenama, a najveća raznolikost na lokaciji s velikim hidromorfološkim promjenama.

Buj i sur. (2023.) naglašavaju da ihtiofauna rijeke Bednje, predstavlja »vruću točku« u dunavskom slivu. Njena iznimna raznolikost pod jakim je prijetnjama kao posljedica prirodnih i antropogenih utjecaja koji se intenziviraju u recentnom razdoblju.

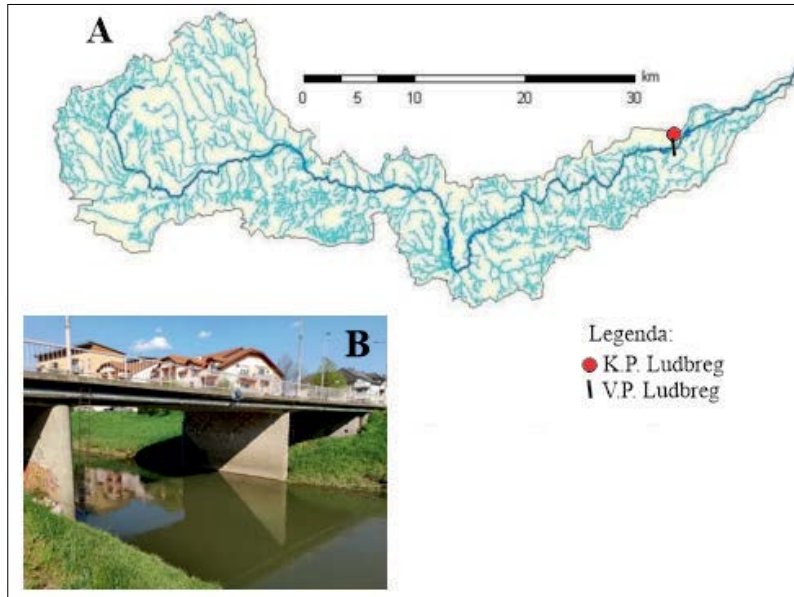
3. MATERIJALI I METODE

3.1. Opis sliva i korištenih podataka

Rijeka Bednja je desna pritoka rijeke Drave te kao takva pripada crnomorskom slivu. Gotovo cijelim tokom teče u smjeru zapad-istok što je moguće uočiti sa slike 1A. Površina sliva Bednje iznosi 596 km² (Počakal 1982.). Duljina korita rijeke Bednje od izvora do uljeva u rijeku Dravu iznosi 106,26 km (Čanjec i sur. 2022.). Treba napomenuti da se u nekim drugim literaturnim izvorima spominju različite duljine rijeke Bednje koje variraju od 103 km (Počakal 1986.) do 133 km (Petrić 2011.; Đurin i sur. 2023.). Za izvorište rijeke Bednje smatra se Brezova gora, odnosno više malih izvora koji formiraju stalni tok (Počakal 1982.). Izvor se nalazi na nadmorskoj visini od oko 300 metara nad morem (mnm), a ušće je na visini od 136 mnm. Petrić (2011.) napominje da o izvoru rijeke Bednje postoje različita mišljenja te navodi slijedeće: »Jedni autori smatraju kako je izvor Bednje u Kamenoj gorici, drugi da Bednja nastaje istjecanjem vode iz Trakošćanskog jezera, a neki za izvor Bednje uzimaju tok koji izvire u Brezovoj gorici«. Pretpostavljajući da su podaci koji su izneseni u radu Čanjec i sur. (2022.) najtočniji navode se geografske koordinate izvora (46° 17' 19,939" N; 5° 59' 19,926" E) i ušća (46° 18' 12,397" N; 6° 25' 23,55") rijeke Bednje.

Uzdužni profil rijeke Bednje uglavnom odgovara nizinskoj rijeci s minimalnim visinskim promjenama. Prosječna širina sliva je 5,8 km. U izvorišnom području sliv je najširi (do 29 km), nakon čega se sužava tako da mu u području ušća širine iznosi 4 km.

Rijeka Bednja je uglavnom nizinska rijeka s minimalnim visinskim promjenama. Sa stanovišta formiranja otjecanja bitno je shvatiti da je korito rijeke omeđeno planinama i brežuljcima, koji čine i razvodnicu sliva. Posljedica toga je da je cjelokupno područje sliva pretežito brdsko. Intenzivne krat-



Sl. 1. Sliv rijeke Bednje (A) i fotografija vodomjerne postaje Ludbreg (snimio B. Đurin)

Fig. 1. Map of the Bednja River Basin (A) and photo of the Ludbreg water gauging station (taken by B. Đurin)

kotrajne oborine i njihovo otjecanje s padina Ivančice, Ravne Gore i Kalničkog gorja u korito rijeke Bednje uzrokuju relativno česte nagle bujične poplave u raznim dijelovima sliva.

Područje sliva Bednje ima umjereno toplu i kišnu klimu, s najvećim intenzitetom padalina u zimskom dijelu godine. Najtopliji mjeseci su srpanj i kolovoz, dok su najhladniji siječanj i veljača. Ovo područje ima kontinentalni tip godišnjeg hoda oborina. Prema klasifikaciji po Köppen-u (Köppen i Geiger 1936.) sliv Bednje pripada Cfb tipu klime. Radi se o tipično umjereno toploj i vlažnoj kontinentalnoj klimi s toplim ljetom (Filipčić 1998.; Šegota i Filipčić 2003.).

Hidrološki i klimatološki podaci korišteni u ovom radu dobiveni od Državnog hidrometeorološkog zavoda Hrvatske iz Zagreba.

Vodomjerna postaja Ludbreg (46° 24' 77,6" N; 16° 61' 96,06" E) čija je fotografija prikazana na slici 1B zahvaća 546,98 km² sliva Bednje čija ukupna površina iznosi 596 km², što znači da je na toj lokaciji kontrolirano oko 91,8 % njenog cjelokupnog sliva. Nadmorska visina kote nule vodokaza je 147,35 mm. Udaljena je od ušća u Dravu 12,2 km. U ovom radu su korištene srednje godišnje protoke u razdoblju 1947. – 2023.

