

## ANALIZA HIDROLOŠKIH PROMENA DUŽ TOKA REKE ZRMANJE

Ognjen BONACCI, Tanja ROJE-BONACCI

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu  
E-mail: obonacci@gradst.hr; bonacci@gradst.hr

### REZIME

U članku je izvršena hidrološka analiza karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) godišnjih protoka izmerenih na devet vodomjernih stanica (VS) duž toka reke Zrmanje. Njen je cilj bio upoređivanje hidrološkog režima u prirodnom neporemećenom stanju sa onim uzrokovanim radom reverzibilne hidroelektrane Velebit (RHE Velebit). Analizama dugih vremenskih nizova godišnjih padavina i srednjih godišnjih temperatura vazduha opaženih na meteorološkoj stanici Gračac ustanovljeno je da je od 1983. godine došlo do statistički značajnog smanjivanja količina godišnjih padavina, te da je od 1988. došlo do statistički značajnog povećanja srednjih godišnjih temperatura. Utvrđeno je da je rad RHE Velebit uticao na smanjenje srednjih godišnjih protoka na osam vodomernih stanica smeštenih uzvodno od akumulacije (kompenzacionog bazena) Razovac na reci Zrmanji. Na VS Jankovića Buk koja se jedina nalazi nizvodno od akumulacije Razovac ne oseća se uticaj rada RHE Velebit na smanjenje srednjih godišnjih protoka, ali je njen rad uticao na značajno smanjenje minimalnih protoka na njoj. Zaključeno je da su promjene hidrološkog režima duž toka rijeke Zrmanje uzrokovane većim delom radom RHE Velebit, ali je na njih određen uticaj izvršila i spomenuta promena klimatskih parametara na širem području sliva.

**Ključne reči:** hidrologija karsta, reka Zrmanja, trasiranje, antropogeni uticaji, RHE Velebit

### 1. UVOD

Hidrološke karakteristike otvorenih vodotoka u karstu značajno se razlikuju od karakteristika vodotoka koji se formiraju i protiču kroz druge homogenije vrste okruženja. Brojni i uglavnom nedovoljno poznati pre svega podzemni, ali i površinski karstni oblici bitno

utiču na interaktivno delovanje površinskih i podzemnih voda u njihovim slivovima. Njihov je uticaj na hidrološko ponašanje duž otvorenih vodotoka, na celom slivu, ali i tokom vremena značajno različit od vodotoka do vodotoka. Zbog toga treba biti oprezan sa donošenjem opštih zaključaka, pa se treba usmeriti na detaljne analize svakog pojedinačnog vodotoka. Za pouzdano donošenje zaključaka neophodne su brojna i dugotrajna merenja ne samo hidroloških, hidrogeoloških i klimatoloških, već i brojnih drugih parametara. Često se dešava da i usprkos detaljnom monitoringu i brojnim kontinuirano osmatranim parametrima nije moguće naći potpune odgovore na izazove koje karst postavlja pri rešavanju osnovnog hidrološkog problema - transformaciji padavina u oticanje.

Ford i Williams (2007) ističu da određivanje strukture i svojstva karstnog sistema predstavlja ključan praktični problem koji je teško rešiti zbog njegove anizotropne i snažno heterogene prirode i nedostatka informacija, osobito o podzemnim karstnim oblicima i njihovoj funkciji u transportu vode.

Svuda, a osobito u području dubokog i kompleksnog Dinarskog karsta, otvoreni vodotoci predstavljaju ključne činioce koji pružaju nezamenjivu podršku razvoju okruženja i njegovog ekosistema. Ta uloga je posebno važna na njegovom središnjem i uglavnom golom delu. U ovom radu analizirat će se vremenske i prostorne hidrološke karakteristike na devet vodomera duž toka reke Zrmanje. Osim činjenice što je hidrologija ovog vodotoka pod uticajem izrazito razvijene topografije te ekstremno snažnih, ali i slabo poznatih površinskih i podzemnih karstnih fenomena, na njegovom slivu postoje i značajni antropogeni zahvati. Stanje je dodatno komplicirano promenom i/ili varijacijom klime koja je opažena u poslednjih nekoliko decenija (Bonacci, 2012).

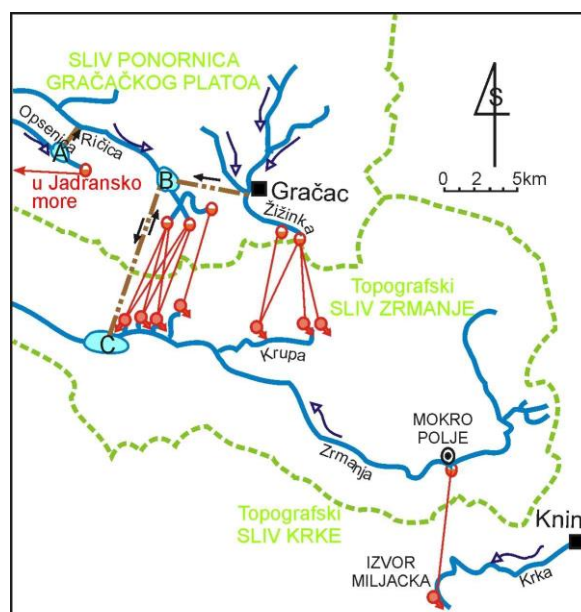
Na analiziranom slivu do sada je izgrađena reverzibilna (pumpno-akumulaciona) hidroelektrana Velebit (u daljnjem tekstu RHE Velebit) koja je svojim radom značajno uticala na promenu prirodnog hidrološkog režime. Treba ukazati da postoje planovi za izgradnju sledeće tri akumulacije na reci Zrmanji i s njima vezane hidroelektrane (Bjedov, 1995): (1) Prevljes - HE Ervenik (H=270 mnm; V=19,8×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>); (2) Žegar - HE Žegar (H=122 mnm; V=7,2×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>); (3) Zrmanja - HE Zrmanja (H=50 mnm; V=15,2×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>). Oznaka (H) se odnosi na maksimalni nivo vode u akumulaciji izražen u mnm, dok se oznaka V odnosi na zapreminu akumulacije izraženu u m<sup>3</sup> kod navedene maksimalne kote H. Razmatra se i mogućnost masovnijeg korištenja voda reke Zrmanje za potrebe snabdevanja vodom i za intenzivno navodnjavanje poljoprivrednih površina. Analize izvršene u ovom radu biće od koristi za pouzdaniju procenu uticaja predviđenih zahvata na promenu hidroloških karakteristika reke Zrmanje.

