

PROBLEMI KOJI SU SE POJAVILI PRI IZGRADNJI I FUNKCIONIRANJU BRANA I AKUMULACIJA U KRŠU

Prof. emeritus Ognjen Bonacci
Prof. dr. sc. Tanja Roje-Bonacci

UVOD

Izgradnja brana i formiranje akumulacija u području krša jedan je od vrlo kompleksnih i najizazovnijih inženjerskih poduhvata s dugoročnim i često teško sagledivim posljedicama. Brane i njima stvorene akumulacije grade se uvijek i isključivo s jednom namjerom, poboljšati uvjete života i osigurati profit u područjima krša, koji su u pravilu u cijelom svijetu slabije razvijeni. Prilikom njihove izgradnje, a posebno dugotrajnijeg funkcioniranja (misli se na više desetaka godina) uočavaju se brojni problemi o kojima se nažalost nedovoljno obavještava stručna i znanstvena zajednica. Danas već postoje brojna iskustva od kojih su mnoga nažalost negativna. Na njih se ne treba gledati kao na nešto o čemu treba šutjeti, što je potrebno zataškavati („stavljati pod tepih“), no naprotiv; na negativnim iskustvima može se mnogo toga naučiti te ih se treba iskoristiti da se budući zahvati grade sigurnije i jeftinije te da budu pouzdaniji.

O raznim vrstama utjecaja (uglavnom negativnih, ali i nepredvidivih) ljudskih aktivnosti na prostorima krša u cijelom svijetu objavljeno je tek u posljednjih dvadesetak godina dosta, ali ne i dovoljno radova (npr. Breznik, 1998.; Drew i Hötzl, 1999.; Milanović, 2000.; 2002.; Waltham et al., 2005. itd.). Negativni utjecaji uglavnom su uzrokovani: 1) Agrotehničkim zahvatima povezanim s promjenom sistema obrade te zagađenjem tla i podzemnih voda zbog pretjerane gnojidbe; 2) Pretjeranom i nekontroliranom industrijalizacijom i urbanizacijom; 3) Rudarskim radovima, a posebno kamenolomima; 4) Pretjeranim crpljenjem podzemnih voda što može uzrokovati urušavanje tla, u morskim priobalnim terenima prodor slane morske vode, presušivanje izvora i vodotoka itd.; 5) Izgradnjom i funkcioniranjem brana i akumulacija; itd.

O tome da postoje gubici vode iz akumulacija u kršu zna se već dugo vremena, ali je o toj problematici objavljeno relativno malo radova kako u svijetu tako i kod nas. U Dinarskom kršu tu je problematiku sustavno,

s teoretskog i praktičnog aspekta, prvi pokušao objasniti Boreli (1966.) analizirajući gubitke iz akumulacije Buško Blato. U posljednjih desetak godina vodeći znanstvenici iz područja analize krša (npr. Dreybrodt et al., 2002.; Romanov et al., 2003.; 2007.; Turkmen, 2003.; Ahmadipour, 2005.; Günay i Milanović, 2005.; Fazeli, 2007.; Karimi et al., 2007.; Unal et al., 2007.; Kaufmann i Romanov, 2008.; Bonacci et al. 2009.; Hiller et al., 2011.; Bonacci i Roje Bonacci, 2012. itd.) vrlo intenzivno i znanstveno zasnovano dokazuju da izgradnja akumulacija u kršu može značajno ubrzati procese koji će rezultirati povećanjem gubitaka vode iz akumulacije, a može utjecati i na sigurnost (stabilnost temelja) samog objekta brane. Njihovi proračuni pokazuju da se takovi procesi mogu odvijati u relativno kratkom vremenu od nekoliko desetaka godina.

U krškom podzemlju postoje brojne nepoznanice što a priori onemogućava učinkovito sprečavanje gubitaka vode iz akumulacija. Naglašava se da će u ovom radu, baš s tim ciljem, biti prikazani primjeri prvenstveno vezani s izgradnjom i funkcioniranjem brana i akumulacija u kršu, kod kojih su se pojavili brojni problemi od kojih su neki koliko toliko sanirani, ali ima i slučajeva kada su objekti morali biti napušteni. Cilj ovog stručnog prikaza je da se informira inženjere praktičare na potencijalne probleme koji se mogu pojaviti prilikom realizacije njihovih projekata u krškim područjima. Treba naglasiti i činjenicu da će u radu biti iznesen tek mali dio stvarnih problema (kod nas i u svijetu) dijelom i zbog toga što mnoge institucije i vlasnici objekata (mnogo više kod nas u Hrvatskoj nego u svijetu) ne daju u javnost podatke o nezgodama i negativnim posljedicama zahvata u kršu. To smatraju nekakvim poslovnim tajnama ili stručnim „sramotama“, što je potpuno krivo. O problemima treba pisati kako bi se stručna javnost upozorila na potencijalne opasnosti isključivo s ciljem da se oni izbjegniju ili da se ublaže njihove negativne posljedice.