Klimatološka postaja Ludbreg (46° 14' 37,3" N; 16° 34' 26,6" E) je smještena na visini od 158 mm. U radu se analizirani podaci godišnjih oborina i srednjih godišnjih temperatura izmjereni u razdoblju 1982. – 2024.

3.2. Korištene metode

Metodom linearne regresije analizirano je koliko su promjene zavisne varijable, Y (protok, Q, i koeficijent otjecanja, K) povezane s promjenama nezavisnih varijabli X (oborina, P, i temperatura zraka, T). Ista se metoda koristila za definiranje linearnih trendova vremenskih nizova analiziranih hidroloških i klimatoloških parametara. Jednadžba pravca linearne regresije glasi:

$$Y = A + (B \times X) \quad (1)$$

gdje, Y, predstavlja zavisnu varijablu, dok X označava nezavisnu varijablu koja u slučaju analize trenda u vremenskim nizovima predstavlja godinu. Koeficijenti A i B su koeficijenti linearne regresije koji se računaju metodom najmanjih kvadrata. Koeficijent, B, predstavlja nagib pravca regresije. Negativna vrijednost ovog koeficijenta označava da je veza između ispitivanih parametara obrnuto proporcionalna ili da se javlja trend u opadanja, dok pozitivna vrijednost ukazuje na suprotnu međuzavisnost.

Pearsonov koeficijent linearne korelacije, R, mjeri jakost linearne korelacije, tj. vjerojatnost da vrijednosti jedne statističke varijable odgovara određena vrijednost druge statističke varijable pri izravnoj ili recipročnoj razmjernosti. Za svaki pojedini analizirani slučaj analiziran u ovom radu izračunate su

vrijednosti koeficijenta korelacije, R , i koeficijenta determinacije, R^2 . Koeficijent determinacije, R^2 , predstavlja kvadrat vrijednosti koeficijenta korelacije, R . Oba koeficijenta su pokazatelji koliko dobro u linearnoj regresiji jedna varijabla objašnjava varijaciju druge varijable ili koliko se dobro pravac regresije prilagođava podacima. Na primjer, koeficijent determinacije $R^2=0,80$ ($R=0,894$) ukazuje da se 80 % ukupne varijacije zavisne varijable, Y , može objasniti linearnom ovisnošću s nezavisnom varijablom, X , dok se preostalih 20 % ne može objasniti linearnom ovisnošću. Nastavno se navodi Chaddock-ova skala (Chaddock 1925.) za interpretaciju rezultata korelacijske analize, na osnovu vrijednosti koeficijenta korelacije R : (1) 0,00–0,30 zanemariva korelacija; (2) 0,30–0,50 slaba korelacija; (3) 0,50–0,70 umjerena korelacija; (4) 0,70–0,90 jaka korelacija; (5) 0,90–1,00 vrlo jaka korelacija.

Za ispitivanje ovisnosti godišnjih koeficijenata otjecanja, K , i srednjih godišnjih protoka, Q , (kao zavisnih varijabli) o godišnjim oborinama, P , i srednjim godišnjim temperaturama zraka, T , (kao nezavisnim varijablama) korištena je metoda višestruke linearne regresije:

$$Y = A + (B \times P) + (C \times T) \quad (2)$$

pri čemu je, Y , jedna od dvije prethodno navedene zavisne varijable dok A , B , C , predstavljaju koeficijente linearne regresije kod čega se koeficijent, A , tretira kao rezidual (Papić 2005.). I za ovaj se odnos izračunava koeficijent višestruke linearne determinacije, RV^2 .

Za određivanje podnizova sa statistički značajno različitim prosječnim vrijednostima korištena je Rescaled Adjusted Partial Sums (RAPS) metoda (Garbrecht i Fernandez 1994.; Đurin i sur. 2023.). Izraz za definiranje RAPS-a glasi:

$$RAPS_k = \sum_k ((Y_k - Y_N)/S_N) \quad (3)$$

gdje, Y_k , predstavlja prosječnu vrijednost analiziranog parametra u intervalu vremena, k , Y_N , je prosječna vrijednost u cijelom vremenskom nizu, S_N je standardna devijacija cijelog niza koji se sastoji od, N , članova, dok, ($k = 1, 2 \dots, N$), predstavlja brojač tijekom sumiranja.

Za određivanje statističke značajnosti razlika između prosječnih vrijednostima dva susjedna podniza, definirana RAPS metodom, korišteni su F-test i t-test (McGhee 1985). Dok je F-testom ispitivana statistička značajnost razlike varijanci, t-test se koristio za procjenu da li se prosječne vrijednosti dva susjedna vremenska podskupa statistički značajno razlikuju. U oba testa kao nivo za prihvatanje hipoteze da se prosječne vrijednosti susjednih podnizova statistički značajno razlikuju izabrana je vrijednost vjerojatnosti od, $p < 0,01$.

Za niz srednjih godišnjih protoka Bednje na profilu Ludbreg korištenjem niza godišnjih oborina Ludbrega izračunate su vrijednosti godišnjih koeficijenata otjecanja, K . Koeficijent otjecanja je odnos godišnjeg volumena otekline vode na analiziranom profilu vodotoka i volumena oborine koja padne na pripadni sliv tijekom iste godine. Ovaj koeficijent predstavlja bitan hidrološki pokazatelj u analizama procesa otjecanja oborine s određenog sliva.

Statistička značajnost monotonog porasta ili opadanja linearnih trendova vremenskih nizova hidroloških i klimatoloških parametar ocjenjivana je neparametarskim Mann-Kendall-ovim (M-K) testom (Mann 1945.; Kendall 1975.). Nulta hipoteza je da ne postoji statistički značajan monotoni trend analiziranog vremenskog niza, dok je alternativna hipoteza da statistički značajan trend postoji. Kao kriterij za prihvatanje alternativne hipoteze koristi se vjerojatnost, $p < 0,01$.