RHE Velebit je započela s radom 1985. godine. Uticaj njenog rada na hidrološko-hidrogeološke, a posebno na ekološke procese u slivu nije do sada bio razmatran. Treba naglasiti da se radi o vrlo osetljivom, vrednom i ranjivom karstnom prostoru. Upravo stoga rezultati ovog rada, koji se bavi isključivo hidrološkom problematikom, mogu poslužiti ostalim stručnjacima (pre svega ekologima) da detaljnije izuče i pouzdanije procene razloge eventualnih postojećih, ali i mogućih budućih uticaja na okruženje.

## 2. POSEBNOSTI PROCESA OTICANJA NA SLIVU REKE ZRMANJE

Otvoreni vodotoci imaju ulogu krvotoka ključnog za pružanje podrške okruženju i celokupnom slivu. Prirodno svojstvo svih otvorenih vodotoka u Dinarskom karstu, ali i u većini drugih karstnih regija, je da oni na određenim deonicama u određenim geološkim i hidrogeološkim uslovima gube vodu ili čak i kompletno poniru u podzemlje. Na taj način oni igraju integralnu ulogu između hidroloških i hidrogeoloških procesa bitnih za površinsko i podzemno okruženje. U tom smislu sama Zrmanja, a osobito njen hidrološko-hidrogeološki sliv predstavljaju izvanredan primer. Na slici 1 prikazan je sliv Zrmanje, sa naznačenim rezultatima do sada izvršenih trasiranja. Na slici 2 ucrtane su granice topografskog sliva Zrmanje i korita reke s naznačenim položajima devet vodomjernih stanica i dve meteorološke stanice (Gračac i Knin) čije su obrade korištene u ovom radu. Površina topografskog sliva Zrmanje procenjena je na oko 780 km<sup>2</sup>. Površina dela Gračačkog platoa iz kojeg vode podzemnim

vezama gravitiraju u topografski sliv Zrmanje procenjena je na oko 500 km<sup>2</sup>. Prema tome, ukupna hidrološko-hidrogeološka površina sliva Zrmanje iznosi oko 1280 km<sup>2</sup>. Topografski sliv reke Zrmanje znatno je manji od hidrološko-hidrogeološkog sliva. Radi se vrlo složenom i do sada nepotpuno razjašnjenom sistemu ponornica i podzemnih rečnih tokova.



### Legenda:

- topografska vododjelnica
- veze utvrđene trasirama
- ponor
- izvor
- smjer površinskog toka
- meteorološka postaja
- vodomjerna postaja Mokro Polje
- akumulacija
- kanal
- tunel i cjevovod

Slika 1. Sliv Zrmanje s ucrtanim rezultatima trasiranja između ponorskih zona i izvora (A - akumulacija Opatovac; B - akumulacija Štikada; C - akumulacija Razovac)

Sa slike 1 je moguće uočiti da deo ponornica na istoku Gračačkog platoa vodom prihranjuje reku Zrmanju i njene pritoke. Vode koje poniru na Gračačkom platou iz ponornice Opatovca i ostalih manjih povremenih vodotoka smeštenih na zapadnom delu platoa izbijaju na površinu u priobalnim i podmorskim krškim izvorima u Jadranskom moru. Vode koje poniru iz otvorenih vodotoka Štikade i Žižinke smeštenih na istočnom delu Gračačkog platoa na površinu izbijaju u izvorima Krupe i njenih pritoka, te Dobarnice i ostalih manjih pritoka Zrmanje. Deo voda koje poniru duž toka Zrmanje oko lokacije vodomerne stanice Mokro Polje izbija na

površini u krškom izvoru Miljacka smeštenom u kanjonu susedne reke Krke. Izvor je udaljen tek desetak metara od desne obale reke Krke (Bonacci, 1999; Terzić i sar., 2014). Koristeći hidrohemijske analize Terzić i sar. (2014) su izračunali da izvor Miljacka ne dobija vodu isključivo iz Zrmanje i manjim delom infiltracijom padavina iz njenog sliva, već delom i iz reke Krke. Odnos varira u rasponu od 66% do 86% dotoka vode u izvor Miljacke iz sliva Zrmanje. U sušnom razdoblju iz Zrmanje u izvor Miljacka dotiče manji procenat vode nego tokom vlažnog razdoblja.

Problem za donošenje pouzdanih zaključaka leži u činjenici da je većina zaključaka vezanih s određivanjem hidrološko-hidogeološkog sliva reke Zrmanje zasnovana na relativno malobrojnim trasiranjima izvršenim pred tridesetak godina. Wicks (2013.) naglašava da je kod trasiranja u karstnim sistemima potrebno mnogo detaljnije organizovati merenja nego u slučajevima nekarstnog terena. To se pre svega odnosi na neophodnost brojnijih merenja u različitim stanjima vodnosti. Osim toga, merenja raznih hidroloških karakteristika (ne samo protoka nego i temperatura vode, električne provodljivosti i niza hemijskih svojstva) kako na mestu ubacivanja, tako i na mestima potencijalnih izlaza moraju biti kontinuirana. Pri tome je neophodno meriti nivoe podzemne vode u celom analiziranom sistemu, te obuhvatiti sva izlazna mesta na kojima se potencijalno očekuje pojava ubačenog trasera. Sve to usložnjava i značajno poskupljuje proces trasiranja u karstu. Očito je da bi trebalo organizovati nova trasiranja korištenjem savremenih tehnologija. Još je dosta nepoznato i neotkriveno, da bi se moglo očekivati pouzdano upravljanje vodnim resursima ovog neprocenjivo vrednog krškog vodnog fenomena.

Topografski sliv Zrmanje izgrađen je od dolomita i krečnjaka koji pripadaju donjem trijasu, krednih karbonata, kao i dolomitnih breča (Fritz, 1972). U prostoru topografskog sliva smeštena su četiri veća krška polja i brojne manje krške depresije površine između 0,1 km<sup>2</sup> i 2 km<sup>2</sup>. Većina njihovih površina kao i prostor uz korito reke pokriveni su plodnim i za vodu slabije propusnim kvartarnim naslagama, najčešće crvenicom. Površinski i podzemni karstni oblici u hidrološko-hidogeološkom slivu Zrmanje su brojni i nedovoljno istraženi. Većina površina terena, osim onih u manjim i četiri velika karstna polja, snažno je karstificirana i relativno slabo pokrivena vegetacijom. Radi se o prostoru koja pokriva više od 90% ukupne hidrološko-hidogeološke površine. Zbog toga padavina koja padne na nju vrlo brzo prodire u karstno podzemlje

uzrokujući da su godišnji koeficijenti oticanja visoki, te prelaze vrednost od 0,5. Treba biti svestan činjenice da osim uočenih i dokazanih veza između mesta poniranja i mesta pojave vode na površini prikazanih na slici 1, vrlo verovatno postoje i brojne druge veze koje tek treba otkriti.

