

UTICAJ DELIMIČNOG PREVOĐENJA VODA IZ SLIVOVA BUNE I BREGAVE U SLIV TREBIŠNJICE

Petar MILANOVIĆ, Radmilo GLIŠIĆ¹⁾, Branislav ĐORĐEVIĆ,
Tina DAŠIĆ²⁾, Nedeljko SUDAR³⁾

¹⁾ Energoprojekt, Hidroinženjering, Beograd,

²⁾ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, ³⁾ Zavod za vodoprivredu, Bijeljina

REZIME

Vodoprivredni „Hidrosistem Trebišnjica“, planiran kao sistem u etapnom razvoju, ušao je u završnu etapu izgradnjom Gornjih horizonta. Na taj način sistem postaje jedan od najvećih integralnih razvojnih projekata u ovom delu Evrope, sa brojnim ekonomsko-razvojnim, socijalnim, vodoprivrednim, energetskim, ekološkim, urbanim i drugim ciljevima. Pošto se sistem realizuje u jednom od najizraženijih karstnih područja Dinarida, jedno od centralnih pitanja koja su postavljena u fazi njegovog planiranja je pitanje hidroloških i ekoloških uticaja tog sistema na reke Bunu, Bunicu i Bregavu, ekološki veoma značajne pritoke reke Neretve. To pitanje je odavno fokusirano i u javnosti, sa zahtevom da se detaljno ispita uticaj sistema na vodne režime pomenutih vodotoka, posebno u periodu malih voda. U članku su, pored rezultata višegodišnjih istraživanja i analiza, prikazani ključni rezultati sudije iz 2009. (Energoprojekt Beograd i Zavod za vodoprivredu, Bijeljina). Nakon analize padavina, hidrogeoloških fenomena pravaca kretanja podzemnih voda i analiza hidroloških serija dnevnih protoka, urađeni su matematički modeli (klasa ARMA modela, homomorfne simulacije), koji pokazuju da se mogu uspostaviti vrlo pouzdane matematičke zavisnosti između dnevnih protoka na kontrolnim profilima na pomenute tri reke (tražena veličina), dnevnih padavina u pojedinim hidrogeološkim zonama i protoka u više uzastopnih prethodnih dana na pojedinim hidrološkim profilima. Vrlo visoki koeficijenti korelacije (0,96÷0,99) modeliranjem dobijenih i izmerenih vrednosti dnevnih protoka na pomenute tri reke pokazuju da se vrlo pouzdano može apriorno predvideti kakvi se hidrološki uticaji mogu očekivati nakon realizacije Gornjih horizontata (akumulacije, kanalske i tunelske derivacije). Zaključuje se da se velike i srednje vode smanjuju, jer se deo protoka

akumulira i usmerava prema već izgrađenom delu Hidrosistema Trebišnjica.

Projektom Gornjih horizontata planira se prevođenje oko 30% (20 m³/s) voda slivova Bune i Bregave u već izgrađeni deo Hidrosistema Trebišnjica. To je deset puta manje u odnosu na srednji godišnji prirodni proticaj Neretve u Mostaru (197,4 m³/s). To je manje je i od najmanje izmerenih proticaja Neretve u Mostaru (32 m³/s) s tim što tada (sušni period) na Gornjim horizontima nema vode za prevođenje. U tom periodu dotok u Neretvu sa područja Gornjih horizontata je takođe deset puta manji od proticaja Neretve.

Interesantan je i podatak da je srednji godišnji prirodni proticaj Neretve, neposredno nizvodno od ušća Bune, 250,7 m³/s (Pavlović M. & Pavlović M.) što je dvanaest puta više od količina planiranih za prevođenje. Prema „Okvirnoj vodoprivrednoj osnovi BiH“ (1994) Qsr kod Žitomislića je 233 m³/s što je takođe u granicama gore pomenutih odnosa.

Nakon energetskog iskorišćenja prevedenih voda na postojećim elektranama (HE Trebinje 1, HE Trebinje 2 i PHE Čapljinu) ove vode se vraćaju u Neretvu kroz ustavu Krupa, uzvodno od Metkovića. Akumulacije Gornjih horizontata (Zalomka i Nevesinje) omogućuju da se u slučajevima ekstremnih padavina ublaži poplavni talas na području Čapljinu i Metkovića, a u sušnom periodu povećaju protoci Neretve u Metkoviću i nizvodno. Nakon izgradnje Gornjih horizontata oko 65% voda Bune, Bunice i Bregave ostaje u prirodnom režimu i na njih se ne može uticati bilo kakvim tehničkim merama.

Najvažniji je zaključak da se ne menjaju režimi malih voda, koji su i najvažniji za procenu ekoloških uticaja. Takođe, zaključuje se da se male vode Bregave na

potezu kroz Stolac mogu poboljšati odgovarajućim geotehničkim merama regulacije korita, sprečavanjem poniranja u karstifikovanom koritu upravo u toj zoni. Smanjenja velikih voda razmatranih pritoka Neretve se može tretirati kao pozitivan uticaj sistema Gornjih horizonata, jer se za toliko smanjuje povodanj u donjem toku Neretve.

Opšti zaključak je da su hidrološki i ekološki uticaji planiranog sistem Gornji horizonti bitno i preovlađujuće pozitivni i da se sa određenim radovima režimi malih voda mogu i poboljšati na Bregavi u urbanom delu Stoca.

Ključne reči: Integralni sistem, Gornji horizonti Hidrosistema Trebišnjica, režimi voda u karstu, ekološki uticaj, Trebišnjica, Buna, Bunica, Bregava

1. UVOD

Istorijat. Projektom Hidrosistema Trebišnjica predviđeno je integralno uređenje, korišćenje i zaštita voda istočne Hercegovine (slika 1). Konceptija projekta se zasniva na velikom vodnom potencijalu i kaskadnom rasporedu karstnih polja, čiji geografski položaj omogućuje da se voda što duže zadrži na površini i optimalno koristi od kota 900 mnm do nivoa mora. Po konceptiji, širini obuhvata i ciljevima radi se o jednom od najvećih integralnih razvojnih projekata najvišeg nivoa značajnosti, sa brojnim ekonomsko-razvojnim, socijalnim, energetskim, vodoprivrednim, ekološkim, urbanim i drugim ciljevima. Projekat čine sedam elektrana sa šest akumulacija koje su međusobno povezane tunelima i kanalima.

Realizacija ovog projekta predviđena je u dve etape, a svaka etapa u dve faze. Prva konceptija sistema je postavljena 1953 godine, a modifikovana je i usvojena 1956. Istražni radovi su započeti 1954, Idejni projekat je završen 1956, a realizacija prve faze prve etape započeta 1959. Prvi objekti, brana 'Gorica' i elektrana 'Dubrovnik' završeni su 1965 godine. HE Trebinje 1 sa dva agregata, je puštena je u rad 1968., dok je treći agregat u HE Trebinje 1 pušten u pogon 1975. Time je završena I faza prve etape izgradnje, kojom je realizovan najprofitabilniji deo sistema. Tokom izgradnje projekat je evoluirao u pravcu što ravnomernijeg doprinosa razvoju čitave istočne Hercegovine, uz podjednaku zaštitu vodnih resursa i životne sredine u svakom delu ovog regiona, pa je prvobitna konceptija dopunjena sa elektranama Trebinje 2 i PHE Čapljina, kao drugom fazom prve

etape. Kao deo prve etape bila je predviđena izgradnja HE Dubrovnik 2, za koju već pripremljena mašinska zgrada, ali do realizacije nije još došlo. Druga etapa razvoja tog projekta, pod nazivom Gornji horizonti, započeta je izgradnjom tunela Dabarsko polje - Fatničko polje (pušten u pogon 1986.) i Fatničko polje - akumulacija Bileća (pušten u pogon 2006.). Slede finalizacija druge etape kojom se Hidrosistem Trebišnjica proširuje na ostale planirane objekte na Gornjim horizontima, od kojih su najveći akumulacije „Zalomka“ i „Nevesinje“ i hidroelektrane Nevesinje, Dabar, i Bileća.



Slika 1. Hidrosistem Trebišnjica. Područje Gornjih horizonata.

Legenda: 1. nadmorska visina, 2. povremeni tok, 3. stalni površinski tok, 4. trasa tunela, 5. brana, 6. hidroelektrana (u pogonu), 7. hidroelektrana (projektovana).

Tokom izgradnje prve etape Hidrosistema Trebišnjica obavljani su istražni i pripremni radovi za realizaciju druge etape tzv. Gornjih horizonata. Svaki tehnički zahvat u prirodi, a pogotovo kada se radi o karstu, suočava se sa uticajima ekološke, socijalne i političke prirode, pa tako ni projekat Gornjih horizonata i njegova realizacija nisu samo tehničko pitanje. Cilj tog projekta, kao integralnog razvojnog projekta, je da donese prosperitet stanovništvu šire regije i da se na najpogodniji način uklopi u ekološko i socijano okruženje. Većina mogućih uticaja je predviđena i ugrađena u projektna rešenja, ali zbog složene prirode

karsta moguće su i nepredviđene reakcije prirode što se jasno manifestovalo tokom izgradnje prve etape. Ta iskustva su poslužila za izradu konačne verzije projekta. Težilo se da rizik izgradnje u karstu koji je definisan i frazom 'očekivati neočekivano' bude sveden na najmanju moguću meru.

Osnovno rešenje hidroenergetskog iskorišćenja voda Gornjih horizonata je revidovano i usvojeno u julu 1976 godine, a idejni projekat u junu 1980. Brojne prateće studije i elaborati o uticajima i efektima gornjih horizonata su završene do 1985 godine. Među njima od posebnog značaja su: elaborat o uticaju prevođenja voda Dabarskog polja na režim voda reke Bregave (1985), studija 'Rijeka Bregava – Mogućnost povećanja malih voda' (1986) i elaborat o uticaju prevođenja voda reke Zalomke na režim voda Bunice i Bune (1983). Na osnovu dostavljene investiciono-tehničke dokumentacije Republički komitet za poljoprivredu, šumarstvo i vodoprivredu SRBiH daje (1986) Vodoprivrednu saglasnost za izgradnju objekata prve faze Gornjih horizonata (HE Dabar). Istovremeno se rade pripremni radovi za vosnabdevanje gradilišta vodom, izrada pristupnog puta za vodostan HE Dabra, dovršetak radova na tunelima Fatnica–Bileća i Dabar-Fatnica, nabavka trafo stanica za gradilišta i sl. Kao integralni deo projekta Gornji horizonti urađena je studija povećanja proticaja reke Bregave u sušnom periodu kroz Stolac.

Odmah nakon revizije projekta Gornjih horizonata u nekim medijima počinje da se dovodi u sumnju opravdanost projekta. Ta sumnja je bila politički motivisana, ali je bazirana na pretpostavkama o mogućim dramatičnim negativnim uticajima. Potpuno su ignorisane razvojne dimenzije projekta i brojne nesumnjive koristi koje projekat Gornjih horizonata donosi ovom delu istočne Hercegovine. Zbog toga je aprila 1987. godine održan sastanak između predstavnika opštine Stolac i Elektroprivrede BiH, na kome je pismeno potvrđena obaveza Hidrosistema Trebišnjica da se, u skladu sa projektom, obave radovi na povećanju minimalnih proticaja reke Bregave kroz Stolac.

Sumnja u projekat Gornjih horizonata je obnovljena jula 2003 u formi poslaničkog pitanja skupštini Republike Srpske i sa više dramatičnih izjava u sredstvima javnog informisanja o očekivanim 'pogubnim posledicama' po reku Bregavu. Zbog toga su Ministarstva poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede FBiH i Republike Srpske formirale Stručnu komisiju sa zadatkom da na osnovu

postojeće dokumentacije 'pripremi predlog daljih aktivnosti radi definisanja uticaja koje izgradnja ovog sistema može imati na režim voda u širem području i način svodenja tih uticaja na prihvaljivu meru'. U Izveštaju koji je Komisija predala naručiocu (april 2004) ključna je preporuka da zaključke koji su proistekli iz matematskog modeliranja (1985, 1988), a odnose se na uticaje prevođenja voda Nevesinjskog, Dabarskog i Fatničkog polja na male, srednje i velike vode, treba proveriti, uz upotrebu aktuelnih podataka i uz prethodnu verifikaciju modela.

Nakon toga (2004) radi se Studija kojom se analiziraju efekti prevođenja voda kroz tunel Fatničko polje – akumulacija Bileća na režim malih voda reke Bregave. Poslednja studija koja analizira istu problematiku, pre svega sa ciljem da postupi po zaključcima pomenute komisije koju su formirala dva ministarstva, je Studija 'Aktuelizacija uticaja prevođenja voda Gornjih horizonata na režim površinskih i podzemnih voda' (obrađivač konzorcijum: Energoprojekt, Beograd i Zavod za vodoprivredu, Bijeljina, 2009). U ovom radu je prikazan metodološki pristup toj analizi i ključni rezultati i zaključci o uticaju na vodne režime Bune, Bunice i Bregave.

