

HIDROLOŠKA ANALIZA KRŠKOG IZVORA RUMIN VELIKI

prof. emer. dr. sc. Ognjen Bonacci
Fakultet građevinarstva, arhitekture i
geodezije
Sveučilišta u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split
ognjen.bonacci@gradst.hr

U radu je izvršena hidrološka analiza stalnog krškog izvora Rumin Veliki. Izvor se nalazi u slivu rijeke Cetine u Hrvatskoj, dok se njegov sliv dijelom nalazi u Hrvatskoj, a dijelom u Bosni i Hercegovini. Puštanjem u rad hidroelektrane (HE) Orlovac, prvenstveno zbog izgradnje i punjenja akumulacije Buško Blato u Livanjskom polju, došlo je do nagle promjene hidrološkog režima ovog izdašnog krškog izvora. Za detaljnu hidrološku obradu izvršenu u ovom radu na raspolaganju su stajali podatci o dnevnim protocima u razdoblju od 1. siječnja 1948. do 31. prosinca 2013. Treba napomenuti da nedostaju mjerenja protoka za sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1. siječanj 1985. do 5. kolovoz 1985; (2.) 1. rujan 1991. do 30. lipanj 1992. Osim dnevnih protoka izvora Rumin Veliki u radu su korišteni podatci godišnjih oborina opaženih na meteorološkoj postaji Sinj koja se nalazi u blizini analiziranog izvora. U prirodnom, antropogenim radom neporemećenom stanju u podrazdoblju 1948.-1972. karakteristični godišnji protoci (minimalni, srednji i maksimalni) bili su statistički značajno veći od onih koji su se pojavili tijekom rada sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac, a koji se javljaju i danas. Prosječni godišnji protok koji je u prirodnom stanju iznosio $18,63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ smanjen je za $11,57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (za 62,1 %) te u recentnom podrazdoblju 1973.-2013. iznosi $7,06 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. U radu je primjenom hidrološke metodologije procijenjena približna površina sliva izvora u prirodnom i u novom stanju. Zaključeno je da je površina sliva iz koje se prihranjuje izvor Rumin Veliki, zbog izgradnje i rada sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac, prosječno za oko 2,7 puta manja od one koja je bila u prirodnom stanju.

Ključne riječi: krški izvor, protok, oborina, površina sliva, Rumin Veliki, Hrvatska

1. UVOD

Krški izvor Rumin Veliki se nalazi u slivu rijeke Cetine na području Hrvatske. Voda izvire ispod klisure zvane Greda. Radi se o stalnom krškom izvoru koji nikada ne presuši. U njegovoj neposrednoj blizini, udaljen samo 640 m zračnom linijom, nalazi se drugi, ali ovog puta povremeni krški izvor Rumin Mali. Izvori Rumin Mali i Rumin Veliki formiraju kratki vodotok Rumin koji je po izdašnosti drugi po veličini pritek rijeke Cetine. Slivovi oba izvora dijelom se nalazi u Bosni i Hercegovini, a dijelom u Hrvatskoj. Na slici 1 dana je shematizirana situacija analiziranog područja s ucrtanim krškim izvorima, nekim ponorima, Livanjskim poljem, utvrđenim i pretpostavljenim podzemnim vezama (Magdalenić, 1971.; Borić, 1980.), akumulacijama Buško Blato i Lipa, HE Orlovac te meteorološkoj postajom Sinj.

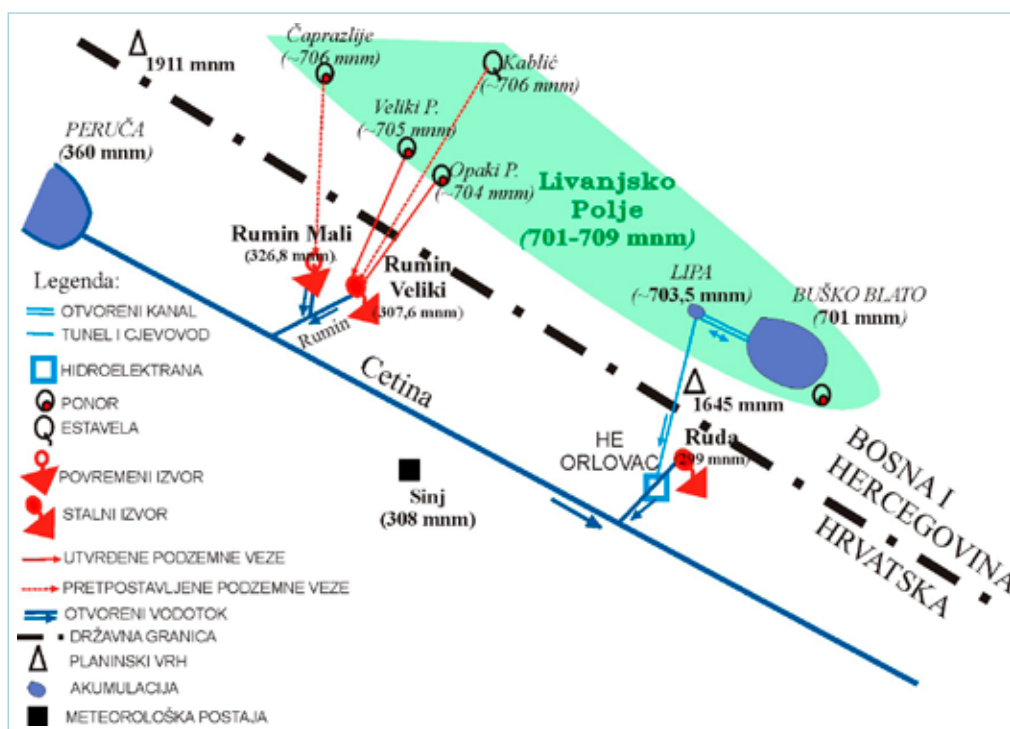
Ponori na Livanjskom polju iz kojih je bojenjem dokazano ili barem pretpostavljeno postojanje vezu sa spomenutim izvorima udaljeni su zračnom linijom između 13 i 19 km. Oni se nalaze u Livanjskom polju na nadmorskim visinama od oko 704 do 706 m nad morem (mnm), dok se otvor izvora Rumin Veliki nalazi na koti od 307,6 mnm. Vodovodna postaja Rumin koja kontrolira izlaz voda iz izvora Rumin Veliki udaljena je od otvora izvora oko 200 m, a kota nule joj iznosi 306,474 mnm. Između zone ponora u Livanjskom polju i otvora analiziranog izvora prostire se planinski lanac Dinare čija visina prelazi 1400 mnm. Najviši vrh je Troglav na kojem visina doseže 1911 mnm.

Za potrebe analiza izvršenih u ovom radu na raspolaganju su nam stajali podaci dnevnih protoka u razdoblju od 1. siječnja 1948. do 31. prosinca 2013.