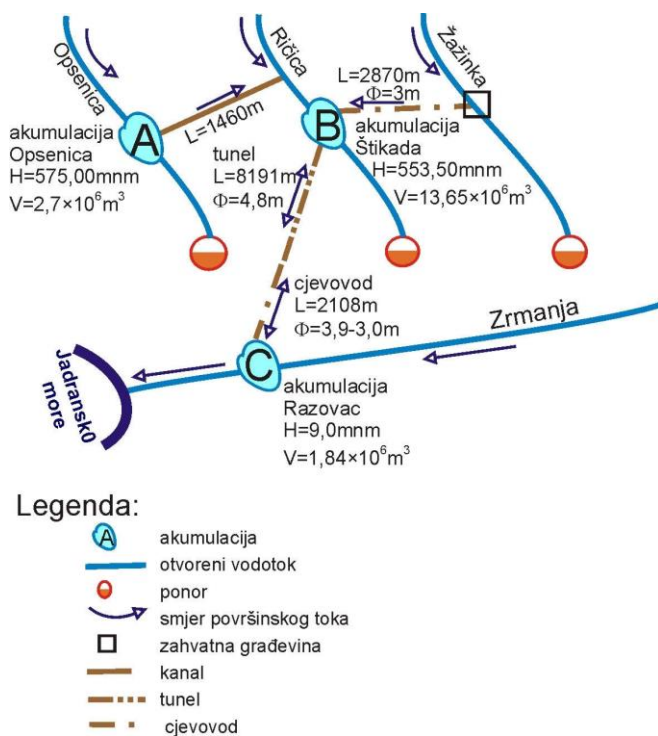
Početak formiranja recentne doline reke Zrmanje vezan je za alpski orogenetski ciklus, kada su se u tom prostoru odvijali poslednji intenzivni tektonski pokreti. Na prelazu iz eocena u oligocen u ovom području se javljaju intenzivni procesi formiranja raseda, bora i navlaka (Herak i sar., 1969). Tokom ovih orogenetskih procesa došlo je do snažnog razlamanja stena, čime su stvoreni preduslovi za poniranje znatnijih količina vode sa površine vrlo duboko u podzemlje. Time su stvoreni preduslovi da ova voda svojim fizičkim i hemijskim delovanjem utiče na razvoj podzemnih karstnih oblika u velikim dubinama. Neposredno nakon završetka orogenetskih pokreta formiran je dinamični inicijalni reljef. Od tog vremena egzogene su sile imale ključan uticaj na oblikovanje današnjeg vrlo razvijenog reljefa (Fritz, 1972).

U Dinarskom karstu nivo podzemne vode često se nalazi dublje od 50 m ispod dna otvorenih vodotoka. Na Krki i Zrmanji postoje deonice na kojima je podzemna voda uvek ispod nivoa dna vodotoka. Razlika je u tome da na reci Krki na tim deonicama nema gubitaka vode kroz dno, pa reka Krka nikad ne presuši, dok se na reci Zrmanji ti gubici stalno javljaju, te dolazi do povremenog presušivanja. Takav slučaj je na reci Zrmanji na deonici između Palanke i Nadvoda, na dužini od oko 30 km (Bonacci, 1999).



Slika 2. Topografski sliv Zrmanje sa lokacijama 9 VS i 2 MS (Gračac i Knin)

Na slici 3 shematski su ucrtani glavni delovi sistema RHE Velebit. Položaji tri akumulacije ucrtani su i na slici 1 te označeni slovima **A** (akumulacija Opsenica), **B** (akumulacija Štikada) i **C** (akumulacija Razovac). Akumulacija Štikada vrši ulogu kompenzacionog bazena RHE Velebit. Na slici 3 su navedene i maksimalne visine nivoa vode u akumulacijama (H) u mnm, te njihove zapremine (V) u m<sup>3</sup>. Tu su i podaci o dužinama (L) kanala, cevovoda i tunela u m. Za cevovode i tunele naveden je i podatak o njihovom prečniku Ø u m. Instalirani protok turbina iznosi 60 m<sup>3</sup>/s, dok instalirani protok pumpi iznosi 40 m<sup>3</sup>/s. Izgradnjom akumulacije Opsenica deo voda iz slivova priobalnih kraških izvora i vrulja prebačen je u sliv Zrmanje. Zahvatom vode na reci Žižinki deo njenih voda prebačen je u akumulaciju Štikada. Akumuliranje voda i njihovo korišćenje za potrebe pogona RHE Velebit su uticali na promenu prirodnog vodnog režima duž toka Zrmanje. U ovom isključivo hidrološki orijentisanom radu, ekološka problematika neće biti tretirana, ali će rezultati izneseni u njemu moći poslužiti ekolozima za donošenje zaključaka bitnih za pružanje podrške održivom razvoju ovog vrednog i još uvijek ekološki relativno dobro sačuvanog prostora.



Slika 3. Šematska situacija analiziranog sistema RHE Velebit

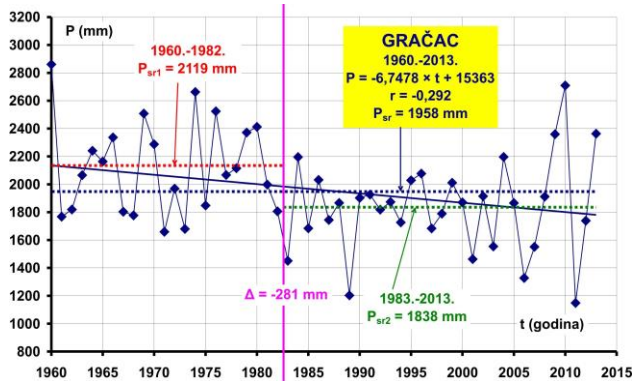
### 3. PADAVINE I TEMPERATURE

Kao posledica razvijenog reljefa hidrološko-hidrogeološki sliv Zrmanje se nalazi pod različitim klimatskim uticajima. Najviši delovi (iznad 500 mnm) i najudaljeniji od Jadranskog mora imaju planinsko-kontinentalnu klimu. Oni niži i bliži obali Jadrana imaju kontinentalnu klimu sa uticajem mediteranske klime. Najniži delovi, tj. donji tok reke Zrmanje snažnije su pod uticajem mediteranske nego kontinentalne klime.