Realizacija projekta postala je u novije vreme posebno aktuelna. Projekat je unet kao prioritetan u strateške planske dokumente Republike Srpske (*Bratić, 2006*). Promenili su se i uslovi na planu vrednovanja energije iz obnovljivih vodnih potencijala (*Dorđević, 2008*), tako da integralni projekat Gornjih horizonata ima sve uslove da bude najveći razvojni projekat koji treba da pokrene razvoj čitavog područja istočne Hercegovine. Postoje svi uslovi da se sistem ne samo skladno uklopi u ekološko i socijalno okruženje, već i da akumulacije koje uređuju vodne režime poboljšaju te uslove na širem području (*Dorđević i Dašić, 2011a*), uključiv i tok Trebišnjice na deonici kroz Trebinje (*Dorđević i Dašić, 2011b*). Za projekat koji sa oslanja na akumulacije veoma je bitno da se kvalitet vode u njima očuva u najvišem stanju kvaliteta, u stanju oligotrofije. Za to postoje svi uslovi, jer se to može ostvariti realizacijom postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda Nevesinja, na isti način kao što je to nedavno vrlo uspešno učinjeno u Bileći. Monitoringom kvaliteta, i primenom odgovarajućih matematičkih modela za analizu dinamičkih procesa kvaliteta u jezerima (*Dašić i Dorđević, 2009*) jezera se mogu održavati u tom najboljem ekološkom stanju, što će omogućiti niz drugih pogodnosti za njihovu turističku, ekološku i vodoprivrednu valorizaciju.

2. HIDROGEOLOŠKE I HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE BUNE, BUNICE I BREGAVE

Deo istočne Hercegovine koji zahvata projekat Gornjih horizonata pripada karstu Dinarida u kome su u potpunosti razvijeni svi oblici površinskog i podzemnog karsta, sa vodnim režimom u kome dominiraju povremeno plavljena polja, ponornice, ponori sa velikim kapacitetom gutanja, podzemno tečenje i izvori sa velikim varijacijama proticaja.

Vode Gornjih horizonata pripadaju slivovima karstnih polja: Nevesinjskog, Dabarskog, Fatničkog, Slatog i Cerničkog. Najznačajniji tokovi su Zalomka, Bregava, Buna sa pritokom Bunicom, Vrijeka i povremeni tokovi Obod (Fatničko polje) i Opačica (Dabarsko polje).

Vrelo Bune je sigurno jedno od najpoznatijih i najatraktivnijih vrela u karstu Dinarida. Formirano je na kontaktu krednih krečnjaka i eocenskog fliša na nadmorskoj visini oko 36 m (slika 2).



Slika 2. Vrelo Bune

Slivu Bune pripadaju podslivovi Nevesinjskog polja, Zalomke, Slatog polja, Lukavačkog polja i prostrani

međusliv koji zahvata delove Veleža, Podveležja i zapadne delove Sniježnice. Razgraničenje slivova Bune i Bunice u području Nevesinjskog polja je veoma komplikovano, praktično nemoguće. U jugoistočnom delu Nevesinjskog polja utvrđena je duboka paleodepresija sa depozitom Promina serije debljine preko 800 m. Najdublji delovi ove serije dostižu kote od + 50 m. Najmlađi su ugljonošni terigeni sedimenti u Nevesinjskom polju.

Uticaj sliva Zalomke na Bunu je neznatan. Zbog toga je razgraničenje slivova Bune i Bunice veoma aproksimativno, što se uočava i na slici 4.

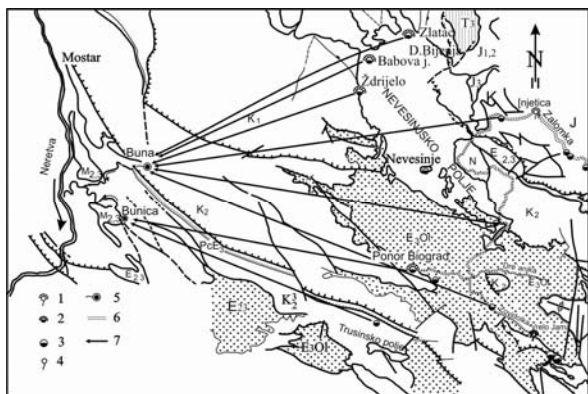


Slika 3. Vrelo Bunice

Ukupna površina sliva Bune se procenjuje na cca 900 km². Deo sliva Buna + Bunica do ponora Biograd ima površinu 544 km². Ovaj deo sliva uključuje sliv Zalomke do profila Kifino selo (267 km²) kao i sve nizvodne dotoke u korito Zalomke južno od puta Nevesinje-Kifino selo, uključujući i podslivove Zovidolke i Drežanjke. Sa brojnim traserskim istražnim radovima je dokazano da (skoro) sve što ponire duž korita Zalomke teče prema vrelo Bune, a sve što ostane u koritu do Biograda teče podzemno prema Bunici.

Deo sliva Bune koji uključuje ponore severozapadnog dela Nevesinjskog polja sa najmarkantnijim ponorima Ždrijelo, Baba i Zlatac ima površinu 98 km². Veza ovih ponora sa vrelom Bune je višestruko potvrđena. Najznačajnijem delu sliva Bune pripada planinsko područje između Nevesinjskog polja i samog vrela (masiv Podveležja i delovi Veleža) To je područje tzv. neposrednog sliva, čije severne granice (šire područje Hanskog polja) još nisu definitivno određene, a procenjuje se na 300 km². Uticaj ovog dela sliva,

zajedno sa podslivom severozapadnog dela Nevesinjskog polja daje najveći deo voda Bune i nezavisan je od hidroloških prilika na većem delu Nevesinjskog horizonta.



Slika 4. Uprošćena hidrogeološka karta dela sliva Bune i Bunice sa značajnijim podzemnim vezama.

Legenda: 1. pećina, povremeni izvor, 2. veliki ponor, 3. ponor, 4. izvor male izdašnosti, 5. veliko stalno vrelo, 6. povremeni tok, 7. utvrđena podzemna veza

Retardacione sposobnosti dela izdani koja se prazni preko vrela Bune, a koja se formira u području samog polja, su dosta bolje u odnosu na tipično karstne izdani. To je jedna od najznačajnijih izdani u karstu Dinarida. Značajno učešće u njenom formiranju imaju velike mase Promina sedimenta koji grade deo Nevesinjskog polja i planine Trusine. Neposredan izdan, koja sa svojim retardacionim kapacitetom omogućuje da Buna nikada ne presuši, grade mezozojski krečnjaci u kojima je formirana duboka depresija ispunjena sedimentima Promina serije. I jedna i druga formacija su podložne karstifikaciji, s tim da su retardacione sposobnost promina serije nešto bolje od karstifikovanih krečnjaka. U delu izdani koji se formira u krčnjačkom paleoreljefu, a koji zaplavljuje Promina, registrovane su najveće oscilacije nivoa podzemne vode na području istočne Hercegovine, do 312 m. Pri srednjim i malim vodama brzina podzemnih tokova se kreće između 3,0 i 4,4 cm/s.

Vrelo Bune je duboki sifon vokliškog tipa. Prema istraživanjima C. Touloumdjian-a (2005) istraženo je 470 m sifonskog kanala Bune. Dubina istraženog dela sifona je -73 m (u odnosu na mesto zarona). Permanentno zasićena zona se verovatno proteže 1 do 2 km u zaleđe oba vrela. Vrelo se karakteriše sa velikim varijacijama proticaja i izuzetno velikom maksimalnom izdašnošću:

$$Q_{\min} = 2,95 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{\max} = 380 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{\text{sr}} = 23,70 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vrelo Bunice (slika 3), može se reći, predstavlja kraj podzemnog toka Zalomke, nakon njenog poniranja u ponor Biograd. Ponor se nalazi na jugozapadnom obodu Nevesinjskog polja. Vrelo je formirano na kontaktu karstifikovanih krednih krečnjaka i sedimentata miocena (konglomerati i lapori sa proslojcima glina). Osim ponora Biograd sliv Bunice uključuje deo sliva masiva Trusinskog polja, a verovatno i delove Hrguda (krečnjaci), Dabrice (konglomerati, peščari, laporci i gline eocena sa boksitima) i Rotimlje (alveolinsko-numulitski krečnjaci eocena). Područje sliva karakterišu brojni reversni rasedi dinarskog pravca pružanja koji su nesumnjivo imali određenog uticaja na formiranje podzemne drenažne mreže.

Površina sliva Bunice je oko 160 km², ali pri tome treba imati u vidu da u to ne ulazi deo sliva sa koga vode dotiču Zalomkom i poniru u ponor Biograd. A to je ipak najveći deo sliva Bunice. Sa Bunicom su uvrđene veze ponora Biograd i ponora Krupac na Trusini. Ostale vode Trusinskog polja koje teku površinski pripadaju slivu Dabarskog polja. Verovatno da i deo voda koje poniru u krečnjacima duž toka Radimlje takođe teče prema Bunici. I pored brojnih bojenja podzemnih tokova na području Nevesinjskog polja ni u jednom slučaju nije utvrđena istovremena veza sa Bunom i Bunicom (slika 4).

Bunica ima karakteristike vokliškog vrela sa kotom isticanja 37 m. Voda ističe u Malom Polju iz dubokog sifonskog kanala koji su ronici delimično istražili. Dužina proronjenog dela kanala vrela Bunice je 160 m, a najveća dubina istraženog dela sifona je -70 m. To su ujedno jedini delovi karstifikovane stenske mase koji su permanentno zasićeni vodom.

Podzemne veza ponora Biograd sa vrelom Bunice predstavlja jednu od najdirektnijih podzemnih veza u karstu Dinarida. Ponor Biograd je najveći ponor sa jednim otvorom u istočnoj Hercegovini. Kota nule vodomera je 799,90 m. Utvrđeni kapacitet gutanja ovog ponora je 86 m³/s, a maksimalni kapacitet gutanja premašuje 110 m³/s. Kada ponor guta oko 80 m³/s brzina podzemnog toka je 33,67 cm/s.

Osnovne karakteristike hidrološkog režima Bunice na vodomernoj stanici Malo Polje:

$$Q_{\min} = 0,72 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{\max} = 207 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{\text{sr}} = 20,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

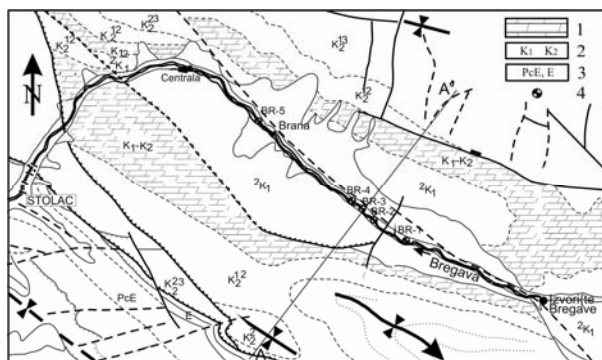
Sa dosadašnjim istražnim radovima i analizama utvrđeno da ne postoji međusobna fizička (hidrogeološka/hidraulička) veza između vrela Bune i Bunice.

Bregava pripada slivu Neretve. Prema istoku graniči se sa slivom Trebišnjice, a prema severu sa slivovima Bune i Bunice. Sliv vrela Bregave čine delovi planinskih masiva Hrguda i Sitnice i Dabarskog polja koji uključuje podslivove Trusinskog i Lukavačkog polja. Dabarsko polje je formirano duž regionalnog reversnog raseda sa nagibom 60° do 70° u pravcu severoistoka. Dubina tercijskih sedimenata se kreće između 200 i 400 m. Severni obod polja grade krečnjaci i sedimenti Promine, a južni obod veoma karstifikovani krečnjaci kredne starosti. Velika dubina vodonepropusnih sedimenata u Dabarskom polju deli posredni sliv vrela Bregave od neposrednog sliva, odnosno sliv Dabarskog polja od sliva nizvodno od Dabarskog i delom Fatničkog polja. Površina sliva Bregave se procenjuje na 418 km². Od toga posrednom slivu, odnosno slivu Dabarskog polja pripada oko 200 km², a neposrednom delu sliva oko 218 km². Granice neposrednog sliva su podložne korekcijama jer zavise od trenutnih hidroloških prilika odnosno nivoa poplavlne vode u Fatničkom polju.

Izvorišna zona reke Bregave se proteže između stalnog vrela Bitunje na koti 130 m i povremenih vrela Mali Suhavić i Veliki Suhavić na koti oko 195 m. Na slici 5 prikazana je uprošćena geološka karta područja Bregave od izvora do Stolca. Proticaji se kontrolišu na vodomernoj stanici Do. Osnovne karakteristike proticaja reke Bregave na vodomernoj stanici Do su:

$$Q_{\min} \approx 0,40 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{\max} = 59 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_{\text{sr}} = 17,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

U sušnoj 2003 godini izmerena je minimalna izdašnost $Q_{\min} = 380 \text{ L/s}$. To se događalo u vreme kada je u ponor Ponikvu u Dabarskom polju uticalo samo 43 L/s (13. 08. 2003).



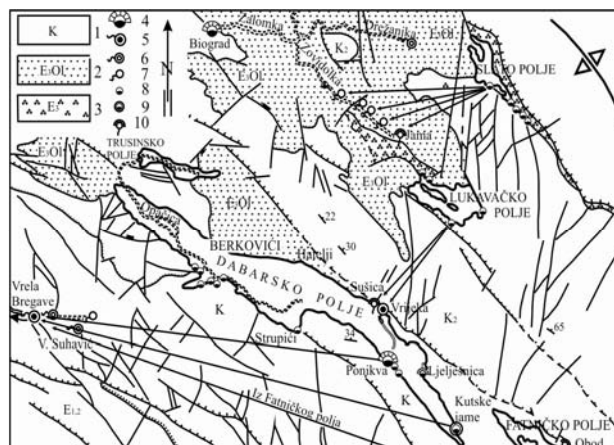
Slika 5. Uprošćena geološka karta područja reke Bregave od izvora do Stolca.

Legenda: 1. dolomiti, 2. krečnjaci, 3. fliš, 4. bušotine

Udeo u prihranjivanju karstne izdani koja se prazni preko ovih vrela ima i sliv Fatničkog polja ali samo kad je nivo poplave u polju veći od 4 m (slika 6).