BRANA HALES BAR (SAD)

Brana Hales Bar na rijeci Tennessee građena je u razdoblju od 1905. do 1913., a svrha joj je bila stvaranje akumulacije čije će se vode koristiti za proizvodnju električne energije. U tom je slučaju prvi puta u SAD-u privatna kompanija gradila veliku branu preko plovnog puta. Kada je bila završena predstavljala je najvišu branu (visine 12,20 m) izgrađenu na svijetu. Cijela je građevina 1939. godine bila uključena u upravljački sustav sliva rijeke Tennessee (Tennessee Valley Authority).

Smještena je 53 km nizvodno od grada Chattanooga. Položaj pregradnog profila brane bio je izabran na mjestu gdje je korito rijeke na dugoj dionici bilo najuže. Poprečni presjek riječnog korita na tom je mjestu bio uzak, nalazio se u riječnoj krivini, a voda je bila plitka. Korito rijeke Tennessee na tom se mjestu probijalo kroz naslage Bangor vapnenaca (Rogers, 2007.).

Kasnijim detaljnim izučavanjima (poslije puštanja u rad sustava) ustanovljeno je da Bangor vapnenci sadrže velik broj pukotina ispunjenih glinom, ali i otvorenih međusobno povezanih krških šupljina i kaverni raznih dimenzija. Pukotine ispunjene glinom pokazale su se nerješivim problemom, mnogo većim od otvorenih kaverni.

Već na samom početku izgradnje u razdoblju 1905.-1910. pojavili su se veliki problemi s temeljenjem brane. Čak tri tvrtke su morale odustati od izvođenja. U razdoblju 1910.-1913. građevinska tvrtka „Jacobs and Davis“ uspjela je izvesti branu koristeći dijamantnim krunama jezgrovanu bušotinu te armirane betonske kesone dimenzija 12,2 m × 13,7 m na uzvodnoj i 9,1 m × 9,8 m na nizvodnoj strani (Rogers, 2007.).

Poslije vrlo kratkog vremena po završetku radova pojavili su se veliki gubici vode na području istočnih temelja brane. Gubitke se pokušalo spriječiti masovnim korištenjem kamenog nabačaja, ali su se oni još povećali. Detaljna dubinska mjerenja na i oko profila brane provedena su tijekom 1914. s ciljem da se utvrdi točna lokacija gubitaka.

Godine 1915., šupljine kroz koje se gubila voda su zapunjene kremenim pješčenjacima, te su potom začepljene betonom. Ovi su radovi izvedeni na dijelu korita nizvodno od brane. Na tako saniranim mjestima gubitaka vode nije bilo, ali su se oni ubrzo pojavili na mjestima u njihovoj neposrednoj blizini.

U sljedećoj se fazi pokušalo gubitke vode iz akumulacije smanjiti čepljenjem rupa na dnu korita balama sjena, starim madracima, žičanim mrežama pa čak i ženskim steznicima. Rezultat je bio porazan. Gubici vode iz akumulacije nisu smanjeni ni nakon tih „sanacijskih“ zahvata. Zbog toga su 1919. godine vlasnici započeli izvedbom injekcijskih bušotina iz inspeksijske galerije unutar betonske brane te injektiranjem vrućeg asfalta kroz njih s ciljem čepljenja pukotina kroz koje se voda gubi iz akumulacije. Pritisak pod kojim je injektiran vrući asfalt iznosio je 1380 kPa. Ubačeno je 2220 m³

vrućeg asfalta u temelj brane. Ukupno je izbušeno 1910 m bušotina s tim da je prosječna dubina bušotine iznosila 28 m. Sve do 1922. izgledalo je da je ovim postupkom izvršena uspješna sanacija gubitaka vode iz akumulacije.

Međutim, počevši od 1922. pa do 1929. gubici su se vratili na razinu na kojoj su bili prije ove sanacije, dakle prije 1919. godine. Pokazalo se da je injektiranje asfalta učinkovito smanjilo gubitke samo u gornjem sloju bušotina te da je tek u rijetkim slučajevima prodrlo na dubinu ispod 3,0 m do 4,6 m.

Tijekom 1930. i 1931. godine vršeni su detaljni istražni radovi trasiranja (bojama i uljem) u cilju da se identificiraju položaji krških šupljina i provodnika kroz koje se voda gubi iz akumulacije. Tim je radovima utvrđeno da su gubici vrlo veliki te da variraju između 2,8 m³ s⁻¹ i 34 m³ s⁻¹.