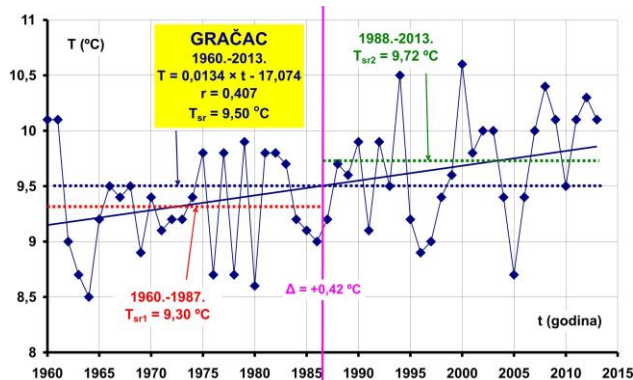
U ovom radu analizirani su podaci godišnjih padavina i srednjih godišnjih temperatura vazduha izmereni na meteorološkoj stanici MS Gračac u razdoblju 1960.-2013., na nadmorskoj visini od 560 mnm. Ona odgovara srednjoj visini hidrološko-hidrogeološkog sliva Zrmanje. U razdoblju od maja 1991. do augusta 1996. MS Gračac nije radila. Godišnje padavine i srednje godišnje temperature za to razdoblje izračunati su regresijom i korelacijom sa meteorološkom stanicom MS Knin. To je bilo moguće učiniti jer su koeficijenti korelacije bili vrlo visoki:  $r=0,825$  (za godišnje padavine) i  $r=0,918$  (za srednje godišnje temperature).

Na slici 4 dat je niz godišnjih padavina opaženih na MS Gračac u razdoblju 1960.-2013. Prosečna godišnja padavina u tom periodu iznosila je 1958 mm. Na slici je prikazan pravac regresije iz kojeg se može uočiti postojanje trenda opadanja godišnjih padavina. Međutim, kad se primenila RAPS metoda (*Garbrecht i Fernandez, 1994*) utvrđeno je da postoje sledeća dva statistički značajno različita podrazdoblja: (1) 1960.-1982.; (2) 1983.-2013. U prvom je prosečna godišnja padavina iznosila 2119 mm te je za 281 mm (više od 13%) bila viša od prosečnih godišnjih padavina drugog podrazdoblja, koje su iznosile 1838 mm. Nije uočena preraspodela padavina tokom godine u drugom podrazdoblju u odnosu na prvo podrazdoblje. Na slici 5 ucrtan je niz srednjih godišnjih temperatura vazduha opaženih na MS Gračac u razdoblju 1960.-2013. Prosečna srednja godišnja temperatura vazduha u tom razdoblju iznosila je 9,50°C. Na slici 5 prikazan je pravac regresije iz kojeg se može uočiti postojanje trenda porasta srednjih godišnjih temperatura vazduha. Primenom RAPS metode utvrđeno je da postoje sledeća dva statistički značajno različita podrazdoblja: (1) 1960.-1987.; (2) 1988.-2013. U prvom je prosečna srednja godišnja temperatura vazduha iznosila 9,30°C, te je za 0,42°C bile niža od prosečne godišnje temperature vazduha u drugom podrazdoblju koja je iznosila 9,72°C. Ni u slučaju temperatura vazduha nije uočena njihova preraspodela tokom godine. U ovom je

radu kao granični kriterij statistički značajne razlike aritmetičkih sredina usvojena vrednost t-testa od 0,01%.



Slika 4. Niz godišnjih padavina na MS Gračac (1960.-2013.)



Slika 5. Niz srednjih godišnjih temperatura vazduha na MS Gračac (1960.-2013.)

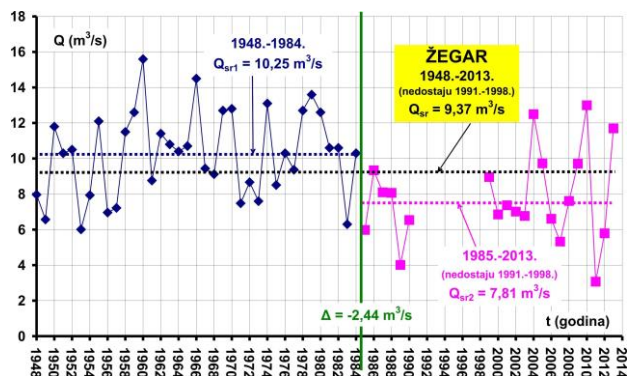
Gotovo identični rezultati dobijeni su i za druge stanice u užem, ali i na širem području. One se ne navode, jer se radi o kraćim nizovima u kojima postoje brojni prekidi u opažanju. Prethodno izvršene analize ukazuju da se na analiziranom prostoru javljaju određeni i zabrinjavajući trendovi snižavanja godišnjih količina padavina i povišenja temperatura zraka. Da li su i koliko ovi procesi uticali na promene hidroloških karakteristika duž toka Zrmanje pokušat će se rasvijetliti u nastavku ovog rada.

#### 4. ANALIZA PROTOKA NA POJEDINIM VODOMJERNIM STANICAMA

Na slici 6 prikazan je niz srednjih godišnjih protoka Zrmanje na vodomernoj stanici Žegar u periodu 1948.-2013. (nedostaju 1991.-1998.). Prosječni godišnji protok u tom razdoblju iznosio je 9,37 m<sup>3</sup>/s. Utvrđeno je da

postoje sledeća dva statistički značajno različita podrazdoblja: (1) 1948.-1984.; (2) 1985.-2013. U prvom je prosečni godišnji protok iznosio 10,25 m<sup>3</sup>/s. On je za 2,44 m<sup>3</sup>/s (oko 31 %) viši od prosečnog godišnjeg protoka u drugom podrazdoblju u kojem je iznosio 7,81 m<sup>3</sup>/s. Primjenom F-testa i t-testa utvrđene je da su razlike aritmetičkih sredina statistički značajne. Ni na ovoj stanici kao i na svim ostalim vodomernim stanicama duž toka Zrmanje nije uočena preraspodjela protoka tokom godine.