Ponor Ponikva (sl. 7) na južnom obodu Dabarskog polja predstavlja najznačajniju zonu koncentrisane infiltracije neposrednog sliva Bregave. Sa vrelima Bregave utvrđene su i veze Kutskih jama i Strupići iz Dabarskog polja i ponora ispred Velike pećine u Fatničkom polju. Novijim istraživanjima (bojenje Ponikve, 2010) potvrđena je mogućnost postojanje direktne veze sa Deranskim blatom.

Najveći deo voda sliva Dabarskog polja dotiče preko stalnog vrela Vrijeka, zatim povremenim tokom Opačica (iz Trusinskog polja), kroz estavelu Ljelješnica i preko više vrela duž severnog oboda polja.



Slika 6. Uprošćena hidrogeološka karta dela sliva vrela Bregave

1. kredni krečnjaci, 2. promina konglomerati, 3. eocenski fliš, 4. ponor Ponikva, 5. veliko stalno vrelo, 6. veliko povremeno vrelo, 7. malo povremeno vrelo, 8. ponor, 9. grupa bliskih ponora, 10. veliko povremeno vrelo – pećina.

Vododelnica sliva Trebišnjice i Bregave nalazi se južno od Fatničkog polja. Karstne izdani ovih slivova su međusobno odvojene sa visokom bazom karstifikacije, mada nije isključena mogućnost međusobne hidrauličke veze ovih polja pri određenim hidrološkim uslovima. Samo u periodu plavljenja Fatničkog polja deo njegovih voda (10% - 15%) otiče kroz estavelu u jugozapadnom delu polja prema Bregavi. Ovo se događa tek kada nivo poplave dostigne nivo od približno 4 do 7 m.



Slika 7. Ponor Ponikva u Dabarskom polju

Analiza rezultata brojnih merenja potvrđuju povremeno funkcionisanje ponora Ponikve (slika 7) kao estavele (isticanje vode u Dabarsko polje), a i mogućnost neposredne hidrauličke veze ponorske zone Ponikve i ponorske zone Fatničkog polja (Pasmice).

3. RANIJE ANALIZE UTICAJA SISTEMA NA SLIVOVE BUNE, BUNICE I BREGAVE

Već od samog začetka ideje o uređenju režima voda u istočnoj Hercegovini, odnosno od samog početka rada na realizaciji Hidrosistema Trebišnjica projektanti su računali sa iznenađenjima koja nije moguće predvideti projektom. Da bi se ova iznenađenja svela na minimum organizovana su brojna osmatranja tzv. 'nultog stanja', a pre svega osmatranja režima vrela da bi se utvrdila njihova eventualna ugroženost.

Vrelima Bune, Bunice i Bregave je od prvog dana posvećena dužna pažnja. Na osnovu brojnih geoloških, hidrogeoloških i hidroloških radova i obrada podataka detaljno je definisana 'fizika problema'. Iz njenog poznavanja proizilazi jednoznačna ocena da nivo posledica na ova vrela koje nastaju izgradnjom Gornjih horizonata ni u kom slučaju ne može da kompromituje ovaj projekat. Njegove koristi za razvoju ovog dela istočne Hercegovine su neoporedivo veće u odnosu na moguće, ali minorne negativne posledice.

Zbog pojave kritičara ovog projekta, često nekompetentnih za ovu problematiku ali i dobronamernih ali pogrešno informisanih i instruiranih, obavljene su dodatne analize uz korišćenje (u tom trenutku) najsavremenijih matematičkih modela.

Model iz 1985. Primenom ARMA modela (Miličević, 1985) analiziran je uticaj prevođenja dela voda na Bunu

i Bunicu pod pretpostavkom potpunog 'zatvaranja' ponora Biograd. Ove analize pokazuju da će na vrelu Bunice doći do smanjenja maksimalnih protoka (za preko 50%) i srednjih protoka, dok će minimalne izdašnosti ostati u granicama prirodnih. Kao posledica 'zatvaranja' ponora Biograd maksimalna izdašnost Bunice bi se smanjila sa $Q = 207,0 \text{ m}^3/\text{s}$ na $Q = 86,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Ova analiza pokazuje da za prirodnu izdašnost Bunice manju od $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ne dolazi do smanjenja isticanja, bez obzira na potpuno sprečavanje poniranja u ponor Biograd. 'Zatvaranja' ponora Biograd ne utiče na režim voda Bune jer fizička veza između izdani ova dva vrela ne postoji.

Prema ovim analizama svi ulazi u Nevesinjskom polju daju Buni oko $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$, plus veći deo voda koje poniru duž korita Zalomke. To znači da najveći deo voda Bune pripada velikom međuslivu između Nevesinjskog polja i vrela. Čak i da se deo voda iz severozapadnog dela Nevesinjskog polja (Ždrijelo, Zlatac, Babova jama) uključi u projekat Gornjih horizonata, očigledno je da se iz sliva Bune prevodi zanemarljivo mala količina vode.

Primenom istog modela urađena je i numerička kvantifikacija posledica prevođenja voda Dabarskog polja u sliv reke Trebišnjice na režim voda reke Bregave. Rezultati ovog modela potvrđuju da se ovim prevođenjem smanjuju velike i prosečne vode Bregave, dok u režimu malih voda nema promena.

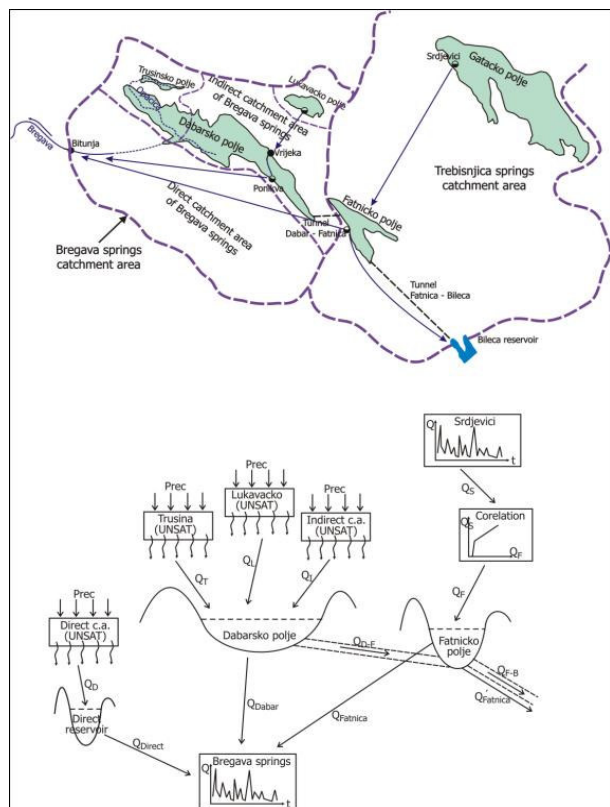
Analiza iz 2003-2004. Tokom 2003/04 godina urađena je Studija 'Uticaj prevođenja voda kroz tunel Fatničko polje - akumulacija Bileća na režim voda reke Bregave'. Analizama je obuhvaćeno čitavo slivno područje izvorišne zone reke Bregave, kao i deo sliva izvora reke Trebišnjice, koji u određenim periodima utiču na režim voda reke Bregave. Buna i Bunica nisu razmatrane tom studijom.

Razmatrano područje modelirano je od strane tri nezavisna tima stručnjaka, što je rezultiralo formiranjem tri različita modela sistema: model Instituta J. Černi, model K Sim (Tehnički univerzitet, Atina) i model Građevinskog fakulteta, Beograd.

Razmatrane su dve varijante modela Građevinskog fakulteta: pojednostavljena varijanta – sa transformacijom hidrograma u čvorovima sistema (rezervoari, polja); i pun dinamički model (Stanić i Dašić, 2005).

Nezasićena sredina modelirana je UNSAT modelom, kojim se određuje procurivanje vode u dublje slojeve. Karstni akvifer direktnog dela sliva (nizvodno od

Dabarskog polja) predstavljen je posebnim elementom - rezervoarom određene zapremine.



Slika 8. Šema jednostavnog fizičkog modela (Stanić i Dašić, 2005).

Sva tri modela su dala slične rezultate posledica prevođenja voda na režim voda reke Bregave: uticaj na ekstremno velike vode (preko 50 m³/s) postoji, ali je srazmerno (procentualno) mali; srednji protoci (5÷50 m³/s) su smanjeni, a procenat smanjenja varira od modela do modela u granicama od 5% (10%) do 50%; a režimi protoka manjih od 5 m³/s ostali su nepromenjeni.

4. MATEMATIČKI MODEL UTICAJA SISTEMA NA BUNU, BUNICU I BREGAVU

Pristup modeliranju. Ključno pitanje pri matematičkoj simulaciji složenih vodoprivrednih sistema je izbor koncepcije matematičkog modela (ubuduće: MM). Izomorfni MM se ne može uspešno napraviti ni za orografski, hidrografski i hidrogeološki mnogo jednostavnije slivove. U uslovima karsta i sam pokušaj pravljenja MM tog tipa pokazivao bi nerazumevanje same suštine matematičke simulacije. Zbog toga je MM koncipiran kao homomorfni model¹. Homomorfizam ne predstavlja uprošćavanje postupka modeliranja, već se, naprotiv, radi o mnogo tačnijem pristupu: formira se lanac MM sistema, od kojih je svaki od njih homomorfni sa realnim sistemom po nekoj unapred jasno definisanoj osnovi koja je od značaja za planiranje. Na taj način se ostvaruje znatno veća tačnost onih rezultata koji nas interesuju, onih zbog kojih se MM i radi, u odnosu na tačnost koja bi se ostvarila u slučaju izomornog modela. Korišćenje homomornih modela nije iznuđeno zbog toga što nije moguće formirati 'bolji' izomorfni model, već je rezultat težnje da se dobiju pouzdaniji rezultati. Izomorfni modeli postoje u matematici i u slučaju konfiguraciono vrlo jednostavnih sistema.

Homomorfna modelska veza {C_r h C_m}, u kojoj su C_r – realni sistem, C_m – model sistema, h – oznaka homomorfne veze, u slučaju sistema kakav je sistem Gornjih horizonata, mora da bude model tipa 'crne kutije'². To je slučaj kod sistema kod kojih za formiranje modela stoje na raspoloženju samo serije (korteži) ulaza u sistem (ulaz je vektorska vremenska serija **x**) i odgovarajuće serije (vektorske funkcije) izlaza **y**. Međutim, modeli tog tipa se primenjuju ne samo onda kada se raspolaže samo kortežima ulaznih i izlaznih serija, već i u slučaju svih onih sistema kada je

¹ Homomorfizam (μορζ - sličan, μορφη - oblik) ne zahteva da se modeliraju svi elementi, veze i procesi u sistemu, već se usredsređuje samo na one fenomene, procese i transformacije koji su potrebni za donošenje zaključaka o realnom sistemu samo u nekoj unapred definisanoj sferi traženja ekvivalencije realnog sistema i modela sistema.

² Modelom tipa 'crne kutije' traži se što je moguće tačnija analitička relacija ulazno-izlaznog preslikavanja, a ne i analitičke relacije svih međuprocasa, koji mogu da budu i izuzetno brojni, složeni i u mnogim slučajevima - neosmotrivi, bez mogućnosti analitičkog opisivanja. Zbog toga je redosled realizacije modela uvek sledeći: najpre se uradi MM tipa 'crne kutije', a zatim se, nakon odgovarajućih istražnih radova, pokušava da sagledaju bar neki od važnijih međuprocasa koji se odigravaju unutar 'crne kutije', kako bi se dobio model tipa 'provodne kutije' samo po nekim od elemenata. U slučaju tečenja u karstu sasvim je izvesno da se nikada, ni nakon najsloženijih istražnih radova, ne bi mogao da napravi potpun model tipa 'provodne kutije, jer bi on trebalo da obuhvati stotine, pa i hiljade hidrauličkih relacija kojima se analitički opisuje tečenje u svakom karstnom kanalu, i pukotini, sa relacijama transformacije protoka u brojnim kavernama.

unutrašnja struktura previše složena da bi se mogla dovoljno tačno da predstavi odgovarajućim relacijama koje bi iole tačno opisivale šta se dešava 'u samom sistemu', da bi se mogli razviti modeli tipa 'providne (bele) kutije' (Đorđević, 1990). Veliki slivovi u karstu upravo spadaju u takve sisteme (Milanović S, 2010), (Milanović S. i Vasić, 2011), kod kojih se ni nakon najslabijih istražnih radova neće dobiti takva saznanja koja bi omogućila da se npr. definišu tačne hidrauličke relacije ustaljenog i/ili neustaljenog tečenja kojima se tačno može opisati složen proces tečenja po terenu i koritima, poniranja, tečenja kroz podzemlje, isticanja na vrelima u različitim režimima, itd.

Model tipa 'crne kutije' podrazumeva matematičku formacijaciju tipa $\{xRy\}$, gde su: x – ulaz u sistem, kao vektorska veličina, y – izlaz iz sistema, R – operator preslikavanja ulaza u izlaz. Problem se upravo i svodi na određivanje operatora R , što predstavlja rešenje zadatka modeliranja tog dela sistema, odnosno te relacije ulazno-izlaznog preslikavanja. Najveći broj metoda Parametarske i Stohastičke hidrologije zasnovan je upravo na tom prilazu.