Koristeći podatke srednjih godišnjih temperatura zraka, T , i godišnjih oborina, P , Ludbrega u razdoblju 1982. – 2024. u radu su izračunate vrijednosti novog indeksa suše, NDI (Bonacci i sur. 2023.). Radi se o novom pokazatelju intenziteta suše koji je u relativno kratko vrijeme primijenjen u brojnim regijama svijeta te se kao takav pokazao kao pouzdana mjera suše (Sidiqi i sur. 2023.; Zeng i sur. 2025.). NDI je kompozitni indeks koji integrira oborine, vlažnost tla i zdravlje vegetacije, nudeći cjelovitiji pogled na sušu u usporedbi s tradicionalnim indeksima. Weaver i sur. (2025.) su ga koristili za redefiniranje suše u državi Missouri (SAD) u razdoblju 2018. – 2024. Izraz za definiranje, NDI, glasi:

$$NDI_i = [(P_i - P_{pr})/SP] - [(T_i - T_{pr})/ST] \quad (4)$$

kod čega je, P_i , oborina u godini, i , P_{pr} , prosječna vrijednost niza oborine u analiziranom razdoblju, SP , standardna devijacija analiziranog niza godišnjih oborina, T_i , srednja godišnja temperatura zraka u godini i , T_{pr} , prosječna vrijednost analiziranog niza srednjih godišnjih temperatura zraka u analiziranom razdoblju, ST , standardna devijacija analiziranog niza srednjih godišnjih temperatura zraka.

Sustavi praćenja suše i ranog upozoravanja obično koriste pokazatelje suše kao što je standardizirani indeks oborine, SPI, što nije dobar pokazatelj hidroloških suša. S ciljem poboljšanja razumijevanja opasnosti od suše u Velikoj Britaniji Barker i sur. (2016.) su, SPI, povezali sa Standardiziranim indeksom protoka, SQI. Nalbantis i Tsakiris (2007.) su koristili, SQI, za analizu suše na rijeci Evinos u Grčkoj. U ovom radu je, SQI, proračunat na raspoloživom nizu srednjih godišnjih protoka, Q, Bednje na vodomjernom profilu Ludbreg. Izraz za definiranje, SQI, glasi:

$$SQI_i = (Q_i - Q_{pr}) / SQ \quad (5)$$

kod čega je, Q_i , srednji godišnji protok u godini, i , Q_{pr} , prosječna vrijednost niza srednjih godišnjih protoka u analiziranom razdoblju, SQ , standardna devijacija analiziranog niza.

Kategorije intenziteta suše klasificirane su na temelju vrijednosti tri spomenuta indeksa. Blage suše se smatraju kad su indeksi u rasponu od 0 do $(-1,0)$. Umjerene suše su onda kad se vrijednosti indeksa nalaze u rasponu od $(-1,0)$ do $(-1,5)$. Jaka suša se javljaju kad se vrijednosti indeksa kreće u rasponu od $(-1,5)$ do $(-2,0)$. Ekstremne suše se javljaju kad su vrijednosti indeksa manje od $(-2,0)$.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

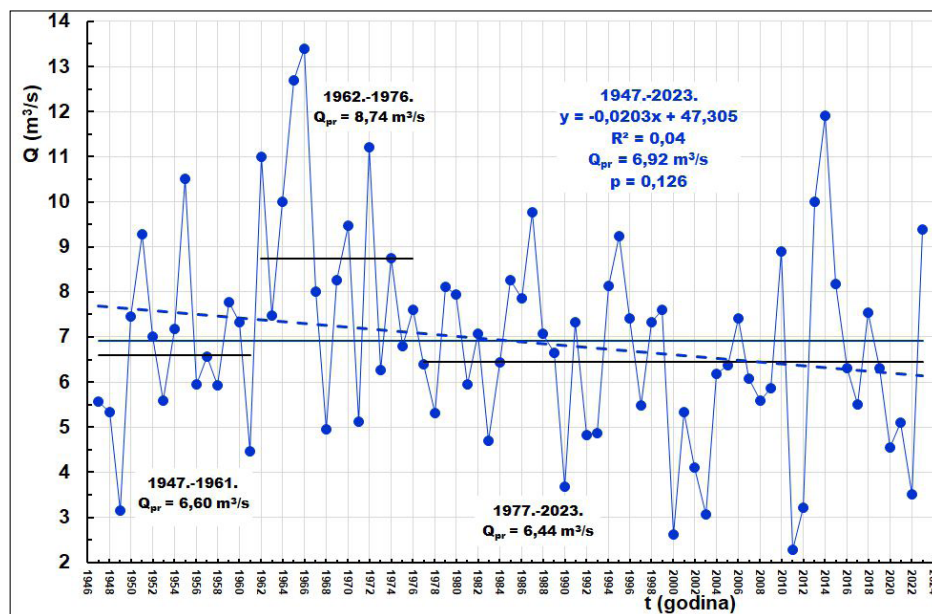
4.1. Protoci Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg

Na slici 2 prikazan je niz srednjih godišnjih protoka, Q, Bednje na profilu Ludbreg u razdoblju od 1947. do 2023. Vrijednosti se kreće u vrlo širokom rasponu od minimalnih 2,29 m³/s, 2011. godine do maksimalnih 13,4 m³/s, 1966. godine. Prosječna vrijednost u nizu od 77 godina je 6,92 m³/s. Trend opadanja protoka nije statistički značajan pošto vrijednost vjerojatnosti izračunate M-K testom iznosi, $p=0,126$, te je viša od usvojene granične vrijednosti, $p=0,01$.

Primjenom RAPS metode utvrđeno je postojanje tri slijedeće vremenska podniza sa statistički značajno različitim prosječnim vrijednostima: (1) 1947. – 1961., $Q_{pr}=6,60$ m³/s; (2) 1962. – 1976., $Q_{pr}=8,74$ m³/s; (3) 1977. – 2024., $Q_{pr}=6,44$ m³/s.

4.2. Oborine i srednje temperature zraka na klimatološkoj postaji Ludbreg

Na slici 3 je prikazan niz godišnjih oborina, P, opažen na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju od 1982. do 2024. Niz vrijednosti se kreće u vrlo širokom rasponu od minimalnih 472,5 mm, 2011. godine do maksimalnih 1376,4 mm, 2014. godine. Prosječna vrijednost u nizu od 43 godina je 898 mm. Trend porasta godišnjih oborina nije statistički značajan pošto vrijednost vjerojatnosti izračunate M-K testom iznosi, $p=0,983$, te je izrazito viša od usvojene granične vrijednosti, $p=0,01$.