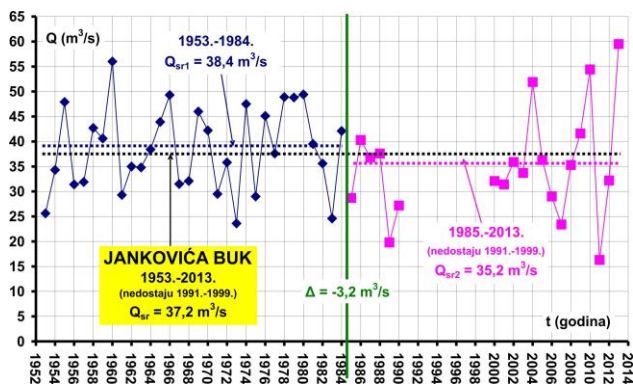
Kako se ne bi nepotrebno opterećivao ograničeni prostor ovog rada napominje se da su i na svim ostalim vodomjernim stanicama duž toka Zrmanje (Vrelo, Palanka, Prevjes, Mokro Polje, Ervenik, Nadvode i Berberov Buk), osim stanice Jankovića Buk, utvrđene statistički značajne razlike između aritmetičkih sredina protoka u razdobljima pre i posle početka rada RHE Velebit. Razlog nižim srednjim godišnjim protocima u drugom podrazdoblju u slučaju osam VS (isključujući VS Jankovića Buk) treba tražiti u radu RHE Velebit, ali i u prethodno spomenutim klimatskim promenama koje su se zbile na tom prostoru.



Slika 6. Niz srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Žegar

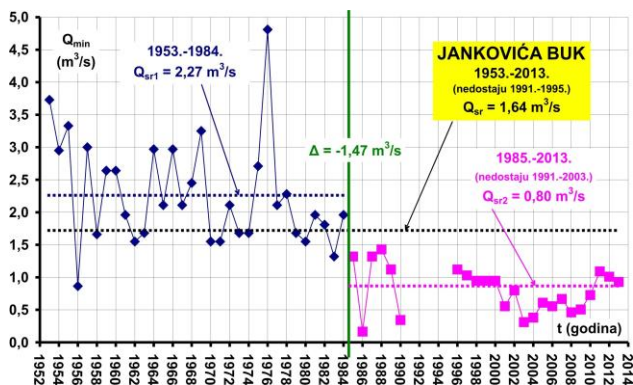
Na slici 7 prikazan je niz srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Jankovića Buk u razdoblju 1953.-2013. (nedostaju 1991.-1999.). Prosečni godišnji protok u tom razdoblju iznosio je 37,2 m<sup>3</sup>/s. U prvom podrazdoblju (1953.-1984.) prosečni godišnji protok je bio 38,4 m<sup>3</sup>/s. U drugom podrazdoblju (1985.-2013.) prosečni godišnji protok iznosio je 35,2 m<sup>3</sup>/s. On je za 3,2 m<sup>3</sup>/s (oko 9%) niži od prosečnog godišnjeg protoka prvog podrazdoblja. Primjenom F-testa i t-testa utvrđene je da razlike aritmetičkih srednjaka nisu statistički značajne. Ni na ovoj stanici nije uočena preraspodjela protoka tokom godine. Razlog nižim srednjim godišnjim protocima u drugom podrazdoblju u slučaju VS

Jankovića Buk verovatno je u sniženim godišnjim padavinama i povišenim srednjim godišnjim temperaturama vazduha, što će u ovom radu biti potvrđeno analizama izvršenim na slici 14.



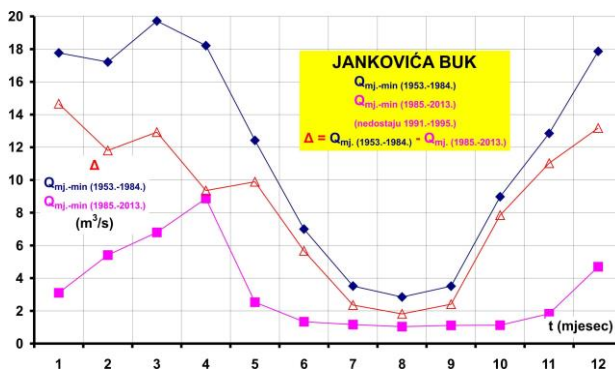
Slika 7. Niz srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Jankovića Buk (1953.-2013., nedostaje 1991.-1999.)

Na slici 8 prikazan je niz minimalnih godišnjih protoka Zrmanje na VS Jankovića Buk u periodu 1953.-2013. (nedostaju 1991.-1995.). Prosečni minimalni godišnji protok u celom periodu opažanja iznosio je 1,64 m³/s. Utvrđeno je da postoje sledeća dva statistički značajno različita podrazdoblja podataka minimalnih godišnjih protoka: (1) 1953.-1984.; (2) 1985.-2013. U prvom je prosečni minimalni godišnji protok iznosio 2,27 m³/s. On je za 1,47 m³/s (oko 184%) veći od prosečnog minimalnog godišnjeg protoka u drugom podrazdoblju koji je iznosio 0,80 m³/s. Primjenom F-testa i t-testa utvrđene je da su razlike aritmetičkih srednjaka statistički značajne.



Slika 8. Niz minimalnih godišnjih protoka Zrmanje na VS Jankovića Buk

Na slici 9 prikazana su dva niza minimalnih mesečnih protoka koje su izmerene u sledeća dva podrazdoblja: (1) 1953.-1984.,  $Q_{mj.-min}$  (1953.-1984.) (plava boja); (2) 1985.-2013.,  $Q_{mj.-min}$  (1985.-2013.) (nedostaju 1991.-1995.) (ljubičasta boja). Crvenom bojom su označene razlike ( $\Delta$ ) protoka prvog i drugog podrazdoblja.



Slika 9. Nizovi minimalnih protoka koje su se pojavile u pojedinom mesecu godine na VS Jankovića Buk u dva podrazdoblja: (1) 1953.-1984.,  $Q_{mj.-min}$  (1953.-1984.) (plava boja); (2) 1985.-2013.,  $Q_{mj.-min}$  (1985.-2013.) (nedostaju 1991.-1995.) (ljubičasta boja). Crvenom bojom su označene razlike ( $\Delta$ ) protoka prvog i drugog podrazdoblja.