Unutar spomenutog razdoblja nedostaju mjerenja protoka za sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1. siječanj 1985. do 5. kolovoz 1985.; (2.) 1. rujanj 1991. do 30. lipanj 1992. Osim dnevnih protoka izvora Rumin Veliki u radu su korišteni podatci godišnjih oborina opaženih na meteorološkoj postaji Sinj u razdoblju 1950.–2013. Radi se o kišomjeru najbližem slivu analiziranog krškog izvora. U radu su analizirani službeni podatci Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) iz Zagreba. Koristi se ova prilika da im se zahvali na ustupljenim podatcima.

Prostor oko dva spomenuta izvora zbog prirodne sačuvanosti i neospornih ekoloških vrijednosti proglašen je 2000. godine značajnim krajobrazom Rumin. Obuhvaća površinu od 33,5 ha u kojoj se nalaze oba izvora. Značajnim krajobrazom Rumin upravlja, u skladu sa Zakonom o zaštiti prirode, Javna ustanova za upravljanje zaštićenim prirodnim vrijednostima na području Splitsko-dalmatinske županije. Za sve radnje i aktivnosti u zaštićenom području potrebno je ishoditi dopuštenje koje sadrži uvjete zaštite prirode. Za obavljanje radnji i aktivnosti u suprotnosti sa Zakonom o zaštiti prirode primjenjuju se prekršajne odredbe Zakona o zaštiti prirode.

Oba se izvora nalaze nizvodno od akumulacije Peruća izgrađene 1960. godine. Bonacci i Roje-Bonacci (2003.) su dokazali da izgradnja ove akumulacije i rad hidroelektrane (HE) Peruća nisu utjecali na promjenu hidrološkog režima ova dva izvora. Prva detaljna interdisciplinarna istraživanja cjelokupne zone oba izvora Rumina, a osobito izvora Rumin Veliki, započeta su pedesetih godina prošloga stoljeća za potrebe izgradnje



Slika 1: Schematizirana situacija analiziranog područja s ucrtanim krškim izvorima, nekim ponorima, Livanjskim poljem, utvrđenim i pretpostavljenim podzemnim vezama između ponora i izvora (Magdalenić, 1971.), akumulacijama Buško Blato i Lipa, HE Orlovac te lokacijom meteorološke postaje Sinj

hidroelektrane Peruća (Malez, 1955.; 1958.). Tada se je i prvi puta zaronilo u izvor. Prvi nacrt podzemnih krških provodnika izvora napravljen je 1996. godine. Novijim ronjenjima istražilo se preko 50 metara dubine i preko 180 metara dužine krških provodnika izvora Rumina Velikog. U podzemlju se nalazi i tunnel koji je napravljen u vrijeme istražnih radova za HE Peruća.

U ovom radu neće biti istraživana "enigma" čije rješavanje odavno intrigira prvenstveno hidrogeologe, ali i hidrologe krša. Radi se o odnosu izvora Mali Rumin i Veliki Rumin koji su međusobno vrlo blizu, ali se po svemu do sada poznatom čini da im vode nisu povezane. Međutim, analize izvršene u ovom radu i zaključci doneseni na osnovi njih vjerojatno će moći korisno poslužiti za rasvjetljavanje ovog fenomena.

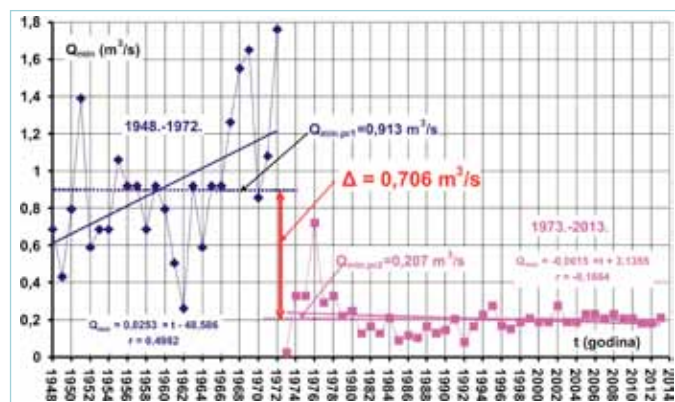
U ovom radu analizirat će se isključivo hidrološki podatci izvora Rumin Veliki s ciljem da se utvrdi kako je na njegovo hidrološko ponašanje utjecala izgradnja i funkcioniranje akumulacije Buško Blato (Borelli, 1966.) u Livanjskom polju (Bosna i Hercegovina) i rad HE Orlovac u Hrvatskoj. Sustav je započeo s radom 1973. godine.

2. ANALIZA GODIŠNJIH PROTOKA

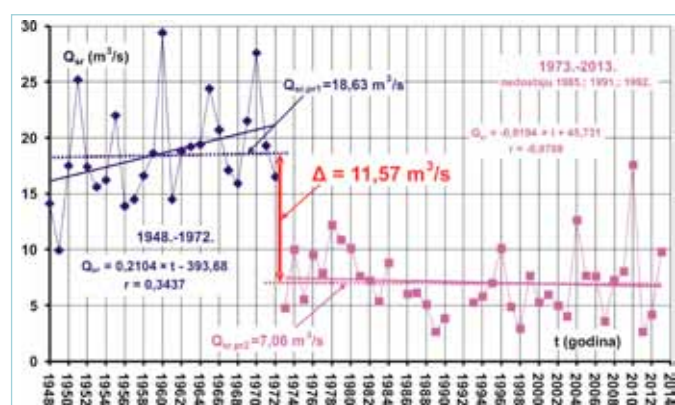
Vežano s hidrološkim analizama koje će biti izvršene u sljedeća tri poglavlja treba napomenuti da na vodomjernoj postaji Rumin Veliki tijekom tri godine (1985., 1991., 1992.) mjerenja nisu bila kompletna. Za te godine nije bilo moguće odrediti vrijednosti srednjih godišnjih protoka, ali je DHMZ odredio maksimalne i minimalne godišnje protoke čije su vrijednosti nastavno korištene.

Na slici 2 prikazani su nizovi minimalnih godišnjih protoka, Q_{\min} , izračunatih na izvoru Rumin Veliki u sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972.; (2.) 1973.-2013. Uočljiva je statistički značajna razlika prosječnih minimalnih godišnjih protoka u dva spomenuta podrazdoblja. Posebno treba napomenuti da su razlike vrijednosti standardnih devijacija, ST. DEV., u dva analizirana podrazdoblja statistički značajne (vidi tablicu 1). U prirodnom stanju minimalni godišnji protoci varirali su u širokom rasponu. U razdoblju poslije izgradnje sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac, osobito u posljednjih dvadesetak godina njihove su varijacije minimalne. Prosječni minimalni godišnji protok u drugom podrazdoblju niži je za $0,706 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što predstavlja 77 % niži protok od prosječnog u prvom podrazdoblju.