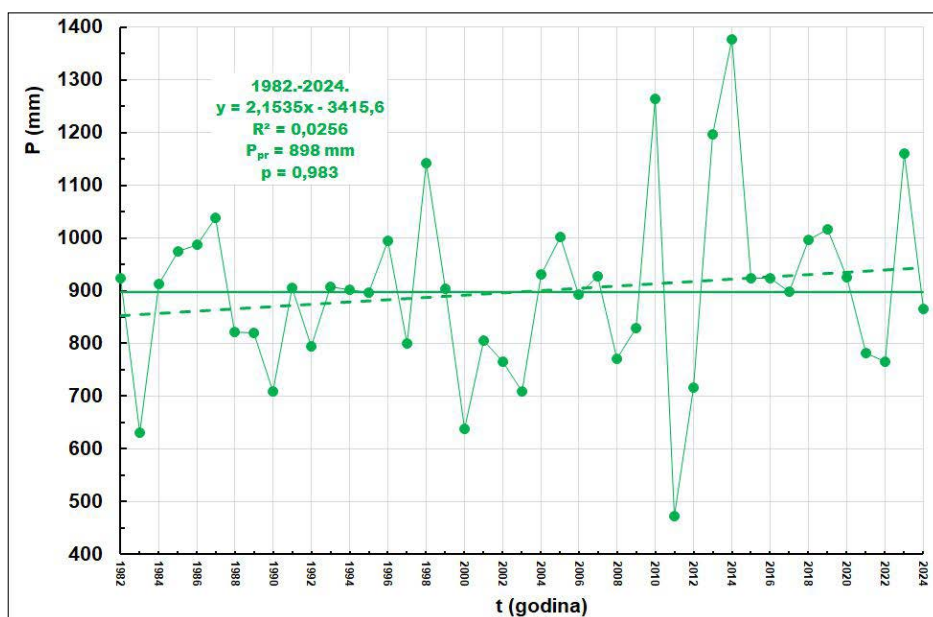
SI. 2. Niz srednjih godišnjih protoka (Q) Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg opažen u razdoblju 1947. – 2023.

Fig. 2. Series of mean annual Bednja flows (Q) at the Ludbreg water gauging station observed in the period 1947-2023

Na slici 4 je prikazan niz srednjih godišnjih temperatura zraka, T, opažen na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju od 1982. do 2024. Niz vrijednosti se kreće u rasponu od minimalnih 8,8 °C, 1985. godine do maksimalnih 13,204 °C, 2024. godine. Prosječna vrijednost u nizu od 43 godina je 10,8 °C. Trend porasta godišnjih oborina statistički je značajan pošto vrijednost vjerojatnosti izračunate M-K testom iznosi, $p=7,2E-09$, što je izrazito niža vrijednost od usvojene granične vrijednosti, $p=0,01$. Ovaj niz pokazuje jasan utjecaj globalnih klimatskih promjena na porast temperatura zraka u analiziranom području.

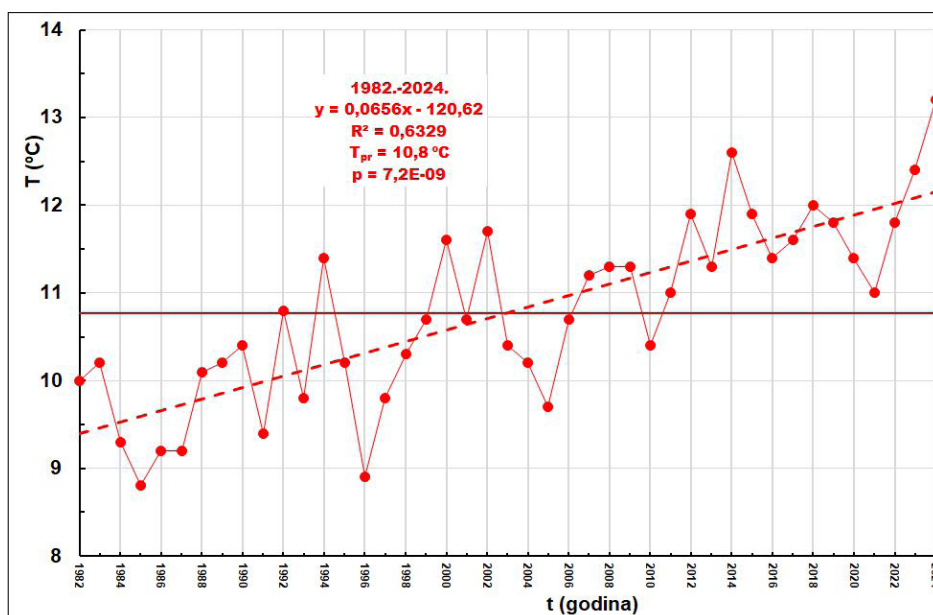
4.3. Koeficijenti otjecanja

Niz godišnjih koeficijenata otjecanja, K, Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg u razdoblju 1982. – 2023. ucrtan je na slici 5. Prosječna vrijednost u cijelom raspoloživom razdoblju iznosi 0,367. Kreće se u rasponu od najniže vrijednosti 0,22, 2000. godine do najviše vrijednosti 0,51, 2014. godine. Uočava se opadajući trend koji statistički nije značajan pošto vrijednost vjerojatnosti izračunate M-K testom iznosi, $p=0,250$, te je viša od usvojene granične vrijednosti, $p=0,01$.