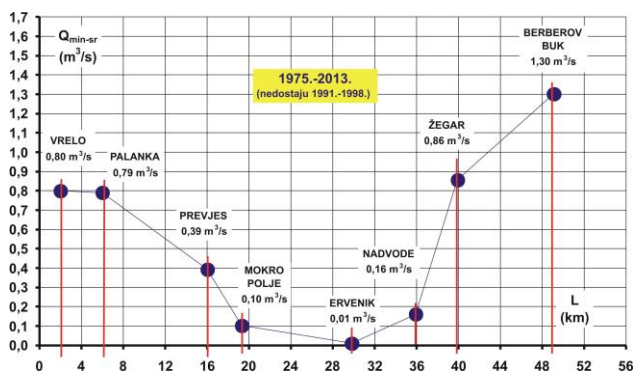
Naglo i statistički značajno opadanje srednjih godišnjih protoka od 1985. godine do danas moguće je povezati s radom RHE Velebit, ali se ne sme zanemariti ni uticaj povećanja srednjih godišnjih temperatura vazduha koje je počelo 1988. godine i opadanja godišnjih padavina započeto 1983. godine. Ovo se objašnjenje odnosi na sve VS osim onu najnižvodniju VS Jankovića Buk, koja se jedina nalazi nizvodno od akumulacije Razovac. Na njoj nije došlo do statistički značajnih smanjivanja srednjih godišnjih protoka. Objašnjenje vezano uz smanjenje minimalnih mesečnih i godišnjih protoka na VS Jankovića Buk treba tražiti, takođe, u radu RHE Velebit, tj. u načinu akumuliranja i korišćenja voda akumulacije Razovac. Zbog potreba pogona RHE Velebit u akumulaciji Razovac se voda zadržava što je duže moguće, te se ne ispušta u nizvodni tok Zrmanje. To je posebno izraženo tokom sušnih razdoblja i tokom toplih meseci godine kad je prirodni dotok Zrmanjom prirodno nizak.

### 5. ANALIZA PROTOKA DUŽ TOKA ZRMANJE

Analizirane su promene karakterističnih protoka (prosečnih minimalnih godišnjih, prosečnih srednjih godišnjih i prosečnih maksimalnih godišnjih) na devet

vodomernih stanica duž toka reke Zrmanje. Pošto su stanice imale različite dužine nizova, merenja za zajednički analizu usvojeno je razdoblje obrade 1975.-2013. (nedostaju 1991.-1998.).

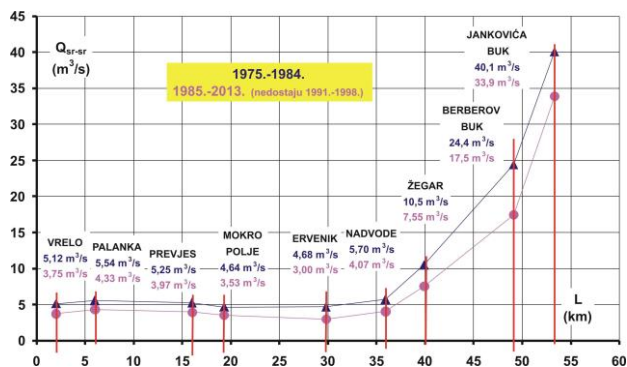
Slika 10 predstavlja grafički prikaz prosečnih minimalnih godišnjih protoka ( $Q_{\min-sr}$ ) izmerenih na osam vodomera duž toka Zrmanje (L) u periodu 1975.-2013 (nedostaju 1991.-1998.). Naglašava se da na ovih osam vodomera nije bilo razlika u prosečnim minimalnim protocima u podrazdobljima pre i posle početka rada RHE Velebit. Prosečni minimalni godišnji protok na stanici Jankovića Buk statistički značajno se smanjio u drugom podrazdoblju kao posledica rada RHE Velebit, što je prethodno bilo pokazano i objašnjeno na slikama 8 i 9. Sa slike 10 je moguće uočiti da prosečne minimalne godišnje vrednosti protoka opadaju od stanice Vrelo do stanice Ervenik, te da su i na stanici Nadvođe još uvijek vrlo niske. Stvarni porast se opaža tek na stanici Žegar. To potvrđuje zaključak da na potezu reke Zrmanje od Palanke do Nadvođe voda ponire u krško podzemlje u razdoblju niskih protoka.



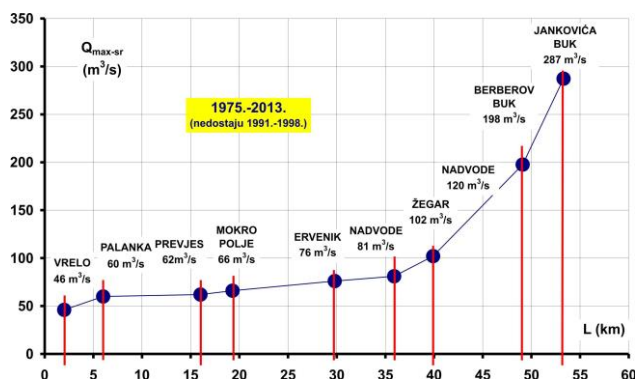
Slika 10. Prikaz prosečnih minimalnih godišnjih protoka ( $Q_{\min-sr}$ ) na 8 VS duž toka Zrmanje (L)

Na slici 11 grafički su prikazani prosečni srednji godišnji protoci ( $Q_{sr-sr}$ ) izmereni na devet vodomera duž toka (L) reke Zrmanje u sledeća dva podrazdoblja: (1) 1975.-1984. (plava boja); (2) 1985.-2013. (nedostaju 1991.-1998.) (ljubičasta boja). Uočava se da su u prvom podrazdoblju prosečni srednji godišnji protoci veći na svih devet vodomera duž toka Zrmanje nego u drugom podrazdoblju. Pri tome se napominje da su na osam uzvodnih VS te razlike statistički značajne, dok na VS Jankovića Buk one nisu statistički značajne. Objasnjene je moguće naći u činjenici da je u prvom podrazdoblju vladao prirodni hidrološki režim, koji je početkom rada RHE Velebit promenjen. Međutim, ne sme se zaboraviti na činjenicu da je od 1983. došlo do smanjivanja

godišnjih padavina, a od 1988. do povišenja srednjih temperatura vazduha u regiji. Uticaj ovih faktora ne sme se zanemariti. I na ovom grafičkom prikazu moguće je uočiti da prosečni godišnji protoci duž toka Zrmanje praktično stagniraju na potezu od VS Vrelo do VS Nadvođe, uprkos činjenici da se topografski sliv povećava sa  $16 \text{ km}^2$  na profilu Vrelo na  $340 \text{ km}^2$  na profilu Nadvođe. Značajniji porast prosečnih srednjih godišnjih protoka javlja se tek na profilu stanice Žegar.



Slika 11. Prikaz prosečnih srednjih godišnjih protoka ( $Q_{sr-sr}$ ) na 9 VS duž toka Zrmanje: (1) 1975.-1984. (plava boja); (2) 1985.-2013. (ljubičasta boja)



Slika 12. Prikaz prosečnih maksimalnih godišnjih protoka ( $Q_{\max-sr}$ ) na 9 VS duž toka Zrmanje (1975.-2013., nedostaje 1991.-1998.)