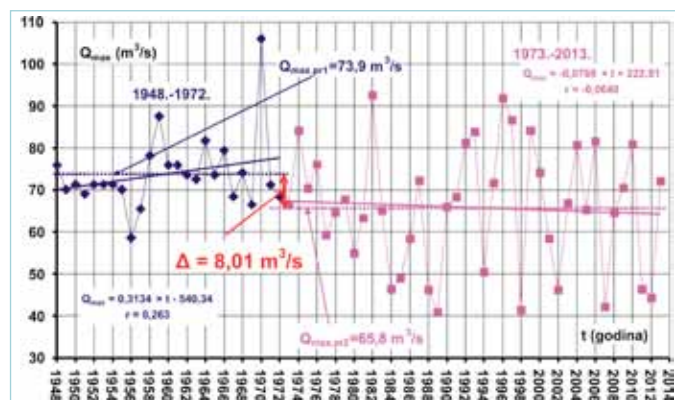
Na slici 3 prikazani su nizovi srednjih godišnjih protoka, Q_{sr} , izračunatih na izvoru Rumin Veliki u sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972.; (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.). U ovom slučaju razlika između prosječnih protoka dva podrazdoblja također je statistički značajna, ali nije značajna razlika među njihovim standardnim devijacijama (vidi tablicu 1). Prosječni srednji godišnji protok u drugom podrazdoblju niži je za $11,57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što je 62 % niži protok od prosječnog u prvom podrazdoblju.



Slika 2: Prikaz nizova minimalnih godišnjih protoka, Q_{\min} , izvora Rumin Veliki u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013.

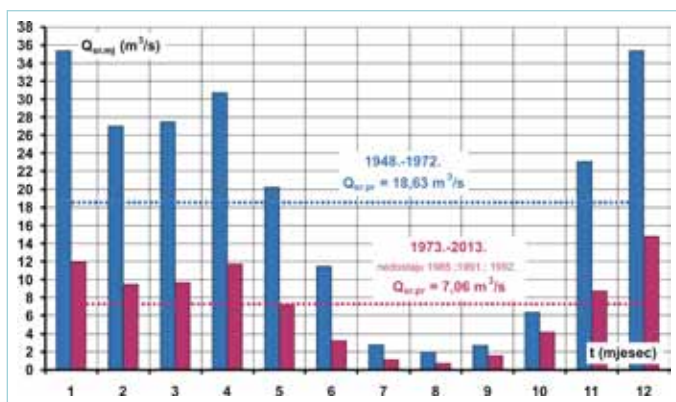


Slika 3: Prikaz nizova srednjih godišnjih protoka, Q_{sr} , izvora Rumin Veliki u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

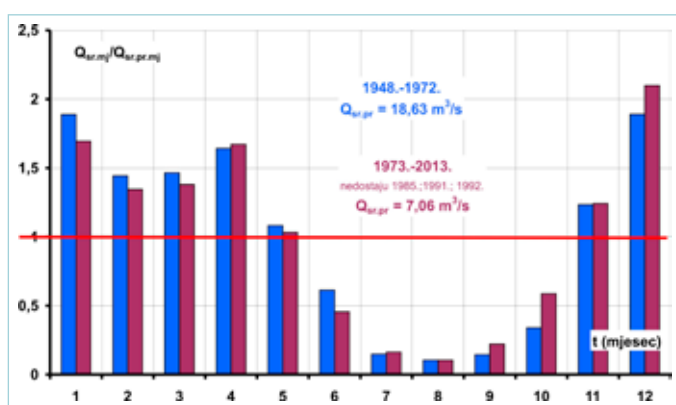


Slika 4: Prikaz nizova maksimalnih godišnjih protoka, Q_{\max} , izvora Rumin Veliki u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013.

Na slici 4 prikazani su nizovi maksimalnih godišnjih protoka, Q_{\max} , izračunatih na izvoru Rumin Veliki u sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972.; (2.) 1973.-2013. I za ovu hidrološku karakterističnu vrijednost razlika prosječnih protoka je statistički značajna, ali bitno manje nego za minimalne i srednje godišnje vrijednosti (vidi tablicu 1). Treba uočiti da se standardne devijacije u dva analizirana podrazdoblja statistički značajno



Slika 5: Prikaz nizova prosječnih srednjih mjesečnih protoka, $Q_{sr,mj}$, izvora Rumin Veliki izraženih u $m^3 s^{-1}$ u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)



Slika 6: Prikaz nizova prosječnih srednjih mjesečnih protoka izvora Rumin Veliki izraženih u relativnim iznosima, $(Q_{sr,mj}/Q_{sr,pr,mj})$, u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

razlikuju. Međutim, u ovom slučaju, u prirodnom stanju su varijacije maksimalnih godišnjih protoka znatno manje nego u novom stanju. Prosječni maksimalni godišnji protok u drugom podrazdoblju niži je za $8,01 m^3 s^{-1}$, što je oko 11 % niži protok od prosječnog u prvom podrazdoblju.

Za sve tri analizirane hidrološke karakteristike vrijednosti koeficijenta varijacije, KOEF. VARIJ., veće su za nizove podatka u recentnom razdoblju (1973.-2013.) nego tijekom neporemećenog stanja (1948.-1972.).

Maksimalni godišnji protok izmjeren je 1970. te je iznosio $106 m^3 s^{-1}$. Kako se radi o prostranom slivu na kojem padaju intenzivne i obilne oborine, očito je da je riječ o krškom izvoru s ograničenim kapacitetom maksimalnog istjecanja (Bonacci, 2001. a). Razlog ograničenog maksimalnog kapaciteta istjecanja treba tražiti u ograničenim dimenzijama krških provodnika i samog izlaza kao i u činjenici mogućnosti skladištenja velikih količina vode u vadoznom i epikrškom sloju.

3. ANALIZA MJESEČNIH PROTOKA

U prethodnom poglavlju analizirane su promjene osnovnih hidroloških karakteristika izvora Rumin Veliki korištenjem godine kao vremenske jedinice obrade. Važno je ustanoviti kako su se te promjene rasporedile tijekom cijele godine. S tom namjerom će se u ovom poglavlju analizirati ponašanje karakterističnih protoka tijekom godine korištenjem mjeseca kao vremenske jedinice. Na slici 5 prikazani su nizovi prosječnih srednjih mjesečnih protoka, $Q_{sr,mj}$, izvora Rumin Veliki izraženih u $m^3 s^{-1}$ u sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972. (plava boja); (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.) (ljubičasta boja). Uočava se da su prosječni srednji mjesečni protoci u drugom podrazdoblju uvijek manji u svakom pojedinom mjesecu godine. Na slici 6 dat je prikaz dva niza prosječnih srednjih mjesečnih protoka izvora Rumin Veliki izraženih u relativnim iznosima, $(Q_{sr,mj}/Q_{sr,pr,mj})$, u ista dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972. (plava boja); (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.) (ljubičasta boja). Iz prikaza koji se nalazi na slici 6 moguće je zaključiti da je režim raspodjele prosječnih srednjih mjesečnih protoka tijekom godine ostao isti u prirodnom stanju kao i u recentnom razdoblju koje je pod antropogenim utjecajima izmijenjenom hidrološkom režimu. Male razlike koje su u nekim mjesecima pozitivne, a u drugim negativne mogu se pripisati slučajnim varijacijama.