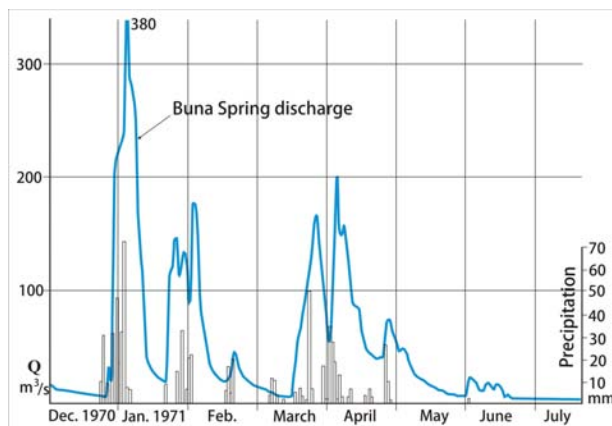
Metodološka polazišta za izradu MM geneze protoka u slivu i za određivanja uticaja realizacije sistema na procese nizvodnih reka Bune, Bunice i Bregave su sledeća.

(a) Sa visokom tačnošću definisati matematičke relacije operatora preslikavanja R , kojima se opisuju protoci (izlazi iz sistema) na Buni, Bunici i Bregavi u funkciji padavina i protoka na slivu. Model napraviti za sledeće slučaje: • prirodne uslove oticanja na Gornjim horizontima bez kasnije izvedenih radova, • za sadašnje stanje, koje postoji nakon realizacija dva tunela kojima se voda iz Dabarskog polja kontrolisano prebacuje u Fatničko polje, a iz njega u Bilečku akumulaciju, • za buduće stanje, u uslovima izgrađenosti sistema. Iterativnim putem, proveravajući uticaje pojedinih ulaza, ostvariti visoku tačnost zavisnosti xRy u prirodnom i sadašnjem stanju, kako bi se taj tip zavisnosti mogao da koristi i za model u uslovima realizovanog sistema, za analizu oticaja u uslovima realizacije planiranog sistema.

(b) Razgraničiti složenu morfologiju Gornjih horizonata (GH) na delove - hidrogeološke entitete, sa kojih padavine i oticaji nadzemno i podzemno gravitiraju prema određenim nizvodnim rekama, čija izvorišta u sistemskom smislu deluju kao izlazi iz sistema GH. To je bitno zbog toga da bi se povećala tačnost ulazno-izlaznog preslikavanja, jer se u modelu padavine ne razmatraju na celom slivu, već samo na onim delovima

za koje se može smatrati da će kroz karstne formacije biti usmerene prema nekom od nizvodnih hidrografskih sistema.

(c) Imajući u vidu vremensku inerciju fenomena oticaja sa terena tako složenog morfološkog i hidrogeološkog sklopa, proces oticaja ima karakter složenog markovskog lanca: protoci u i -tom vremenskom koraku (danu) na razmatranim rekama zavise od protoka na njihovim vrelima u prethodnim danima, tako da postoji veza tipa $Q^i = f_1(Q^{i-1}, Q^{i-2}, \dots)$. Međutim, svojstvo markovskog procesa ima oticaj i u odnosu na padavine (P) u prethodnim danima na određenim hidrogeološkim entitetima, tako da postoji okvirna veza tipa: $Q^i = f_2(P^{i-1}, P^{i-2}, \dots)$. Ta osobina ima odlučujući značaj za izbor tipa matematičkog modela. Taj fenomen se pregledno i vizuelno vidi na grafiku na slici 9 za vrelo Bune, na kome se uočava međuzavisnost padavina u prethodnim danima sa hidrogramom oticaja na vrelu. Imajući u vidu tu tesnu međuzavisnost padavina i oticaja, koja se modelira po zakonitosti složenog markovskog lanca, dobijene su funkcionalne zavisnosti koje sa visokom tačnošću omogućavaju modeliranje protoka na Buni, Bunici i Bregavi na bazi poznavanja padavina na merodavnim kišomerima i protocima na vodomerima u slivu.



Slika 9. Zavisnost proticaja na vrelu Bune i padavina

(d) Ukupan broj kišomernih stanica (80) na slivu i u relevantnom okruženju oko njega u FBiH i Crnoj Gori koristi se za analizu zakonitosti distribucije padavina na razmatranom području Gornjih horizonata. Međutim, za izradu MM mora se izvršiti redukcija broja stanica samo na one koje su merodavne, pouzdane i operativne za definisanje palih voda na pojedinim razgraničenim hidrogeološkim zonama sliva. To proističe iz dva bazna postulata modeliranja - postulata osmotrivosti i

postulata operativnosti³ (Dorđević, 1990) po kojima se visoka tačnost i operativnost modela ne može ostvariti sa velikim brojem ulaznih podataka (u ovom slučaju – kišomera), već sa manjim brojem ulaznih podataka o padavnama, ali podataka koji su pouzdani i koje se mogu osavremenjavanjem mernog sistema osposobiti za 'on line' akviziciju za upravljanje u realnom vremenu.

(e) U skladu sa polazištem (c) koji ukazuje na markovske osobine hidroloških serija, definisati MM koji će omogućiti da se dnevni protoci na kontrolnim mernim profilima Bune, Bunice i Bregave mogu odrediti na osnovu: • dnevnih protoka na samim tim stanicama, u prethodnim danima, • dnevnih protoka koji su registrovani na limnigrafima na vodotocima sa kojima postoji tesna hidraulička veza, • padavina u merodavnim hidrogeološkim zonama (entitetima) sliva, ali merenih samo na kišomerima koji su odabrani kao merodavni za definisanje te ulazne veličine.

Opšta struktura modela. Imajući u vidu gornja polazišta, za definisanje modela odabran je pristup ARMA, koji je jedan od najkompleksnijih pristupa u klasi homomorfih modela za ovakvu kategoriju zadatka modeliranja. ARMA pristup je u ovom slučaju bio najprimereniji podacima koji su na raspoloženju i najpogodniji sa gledišta markovskih osobina procesa ulaza u sistem i izlaza iz njega.

Osnovna funkcionalna zavisnost ARMA modela (*Autoregressive Moving Average*) je linearni diskretni model, napisan u opštem obliku:

$$Y(t) + A_1 \cdot Y(t-1) + A_2 \cdot Y(t-2) + \dots + A_n \cdot Y(t-n) = B_0 \cdot X(t) + B_1 \cdot X(t-1) + B_2 \cdot X(t-2) + \dots + B_m \cdot X(t-m) \quad (1)$$

gde su : Y – izlazi iz sistema, X – ulazi u sistem (vektorska veličina, može imati više komponenti, npr. padavine na više hidrogeoloških entiteta, protoci na vodomerima na rekama koje su u hidrauličkoj vezi sa razmatranim izlaznim profilom), n – redni broj dana podataka izlaza (broj uzastopnih dana koji se obuhvataju u seriji izlaza), m – redni broj dana podataka ulaza (broj uzastopnih dana koji se obuhvataju u seriji ulaza, tako da je m broj članova u složenom markovskom lancu), A, B – koeficijenti lineranog modela, t – aktuelni vremenski trenutak proračuna.

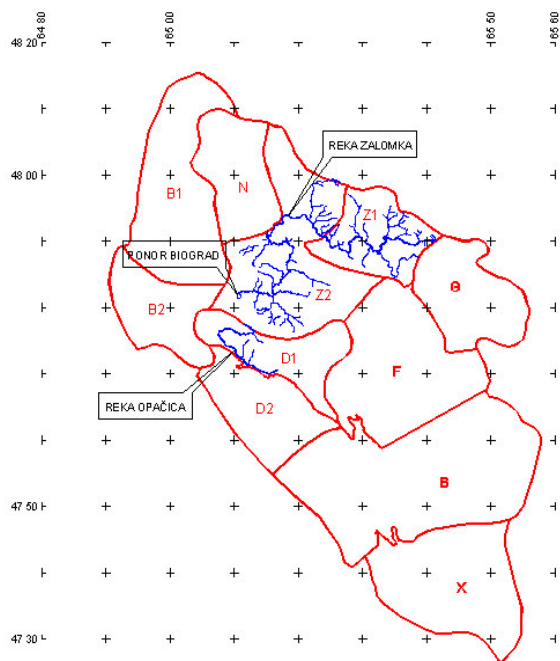
Parametri A i B se dobijaju kao rezultat ARMA modela na osnovu minimizacije kvadrata greške upoređivanjem odstupanja modeliranih veličina u odnosu na izmerene, što istovremeno daje maksimalnu korelaciju između merenih ulaznih i izlaznih parametara.

Sušтина analize se svodi se na sledeće korake:

- na bazi opšte relacije (1) najpre se definišu dovoljno tačne analitičke modelske relacije (operatori **R** u preslikavanju xRy) kojima se definiše geneza dnevnih protoka na svakoj pojedinačnoj od tri razmatrane reke u uslovima sadašnjeg stanja (za Bunu i Bunicu prirodno stanje, za Bregavu stanje sa realizovanim tunelima);
- svaki model se tarira i proveru stapan njegove tačnosti uobičajenim analizama korelacione saglasnosti,
- na osnovu modela u uslovima postojanja sistema dobiju se serije dnevnih protoka u uslovima postojanja sistema,
- izvrši se upoređivanje krivih trajanja protoka na tim rekama (mernim stanicama) u sadašnjim uslovima i u uslovima realizacije vodoprivrednog sistema, kako bi se sagledale promene vodnih režima. Za vodomernu stanicu Do na Bregavi urađen je i dodatni model, pored modela u prirodnom stanju, za sadašnji realan slučaj, kada postoje dva već izvedena tunela. U cilju što realnijeg modela, razmatrana su dva slučaja: slučaj bez izvedene obloge na tunelu i sa realizovanom oblogom na celom tunelu.

Razgraničenje hidrogeoloških zona. Za izradu MM veliki značaj je imalo razgraničenje čitavog prostora Gornjih horizonata na hidrogeološke zone iz kojih padavine i oticaji gravitiraju prema vrelima Bune, Bunice i Bregave. To razgraničenje je neophodno da bi se ostvarila zahtevana visoka tačnost operatora preslikavanja **R**, jer se dnevne padavine ne mogu razmatrati na celom slivu, već samo na onim zonama koje su u hidrološko-hidrauličkoj vezi sa svakim pojedinačnim vrelom tri reke. Izvršena je podela na 11 hidrogeoloških zona (slika 10), po kriterijumu prema kom vrelu je usmereno oticanje iz tog entiteta (videti i slike 4,5 i 6).

³ Postulat osmotrivosti definiše zahtev da se u MM smeju unositi samo podaci koji su osmotrivi u realnom vremenu upravljanja. Postulat operativnosti zahteva da MM treba da bude tako koncipiran i sa gledišta ulaza i svih operacija u njemu, da vreme potrebno za izvršenje matematičkih simulacija bude kraće od vremena koje je neophodno za donošenje upravljačkih odluka.



Slika 10. Hidrogeološke zone prostora Gornjih horizonata

Iz hidrogeoloških zona B2, Z1 i Z2 protok je podzemnim i nadzemnim putevima usmeren prema VS Malo Polje na Bunici, dok su protoci iz zona B1 i N, ali i iz Z1 i Z2 (preko Zalomke), usmereni prema Buni, prema VS Blagaj. Iz zona D1 i D2 voda je usmerena prema Bregavi, prema VS Do.

Padavine kao merodavni ulazi u MM. Ključni ulazi u matematičke modele tečenja prema Buni, Bunici i Bregavi, posmatrajući svaku reku pojedinačno, bile su analize padavina. Na bazi 80 stanica na Gornjim horizontima i u njihovoj okolini urađene su i analizirane izohijetske karte godišnjih protoka za prosečnu hidrološku godinu (na bazi niza 1970/71 do 1983/84). Važan smisao te analize bio je utvrđivanje zakonitosti formiranja padavina na području Gornjih horizonata. Ta analiza je omogućila izbor merodavnih stanica po pojedinim hidrogeološkim entitetima i određivanje udela svake kišomerne stanice u formiranju količine palih voda za svaku od hidrogeoloških zona. Izohijetske karte su urađene kao dvokomponente karte, gde je jednu komponentu diktirao orografski uticaj, a drugi svi ostali uticaji, uslovno nazvani neorografskim uticajima. U sprovedenim analizama određivanja orografskog uticaja dobijena je vrednost gradijenta od 40 mm/100 mm.

U cilju provere da li su bilansi padavinama tačno određeni kada se izvrši redukcija broja kišomera koji se koriste u modelu, izvršeno je upoređivanje vrednosti

godišnjih padavina na hidrogeološkim zonama dobijenih metodom izohijetske karte i metodom Tisenovih poligona. Dobijena su odlična slaganja, sa maksimalnom greškom $\pm 5\%$.

Relacije modela. Polazeći od opšte relacije ARMA modela, za tri istraživana vodotoka, Bunu, Bunicu i Bregavu najpre su uspostavljene funkcionalne zavisnosti MM u prirodnom stanju. Prednost takvog pristupa je što omogućava da se kroz iterativan proces modeliranja ispita nekoliko kombinacija mogućih ulaznih promenljivih, u procesu traganja za najboljim slaganjem modela i prirode.