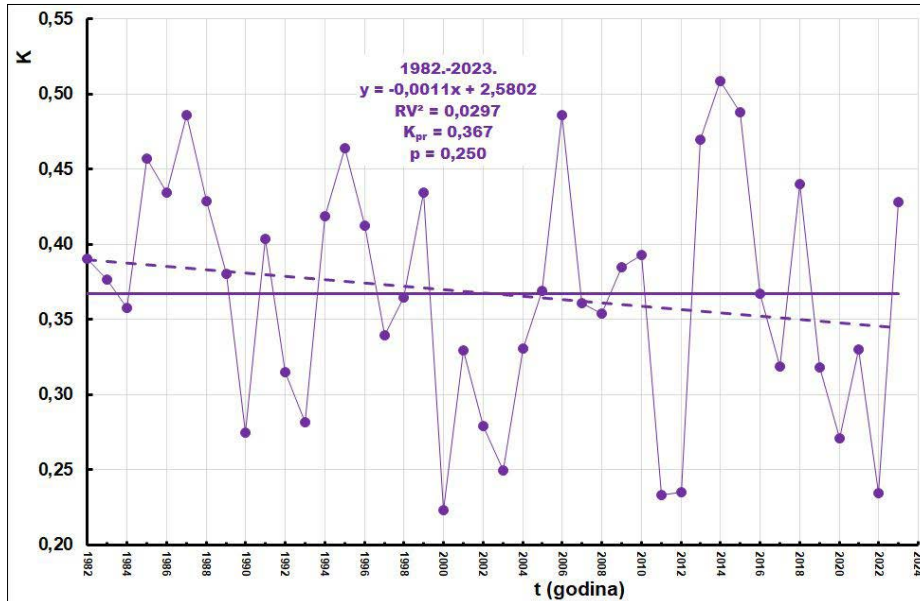
Sl. 3. Niz godišnjih oborina (P) opažen na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju 1982. – 2024.

Fig. 3. Series of annual precipitation (P) observed at the Ludbreg climatological station in the period 1982-2024



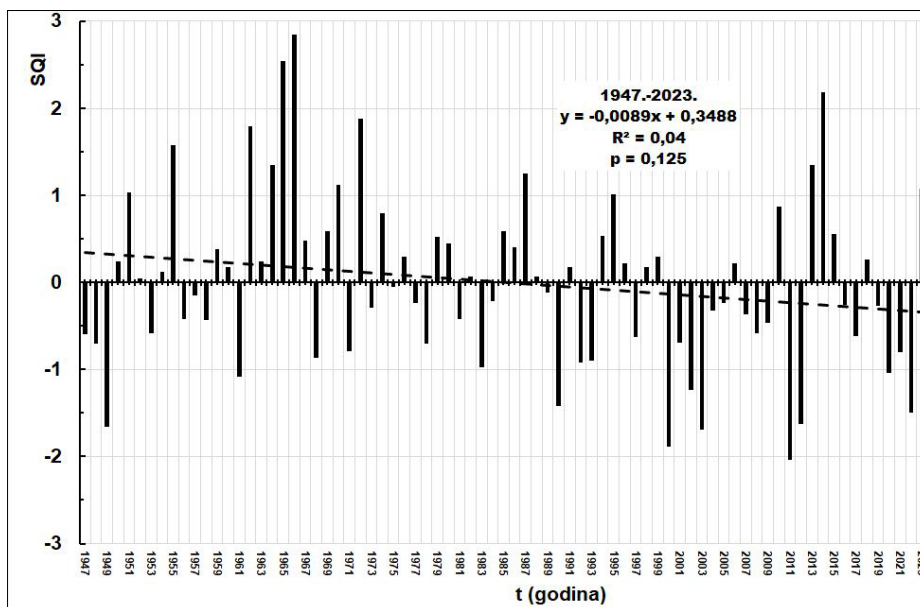
Sl. 4. Niz srednjih godišnjih temperature zraka (T) opažen na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju 1982. – 2024.

Fig. 4. Series of mean annual air temperatures (T) observed at the Ludbreg climatological station in the period 1982-2024



Sl. 5. Niz godišnjih koeficijenata otjecanja (K) rijeke Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg izračunat za razdoblje 1982. – 2023.

Fig. 5. Series of annual runoff coefficients (K) of the Bednja River at the Ludbreg water gauging station calculated for the period 1982-2023



Sl. 6. Niz godišnjih vrijednosti standardiziranog indeksa protoka (SQI) izračunat na vodomjernoj postaji Ludbreg u razdoblju 1947. – 2023.

Fig. 6. A series of annual values of standardized flow index (SQI) calculated at the Ludbreg water gauging station in the period 1947-2023

Jednadžba linearne regresije između godišnjih koeficijenata otjecanja, K, i srednjih godišnjih protoka, Q, u razdoblju 1982. – 2023. glasi:

$$K = 0,1494 + (0,034 \times Q) \quad (6)$$

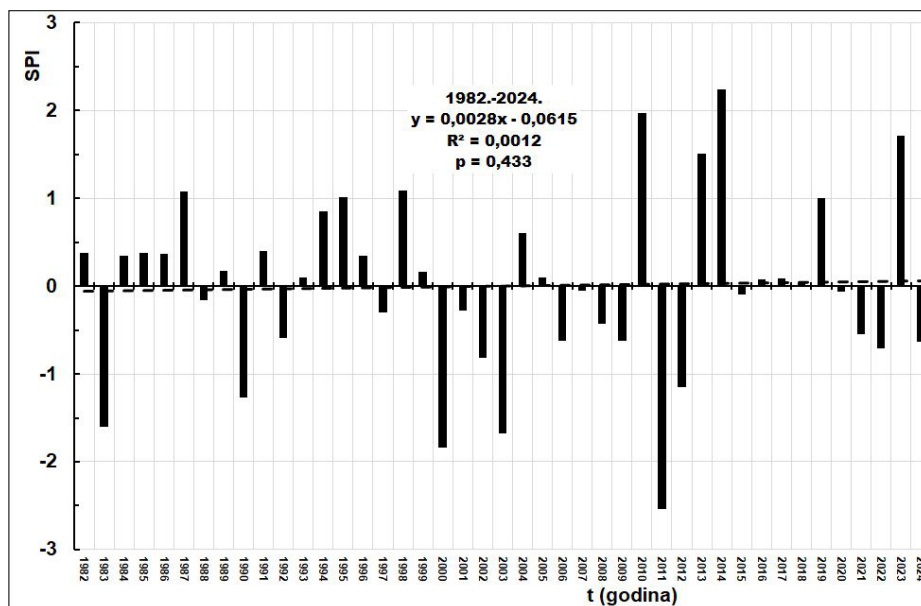
dok je vrijednost koeficijent determinacije, R^2 , vrlo visoka i iznosi 0,8502.