Na slici 7 prikazani su nizovi prosječnih maksimalnih mjesečnih protoka, $Q_{max,mj}$, izvora Rumin Veliki izraženih u $m^3 s^{-1}$ u sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972. (plava boja); (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.;

Tablica 1: Karakteristični prosječni protoci (Q_{min} , Q_{sr} , Q_{max}), standardne devijacije (ST. DEV.) i koeficijenti varijacije (KOE. VARIJ.) Rumina Velikog u dva podrazdoblja: (1) u prirodnom režimu do izgradnje sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac (1948.-1972.); (2) nakon izgradnje tog sustava (1973.-2013.). U tablici su navedeni i rezultati t-testa i F-testa. Kosim (italic) i podebljanim brojevima označene su slučajevi kad su razlike statistički značajn

PARAMETAR	RAZDOBLJE	Q_{min}	Q_{sr}	Q_{max}
Q ($m^3 s^{-1}$)	1948.-1972.	0,913	18,63	73,9
	1973.-2013.	0,207	7,06	65,8
	RAZLIKA	0,706	11,57	8,1
	t-test	9,47279E-10	8,98E-18	0,006835
ST. DEV. ($m^3 s^{-1}$)	1948.-1972.	0,373	4,506	8,771
	1973.-2013.	0,106	3,121	14,731
	F-test	1,27615E-11	0,043219	0,008719
KOE. VARIJ.	1948.-1972.	0,409	0,242	0,120
	1973.-2013.	0,512	0,442	0,224

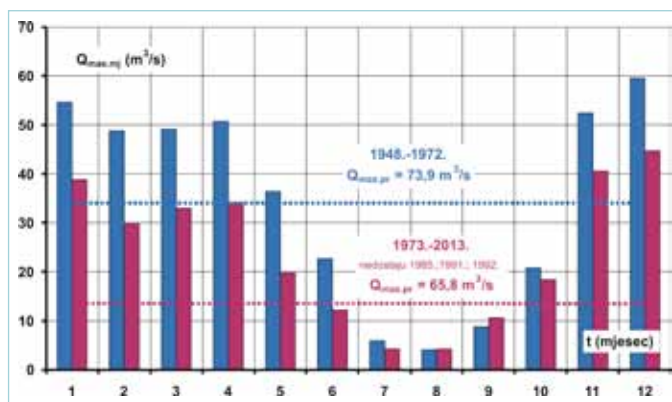
1992.) (ljubičasta boja). Uočava se da su prosječni maksimalni mjesečni protoci u drugom podrazdoblju manji tijekom deset mjeseci godine, dok su u kolovozu i rujnu neznatno manji. Na slici 8 dat je prikaz nizova prosječnih maksimalnih mjesečnih protoka izvora Rumin Veliki izraženih u relativnim iznosima, ($Q_{\max,mj}/Q_{\max,pr,mj}$), u ista dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972. (plava boja); (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.) (ljubičasta boja). Na osnovi ovog prikaza moguće je donijeti sličan zaključak kao i u prethodnom slučaju analize nizova prosječnih srednjih mjesečnih protoka, tj. da su režimi raspodjele vodnih količina koje izlaze iz izvora Rumin Veliki tijekom godine slični u oba analizirana podrazdoblja.

Analiza nizova prosječnih minimalnih mjesečnih protoka, $Q_{\min,mj}$ izvora Rumin Veliki za ista dva podrazdoblja navodi na identične zaključke kao i za nizove prosječnih srednjih mjesečnih i prosječnih maksimalnih mjesečnih protoka. Kako se ne bi nepotrebno opteretio sadržaj ovog članka slikovni se prikazi ne prilažu.

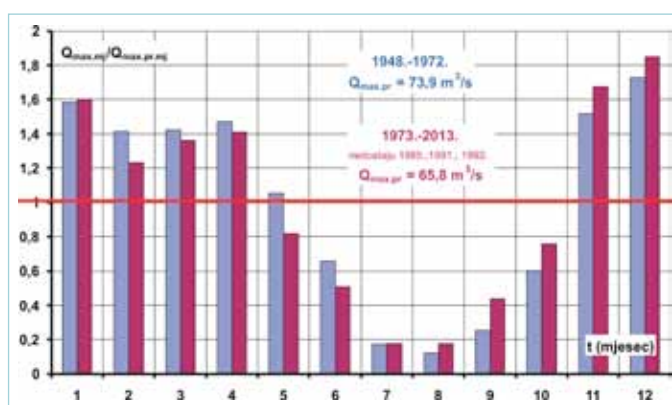
4. ANALIZA DNEVNIH PROTOKA

U ovom poglavlju izvršena je analiza promjena srednjih dnevnih protoka, $Q_{sr,dn}$ izvora Rumin Veliki korištenjem dana (24 sata) kao vremenske jedinice obrade. Na slici 9 nalazi se prikaz nizova prosječnih srednjih dnevnih protoka, $Q_{sr,dn}$ izvora Rumin Veliki izraženih u $m^3 s^{-1}$ u sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972.; (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.). Moguće je uočiti da je praktično tijekom svakog dana godine (osim u sedam dana koji se javljaju krajem rujna i početkom listopada) prosječni srednji dnevni protok, $Q_{sr,dn}$ u prvom razdoblju kada je vladao prirodni režim bio viši nego u razdoblju rada sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac. Razlike prosječnih srednjih dnevnih protoka u vlažnom dijelu godine vrlo su velike (kreću se između $30 m^3 s^{-1}$ i $50 m^3 s^{-1}$ te mogu biti i dvostruko veće od onih u recentnom razdoblju), dok su neznatne ili ih čak nema tijekom ljetnih toplih i sušnih dana kada su razine podzemnih voda vodonosnika iz kojeg se prihranjuje izvor Rumin Veliki niske.

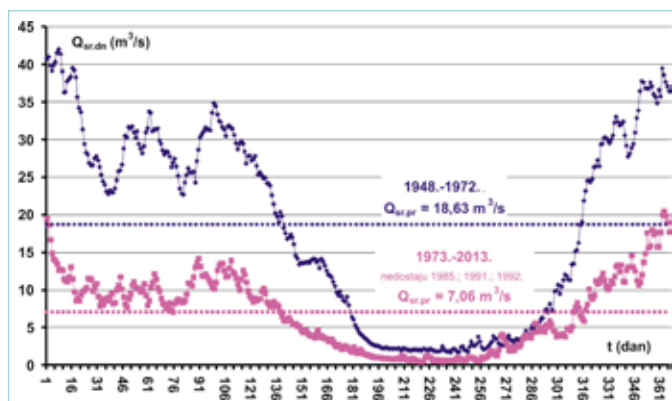
Na slici 10 ucrtane su srednje krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka, $Q_{sr,dn}$ izvora Rumin Veliki izražene u $m^3 s^{-1}$ definirane za sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1948.-1972.; (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.), dok su na slici 11 iscrtane iste srednje krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka izvora Rumin Veliki, ali ovog puta izražene u relativnim iznosima, ($Q_{sr,dn}/Q_{pr}$). Prikaz koji je ucrtan na slici 11 potvrđuje zaključak iz prethodnog poglavlja. Režim raspodjele prosječnih srednjih dnevnih protoka tijekom godine ostao je isti u prirodnom stanju i pod djelovanjem antropogenim utjecajima izmijenjenog hidrološkog režima. Srednje krivulje trajanja izražene u relativnim iznosima gotovo su identične u oba vremenska podrazdoblja. Jedan od