Kao izlazne veličine iz modela sistema uzete su dnevne vrednosti proticaji na vrelima te tri reke. Definisane ulazne veličine bilo je predmet prethodnih analiza kojima su razmatrani svi ulazi (padavine na izdvojenim zonama, protoci na pojedinim vodomerima) koji imaju bitan uticaj na sam proces ulazno-izlaznog preslikavanja. U iterativnom postupku je analiziran uticaj predistorije na rezultate modeliranja, pošto se radi o složenom markovskom procesu, kod koga postoji 'inercija odgovora sistema' i kašnjenje izlaza u odnosu na ulaze u sistem. U slučaju markovskih procesa obavezno je ispitivanje optimalnog broja članova lanca ('predistorije ulaza') koji se obuhvata modelom. U razmatranim modelima se pokazalo da se najbolje slaganje u MM postiže ukoliko se obuhvate samo dva dana unazad (veza tip: $Q^i = F(Q^{i-1}, Q^{i-2})$). To isto važi i za padavine. Unošenje većeg broja članova ne utiče na poboljšanje kvaliteta modeliranja. Taj zaključak je u saglasnosti sa rezultatima ranijih istraživanja na terenu, kada su bojenjem vode na ponorima dobijeni okvirni podaci o vremenu koje prođe do pojave boje na vrelima. Ta ista osobina markovske serije važi i za padavine i za proticaje koji se obuhvataju modelom, što je i logično imajući u vidu stepen razvijenosti podzemne karstne strukture kroz koju se voda usmerava prema izlaznim vrelima.

Nakon definisanja modela koji daju najviši nivo saglasnosti izmerenih i modeliranjem dobijenih dnevnih protoka, klasičnim hidrološkim metodama su definisane krive trajanja dnevnih proticaja na sledećim profilima: VS Rilje na reci Zalomci, VS Pošćenje na reci Zalomci, VS Malo Polje na reci Bunici, VS Blagaj na reci Buni i VS Do na reci Bregavi. Ove krive su ključne za sagledavanje režima prirodnih voda na svakom od razmatranih profila, koje su korišćene za kasnije analize uticaja izgradnje višenamenskog sistema Gornji horizonti.

Dobijene su sledeće relacije matematičkih modela za tri razmatrane reke, u prirodnim uslovima. Sve dimenzije su date u (m³/s).

Za reku Bunicu, razmatrano na VS Malo Polje:

$$Q_{MP}^i = A_1 \cdot Q_{MP}^{i-1} + A_2 \cdot Q_{MP}^{i-2} + B_1 \cdot Q_{Pos}^i + B_2 \cdot Q_{Pos}^{i-2} + C_1 \cdot P_{B2}^i + C_2 \cdot P_{B2}^{i-1} \quad (2)$$

Za reku Bunu, razmatrano na VS Blagaj:

$$Q_{Bl}^i = A_1 \cdot Q_{Bl}^{i-1} + A_2 \cdot Q_{Bl}^{i-2} + B_1 \cdot Q_{Rilj}^i + B_2 \cdot Q_{Rilj}^{i-1} + B_3 \cdot Q_{Rilj}^{i-2} + C_1 \cdot P_{B1}^i + C_2 \cdot P_N^i + C_3 \cdot P_{B1}^{i-1} + C_4 \cdot P_N^{i-1} \quad (3)$$

Za reku Bregavu, razmatrano na VS Do:

$$Q_{Br}^i = A_1 \cdot Q_{Br}^{i-1} + A_2 \cdot Q_{Br}^{i-2} + B_1 \cdot Q_{Dab}^i + B_2 \cdot Q_{Dab}^{i-1} + B_3 \cdot Q_{Dab}^{i-2} + C_1 \cdot P_{D1}^i + C_2 \cdot P_{D1}^{i-1} + C_3 \cdot P_{D1}^{i-2} \quad (4)$$

U gornjim relacijama korišćene u oznake:

Q_{MP} - dnevni protok u Malom Polju na Bunici,

Q_{Pos} - dnevni protok na profilu Pošćenje,

P_{B2} - dnevne padavine u zoni B2,

Q_{Bl} - protok u Blagaju na Buni,

Q_{Rilj} - protok na vodomeru Rilje,

P_{B1} - padavine u zoni B1,

P_N - padavine u zoni N,

Q_{Br} - protok na Bregavi, VS Do,

Q_{Dab} - protok na profilu Dabar,

P_{D1} i P_{D2} - padavine u zonama D1 i D2.

Koeficijenti $A_1, A_2, B_1, \dots, C_2, C_3$, kao i a_1, b_1, b_2, b_3 u jednačini (5) su konstante, dobijene optimizacijom slaganja kroz iterativni postupak, čije apsolutne vrednosti ovde nisu navedene, jer nisu od značaja za prikaz metodike.

Testiranja kvaliteta modeliranja dnevnih protoka na Buni, Bunici i Bregavi za slučaj prirodnog (neporemećenog) stanja pokazuju izvanredno slaganje. Dobijeni su sledeći koeficijenti korelacije realnih i modelima dobijenih dnevnih protoka:

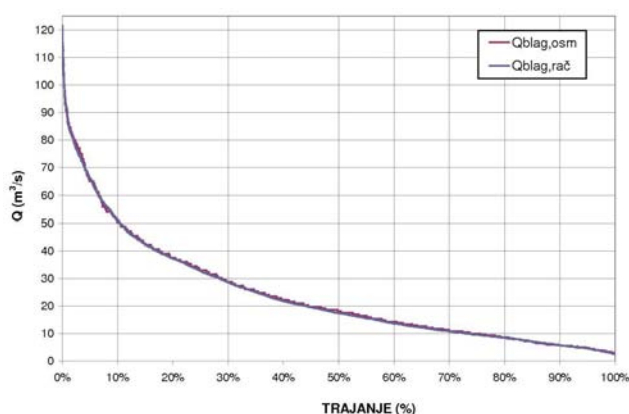
Bunica, Malo Polje: $R_{MP} = 0,962$

Buna, Blagaj: $R_{BL} = 0,992$

Bregava, Do: $R_{Br} = 0,991$

Na slici 11 se prikazuju krive trajanja osmotrenih i modeliranih dnevnih protoka na VS Blagaj na Buni, koje i na očit način predočavaju visok kvalitet ostvaren modelom. Tako visoka slaganja su ostvarena

upravo zahvaljujući koncepciji odabranog modela, kojima se po principu homomorfije želelo da se sa visokom tačnošću analitički razjasni konkretan fenomen koji treba rešiti – analizu uticaja sistema na svaki od tri razmatrana vodotoka. Tako visoka tačnost modeliranja u prirodnim uslovima omogućava pouzdana zaključivanja o delovanju sistema na vodne režime nakon realizacije planiranih objekata na Gornjim horizontima.



Slika 11. Krive trajanja osmotrenih i modeliranih dnevnih protoka na Buni na VS Blagaj

Realizacija dva tunela, kao dela sistema Gornji horizonti nema uticaja na vodne režime Bune i Bunice, koje se prihranjuju sa Nevesinjskog polja (slika 4) i međuslivnog područja koje se i danas nalaze prirodnom stanju. Međutim, situacija u Dabarskom polju nastala izgradnjom tunela Dabar-Fatnica i derivacionog tunela Fatnica-Bilečka akumulacija, donekle je izmenila prirodni režim površinskih i podzemnih voda. Zbog toga je razmatranje režima voda Bregave zahtevalo jedan dodatni korak: izradu simulacionog modela kojim će se razmotiti promene režima površinskih voda Dabarskog i Fatničkog polja zbog realizacije dva tunela, i sagledati posledice na režim voda vrela Bregave. Zbog toga je najpre urađena simulacija prevođenja voda iz Dabarskog polja, uz sledeće pretpostavke i ulazne podatke:

- Bilečka akumulacija kao nizvodni granični uslov ne ograničava prevođenje voda iz Dabarskog i Fatničkog polja;
- kapaciteti ponorskih zona u Dabarskom i Fatničkom polju su dati u funkciji nivoa vode u poljima, kao sumarna krivih proticaja svih ponora u svakom od polja;
- prirodni dotoci u Dabarsko i Fatničko polje su rekonstruisani na bazi izmerenih vodostaja u periodu povodnja na nivou dnevnih podataka;

- kapaciteti izvedenih tunela su određeni na bazi geometrije iz glavnog projekta, s obzirom da ne postoje projekti izvedenog stanja. Sračunate su za svaki tunel dve krive kapaciteta tunela, jedna za neobložene tunele (postojeće stanje) i druga sa izvedenom oblogom (buduće stanje).

Transfer voda iz Dabarskog i Fatničkog polja u Bilečku akumulaciju je urađen simulacionim matematičkim modelom koji je na bazi definisanih ulaza u sistem, definisao stanje sistema (zapremine vode u Dabarskom i Fatničkom polju) i određivao izlaze iz sistema (prevođenje voda u Bilečku akumulaciju). Vremenska diskretizacija je sprovedena na dnevnom nivou, dok su promene stanja i izlazi iz sistema rađeni na časovnom nivou. Za rešenje postavljenog zadatka korišćena je kvazi-stacionarna metoda, za hidraulički gledano, sistem spojenih sudova sa poznatim ulazima u sistem (dnevni dotoci u polja) i nepoznatim stanjima i izlazima iz sistema (nivoi vode u poljima, proticajima kroz tunele i proticajima na ponorima).

Model za simulaciju sadašnjeg stanja urađen je za dva slučaja: • neobložen tunel, • tunel nakon oblaganja. Prikazuje se relacija modela (jedn.5) koja simulira dnevne protoke na VS Do na Bregavi za slučaj nakon oblaganja tunela.

$$Q_{Br,t}^i = A_1 \cdot Q_{Br,t}^{i-1} + A_2 \cdot Q_{Br,t}^{i-2} + B_1 \cdot Q_{Dab}^{i-1} + B_2 \cdot Q_{Dab}^{i-2} + C_1 \cdot Q_t^i + C_2 \cdot Q_t^{i-1} + C_3 \cdot Q_t^{i-2} + a_1 \cdot P_{D2}^i + b_1 \cdot P_{D1}^i + b_2 \cdot P_{D1}^{i-1} + b_3 \cdot P_{D1}^{i-2} \quad (5)$$

Proračuni su obavljani uz pretpostavku da Bilečka akumulacija može da primi sve prevedene količine vode iz Dabarskog i Fatničkog, što je najnepovoljniji scenario sa gledišta uticaja na vrelo Bregave. U realnosti se može očekivati da se zbog pune Bilečke akumulacija u vreme povodnja, deo voda zadržava u Fatničkom polju, što ima za posledicu i zadržavanje dela voda u Dabarskom polju, čime se povećavaju gubici na ponorima, a time se povećavaju protoci na vrelu Bregave. Znači, zaključci o uticaju sistema na režime voda na Bregavi (VS Do) su na strani sigurnosti.

Model za simuliranje protoka na Bregavi (VS Do) je testiran i daje odlično slaganje. Za sadašnje stanje tunela (neobložen tunel) koeficijent korelacije je $R=0,98$, što pokazuje izvanredno slaganje modeliranih i realnih dnevnih protoka.

5. ANALIZA UTICAJA SISTEMA

Ključni objekti sistema Gornji horizonti koji utiču na vodne režime su sledeći:

- akumulacije u Nevesinjskom polju: akumulacija Nevesinje na profilu Pošćenje i akumulacija Zalomka na profilu Rilja; • hidroelektrana Dabar koja koristi vodu iz akumulacije Nevesinje i prevodi vode Zalomke u Dabarsko polje i hidroelektrana Nevesinje koja koristi vode akumulacije Zalomka i upušta ih u akumulaciju Nevesinje; • kanal kroz Dabarsko polje; • derivacioni tunel koji povezuje Dabarsko i Fatničko polje (izveden sa zatvaračnicom na izlaznom portalu); • kanal kroz Fatničko polje, i • derivacioni tunel koji povezuje Fatničko polje sa Bilečkom akumulacijom (izveden sa zatvaračnicama na ulaznom i izlaznom portalu).

U analizi uticaja sistema na Bunu i Bunice pošlo se namerno od pretpostavke da su razmatrani akumulacioni prostori u potpunosti vododrživi. To je urađeno zato što ta pretpostavka daje kao rezultat najnepovoljniji uticaj budućih akumulacija na postojeća vrela Bune i Bunice. Predviđeni su zaptivni radovi za smanjenje gubitaka vode iz akumulacija, ali je pozato da se to u akumulacijama u karstu nigde nije moglo u celosti postići. Zbog toga se može sa sigurnošću reći da analiza uticaja sistema na razmatrana vrela Bune i Bunice predstavlja pesimistički, najnepovoljniji scenario. U stvarnosti gubici iz akumulacija povećavajuće protoke na vrelima, i to će posebno biti povoljno u malovodnim periodima. Zato su sva zaključivanja o vodnim režimima Bune i Bunice nakon realizacije sistema na strani sigurnosti: protoci koji će se realizovati mogu biti samo nešto veći od onih koji se dobijaju modelom, a to poboljšanje će biti procentualno izraženije u malovodnim periodima.

Ključna akumulacija u Nevesinjskom polju je akumulacija Nevesinje na profilu Pošćenje iz koje se zahvataju vode za HE Dabar i prevode u Dabarsko polje. Režim korišćenja te akumulacije definisan je Vodoprivrednom saglasnošću. Zapremina akumulacije Pošćenje je uslovljena periodom godine: u vegetacionom periodu sa KNU 830 mm (zapremina 21,5 hm³), a u hladnom, vanvegetacionom periodu, kada se na tom području formiraju talasi velikih voda - sa kotom 836 mm (61,8 hm³).