Povećanje gubitaka je nastavljeno. 1939. je korišteno je trasiranje floresceinom za utvrđivanje smjerova gubitaka vode. Tada je utvrđeno da se gubici kreću između 47 m³ s⁻¹ i 49 m³ s⁻¹, što približno iznosi 10 % prosječnog protoka rijeke Tennessee na tom profilu. Gubici vode su se počeli javljati ne samo kroz krške šupljine već i kroz šljunkovite naslage.

Kako je već prije bilo rečeno, Tennessee Valley Authority je 1939. godine otkupila cijelu građevinu te je u studenom 1940. započela s novim detaljnim istraživanjem problema gubitaka vode iz akumulacije. Dijamantnim krunama na uzvodnom pročelju brane te u području preljeva izbušene su bušotine promjera 7,62 cm. Duž osi cijele brane nizvodno od prethodno spomenutih bušotina vršeni su radovi s ciljem formiranja dijafragme koja bi vršila funkciju nepropusnog zida. Godine 1941. izbušeno je 750 bušotina promjera 45,72 cm iz kojih je izvađena jezgra, a one su ispunjene betonom do maksimalne dubine od 50 m, s tim da se dubina ispod riječnog dna kretala od 7,6 m do 49,7 m. Dijafragma je izrađena u razdoblju od 1940. do 1944. Naglašava se da su i uzvodno kao i nizvodno izvedene bušotine izrađene dijamantnim krunama bile injektirane cementom i asfaltom. Na taj je način izvedena zavjesa ispod brane čija je uloga bila spriječiti gubitke vode iz akumulacije. Radilo se o složenom pothvatu za koji je bilo neophodno izvesti pomoćni drveni most iznad preljeva brane.

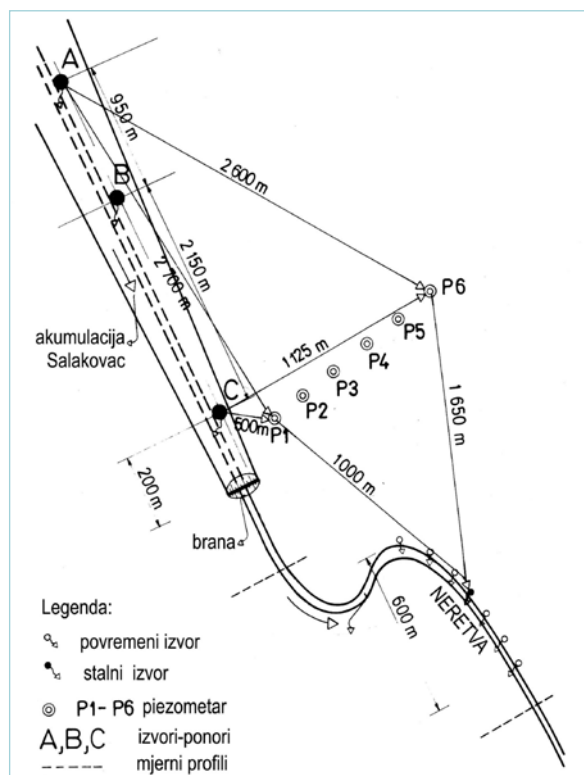
Treba naglasiti da su geološka istraživanja za potrebe izgradnje brane Hales Dam bila jedna od najdetaljnijih ikada izvedenih. Međutim, ni ta činjenica kao ni svi poduzeti skupi i dugotrajni sanacijski radovi nisu uspjeli spriječiti gubitke vode iz akumulacije kroz krški masiv na kojem je brana izgrađena. U travnju 1963. vlasnici su objavili da zbog velikih gubitaka vode napuštaju branu Hales Dam. Preljev i brana uz desnu obalu su uklonjeni. Ostala je strojarnica, a stara brodska prevodnica na desnoj obali je iskorištena kao terminal za prijevoz ugljena. U razdoblju od 1964. do 1967. godine 9,65 km nizvodno izgrađena je nova Nickajack brana.