Slika 12 predstavlja grafički prikaz prosečnih maksimalnih godišnjih protoka ( $Q_{\max-sr}$ ) izmerenih na devet vodomera duž toka reke Zrmanje u razdoblju 1975.-2013. (nedostaju 1991.-1998.). U ovom slučaju ponašanje protoka duž toka reke Zrmanje moglo bi se nazvati očekivanim i uobičajenim, tj. sličnim onima koje se javljaju kod svih ostalih otvorenih vodotoka. Treba uočiti da su maksimalni godišnji protoci relativno niski ako se uzme u obzir činjenica da se radi o relativno velikim kako topografskim tako i hidrološko-

hidrogeološkim slivovima i obilnim i intenzivnim padavinama koje se javljaju na analiziranom području. Razlog tome leži u velikoj sposobnosti skladištenja vode u šupljinama jako karstifikovanog površinskog sloja terena, ali i u mogućnosti zadržavanja vode u brojnim površinskim depresijama i krškim poljima.

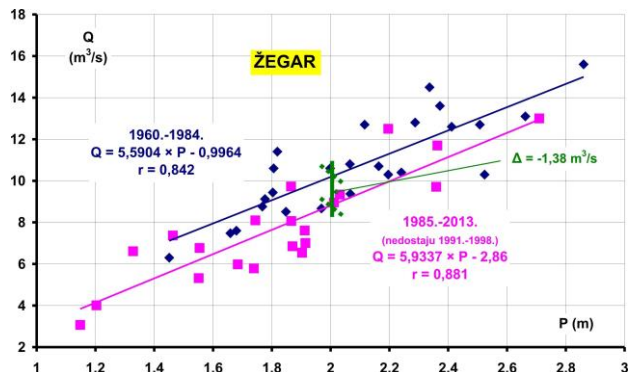
## 6. ANALIZA ODNOSA PROTOKA I PADAVINA

Analiza odnosa srednjih godišnjih protoka i padavina koje su pale na sliv bilo koje reke predstavlja jedan od osnovnih hidroloških postupaka na osnovi kojeg je moguće doneti niz bitnih zaključaka o odnosu padavine-oticanje. Kako nisu poznate ni granice ni površine slivova do pojedinih vodomera, biće analiziran odnos srednjih godišnjih protoka na devet vodomera u zavisnosti od godišnjih padavina izmerenih na MS Gračac. Pošto je u prethodnom poglavlju ustanovljeno da se srednji godišnji protoci u prirodnom stanju do uključivo 1984. godine razlikuju od onih koji se javljaju s početkom rada RHE Velebit, od 1985. do danas, za svaku vodomernu stanicu izračunati su odnosi za ta dva podrazdoblja.

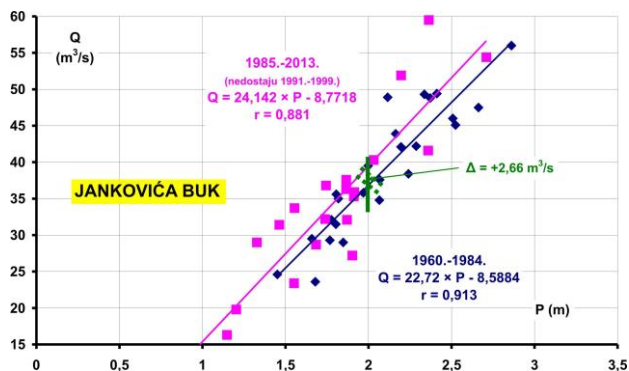
Na slici 13 ucrtani su odnosi srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Žegar (Q) i godišnjih padavina izmerenih na MS Gračac (P) u dva podrazdoblja: (1) 1960.-1984. (plava boja); (2) 1985.-2013. (nedostaju 1991.-1998.) (ljubičasta boja). I u ovom slučaju zaključci su praktično identični kao i kod VS Mokra Polje. Kao prvo treba uočiti da su koeficijenti linearne korelacije u oba slučaja vrlo visoki i gotovo identični, što ukazuje na to da nezavisna varijabla (P) ima značajan uticaj na formiranje zavisne varijable (Q) - oticanje. Pravci regresije u oba podrazdoblja gotovo su paralelni. Jedina razlika je u tome što je ista godišnja padavina u prirodnom režimu rezultirala značajno većim srednjim godišnjim protokom nego tokom vremena kada radi RHE Velebit. Za godišnju padavinu Gračaca od 2000 mm protoci u prirodnom režimu bili su čak 1,38 m<sup>3</sup>/s veći nego u razdoblju kada radi RHE Velebit.

Gotovo identični rezultati dobijeni su i na svim ostalim VS duž toka reke Zrmanje, osim u slučaju najnižvodnije VS Jankovića Buk. Pravci regresije uvek su bili paralelni za oba analizirana podrazdoblja, a koeficijenti linearne korelacije su se kretali između visokih vrednosti od 0,8 do 0,9. Za godišnju padavinu Gračaca od 2000 mm protoci u prirodnom režimu bili su viši od onih u razdoblju rada RHE Velebit na pojedinim stanicama kako sledi: (1) Vrelo: 0,76 m<sup>3</sup>/s; (2) Palanka: 0,61 m<sup>3</sup>/s; (3) Prevjes: 0,60 m<sup>3</sup>/s; (4) Mokra Polje:

1,23 m<sup>3</sup>/s; (5) Ervenik: 0,94 m<sup>3</sup>/s; (6) Nadvode: 0,95 m<sup>3</sup>/s; (7) Berberov Buk: 3,34 m<sup>3</sup>/s.



Slika 13. Odnosi srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Žegar (Q) i godišnjih padavina na MS Gračac (P) u dva perioda: (1) 1960.-1984. (plava boja); (2) 1985.-2013., nedostaje 1991.-1998. (ljubičasta boja)



Slika 14. Odnosi srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Jankovića Buk (Q) i godišnjih padavina MS Gračac, P, u dva podrazdoblja: (1) 1960.-1984. (plava boja); (2) 1985.-2013. (nedostaju 1991.-1999.) (ljubičasta boja)

Na slici 14 prikazani su odnosi srednjih godišnjih protoka Zrmanje na VS Jankovića Buk (Q) i godišnjih padavina izmerenih na MS Gračac (P) u dva podrazdoblja: (1) 1960.-1984. (plava boja); (2) 1985.-2013. (nedostaju 1991.-1999.) (ljubičasta boja). I na ovoj VS regresijski pravci su praktično paralelni. Međutim, za godišnju padavinu Gračaca od 2000 mm protoci u prirodnom režimu bili su ovaj put niži za 2,66 m<sup>3</sup>/s nego u podrazdoblju kada radi RHE Velebit. Treba uočiti da se radi o maloj i statistički neznačajnoj vrednosti razlike protoka od  $\Delta = 2,66 \text{ m}^3/\text{s}$  u odnosu na prosečni srednji godišnji protok Zrmanje kod Jankovića Buk koji je u podrazdoblju prirodnog režima iznosio



38,4 m<sup>3</sup>/s, a u podrazdoblju rada RHE Velebit 35,2 m<sup>3</sup>/s. Moglo bi se zaključiti da na ovoj stanici nije došlo do statistički značajnih promena u odnosu padavina-oticanje, već da se radi o slučajnim varijacijama.