Sa ovako definisanim parametrima akumulacije Nevesinje i definisanim instalisanim proticajem HE Dabar od 55 m³/s urađene su simulacije upravljanja

akumulacijom. Izražena hidrološka neravnomernost prirodnih dotoka na profilu brane Pošćenje, bez dotoka u letnjem periodu i sa velikim poplavama u zimskom i prolećnjem periodu, uslovili su da stepen prevođenja voda bude na nivou od 85% od srednjeg višegodišnjeg dotoka $11,02 \text{ m}^3/\text{s}$ (period 1946-1990.god.). Simulacija prevođenja voda iz Nevesinjskog polja u Dabarsko polje urađena je na bazi definisanih uslova iz vodoprivredne saglasnosti:

- količina prevedene vode ne može biti veća od $12,60 \text{ m}^3/\text{s}$,
- na početku sušnog perioda treba obezbediti punu akumulaciju Nevesinje (KNU 830 mmm), upravo zbog toga da bi se koristila za poboljšanje malih voda vrela Bunice i zadovoljenje vodoprivrednih potreba (navodnjavanje i vodosnabdevanje Dubrava i Dabarskog polja).

Prvi uslov je u svim analizama zadovoljen, jer se ograničenim kapacitetom prevođenja od $55 \text{ m}^3/\text{s}$ (instalirani proticaj HE Dabar) i ograničenom veličinom korisne zapremine akumulacije ne može prevesti sva raspoloživa prirodna količina vode, a koja je na profilu Pošćenja $11,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Drugi uslov je, takođe, u svim analizama ispunjen jer je predviđeno da se na početku sušnog perioda (vegetativni period) ostavi puna akumulacija Nevesinje. Tokom sušnog perioda nije predviđen rad HE Dabar, odnosno prevođenje voda i Dabarsko polje iz prostog razloga - tada je korito reke Zalomke suvo (period pre izgradnje akumulacije Zalomka).

Simulacija rada akumulacije Nevesinje je rađena sa dnevnim podacima proticaja, pri čemu je kriterijum bio minimiziranje prelivanje na brani Pošćenje u kišnom periodu (vanvegetacioni period). Urađene su dve podvarijante rada akumulacije Nevesinje: sa uzvodno izgrađenom branom Rilja i akumulacijom Zalomka i bez nje. Akumulacija Zalomka sa KNU 970 mmm ima zapreminu akumulacije od 185 hm^3 , čime u potpunosti izravnava prirodne dotoke na profilu Rilje sa srednjim višegodišnjim protokom od $4,30 \text{ m}^3/\text{s}$, što predstavlja 39% prirodnog proticaja na profilu Pošćenje. Akumulacija Zalomka zbog svoje veličine ima prevashodno vodoprivrednu ulogu, iz koje se prosečno za potrebe navodnjavanja i vodosnabdevanje prosečno godišnje uzima oko 27 hm^3 , čime se količine zahvaćene vode za HE Dabar smanjuju.

Na osnovu simulacione analize rada HE Dabar sa akumulacijom Nevesinje na profilu Pošćenje i rada HE Nevesinje sa akumulacijom Zalomka na profilu Rilja

generisani su hidrološki nizovi prevođenja voda Nevesinjskog polja u Dabarsko polje za hidrološke godine. Ovi nizovi su definisani uzimajući u obzir raspoložive podatke o dnevnim padavinama po hidrogeološkim zonama i serije osmotrenih proticaja na VS Malo Polje. Na bazi tih serija dnevnih vrednosti ulaza pomoću ARMA modela utvrđena je funkcionalna zavisnost kojom se opisuje režim proticaja na vrelu Bunice (oznake iste kao uz jedn. 2÷4, sve u m^3/s):

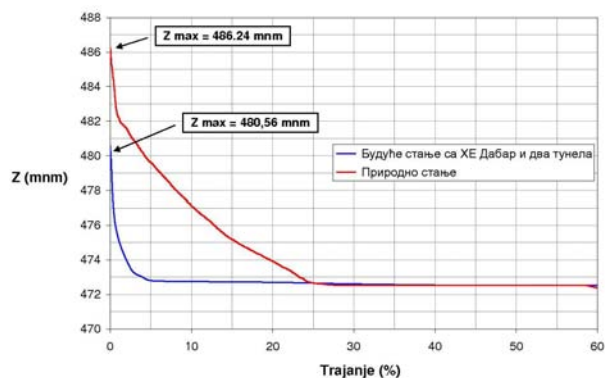
$$Q_{MP}^i = A_1 \cdot Q_{MP}^{i-1} + A_2 \cdot Q_{MP}^{i-2} + B_1 \cdot Q_{Pos}^{i-1} + C_1 \cdot P_{B2}^i + C_2 \cdot P_{B2}^{i-2} \quad (6)$$

gde su: Q_{MP} – dnevni proticaj Bunice na VS Malo Polje; Q_{Pos} – dnevni osmotreni proticaj na VS Pošćenje; P_{B2} – dnevna količina padavina na hidrogeološkoj zoni B2.

U skladu sa uslovima upravljanja akumulacijom Nevesinje iz koje će se zahvatati vode za HE Dabar i prevoditi u Dabarsko polje, u modelu korišćeni niz proticaja Q_{MP} koji odgovara budućem stanju izgrađenosti sistema dat je izrazom:

$$Q_{MP} = \begin{cases} Q_{MP} - 55 & \text{za } Q_{Pos} \geq 55 \text{ m}^3 / \text{s} \\ Q_{MP} - Q_{Pos} & \text{za } Q_{Pos} < 55 \text{ m}^3 / \text{s} \end{cases}$$

Za slučaj postojanja HE Dabar i tunelskih derivacija koje prevode vodu iz Dabarskog polja u Fatničko, a zatim u Bilečku akumulaciju dobijeni su novi režimi nivoa u Dabarskom polju, kao i dnevni protoci u razmatranom nizu 1971÷1984. Na slici 12 date su krive trajanja nivoa u Dabarskom polju pre i nakon realizacije sistema. Zapaža se značajno poboljšavanje režima nivoa: smanjenje visine plavljenja za oko 6 m , i vrlo značajno smanjenje trajanja plavljenja.



Slika 12. Kriva trajanja nivoa u Dabarskom polju pre i nakon realizacije sistema

ARMA modelom je dobijena sledeća funkcionalna zavisnost kojom se definiše režim proticaja na vrelu Bregave u opisanom budućem stanju sistema:

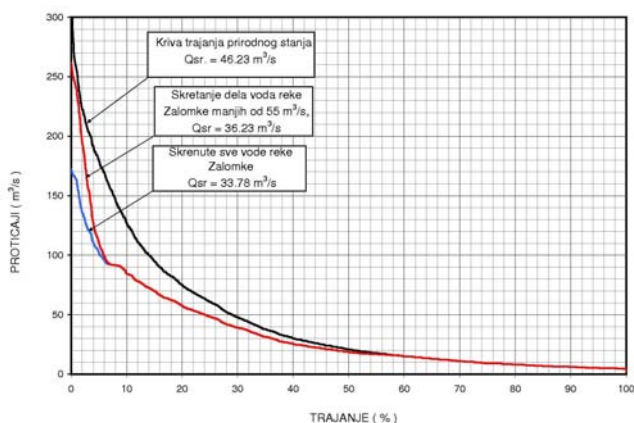
$$Q_{Br}^i = A_1 \cdot Q_{Br}^{i-1} + A_2 \cdot Q_{Br}^{i-2} + B_1 \cdot Q_{pon}^{i-1} + C_1 \cdot P_{D1}^{i-1} + C_2 \cdot P_{D1}^{i-2} \quad (7)$$

gde su: Q_{Br} - proticaj reke Bregave na profilu VS Do; Q_{pon} - količina vode koja ponire ka vrelu Bregave; P_{D1} - količina padavina na hidrogeološkoj zoni D1.

Za prikazanu funkcionalnu zavisnost pomoću koje je definisan niz proticaja koji opisuje režim voda reke Bregave u budućem stanju sistema Gornji Horizonti sračunat je koeficijent korelacije $R=0,961$.

Na osnovu sprovedenih analiza mogu se izvući sledeći zaključci o uticaju sistema na pomenute tri reke.

Buna. Prema rezultatima svih dosadašnjih analiza i studija, izgradnjom sistema Gornjih Horizontata ne narušava se režim voda vrela Bune, odnosno taj uticaj je zanemarljiv. Ovakav zaključak je, pre svega, posledica postojanja velikog međusliva između profila Rilja i Pošćenje koji ostaje u prirodnom stanju, kao i režima voda severozapadnog dela Nevesinjskog polja i velikog međusliva od Nevesinjskog polja do vrela Bune. To se pregledno vidi i na slici 13 na kojem su prikazane krive trajanja protoka u prirodnim i izmenjenim režimima, iz kojeg se vidi da se za trajanja veća od oko 55% potpuno poklapaju dijagrami trajanja, nezavisno od režima prevođenja.

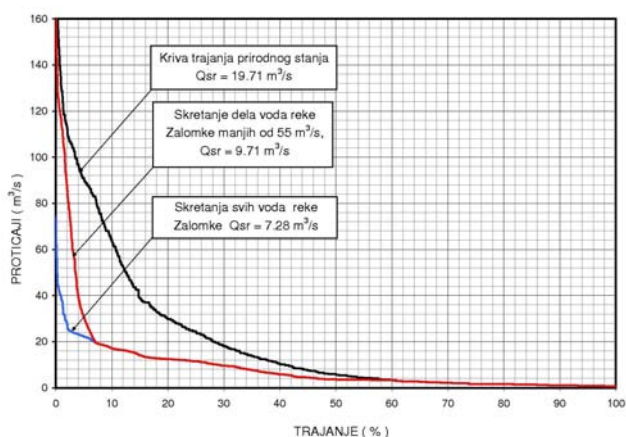


Slika 13. Krive trajanja dnevnih protoka na Buni (VS Buna)

Bunica. Simulacioni model daje vrlo dobro slaganje hidrograma reke Bunice na VS Malo Polje u uslovima planirane izgrađenosti sistema Gornji Horizonti. To

omogućava pouzdano zaključivanje o vodnim režimima Bunice nakon izgradnje objekata novog sistema. Analizama krivih trajanja protoka Bunice na profilu VS Malo Polje u prirodnom, osmotrenom stanju i u stanju budućeg sistema Gornjih Horizontata (slika 14), uočavaju se dve bitne činjenice, bitne za zaključivanje:

- Smanjenje protoka u odnosu na prirodne režime postoji samo u domenu velikih i srednjih protoka (približno do protoka trajanja oko 50% na dijagramu trajanja).
- U periodima malih voda, već za trajanja veća od oko 55% sa krive trajanja, krive trajanja dnevnih protoka u prirodnim režimima i nakon izgradnje sistema se praktično poklapaju. To znači da u tom opsegu malih voda objekti na Gornjim Horizontima ne utiču na promenu vodnih režima Bunice. Znači, proširenje sistema Trebišnjice na Gornje horizonte nema nepovoljne ekološke posledice na reci Bunici.



Slika 14. Kriva trajanja dnevnih protoka Bunice na VS Malo Polje

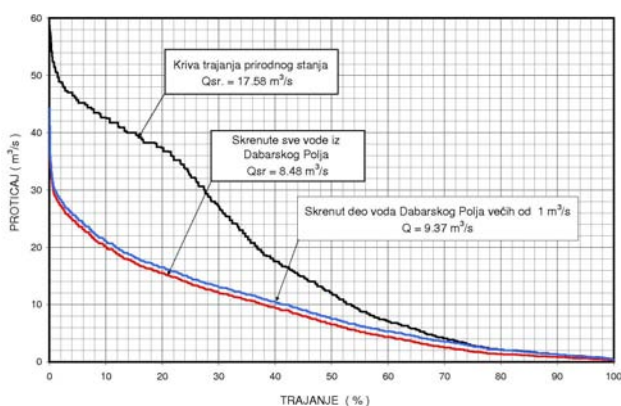
Bregava. Za prevođenje voda iz Dabarskog polja u sliv Trebišnjice data je voprivredna saglasnost na prosečnu godišnju količinu od $Q_{sr} = 6,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Polazište sprovedenih hidroloških analiza bilo je da sve vode koje u prirodnim uslovima dospevaju u Dabarsko polje poniru u nizu ponora u tom polju i u celosti dospevaju na vrela Bregave nešto uzvodnije od kontrolne hidrološke stanice Do. Nizvodno od VS Do, pa do VS Stolac, kao i dalje nizvodno, konstatovani su gubici vode iz rečnog korita. Samo na delu toka 4 km nizvodno od VS Do izmereni gubici kroz dno se kreću između 0,5 i $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Nizvodnije intenzitet poniranja je znatno manji. Ova analiza je ograničena na uticaj prevođenja voda Dabarskog polja samo na deo Bregave u zoni VS Do. Razmatrane su dve varijante skretanja voda Dabarskog Polja i to:

- skretanje svih voda Dabarskog

polja, • skretanje dela voda koje dospevaju u Dabarsko polje, a veće su od $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Predviđeno je da se sve vode reke Zalomke koje se prevode do HE Dabar dalje evakušu prema Fatničkom polju, te nemaju nikakav uticaj na bilans voda Dabarskog polja. Transformacijom niza dnevnih proticaja kroz akumulacioni prostor Dabarskog polja sračunat je niz protoka koji ističu iz Dabarskog polja. Njegovim oduzimanjem od prirodnog niza dnevnih proticaja registrovanih na reci Bregavi na VS Do dobijen je novi niz protoka koji opisuje stanje nakon skretanja svih voda Dabarskog polja.