Uspoređujući rezultate analiza zasnovanih na slikama 2, 3, 4 i 5 nameće se potreba objašnjavanja činjenica da srednji godišnji protoci, Q, i godišnji koeficijenti otjecanja, K, pokazuju trend statistički neznačajnog opadanja usprkos činjenici statistički neznačajnog porasta godišnjih oborina, P. Kako je trend porasta srednjih godišnjih temperatura, T, izrazito statistički značajan vrlo je vjerojatno pretpostaviti da temperature igraju važnu ulogu u ovom zabrinjavajućem procesu. Ne treba zanemariti niti utjecaj antropogenih zahvata na slivu.

Izrazi višestruke linearne regresije za zavisne varijable, Q, i K, glase:

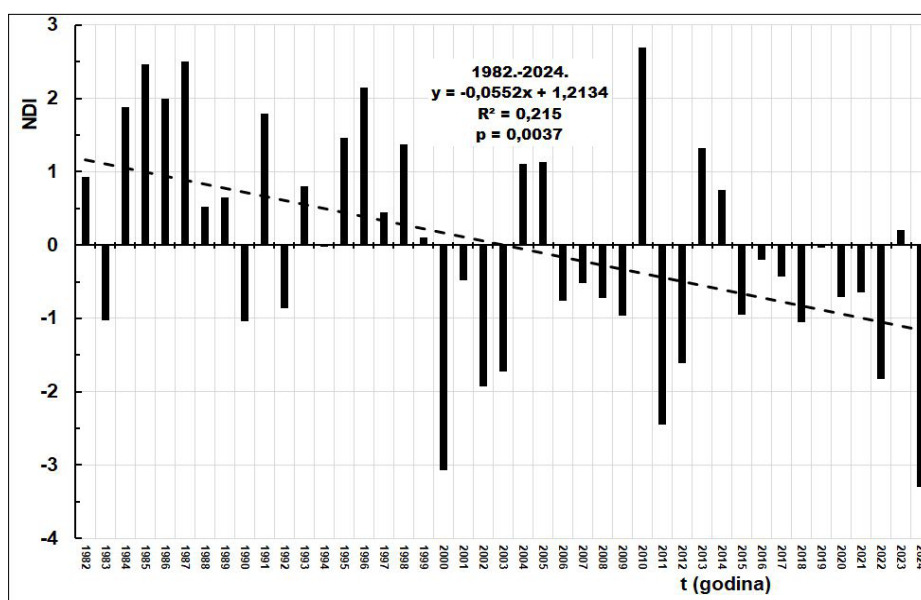
$$Q = -3,394 + (0,01131 \times P) - (0,1298 \times T) \quad (7)$$

$$K = 0,1922 + (0,000309 \times P) - (0,01205 \times T) \quad (8)$$



Sl. 7. Niz godišnjih vrijednosti standardiziranog indeksa oborina (SPI) izračunat na vodomjernoj postaji Ludbreg u razdoblju 1947. – 2023.

Fig. 7. A series of annual values of standardized precipitation index (SQI) calculated at the Ludbreg water gauging station in the period 1982-2023



Sl. 8. Niz godišnjih vrijednosti novog indeksa suše (NDI) izračunat na vodomjernoj postaji Ludbreg u razdoblju 1947. – 2023.

Fig. 8. A series of annual values of new drought index (NDI) calculated at the Ludbreg water gauging station in the period 1982-2023

Koeficijent determinacije višestruke linearne regresije za odnos $Q=f(P,T)$ iznosi, $RV^2=0,779$. Za odnos $K=f(P,T)$ značajno je niži te iznosi, $RV^2=0,488$. Ovi rezultati ukazuju da nezavisne varijable, P , i,T , mnogo bolje objašnjavaju ponašanje srednjih godišnjih protoka, Q , nego godišnje koeficijente otjecanja, K . Logični zaključak bi bio da na vrijednosti godišnjih koeficijenata otjecanja, K , vjerojatno utječu i neki drugi čimbenici. Bez raspolaganja detaljnijim podacima nije moguće dati iole pouzdan odgovor. Važno je uočiti da odnos utjecaja nezavisnih varijabli, P/T , u izrazu (7) iznosi 8,04, dok je u izrazu (8) značajno niži i iznosi 2,35. To navodi na zaključak da na vrijednosti godišnjeg koeficijenta otjecanja, K , znatno više (3,4 puta) utječu temperature zraka, T , nego na vrijednosti srednjih godišnjih protoka, Q .

4.4. Analiza tri indeksa suše

Slika 6 prikazuje godišnje vrijednosti standardiziranog indeksa protoka, SQI , Bednje na vodomjernoj postaji Ludbreg u razdoblju 1947. – 2023. Kod ovog indeksa suše uočava se opadajući trend, koji nije statistički značajan pošto je, $p=0,125$. Bitno je uočiti da se u razdoblju od posljednjih 24 godine

(2000. – 2023.) ekstremna suša (SQI < -2,0) pojavila samo 2011. godine, ali su se jake suše (SQI < -1,5) pojavile tri puta (2000., 2003., 2012.).

Slika 7 prikazuje godišnje vrijednosti standardiziranog indeksa oborina, SPI, opaženih na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju 1982. – 2024. Kod ovog indeksa suše postoji vrlo blagi statistički neznatna trend porasta vrijednosti indeksa, dakle smanjenja suša, pošto je $p=0,433$. Bitno je uočiti da se u raspoloživom razdoblju od 43 godine ekstremna suša pojavila samo tijekom 2011. godine.