Zaključak koji je moguće donijeti na osnovi analiza vršenih u ovom poglavlju je da je rad RHE Velebit potpomognut klimatskim promenama uzrokovao smanjenje srednjih godišnjih protoka duž toka Zrmanje uzvodno od akumulacije Razovac. Vrlo verovatno taj je utjecaj smanjen ili je potpuno nestao nizvodno od akumulacije Razovac.

## 7. ZAKLJUČCI

Dinarski karst obiluje različitim retkim i osobitim karstnim vodnim fenomenima. Čak i u tako bogatom i raznolikom prostoru hidrološko ponašanje Zrmanje predstavlja svojevrstu pojavu koju nije jednostavno shvatiti i objasniti. Kad se tome doda uticaj rada čovjeka kao i promena klime koje se javljaju tokom poslednjih tridesetak godina, stvari se dodatno komplikuju.

Analize izvršene u ovom radu su ukazale da je pod uticajem pogona RHE Velebit došlo do značajnih promena prirodnog hidrološkog režima. Smanjeni su srednji godišnji protoci na svih osam vodomera uzvodno od akumulacije Razovac. Na VS Jankovića Buk koja se jedina nalazi nizvodno od spomenute akumulacije na reci Zrmanji smanjenje srednjih godišnjih protoka nije statistički značajno, već se može pripisati klimatskim faktorima, tj. smanjenim godišnjim padavinama i povećanim srednjim godišnjim temperaturama vazduha. Što više, za iste godišnje količine padavina srednji godišnji protoci na ovoj su stanici povećani. Rad RHE Velebit nije utjecao na promenu maksimalnih protoka duž toka reke Zrmanje. Pogon RHE Velebit nije uticao na promenu minimalnih godišnjih protoka duž toka na osam stanica koje se nalaze uzvodno od akumulacije Razovac. Značajan uticaj na smanjenje minimalnih protoka oseća se samo na najnižvodnijoj VS Jankovića Buk. Razlog tome treba tražiti u zadržavanju vode u akumulaciji Razovac i ne ispuštanju u nizvodni deo toka reke zbog potreba pogona RHE Velebit.

Pošto je gotovo istovremeno s početkom rada RHE Velebit došlo i do porasta srednjih godišnjih temperatura zraka, i do snižavanja godišnjih količina

padavina u regiji, očito je da su i ti klimatski procesi imali određen uticaj na promenu hidrološkog režima duž toka reke. Po svemu sudeći, njihov je uticaj nešto manji od uticaja rada RHE Velebit. Nažalost, na osnovi raspoloživih podataka ne postoji način da se pouzdano kvantitativno procene i razdvoje uticaji prirodnih od antropogenih faktora na promenu hidrološkog režima u slivu reke Zrmanje.

Kod upravljanja vodnim resursima sliva Zrmanje biće neophodna mnogo ozbiljnija briga o uticaju promena hidrološkog režima na okruženje. Na to ukazuje i sama činjenica što je veliki deo sliva Zrmanje obuhvaćen parkom prirode Velebit. Nadamo se da će ovaj rad pomoći u ostvarivanju tog važnog zadatka.

## LITERATURA

- [1] Bjedov, T. (1995.): Višenamjensko iskorištavanje akumulacijskih jezera rijeke Zrmanje. *Građevinar*, 47(11), 679-684
- [2] Bonacci, O. (1999.): Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja. *Hydrological Sciences Journal*, 44(3), 373-386
- [3] Bonacci, O. (2012.): Increase of mean annual surface air temperature in the Western Balkans during last 30 years. *Vodoprivreda*, 44(255-257), 75-89
- [4] Fritz, F. (1972.): Razvitak gornjeg toka rijeke Zrmanje, *Carsus Jugoslaviae*, 8(1), 1-19
- [5] Ford, D., Williams, P.D. (2007.): *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley, Chichester
- [6] Garbrecht J, Fernandez GP. (1994.): Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Water Resources Bulletin*, 30(2), 297-306.
- [7] Herak, M., Bahun, S., Magdalenić, A. (1969.): Pozitivni i negativni utjecaji na razvoj krša u Hrvatskoj. *Carsus Jugoslaviae*, 6, 45-78
- [8] Terzić, J., Marković, T., Lukač Reberski, J. (2014.): Hydrogeological properties of a complex Dinaric karst catchment: Miljacka Spring case study. *Environmental Earth Sciences*, 72(4), 1129-1142
- [9] Wicks, C. (2013.): Spring discharge records - a case study. *Acta Carsologica*, 42(2/3), 339-346

## ANALYSIS HYDROLOGICAL CHANGES ALONG THE RIVER ZRMANJA

by

Ognjen BONACCI, Tanja ROJE-BONACCI

Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

E-mail: obonacci@gradst.hr; bonacci@gradst.hr

### Summary

The article was carried hydrological characteristic analysis (minimum, medium and maximum) annual flow measured at nine hydrological stations along the river Zrmanja canyon. Its aim was to compare the hydrological regime of the natural undisturbed condition with those caused by the work of reversible hydro power plant Velebit (RHE Velebit). Analysis of long time series of annual precipitation and mean annual air temperatures observed at the meteorological station Gračac found that in 1983 there was a statistically significant reduction of the amount of annual rainfall, and that from 1988 there was a statistically significant increase in mean annual temperature. It was found that the work of RHE Velebit contributed to a reduction in mean annual flow at eight gauging stations located

upstream from the reservoir (balancing reservoir) Razovac on the river Zrmanja. At the station Jankovića Buk which is the only one located downstream from the reservoir Razovac not feel the impact of the work of RHE Velebit on the reduction of mean annual flow, but her work is influenced to a significant reduction of minimum flow on it. It was concluded that changes in the hydrological regime along the river Zrmanja caused largely the work of RHE Velebit, but have been determined by the impact made and said climate change parameters in the wider catchment area.

Keywords: Karst hydrology, river Zrmanja, tracing, anthropogenic influences, RHE Velebit

Redigovano 18.11.2015.