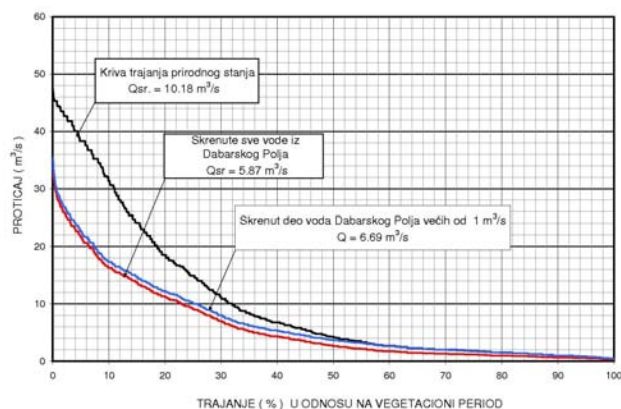
Na sličan način je razmatrana i druga varijanta skretanja voda Dabarskog polja: skretanje dela voda koji prevazilazi dotok od $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Na taj način je generisan novi niz proticaja koji poniru u Dabarskom Polju i dospevaju na profil VS Do na reci Bregavi (pod pretpostavkom da sve poniruće vode ističu na vrelima Bregave). Ovako generisani nizovi dnevnih proticaja na Bregavi poslužili su za proračun tri krive trajanja: za neporemećen, prirodan režim, i za obe varijante skretanja voda Dabarskog polja (slika 15). Mogu se izvući sledeći zaključci.



Slika 15. Bregava: krive trajanja dnevnih protoka na VS Do u prirodnom stanju i za dva režima prevođenja

Po prvoj radikalnijoj varijanti, kada bi se prevodile sve vode iz Dabarskog i Fatničko polje, došlo bi do smanjenja malih voda, onih manjih od $3 \text{ m}^3/\text{s}$ za oko $1/3$, u prosečnom trajanju oko 25% (oko 90 dana godišnje). Druga varijanta, kada se skreću samo vode koje su veće od $1 \text{ m}^3/\text{s}$, mnogo je povoljnija. U tom slučaju, koji je i planiran, na VS Do ostaju potpuno neporemećene sve male vode dužeg trajanja od oko 75%. To je ekološki dobra solucija, jer male vode održava u režimima koji su svim metodama koje se

primenjuju u svetu prihvaćeni kao ekološki prihvatljivi (garantovani) protoci (Đorđević i Dašić, 2011b) u zoni uticaja akumulacija. Međutim, analize pokazuju da je stanje očuvanosti režima protoka na Bregavi još znatno povoljnije u vegetacionom periodu. U tom toplom delu godine u slučaju da se u Dabarskom polju prevode samo vode veće od $1 \text{ m}^3/\text{s}$, male vode na VS Do se ne menjaju za sve protoke dužeg trajanja od 55% (slika 16), što se uklapa u sve kriterijume očuvanja ekoloških protoka nizvodno od akumulacija i vodozahvata. Međutim, u realnom sistemu stanje će se poboljšati čak i u odnosu na sadašnje neporemećeno stanje, jer se planiranim merama male vode mogu povećati i u odnosu na prirodne protoke, što je predmet razmatranja u narednoj tački.



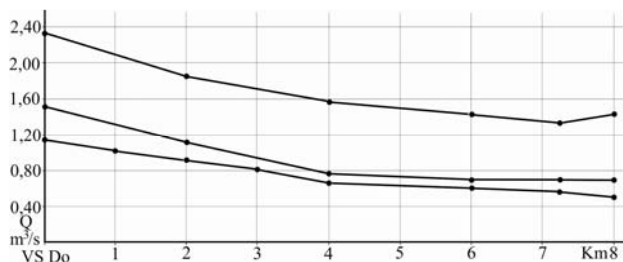
Slika 16. Bregava: krive trajanja na VS Do u vegetacionom periodu u prirodnom stanju i za dva režima prevođenja

6. POVEĆANJE MINIMALNOG PROTICAJA BREGAVE KROZ STOLAC

Projektom Gornjih horizonata predviđeno je saniranje brojnih ponora u Dabarskom polju, a najznačajnija ponorska zona, Ponikve, biće izolovana i uređena za kontrolisano upuštanje vode u nju. To će prouzrokovati promenu prirodnog režima izvorišta i toka Bregave. Kao i u većini sličnih slučajeva ove promene se odnose na maksimalne i prosečne izdašnosti vrela, dok će minimalne ostati oko prirodnih vrednosti.

Specifičan problem predstavlja tok Bregave kroz Stolac. Zbog izrazito neravnomernog proticaja, pogotovo kroz urbani deo Stoca, javljaju se problemi ambijentalne i ekološke prirode. U sušnom periodu izdašnost vrela Bregave može da spadne na $400\div 500 \text{ L/s}$, što je dokazano merenjima u 1986. godini. To se događa na kraju dugog sušnog perioda kada u ponor Ponikvu u

Dabarskom polju ponire 100÷150 L/s, a ekstremno samo 50 L/s. Tada izdašnost izvora zavisi pre svega od retardacije (pražnjenja) neposrednog sliva, a manje od dotoka iz sliva severno od Dabarskog polja. U tim uslovima, zbog poniranja kroz karstifikovanu stensku masu ispod rečnog korita, više od polovine vode se izgubi pre Stoca. Samo zahvaljujući kolmiranom nanosu u rečnom koritu, deo voda ipak dođe do Stoca. Taj protok je toliko mali da se teško može govoriti o pravom rečnom toku kroz grad, što se vidi i na grafiku na slici 17.



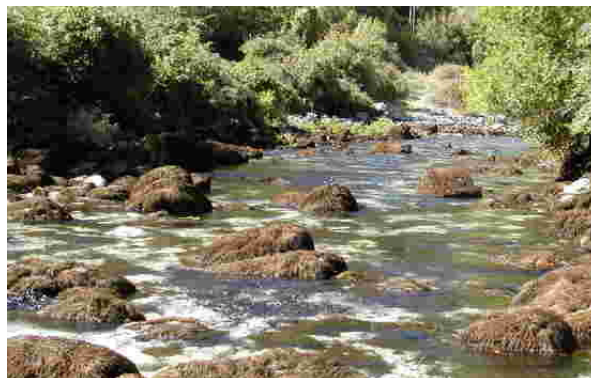
Slika 17. Dijagram gubitaka na delu toka od VS Do do 8 km nizvodno

Da bi se eliminisali gubici u koritu i omogućilo da kroz urbano jezgro Stoca i u najsušnijem periodu protiču najmanje one količine koje se prirodno javljaju na izvoru neophodno je da se duž korita obave određeni geotehnički zaptivni radovi. U cilju izbora optimalnog rešenja, još u periodu 1972÷1975, obavljani su neophodni istražni radovi. Obavljeno je geološko rekognosciranje terena, probno geoelektrično sondiranje, istražno bušenje i bojenje jedne bušotine. Duž korita je izbušeno pet istražnih bušotina dubina od 18 do 42 m (slika 5). U sve su ugrađene pijezometarske cevi. Da bi se utvrdio generalni pravac oticanja vode koja ponire u delu korita nizvodno od Dola izvršena su (1975) bojenja bušotine BR-1 Na-fluoresceinom. Prisustvo boje registrovano na vrelu Drijen na severoistočnom obodu Deranskog blata ukazuje na veoma razvijenu karstifikaciju duž korita. To, međutim, pokazuje i da se odgovarajućim zaptivnim radovima u cilju smanjenja gubitaka, uz primenu principa očuvanja prirodnih karakteristika korita Bregave mogu poboljšati režimi malih voda u zoni Stoca.

Ovaj projekat obezbeđuje povećanje minimalnih proticaja kroz Stolac uvođenjem dela prevedenih voda sa nivoa Nevesinjskog polja. Nakon izgradnje HE Dabra ovo povećanje je cca 1 m³/s, a nakon dovršetka Gornjih horizonata moguće je povećanje od 1,5÷2 m³/s. Pošto vode koje poniru duž korita Bregave, nizvodno od Stoca, ističu na vrelima po obodu Deranskog Blata

projekat Gornji horizonti ima ekološki vrlo povoljan uticaj na poboljšanje režima voda u »Parku prirode Hutovo Blato« - povećanje dotoka u sušnom periodu.

Projekat Gornjih horizonata, sa pratećim radovima regulacije Bregave, uz očuvanje njenog prirodnog izgleda, omogućava upravljanje malim vodama, što je veliko poboljšanje u odnosu na sadašnje stanje.



Slika 18. Bregava u izvorišnom delu (period malih voda)



Slika 19. Reka Bregava u Stocu

Studija sa predlogom rešenja urađena 1986. godine pokazuje da se tom regulacijom, uz maksimalno poštovanje prirodnog izgleda korita, mogu ostvariti značajna poboljšanja u samom gradu Stocu: korito bi i dalje zadržalo ambijentalne i rekreacione vrednosti, povećale bi se male vode i smanjila opasnost od velikih voda. Grad bi se na najbolji urbani način povezao sa tokom Bregave, a rekonstrukcijom mostova, i zgrada tradicionalne arhitekture, kao i uređivanjem obalnog pojasa ostvario bi se urbani ambijent po kome bi grad bio prepoznatljiv. Povećanje proticaja u sušnom periodu bi povoljno uticalo i na očuvanje živopisnih sedrenih slapova u Stocu.

ZAKLJUČCI

Celovit i višenamenski Hidrosistem Trebišnjica, sa već realizovanim delom sistema i planiranim proširenjem na područje Gornjih horizonata, najveći je integralni razvojni projekat u tom delu karsta Evrope, sa brojnim ekonomsko-razvojnim, socijalnim, energetskim, vodoprivrednim, ekološkim, urbanim i drugim ciljevima. Voda i prostori kaskadno raspoređenih karstnih polja praktično su jedni razvojni resursi koji u okviru jednog celovitog sistema mogu da omoguće prosperitetan život ljudi koji žive u tom negostoljubivom prirodnom okruženju kakav je karst istočne Hercegovine. Za već izgrađeni deo sistema, koji se višestruko isplatio i postao ključna poluga daljeg razvoja, žrtvovano je puno, pa čak i takva oaza u sivilu karsta, kakva je bila dolina Trebišnjice u području Miruša. Bogatstvo vodnih resursa i morfologija terena ponudili su jedinu šansu da se taj integralni razvojni projekat zaokruži - i nju treba do kraja iskoristiti. Ostalo je da se nastavi već započeta izgradnja sistema Gornji horizonti, odnosno da se vrlo uspašan razvojni projekat Hidrosistema Trebišnjica završi u potpunosti.

Prema Okvirnoj vodoprivrednoj osnovi BiH (Sarajevo, 1994) iz slivova Bune, Bunice i Bregave, u Neretvu dotiče $Q_{sr} = 59,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Projektom Gornjih horizonata u sliv Trebišnjice se privremeno prevodi $\sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$, odnosno oko 30% voda Bune, Bunice i Bregave, da bi se nakon energetskog iskorišćenja na već izgrađenom delu sistema HET-a, kroz Popovo polje, PHE Čapljinu i ustavu Krupa vratile u Neretvu uzvodno od Metkovića. Na taj način se nizvodnom toku Neretve obezbeđuje i u sušnom periodu stalni dodatni dotok od $8 - 20 \text{ m}^3/\text{s}$, a zna se da u tom periodu, u prirodnim uslovima, dotoka iz pravca Popovog polja prema Neretvi nije bilo. Nakon izgradnje dva hidroenergetska sistema (na Neretvi i Trebišnjici) režim toka Neretve nizvodno od Mostara, a pogotovu u Metkoviću i nizvodno zavisi u velikoj meri od optimalnog upravljanja ovim sistemima. Neophodnost izrade modela upravljanja radom ovih sistema sugerisana je još 1978 (*Barbalić, 1978*).

Osporavanje sistema Gornjih horizonata, nastalo kao rezultat nedovoljne obaveštenosti, traje više decenija, a često u tome učestvuju i oni kojima sistem treba da najviše donese, na razvojnom, socijalnom i ekološkom planu.

Sa hidrogeološkim i hidrološkim radovima i analizama i matematičkim modelima je dovoljno pouzdano utvrđeno da sistem Gornji horizonti neće ugroziti takve bisere prirode kao što su Buna, Bunica i Bregava. Da

obimnim istraživanjima to nije dovoljno pouzdano utvrđeno taj deo rešenja nikada ne bi ni bio unet u ovaj projekat. Razmatrane su i neke druge opcije sistema, ali nijedna od njih nije tako detaljno i ekološki neranjivo vodila računa o integralnom iskorišćenju vodnog potencijala istočne Hercegovine, kao odabrana koncepcija čija se realizacija nastavlja. U periodu odlučivanja tu koncepciju su, kao najbolje integralno rešenje, skladno uklopljeno u prirodu istočne Hercegovine, usvojile revizione komisije sastavljene od vrhunskih eksperata tadašnje Jugoslavije.

U projektima sistema u karstu planeri i računaju sa tim da mogu da očekuju - neočekivano. Iznenađenja, pa i negativna u karstu nisu izuzetak, pre bi se moglo reći ona su pravilo. Osnovno je, međutim, pri planiranju u karstu računati i sa pesimističkim procenama, pa i za takve situacije imati u vidu projektne odgovore, čiji je cilj da se ne ugroze ekološki sistemi. Očuvanje prirode i svega vrednog što je čovek stvorio i što predstavlja deo njegove istorije je imperativ, ali je imperativ i razvoj regiona, koji je osnovni uslov za očuvanje socijalne stabilnosti na tom nerazvijenom području. Naći ravnotežu između ta dva zahteva nije jednostavno, ali je u ovom projektu to ostvarljivo. Jedini put za rešavanje svih otvorenih pitanja je tolerantan, otvoren i stručni dijalog baziran na dokazima i podacima.