Slika 7: Prikaz nizova prosječnih maksimalnih mjesečnih protoka, $Q_{\max,mj}$ izvora Rumin Veliki izraženih u $m^3 s^{-1}$ u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

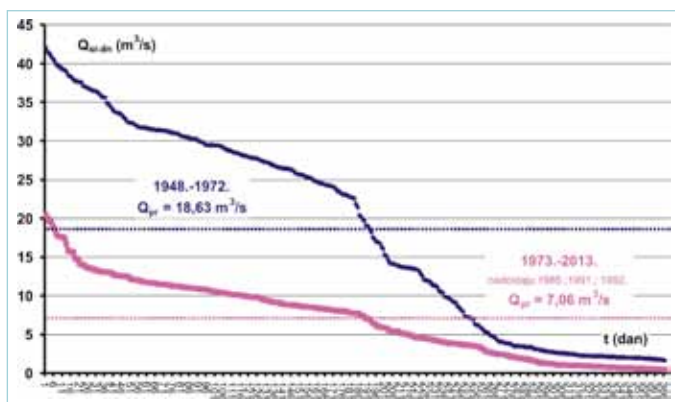


Slika 8: Prikaz nizova prosječnih maksimalnih mjesečnih protoka izvora Rumin Veliki izraženih u relativnim iznosima, ($Q_{\max,mj}/Q_{\max,pr,mj}$), u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

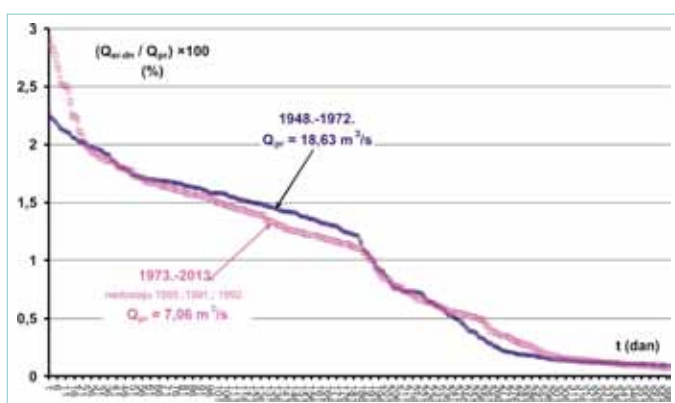


Slika 9: Prikaz nizova prosječnih srednjih dnevnih protoka, $Q_{sr,dn}$ izvora Rumin Veliki izraženih u $m^3 s^{-1}$ u sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

logičnih zaključaka je da je regionalni klimatski utjecaj dominantan na hidrološko ponašanje izvora Rumin Veliki, te da su oblici krivulja trajanja stoga identični u oba razmatrana razdoblja bez obzira na snažnu antropogenu promjenu hidrološkog režima.



Slika 10: Srednje krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka, Q_{srdnj} , izvora Rumin Veliki izražene u m^3s^{-1} definirane za sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)



Slika 11: Srednje krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka izvora Rumin Veliki izražene u relativnim iznosima, $(Q_{srdnj}/Q_{pr}) \times 100$ (%), definirane za sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1948.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

5. PROCJENA POVRŠINE SLIVA

U ovom poglavlju bit će izvršena procjena hidrološko-hidrogeološke površine sliva izvora Rumin Veliki u prirodnom i u antropogenim radovima poremećenom stanju korištenjem klasične hidrološke metode koja nije razvijena isključivo za uvjete otjecanja u kršu. Kao posljedica duboke okršenosti i nepoznavanja podzemnih veza u širem prostoru, granice pa niti površina sliva izvora Rumina Velikog nisu do sada određeni (Borić, 1980.). Za pretpostaviti je da će ih biti vrlo teško pouzdano odrediti i u budućnosti. Radi se o činjenici s kojom su suočeni istraživači hidrološko-hidrogeoloških fenomena ne samo Dinarskog krša, već krša na cijeloj planeti. Posebno se to odnosi na određivanje granica i površine sliva izvora Rumin Veliki za stanje prije izgrađenosti sustava Buško Blato – HE Orlovac. Činjenica je da se sliv u kršu može vrlo brzo mijenjati tijekom vremena u zavisnosti od naglih promjena razina podzemnih voda. Intenzivne oborine koje se javljaju u analiziranoj regiji mogu uzrokovati prelijevanje voda iz jednog u drugi sliv. Takva situacija zasigurno postoji u slučaju izvora Rumin Veliki, ali se o njoj ništa ne zna jer se ne raspolaže s mjerenjima razine podzemne vode u dubokim piezometrima.

U radu su za približno određivanje površine sliva korišteni podatci godišnjih oborina izmjenjenih na meteorološkoj postaji Sinj. Na ove podatke treba gledati kao na vrijednosti koje odgovaraju regionalnim oborinskim karakteristikama. Nažalost, u široj analiziranoj regiji kišomjerne, a osobito meteorološke postaje koje imaju potrebni dugi niz pouzdanih podataka (1948.-2013.) ne postoje, a osobito ih nema na višim nadmorskim visinama koje bi vjerojatno bolje odgovarale nepoznatoj prosječnoj visini sliva izvora Rumina Velikog, koja je nešto viša od nadmorske visine postaje Sinj koja iznosi 308 mm. Prosječna godišnja oborina izmjerena na postaji Sinj u razdoblju 1950.-2013. iznosila je 1190 mm. U prvom podrazdoblju (1950.-1972.) prosječna godišnja oborina je iznosila 1206 mm. U drugom podrazdoblju (1973.-2013.) iznosila je 1183 mm, što ne predstavlja značajnu razliku u odnosu na prvo podrazdoblje.

Na slici 12 prikazani su odnosi između srednjih godišnjih protoka izvora Rumina Velikog, Q , izraženih u m^3s^{-1} i ukupnih godišnjih oborina, izmjenjenih na kišomjeru Sinj, P , izraženih u m, definirani za sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1950.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.) Na slici 12 su ucrtani pravci linearne regresije i upisane vrijednosti koeficijenta linearne korelacije, r , za oba podrazdoblja. Jednadžbe pravaca linearne regresije glase:

$$Q = 15,313 \times P + 0,7482 \quad (1950.-1972.) \quad (1)$$

$$Q = 11,027 \times P - 6,029 \quad (1973.-2013. \text{ nedostaju } 1985.; 1991.; 1992.) \quad (2)$$

U prvom podrazdoblju izračunata je umjerena vrijednost koeficijenta linearne korelacije $r=0,581$. U recentnom podrazdoblju vrijednost koeficijenta linearne korelacije znatno je viša i iznosi $r=0,822$. Ta činjenica ukazuje da godišnje oborine, P , izmjerene na postaji Sinj utječu na zavisnu varijablu, srednje godišnje protoke izvora Rumin Veliki, Q , znatno više u recentnom razdoblju, nego u prirodnom stanju.