Na slici 8 su ucrtane vrijednosti novog indeksa suše, NDI, izračunate korištenjem podataka godišnjih oborina, P, i srednjih godišnjih temperatura zraka, T, izmjerenih na klimatološkoj postaji Ludbreg u razdoblju 1982. – 2024. Jasno se uočava statistički značajan trend intenziviranja suše što je potvrđeno vrijednošću vjerojatnosti trenda prema M-K testu koja iznosi, $p=0,0037$. To je značajno niža vrijednost od usvojene granične vrijednosti od, $p=0,01$. Najekstremnija suša opažena je 2024. godine kada je vrijednost, NDI, iznosila -3,30. Zanimljivo je uočiti da je prema, SPI, indeksu najsušnija godina bila 2011., a da, NDI, indeks tu godinu svrstava tek kao treću po sušnosti unutar raspoloživog razdoblja.

5. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNA ISTRAŽIVANJA

Cilj prethodno iznesenih analiza bio je da se na konkretnom primjeru sliva Bednje pokuša detaljnije shvatiti kako se promjene klime, u ovom slučaju prije svega nagli i intenzivni porasti temperatura zraka, manifestiraju na hidrološki režim. Važno je naglasiti da je prirodni okoliš sliva Bednje vrlo malo poremećen antropogenim zahvatima. Analize su izvršene na vremenskoj skali od godine dana. Bitno je imati na umu da za razliku od značajnog porasta temperatura zraka ne postoje iole značajniji trendovi ni porasta niti opadanja godišnjih oborina, ne samo na tom slivu nego i u široj regiji.

Potencijalni zaključak vezano s ovdje analiziranim slivom je da na poraste temperatura zraka nešto sporije reagiraju protoci vode. Vjerojatno se radi o nešto sporijoj reakciji koju je nemoguće zaustaviti. Na tu činjenicu ukazuje trend vrijednosti, NDI, prikazan na slici 8. Suše su na slivu Bednje i u široj regiji sve češće i sve snažnije (Bonacci i sur. 2025.a, 2025.b). Realno je pretpostaviti da će najteže posljedice osjetiti okoliš te da će se one nešto sporije odraziti i na hidrološki režim, prije svega smanjivanje srednjih godišnjih protoka i izmjenu unutargodišnjeg režima, tj. pojave produženih malovodnih razdoblja. U slučaju sliva Bednje realno je očekivati da bi klimatske promjene mogle uzrokovati presušivanje toka na nekim dionicama, posebno onim u najuzvodnijem djelu vodotoka.

Promjene klime, korištenja zemljišta, kao i antropogeni zahvati uzrokuju posebno drastične i opasne promijene na malim slivovima. Predviđa se da će se ovaj trend nastaviti i pojačati u budućnosti, što će rezultirati češćim i intenzivnijim hidrološkim sušama.

U slivovima kao što je ovaj rijeke Bednje postoji žurna potreba za planiranjem akcija za poduzimanje mjera koje će učinkovito utjecati na ublažavanje negativnih posljedica s osobitim naglaskom na ublažavanje gubitka biološke raznolikosti. Ispunjavanje tog zadatka zahtijeva robusne podatke i detaljne interdisciplinarnе analize.

Jednostavni pristup analizi utjecaj klimatskih promjena na hidrološki režim, kako je to izvršeno u ovom radu, mogao bi biti dobar prvi korak za donošenje ispravnih odluka u ovoj važnoj, ekstremno aktualnoj i svugdje prisutnoj problematici.

ZAHVALA

Autori zahvaljuju Državnom hidrometeorološkom zavodu na ustupljenim podacima i posebno njihovim djelatnicima Damiru Mlineku i Ivani Stankovski na ljubaznosti i profesionalnosti.

Ovo istraživanje je djelomično sufinancirano kroz projekt KK.01.1.1.02.0027, koji je sufinanciran od strane Hrvatske Vlade i Europske Unije kroz »European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Programme.«