Bitan uslov da se započet integralni razvojni projekat nastavi i uspešno zaokruži je prevazilaženje dilema o posledicama sistema Gornji horizonti na Bunu, Bunicu i Bregavu. Te dileme se mogu razjašnjavati isključivo stručnim i egzaktno dokazanim argumentima. Urađene su brojne analize bazirane na realnim (izmerenim) podacima. U periodu od oko 40 godina uticaj Gornjih horizonata na Bunu, Bunicu i Bregavu je analiziran više puta na osnovu rezultata najnovijih tehnologija istraživanja i matematičkih modela koji su tada predstavljali vrhunac u toj oblasti. Rezultati tih istraživanja su uvek opovrgavali sumnju u negativne posledice Gornjih horizonata po režim tih vrela i strah od njihovog presušivanja. I poslednje analize primenom ARMA modela, koji je prezentiran u ovom radu, su još jednom potvrdile i ranije dokazanu činjenicu da je strah neopravdan. Može se smatrati da je sa ovim istraživanjem zaokružen proces analiza tih uticaja, da su iskorišćeni svi dragoceni podaci višedecenijskih terenskih istraživanja i numeričkih analiza, te da se sada treba usredsrediti na izgradnju objekata Gornjih horizonata.

Konačni zaključci o uticaju sistema Gornji horizonti na tri razmatrana vrela su sledeći.

• Režim voda na vrelu **Buni** se ne narušava, odnosno, uticaj prevođenja voda je zanemarljiv. Uticaja na male vode neće biti, jer postoji veliki međusliv između profila Rilja i Pošćenje koji ostaje u prirodnom stanju, i veliki međusliv od Nevesinjskog polja do Bune, koji je bitan za formiranje oticaja u malovodnom periodu. Analize pokazuju da se za trajanja veća od oko 55% potpuno poklapaju dijagrami trajanja prirodnih protoka i protoka nakon izgradnje sistema, nezavisno od režima prevođenja.

• Na vrelu **Bunici** doći će do smanjivanja velikih vode, čak i za preko 70%, što je vrlo povoljno sa gledišta vodnih režima Neretve u periodima povodanja. Smanjuju se i srednje vode za manje od 50%. Međutim, male vode ostaju neporemećene za trajanja veća od oko 55% sa krive trajanja: u tom opsegu se krive trajanja u prirodnim režimima i nakon izgradnje sistema praktično poklapaju. To znači da u tom opsegu malih voda objekti na Gornjim horizontima ne utiču na promenu vodnog režima Bunice. Znači, proširenje sistema Trebišnjice na Gornje Horizonte nema nepovoljne ekološke posledice na vrelu Bunice.

• Na reci **Bregavi** režimi malih voda nakon izgradnje sistema postaju delimično upravljivi. U slučaju kada se prevode samo vode veće od $1 \text{ m}^3/\text{s}$, na VS Do ostaju potpuno neporemećene sve male vode dužeg trajanja od oko 75%. To je ekološki vrlo dobra solucija, jer male vode održava u režimima koji su po svim metodama u svetu prihvaćeni kao ekološki prihvatljivi. Stanje očuvanosti režima protoka na Bregavi još povoljnije u vegetacionom periodu. U tom toplom delu godine u slučaju da se u Dabarskom polju prevode samo vode veće od $1 \text{ m}^3/\text{s}$, male vode na VS Do se ne menjaju za sve protoke dužeg trajanja od 55%. Međutim, u realnom sistemu stanje će se poboljšati čak i u odnosu na sadašnje neporemećeno stanje. Naime, planiranim merama geotehničke regulacije, čiji je cilj smanjenje gubitaka zbog poniranje vode u karstifikovanom koritu Bregave, male vode se mogu povećati u odnosu na prirodne protoke. Time bi se, u sušnom periodu, ostvarilo značajno poboljšanje režima protoka Bregave u zoni urbanog područja Stoca i povoljno uticalo na režim malih voda u Parku prirode Hutovo blato. Smanjenje protoka velikih voda povoljno je i za grad Stolac, ali i za donji tok Neretve u periodima povodanja.

Sa izgradnjom Gornjih horizonata Hidrosistem Trebišnjica postaje zaokružen razvojni projekat svetskih razmera. Taj sistem, jedinstven u karstu, omogućava integralno upravljanje velikim vodnim potencijalom od koga zavisi razvoj istočne Hercegovine. Istovremeno ovaj projekat vodi brigu o optimalnoj valorizaciji istorijskog nasleđa, o uticaju sistema na okolinu, kao i o

zaštiti brojnih endemskih vrsta po kojima je ovaj region poznat u svetskoj literaturi.

Bilo kakvo insistiranje na ponovnom dokazivanju višestruko dokazanog bilo bi uzaludno trošenje sredstava i vremena, a za posledicu bi imalo samo usporavanje razvoja ovog dela istočne Hercegovine.

LITERATURA

- [1] Barbalić, Z. (1978): Efekti izgradnje kompenzacionog bazena „Svitava“ na vodoprivredne probleme Donje Neretve. Saopštenja. Simpozijum o uticaju veštačkih jezera na čovekovu sredinu. Jugoslovenski komitet za visoke brane, HET Trebinje.
- [2] Barbalić, Z. (1981): Režim vodostaja Neretve kroz Mostar nakon izgradnje hidroelektrana na srednjoj Neretvi. Referati. Simpozij o izgradnji hidroelektrana na srednjoj Neretvi. Mostar.
- [3] Bratić, R. i drugi (2006): Okvirni plan razvoja vodoprivrede Republike Srpske, Vodoprivreda, 219-221, str.119-130
- [4] Dašić, T. i B. Đorđević (2009): Modeliranje ekoloških procesa u akumulacijama hidroenergetskih sistema, časopis Elektroprivreda, 2009-2, pp.38-51
- [5] Đorđević, B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd, ISBN 86-23-41056-4
- [6] Djordjević, B. (1993): Cybernetis in Water Resources Systems, WRP, USA, pp. 620, ISBN 0-918334-82-9
- [7] Đorđević, B. (2008): Objektivno vrednovanje obnovljive energije, Vodoprivreda, 231-253, str.19-38
- [8] Đorđević, B. & Dašić T (2011a): Water storage Reservoirs and their role in the development, utilization and protection of catchment, Spatium – International Review, 24, pp 9-15
- [9] Đorđević, B. i Dašić T (2011b): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, Vodoprivreda, 252-254, str.151-164
- [10] Milanović P. (2002): The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst regions. Episodes, Journal of International Geoscience, Vol. 25 No. 1. p. 13-21.
- [11] Milanović, P. (2006): Karst istočne Hercegovine i dubrovačkog priobalja. Izdavač ASOS, Beograd.
- [12] Milanović P. (2010): Study on Hydrogeology of Nature Park Hutovo Blato. WWF European Policy Programme.

- [13] Milanović, S., Stevanović, Z. i Lj.Vasić (2010), Vodoprivreda, Monitoring podzemnih voda Beljaničkog masiva u funkciji formiranja modela karstovog sistema, Vodoprivreda, 246-248, str.199-212
- [14] Milanović, S. i Lj.Vasić (2011): Hidrološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, Vodoprivreda, 252-254, str. 165-174
- [15] Milićević M., (1991). Uticaj čovjekovog rada na promjene prirodnog režima voda na kršu. D.P. Zavod za vodoprivredu, Sarajevo.
- [16] Pavlović M. i Pavlović M. (1981): Mjesto i uloga hidroelektrana na srednjoj Neretvi u okviru energetskog iskorištenja rijeke Neretve. Referat. Simpozij o izgradnji hidroelektrana na srednjoj Neretvi. Mostar.
- [17] Stanić, M. i Dašić, T. (2005): Modeliranje vodnih režima u karstu, Vodoprivreda, 213-215, (1-3/2005), str. 83-93
- [18] Touloumdjian C. (2005): The Springs of Montenegro and Dinaric Karst. Proceedings of the International Conference "Water Resources and Environmental Problems in Karst – Cvijić 2005". National Committee IAH of Serbia and Montenegro, Belgrade.
- [19] Studija: Aktualizacija uticaja prevođenja voda Gornjih horizonata na režim površinskih i podzemnih voda (2009), Konzorcijum: Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd i Zavod za vodoprivredu, Bijeljina
- [20] Izveštaj Komisije za ocjenu uticaja izgradnje sistema višenamjenskog korištenja voda "Gornjih horizonata" istočne Hercegovine na režim voda Trebišnjice i Neretve (2004), Sarajevo.
- [21] Okvirna vodoprivredna osnova Bosne i Hercegovine (1994). Javno vodoprivredno preduzeće "Vodoprivreda Bosne i Hercegovine" Sarajevo. Zavod za vodoprivredu Sarajevo. Sarajevo.

IMPACTS OF PARTIAL WATER RE-ROUTING FROM THE BUNA AND BREGAVA CATCHMENTS IN THE CATCHMENT OF TREBIŠNJIKA RIVER

by

Petar MILANOVIĆ, Radmilo GLIŠIĆ¹⁾, Branislav ĐORĐEVIĆ,
Tina DAŠIĆ²⁾, Nedeljko SUDAR³⁾

¹⁾ Energoprojekt, Hidroinženjering, Belgrade

²⁾ University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

³⁾ Institute for Water Management, Zavod za vodoprivredu, Bijeljina

Summary

The Trebišnjica Hydrosystem is one of the most complex development projects in that part of Europe known as the Dinaric Karst area. In this area, water is the only important and valuable natural resource and base for regional economic development. However, the proper planning and construction of water resource systems in any karst region, including Eastern Herzegovina, contains an inherent risk component. Situated in the area of Eastern Herzegovina, the Trebišnjica Hydrosystem consists of seven dams, six artificial reservoirs, six tunnels, and four channels. The ultimate aim of the Hydrosystem is to provide multi-

purpose use of water resources from an elevation of 900 m a.s.l. to the sea level. Upon full completion, the natural regime of surface and groundwater will be completely changed on both a local and regional scale. The important issue for the future is how to keep the balance between the necessity for regional development and the preservation of the unpredictable and complex ecological system of Eastern Herzegovina.

Construction of the Trebišnjica Hydrosystem started in 1959. A large part of the Hydrosystem is already operational. After many years pending the construction

of the final stage of the Trebišnjica Hydrosystem, the so called "Upper Horizons" have just started. The key structures of the "Upper Horizons" are: PP Dabar, PP Nevesinje and PP Bileća, including the reservoirs Zalomka and Nevesinje. The main purpose of this part of the Trebišnjica Hydrosystem is socio-economic development of this area of Eastern Herzegovina (Nevesinje, Dabar, Stolac and Dubrave areas). To achieve this goal, the optimal use of regional water resources is necessary i.e. the Hydrosystem requires the transfer of 30% of water from the catchments of the Buna, Bunica and Bregava springs (Neretva River) to the direction of the already operational part of the Hydrosystem (Trebišnjica River catchment). The main natural properties of these springs are:

Buna: $Q_{\min}=3\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\max}=380\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{av}}=24\text{ m}^3/\text{s}$;

Bunica: $Q_{\min}=0.72\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\max}=207\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{av}}=21\text{ m}^3/\text{s}$;

Bregava: $Q_{\min}=0.4\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\max}=59\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{av}}=17.5\text{ m}^3/\text{s}$.

After the transferred waters are used at the power-plants Trebinje 1, Trebinje 2 and Čapljina, it then has to be returned to the Neretva River to a point upstream of Metković town. The quantity of transferred waters is ten times less than Neretva average annual flow upstream from the confluence Neretva / Buna River.

From the very beginning appears the crucial question of the possible environmental impact as a consequence of these changes to the natural water regime in the area of the "Upper Horizons" and the previously mentioned springs. Changes in the flow regime of springs as a consequence of water re-routing in other directions often creates conflicts between the owners of reservoirs and the users of springs, particularly if it is a transboundary problem. To avoid possible conflicts, and to provide the sustainable and peaceful management of transboundary waters the designers of the Hydrosystem undertook a series of long lasting and complex hydrogeological/hydrological investigation programmes with the close co-operation of a wide spectrum of scientists and engineers. As often as possible, analyses included the application of a few independent

mathematical models adapted to the complicated nature of the karst area (1985, 2003/04 and 2009). All hydrogeological and hydrological analyses and applied mathematical models confirmed that the integrity of the Buna, Bunica and Bregava springs would not be endangered as a result of part of its water being re-routed in the direction of the Trebišnjica catchment.

Results of all analyses confirmed that the consequences of water transfer would be negligible on the Buna Spring discharge and without any practical negative consequence. In the case of the Bunica Spring the maximal flow (high precipitation period of year) would be reduced to about 70%, however in the period of low flow (dry period of year) a negative influence of water transfer is not possible. A similar result is applicable in the case of the Bregava sinking river. During operation of PP Dabar, as part of the "Upper Horizons", a considerable decrease of the Bregava flow is to be expected as a consequence during the high precipitation period. This means that extreme flows (floods) in the Stolac urban area would be eliminated. According to the design solutions, the geotechnical measures are foreseen to improve water-tightness of the Bregava river bed, with the consequence that the flow in the dry period in the area of Stolac town, would increase to 3 to 5 times of that in its natural condition. At the same time, this improvement of the minimal flow of the Bregava would have a positive influence on the critical minimal inflow into the Hutovo Blato Nature Park.

In most instances, the impact of the "Upper Horizons" is positive, offering irrigation, flood reduction, water supply improvement, power production, infrastructure improvement, increasing of minimal river flow, reduction of deforestation, recreation and many secondary benefits. As a consequence of any human activities and engineering construction in karst areas, some negative impacts are unavoidable. However, the major aim in the planning of the entire Trebišnjica Hydrosystem is to minimize the negative and to maximize the positive environmental impacts.

Redigovano 26.07.2012.