Na slici 12 treba uočiti da je vrijednost presjeka pravca regresije s osi apscise za prvo podrazdoblje (1950.-1972.) negativna te iznosi $P_0=-49$ mm. U hidrološkom smislu značenje točke presjeka pravca regresije s osi apscise je od ključne važnosti (Bonacci i Andrić, 2008.). U slučaju kad bi vrijednost godišnjih oborina bila manja ili jednaka onoj na presjeku, izvor bi presušio. U slučaju kad su vrijednosti presjeka, P_0 , negativne, objašnjenje se mora tražiti u činjenici da se u izvor prelijevaju vode s nekog susjednog sliva.

Negativna vrijednosti presjeka, P_0 , navodi na zaključak da su u prirodnom stanju u izvor Rumin Veliki dotjecale vode s viših horizonata, u ovom slučaju iz područja Livanjskog polja. Slični fenomeni uočeni su u brojnim krškim regijama u svijetu. U literaturi se slivovi

krških izvora dijele na unutrašnju („inner“) i vanjsku („outer“) zonu (Ravbar i Goldscheider, 2009.). Unutrašnja zona se naziva i autogeni („autogenic“) dio sliva (Ravbar et al., 2012.), dok se za vanjsku zonu (Bailly-Comte et al., 2012.; Ravbar et al., 2012.; Birk et al., 2014.) koristi termin alogeni („allogenic“) dio sliva.

U razdoblju 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.), dakle poslije izgradnje sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac, presjek pravca regresije s osi apscise ima pozitivnu vrijednost te iznosi $P_0=548$ mm. Ta vrijednost ukazuje na uobičajeno hidrološko ponašanje procesa oborina - otjecanje u drugom podrazdoblju. Ova se promjena može objasniti time da u recentnom stanju u izvor Rumin Veliki glavninom dotječu vode iz vlastitog (unutrašnjeg ili autogenog) sliva. U prirodnom stanju dotok iz horizonta Livanjskog polja, tj iz vanjskog ili alogenog dijela sliva bio je značajan. Dotok iz gornjih horizonata Livanjskog polja vjerojatno postoji i sada, ali je on bitno smanjen u odnosu na prirodno stanje. Za pretpostaviti je da se javlja kratkotrajno i samo poslije padanja obilnih oborina. Ovu pretpostavku potvrđuje i činjenica što je koeficijent linearne korelacije između srednjih godišnjih protoka, Q , izvora Rumin Veliki i oborina mjerenih na postaji Sinj, P , u recentnom stanju veći nego u prirodnom stanju, te iznosi $r=0,822$. Moguće je zaključiti da oborine pale na kišomjernoj postaji Sinj karakteriziraju oborinski režim unutrašnjeg (autogenog) području sliva. Nastavno će se linearne regresijske izraze (1) i (2) iskoristiti za procjenu površine sliva izvora Rumin Veliki u prirodnom i recentnom stanju. Srednji godišnji protok izvora, Q , izražen u m^3s^{-1} , moguće je definirati sljedećim izrazom:

$$Q \times t = P \times A \times c \quad (3)$$

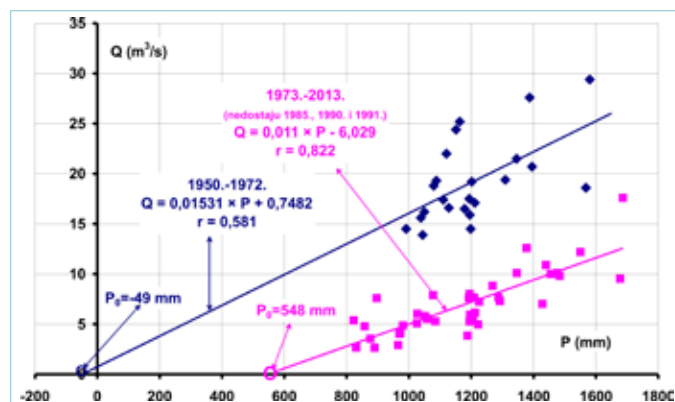
pri čemu, t , označava broj sekundi u godini, P , oborinu palu na sliv izraženu u metrima, A , površinu sliva izraženu u m^2 , dok c predstavlja bezdimenzionalni koeficijent otjecanja. Broj sekunda u godini koja traje 365 dana iznosi 31.536.000 sekundi, dok u prijestupnoj godini koja traje 366 dana iznosi 31.622.400 sekundi.

Uvrštavanjem izraza (3) u jednadžbe (1) i (2) dobiju se sljedeća dva izraza pomoću kojih se može definirati površina sliva, A , u m^2 :

$$A = \{t \times [15,313 + (0,7482/ P)]\}/c \quad (4)$$

$$A = \{t \times [11,027 - (6,029/ P)]\}/c \quad (5)$$

U izrazima (4) i (5) jedina nepoznanica je godišnji koeficijent otjecanja, c . Koeficijent otjecanja, c , predstavlja jedan od bitnih hidroloških parametara. U njemu su integrirani svi procesi koji se zbivaju u slivu



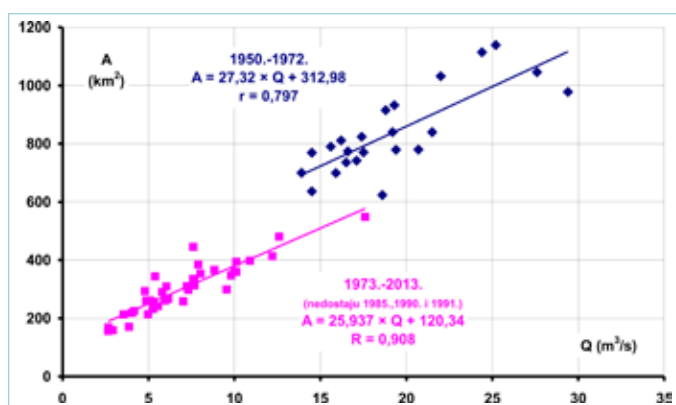
Slika 12: Odnosi između srednjih godišnjih protoka, Q , izvora Rumin Veliki i oborina, P , izmjerenih na kišomjernoj postaji Sinj definirani za sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1950.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.)

tijekom transformiranja oborina u otjecanje (Bonacci, 2001.b). U Dinarskom kršu Hrvatske on je znatno viši nego u nekrškim terenima te uglavnom prelazi vrijednost od 0,5. Žugaj (1995.) je za neke izvore u kršu Hrvatske izračunao da vrijednost godišnjeg otjecajnog koeficijenta može preći veličinu od $c=0,7$.

Kad se u izraze (4) i (5) uvrste prosječne oborine Sinja, P , pale u dva analizirana podrazdoblja te ako se usvoji godišnji koeficijent otjecanja $c=0,6$ za prvo podrazdoblje (1949.-1972.) dobije se površina sliva od 841 km^2 . Uz iste uvjete za drugo podrazdoblje (1973.-2013. nedostaju 1985.; 1991.; 1992.) površina sliva je 2,7 puta manja i iznosi 312 km^2 .