LITERATURA

1. Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A., Svensson, C. (2016.): From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (6), 2483–2505. DOI: 10.5194/hess-20-2483-2016
2. Beaulieu, E., Lucas, Y., Viville, D., Chabaux, F., Ackerer, P., Godd eris, Y., Pierret, M.-C. (2016.): Hydrological and vegetation response to climate change in a forested mountainous catchment. *Modeling Earth Systems and Environment* 2, 1–15, DOI: 10.1007/s40808-016-0244-1
3. Bonacci, O.,  akni - atovi , A., Roje-Bonacci, T., Bonacci, D. (2025.a): Assessing the effects of climate change on the hydrology of a small catchment: the Krapina River near Kupljenovo, *Water* 17 (1403), DOI: 10.3390/w17091403
4. Bonacci, O.,  akni - atovi , A., Roje-Bonacci, T. (2025.b): Comparative hydrological analysis at two stations on the boundary river Sotla/Sutla (Slovenia-Croatia), *Acta Hydrotechnica* 38 (68), 15-22, DOI: 10.15292/acta.hydro.2025.02
5. Bonacci, O., Bonacci, D., Roje-Bonacci, T., Vrsalovi , A. (2023.): Proposal of a new method for drought analysis, *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 71 (1), 100-110, DOI: 10.2478/johh-2022-0030
6. Buj, I., Pleše, S., Onorato, L., Mar i , Z., Mustafi , P.; Zanella, D., Caleta, M.; Ivi , L.; Novoselec, L., Reni , N., Horvati , S., Karlovi , R., Tvrđini , G. (2023.): The ichthyofauna of the Bednja River, ichthyological 'hot spot' in the Danube Basin—exceptional diversity under strong threats, *Water* 15, 311. DOI: 10.3390/w15020311
7. Chaddock, R. E. (1925.): *Principles and methods of statistics*. Houghton Mifflin, Cambridge, 471 pp.
8.  anjevac, I. (2012.): Novije promjene proto nih re ima u hrvatskom dijelu porje ja Dunava, *Hrvatski geografski glasnik* 74 (1), 61-74, DOI: 10.21861/HGG.2012.74.01.04
9.  anjevac, I. (2013.): Tipologija proto nih re ima rijeka u Hrvatskoj, *Hrvatski geografski glasnik* 75 (1), 23-42, DOI: 10.21861/HGG.2013.75.01.02
10.  anjevac, 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
11.  anjevac, I., Orešić, D. (2018.): Changes in discharge regimes of rivers in Croatia, *Acta geographica Slovenica* 58 (2), 7-18, DOI: 10.3986/ags.2004
12.  urin, B., Kranj i , N., Muhar, A. M. (2020.): Smart hydro-energy hybrid system potential in Croatia—Bednja River case study, *Elektroni ki  asopis Građevinskog fakulteta Osijek—e-GFOS* 11 (20), 39–50
13.  urin, B., Plantak, L., Bonacci, O., Di Nunno, F. (2023.): A unique approach to hydrological behavior along the Bednja River (Croatia) watercourse, *Water* 15 (589), DOI: 10.3390/w15030589
14. Filip i , A. (1998.): Klimatska regionalizacija Hrvatske po W. K ppenu za standardno razdoblje 1961. – 1990. u odnosu na razdoblje 1931. – 1960. *Acta Geographica Croatica* 33 (1), 7-14
15. Garbrecht, J., Fernandez, G. P. (1994.): Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Water Resources Bulletin* 30 (2), 297–306. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1994.tb03292.x
16. Kendall, M. G. (1975.): *Rank Correlation Methods*. 4th edition. Charles Griffin, London, 202 pp.
17. K ppen, W., Geiger, R. (1936.): *Handbuch der Klimatologie: Das geographische System der Klimate*. Verlag von Gebr der Borntraeger, Berlin, 44 pp.
18. Kos,  .,  urin, B., Dogan i , D., Kranj i , N. (2021.): Hydro-energy suitability of rivers regarding their hydrological and hydrogeological characteristics, *Water* 13 (13), 1777, DOI: 10.3390/w13131777
19. Leskovar, K., Mraku i , 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
20. Mann, H. B. (1945.): Non-parametric test of randomness against trend. *Econometrica* 13 (3), 245-259, DOI: 10.2307/1907187
21. McGhee, J. W. (1985.): *Introductory statistics*, West Publishing Company, St Paul and New York, 650 pp.
22. Merheb, M., Moussa, R., Abdallah, C., Colin, F., Perrin, C., Baghdadi, N. (2016.): Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. *Hydrological Sciences Journal* 61 (14), 2520–2539, DOI: 10.1080/02626667.2016.1140174
23. Nalbantis, I., Tsakiris, G. (2007.): Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management* 23(5), 881–897, DOI: 10.1007/s11269-008-9305-1
24. Orešić, D., Filip i , A. (2024.): Promjene proto nih re ima najve ih savskih i dravskih pritoka u Hrvatskom Zagorju i Gornjoj Podravini 1961. – 2020., *Podravina* 23 (45), 33-52
25. Papi , M. (2005.): *Primijenjena statistika u MS Excelu*, Zoro, Zagreb, 259 pp.

26. Petrić, H. (2011.): O nekim naseljima u porječju rijeke Bednje tijekom srednjeg i početkom ranog novog vijeka, *Kaj* 94 (5), 57–68
27. Počakal, M. (1982.): Hidrografske veličine porječja Bednje, *Hrvatski geografski glasnik*, 44 (1), 85-101
28. Sidiqi, M., Kasiviswanathan, K. S., Scheytt, T., Devaraj, S. (2023.): Assessment of meteorological drought under the climate change in the Kabul river basin, Afghanistan, *Atmosphere* 14 (570), DOI: 10.3390/atmos14030570
29. Šegota, T., Filipčić, A. (2003.): Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, *Geoadria* 8 (1), 17-37, DOI:10.15291/geoadria.93
30. Tsegaw, A. T., Pontoppidan, M., Kristvik, E., Alfredsen, K., and Muthanna, T. M. (2020.): Hydrological impacts of climate change on small ungauged catchments – results from a global climate model–regional climate model–hydrologic model chain, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20 (8), 2133–2155, DOI:10.5194/nhess-20-2133-2020
31. Vilenica, M., Vidaković Maoduš, I., Mihaljević, Z. (2022.): Mayflies of the Bednja River, Croatia, *Natura Croatica* 3 (2), 283-292, DOI 10.20302/NC.2022.31.20
32. Weaver, S. M., Lupo, A. R., Hunt, S., Aloysius, N. (2025.): Refining drought assessment: a multi-dimensional analysis of condition monitoring observer reports in Missouri (2018– 2024), *Atmosphere* 16 (389), DOI: 10.3390/atmos16040389
33. Yıldız, M. B., Di Nunno, F., Đurin, B., Pham, Q. B., de Marinis, G., Granata, F. (2024.): A combined seasonal Mann–Kendall and innovative approach for the trend analysis of streamflow rate in two Croatian rivers. *Water* 16 (1422), DOI: 10.3390/w16101422
34. 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
35. Zeng, F. Gao, Q., Wu, L., Rao, Z., Wang, Z., Zhang, X., Yao, F., Sun, J. (2025.): Modeling short-term drought for SPEI in Mainland China using the XGBoost model, *Atmosphere* 16 (419), DOI: 10.3390/atmos16040419

IZVORI

1. *Digitalna baza hidroloških podataka (Digital database)*, DHMZ (Croatian Meteorological and Hydrological Service), Zagreb (putem zahtjeva na e-mail: usluge@cirus.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)

SUMMARY

The article presents the results of analyses of the hydrological regime of the Bednja River at the Ludbreg gauging station on an annual time scale. In addition to the series of mean annual discharges of the Bednja at the Ludbreg gauging station for the period 1947–2023, series of annual precipitation totals and mean annual air temperatures measured at the Ludbreg climatological station for the period 1982–2024 were also analysed. The series of mean annual discharges shows a statistically insignificant decreasing trend, while the series of annual precipitation exhibits a statistically insignificant increasing trend. The series of mean annual air temperatures shows a statistically significant increasing trend.

In the article, annual runoff coefficients were calculated for the period 1982–2023. Their trend is decreasing but not statistically significant. Annual values of the following three drought indices were defined: (1) the Standardized Streamflow Index (SQI); (2) the Standardized Precipitation Index (SPI); and (3) a new drought index (NDI). The SQI index shows a statistically insignificant decreasing trend. The SPI series shows a statistically insignificant increasing trend. The NDI series shows a statistically significant decreasing trend, i.e. a statistically significant intensification of drought in the Bednja catchment.