Treba naglasiti da prethodno definirane vrijednosti površine sliva izvora Rumin Veliki predstavljaju tek prvu aproksimaciju stvarnih vrijednosti. One su definirane samo za jednu vrijednost koeficijenta otjecanja ($c=0,6$) i na osnovi oborina izmjerenih na meteorološkoj postaji Sinj. Stvarne oborine pale na sliv ne mogu se odrediti jer nije poznat položaj sliva, a na njegovom potencijalnom prostoru nema kišomjernih postaja. Pri tome treba imati na umu da se i godišnji koeficijent otjecanja mijenja u zavisnosti od ukupno palih oborina na sliv (Bonacci, 2001.b). Kod većih količina godišnjih oborina on je manji. Osim toga na vrijednost godišnjeg koeficijenta otjecanja, c , velik utjecaj ima i raspodjela oborina tijekom godine. Oborine pale u toplom dijelu godine imaju znatno manji utjecaj na otjecanje od oborina koje su pale u hladnom dijelu godine. Prema tome, na proces otjecanja značajan utjecaj ima i raspodjela oborina tijekom godine, a ne samo količina godišnjih oborina. Za tako detaljne proračune u ovom se trenutku ne raspolaze s odgovarajućim podatcima.

U recentnom stanju, u razdoblju 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.) nastalom poslije izgradnje sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac, došlo je do značajnog smanjivanja površine sliva, čak za 2,7 puta.



Slika 13: Odnosi između površine sliva, A, i srednjih godišnjih protoka, Q, izvora Rumin Veliki definirani za sljedeća dva podrazdoblja: (1) 1950.-1972.; (2) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.). Pretpostavljena je konstantna vrijednost godišnjeg koeficijenta otjecanja u iznosu od $c=0,6$

Na slici 13 ucrtani su odnosi između površine sliva, A, i srednjih godišnjih protoka, Q, izvora Rumin Veliki definirani za sljedeća dva podrazdoblja: (1.) 1950.-1972.; (2.) 1973.-2013. (nedostaju 1985.; 1991.; 1992.). U ovom slučaju pretpostavljena je konstantna vrijednost godišnjeg koeficijenta otjecanja u iznosu od $c=0,6$. Čvrstoća analiziranog odnosa, tj. vrijednost koeficijenta linearne korelacije značajno je veća u recentnom razdoblju kada iznosi $r=0,908$. U prirodnom stanju ona je bila znatno manja te je iznosila $r=0,797$. Veća vrijednost koeficijenta linearne korelacije u recentnom razdoblju mogla bi se smatrati potvrdom hipoteze da je poslije izgradnje sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac značajno smanjen dotok iz vanjskog djela sliva koji se nalazi u području Livanjskog polja te da sada voda u izvor Rumin Veliki glavninom dotječe iz unutarnjeg sliva s eventualno rijetkim pojavama dotjecanja iz gornjih horizonata samo u situacijama ekstremno velikih poplava u tom prostoru. Logično je pretpostaviti da je u prirodnom stanju dotok iz Livanjskog polja bio znatno neravnomjerniji u odnosu na recentno stanje, što je utjecalo na manju vrijednost koeficijenta korelacije između površine sliva, A, i srednjih godišnjih protoka izvora, Q, u prirodnom stanju.

6. ZAKLJUČAK

U članku su analizirane hidrološke promjene koje su se pojavile na postaji Rumin koja kontrolira vode koje istječu iz krškog izvora Rumin Veliki. Ustanovljeno je da je počevši od 1973. došlo do statistički značajnog smanjivanja svih karakterističnih godišnjih protoka (minimalnih, srednjih i maksimalnih). Najznačajnije promjene opažene su u smanjivanju srednjih godišnjih protoka, a potom i minimalnih godišnjih protoka. Najmanje su se, iako statistički značajno, smanjili maksimalni godišnji protoci. Razlog za smanjenje protoka izvora Rumin Veliki definitivno treba tražiti u radu sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac. Međutim, u ovom radu izvršene analize koje spadaju isključivo u domenu hidrologije, nisu

dovoljne da bi se u potpunosti shvatio i detaljno objasnio ovaj fenomen. Očito će biti potrebna tijesna suradnja s hidrogeolozima i osobito speleoroniocima, ali od koristi mogu biti i saznanja biologa, geografa i ostalih stručnjaka koji se bave širom problematikom krša.

Primjenom striktno hidrološkog pristupa izračunato je da se površina sliva koji prihranjuje izvor Rumin Veliki u recentnom stanju smanjila oko 2,7 puta u odnosu na onu koja je postojala u prirodnom stanju. Na vrijednosti površina sliva koje su iznesene u prethodnom dijelu ovog rada treba gledati kao na procjene koje se odnose na prosječne veličine sliva i koje odgovaraju prosječnim godišnjim oborinama uz pretpostavljeni prosječni godišnji koeficijent otjecanja od $c=0,6$.

Pri tome treba imati na umu da oborine izmjerene na postaji Sinj, s kojima su izračunate površine sliva u prirodnom (1950.-1972.) i zbog antropogenih zahvata promijenjenom (1973.-2013.) stanju, zasigurno u potpunosti ne odgovaraju oborinama palim na stvarni, ali nepoznati sliv. Taj se zaključak više odnosi na prirodno stanje nego na ono u antropogenim zahvatima promijenjeno stanje. Zbog razvijene topografije (dijela planinskog lanca Dinarida između ponora u Livanjskom polju i izvora Rumin Veliki) vjerojatno su oborine pale na vanjski i unutrašnji dio sliva nešto veće. To bi značilo da su i površine sliva nešto manje od onih koje su proračunate u ovom radu. Kako ne postoje kišomjeri na planinskom dijelu sliva ovog izvora nema smisla vršiti daljnje proračune. U biti, stvarne granice i površinu sliva izvora Rumin Veliki tek treba pouzdano definirati. Stoga se kao logična posljedica nameće zaključak da je za rješavanje ove problematike neophodno formirati novu i gustu mrežu kišomjera, ali i kompletnih meteoroloških postaja na cijelom području potencijalnog sliva izvora. Važno je imati na umu činjenicu da se površina sliva u kršu mijenja u zavisnosti od brzih i naglih promjena razina podzemnih voda. Stoga bi za pouzdano određivanje površine sliva krškog izvora Rumin Veliki trebalo raspolagati s kontinuiranim mjerenjima razina podzemnih voda u najmanje desetak dubokih piezometara. Nekoliko njih trebalo bi locirati u Livanjskom polju u području nizvodno od ponorske zone prikazane na slici 1, dok bi nekolicinu piezometara trebalo izbušiti u neposrednom zaleđu samog izvora Rumin Veliki.

Osobito treba biti svjestan činjenice da su trasiranja podzemnih voda u analiziranom prostoru bila vršena prije pedesetak godina. Tadašnja tehnologija, saznanja vezana s procesima cirkulacije vode u kršu, kao i njihova nedovoljna brojnost u najmanju ruku nisu garantirali cjelovito definiranje svih podzemnih veza između ponora i izvora u tako kompleksnom krškom sustavu. Uz to se ne smije zanemariti da se podzemne krške veze mijenjaju tijekom vremena kao posljedica promjena hidroloških stanja. Sva su mjerenja vršena u prirodnom stanju prije izgradnje sustava akumulacija Buško Blato - HE Orlovac. Prema tome, trebalo bi organizirati nova trasiranja u recentnom stanju, koja bi pomogla da se baci više svjetlosti na ovu složenu, ali izrazito važnu problematiku. ■

LITERATURA

- Bailly-Comte, V., Borrell-Estupina, V., Jourde, H., Séverin, P. (2012.): A conceptual semidistributed model of the Coulazou River as a tool for assessing surface water – karst groundwater interactions during flood in Mediterranean ephemeral rivers, *Water Resources Research*, 48 (9):W09534,1-14.
- Birk, S., Wagner, T., Mayaud, C. (2014.): Threshold behavior of karst aquifers: the example of the Lurbach karst system (Austria). *Environmental Earth Sciences*, 72 (5):1349-1356.
- Bonacci, O. (2001. a): Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal*, 9 (4):328-338.
- Bonacci, O. (2001. b): Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst springs, *Hydrological Sciences Journal*, 46 (2):287-299.
- Bonacci, O., Andrić, I. (2008.): Sinking karst rivers hydrology: case of the Lika and Gacka (Croatia). *Acta Carsologica*, 37 (2-3):185-196.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. (2003.): The influence of hydroelectrical development on the flow regime of the karstic river Cetina. *Hydrological Processes*, 17 (1):1-15.
- Borelli, M. (1966.): O gubitcima vode iz krške akumulacije Buško Blato. *Saopštenja Instituta Jaroslav Černi*, 36:17-30.
- Borić, M. (1980.): Korištenje prirodnih termičkih osobina vode u akumulaciji u kršu kao metoda za lociranje gubitaka iz akumulacija na primjeru akumulacije Buško Blato. *Zbornik radova 6. jugoslavenskog simpozija o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji*, Knjiga 2:179-190.
- Magdalenić, A. (1971.) Hidrogeologija sliva Cetine. *Krš Jugoslavije*, 7/4:89-169.
- Malez, M. (1955.): Neke pećine i jame duž Cetine. *Geografski Glasnik*, 16-17:39-59.
- Malez, M. (1958.): Pećine, jame i ponori Biteličke krške zaravni. *Geološki Vjesnik*, 11:101-122.
- Ravbar, N., Goldscheider, N. (2009.): Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovenian karst catchment. *Hydrogeology Journal*, 17 (3):725-733.
- Ravbar, N., Barberá, J. A., Petrič, M., Kogovšek, J., Andreo, B. (2012.): The study of hydrodynamic behaviour of a complex karst system under low-flow conditions using natural and artificial tracers (spring of the Unica River, SW Slovenia). *Environmental Earth Sciences*, 65 (8), 2259-2272.
- Žugaj, R. (1995.): *Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske*. Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb.

HYDROLOGICAL ANALYSIS OF THE KARST SPRING RUMIN VELIKI

Abstract. The paper presents a hydrological analysis performed on the permanent karst spring Rumin Veliki. The spring is located in the Cetina River basin in Croatia, although its recharge area is partially in Croatia and Bosnia-Herzegovina. The start of the HPP Orlovac operation, in particular the construction and filling of the reservoir Buško Blato in Livanjsko polje, lead to a sudden change in the hydrological regime of this high-yield karst spring. A detailed hydrological analysis performed in the paper is based on available daily discharge data in the period from 1 January 1948 to 31 December 2013, with discharge measurements for the two subperiods missing: (1) 1 January 1985 to 5 August 1985 and (2) 1 September 1991 to 30 June 1992. Apart from daily discharges of the spring Rumin Veliki, the paper also utilizes annual precipitation data measured at the meteorological station Sinj located in the vicinity of the analysed spring. In the 1948-1972 subperiod, characteristic annual discharges (minimum, medium and maximum) under natural conditions undisturbed by anthropogenic activities were statistically significantly larger than those during the operation of the reservoir system Buško Blato - HPP Orlovac, which still apply. The average annual discharge, which in the natural state equalled $18.63 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, was reduced by $11.57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (62.1 %) and equalled $7.06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in the recent subperiod from 1973 -2013. Based on hydrologic methodology, the paper estimates the approximate spring recharge area in the spring's natural and present states, concluding that the recharge area of the spring Veliki Rumin is presently on average about 2.7 times smaller than it was in the spring's natural state due to the construction and operation of the reservoir system Buško Blato - HPP Orlovac.

Key words: karst spring, discharge, precipitation, recharge area, Rumin Veliki, Croatia

HYDROLOGISCHE ANALYSE DER KARSTQUELLE RUMIN VELIKI

Zusammenfassung. Im Artikel wird die hydrologische Analyse der permanenten Karstquelle Rumin Veliki dargestellt. Die Quelle befindet sich im Einzugsgebiet des Flusses Cetina in Kroatien, während sich das Einzugsgebiet der Quelle teilweise in Kroatien und teilweise in Bosnien und Herzegowina befindet. Nach der Inbetriebnahme des Wasserkraftwerkes Orlovac kam es zur rapiden Änderung des hydrologischen Regimes dieser wasserreichen Karstquelle vor allem wegen des Baus und der Füllung des Speichersees Buško Blato in Livanjsko polje. Für diese detaillierte hydrologische Analyse standen die Angaben über Tagesdurchflüsse im Zeitraum vom 1. Januar 1948 bis 31. Dezember 2013 zur Verfügung mit der Anmerkung, dass die Messungen für zwei Unterzeiträume fehlen: (1) 1. Januar 1985 bis 5. August 1985; (2) 1. September 1991 bis 30. Juni 1992. Neben den Tagesdurchflüssen an der Quelle Rumin Veliki wurden auch die Angaben über die Jahresniederschläge genutzt, beobachtet an der meteorologischen Station Sinj, die sich in der Nähe der analysierten Quelle befindet. Im natürlichen und anthropogen unbeeinflussten Zustand im Unterzeitraum 1948-1972 waren die charakteristischen Jahresdurchflüsse (minimale, mittlere und maximale) statistisch wesentlich höher als die Durchflüsse, die seit der Inbetriebnahme des Wasserkraftwerkes Orlovac am Speichersee Buško Blato gemessen worden sind. Der mittlere Jahresdurchfluss, der im natürlichen Zustand $18,63 \text{ m}^3/\text{s}$ betrug, ist um $11,57 \text{ m}^3/\text{s}$ (62,1 %) erniedrigt worden, so beträgt er im Unterzeitraum 1973-2013 nur $7,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Unter Anwendung der hydrologischen Methodologie wurde die ungefähre Fläche des Einzugsgebietes der Quelle in seinem natürlichen und in seinem neuen Zustand eingeschätzt. Daraus konnte man schließen, dass die Fläche des Einzugsgebietes der Quelle Rumin Veliki wegen des Baus und Betriebes des Systems Speichersee Buško Blato / Wasserkraftwerk Orlovac durchschnittlich etwa 2,7-mal kleiner ist als die Fläche des Einzugsgebietes im natürlichen Zustand.

Schlüsselwörter: Karstquelle, Durchfluss, Niederschlag, Einzugsgebietsfläche, Rumin Veliki, Kroatien