Na osnovu iskustava s branom Hales Dam, Rogers (2007.) donosi niz bitnih zaključaka vezanih s ograničenjima konvencionalnih injektiranja u krškim terenima kao i razloga zbog čega se injekcijske zavjese u krškim terenima uvijek degradiraju. Nastavno se navode njegovi zaključci: 1) Krške šupljine u starim krškim terenima uvijek su djelomično ispunjene glinom i kamenim nanosom; 2) Veće šupljine su vrlo složeno povezane s manjim međuslojnim pukotinama, krškim prslinama i rasjedima proširenim otapanjem; 3) Injektiranjem kroz vertikalne bušotine može se postići prodiranje injekcijske smjese u ograničenom prostoru, najčešće udaljenom od bušotine od 1,5 m do 7,5 m. Ta udaljenost zavisi od sastava injekcijske smjese, miješanja s tekućom vodom koja u podzemlju teče pod pritiskom i postojećom (uglavnom nepoznatom) morfologijom podzemnih krških pukotina; 4) Današnja suvremena kompjuterizirana tehnologija koja koristi kose injekcijske bušotine može riješiti neke od tih slučajeva, ali uz značajno povećanje cijene izvedbe; 5) Uvijek kada se zavjesa injektira u krškim šupljinama ispunjenim glinom koje su izložene hidrostatskim pritiscima, koji se javljaju kad je akumulacija puna zavjesa će u početku (određeno vrijeme) spriječiti procjeđivanje vode; 6) Injekcijska zavjesa biva duže vremena izložena velikim hidrostatskim pritiscima pod kakvim nikada do tada nije bila; 7) Takovi povećani pritisci mogu uzrokovati istiskivanje glinenih čepova i time otvaranja novih i većih šupljina koje voda dalje proširuje i kroz koje se iz akumulacije gubi sve više vode.

HE SALAKOVAC NA NERETVI (BOSNA I HERCEGOVINA)

Hidroelektrana Salakovac na rijeci Neretvi locirana je neposredno na izlasku rijeke iz kanjonskog dijela toka u Bijelo Polje, 17 km uzvodno od grada Mostara. Postrojenje je pribranskog tipa s gravitacionom branom visine 70 m i dužine 230 m. Akumulacija HE Salakovac ima ukupnu zapreminu od $68 \times 10^6 \text{ m}^3$, s korisnom zapreminom od $15,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. U prosincu 1981. godine završena je izgradnja brane te je započelo probno punjenje akumulacije.

Na slici 1 shematski je prikazana situacija rijeke Neretve, brane i akumulacije Salakovac, šest piezometara (P1 do P6) te stalnih i povremenih krških izvora (ponora) u akumulaciji (A, B, C) i nizvodno od nje (Jelin, 1987.; Bonacci i Jelin, 1988.). Važno je ukazati da je u prirodnom, neporemećenom stanju uzvodno od brane postojala zona značajnih povremenih krških vrela (nazvanih Salakovačka vrela) od kojih su posebno izražena tri krška izvora označena na slici 1 slovima A, B i C. Površina sliva cijele zone ovih vrela procijenjena je na 138 km^2 . Njihovi otvori su se nalazili na kotama između 95 m n.m. i 100 m n.m. Najizdašniji je bio izvor C s procijenjenim maksimalnim kapacitetom od oko 15



Slika 1. Shematski prikaz situacije rijeke Neretve, brane i akumulacije Salakovac, šest piezometara (P1 do P6) te stalnih i povremenih krških izvora (ponora) u akumulaciji (A, B, C) i nizvodno od nje

$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok su za izvore B i A procijenjeni maksimalni kapaciteti iznosili po $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ za svakog pojedinačno. Uz njih su na lijevoj obali Neretve nizvodno od brane na dužini od oko 600 m postojali uglavnom povremeni krški izvori dok je jedan izvor bio stalni. Njihova se izdašnost u prirodnom stanju kretala od minimalnih oko $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ tijekom dugotrajnog sušnog razdoblja do maksimalnih oko $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nakon obilnih intenzivnih oborina (Jelin, 1987.).

Ivanković (1974.) je detaljno opisao problematiku izbora položaja i dimenzija injekcijske zavjese akumulacije HE Salakovac. Vrh injekcijske zavjese projektiran je na koti 125 m n.m. Predviđeno je da zavjesa bude izvedena ispod samog tijela brane u dužini od 230 m s tim da je ispod dna korita vodotoka (u dužini od 110 m) trebala ići do visine od 7 m n.m. te se na bokovima postepeno dizati do visine 40 m n.m. Za desni bok predviđena je dužina od 80 m (razmatrana je i varijanta od 110 m), a dno ovog dijela zavjese je bilo predviđeno na 50 m n.m. Uočeni su problemi na lijevom boku izgrađenom od karstificiranih krednih vapnenaca u kojima su hidrogeološki uvjeti tečenja bili krajnje kompleksni. Ivanković (1974.) je predložio da injekcijska zavjesa na lijevom boku bude dužine 275 m te da joj dno bude na visini 40 m n.m. Gornji dio zavjese je dvoredni do visine 40 m n.m. ispod brane i 70 m n.m. samo na lijevom boku, a donji jednorodni. Razmatrao je i drugu varijantu, tj. izvođenje

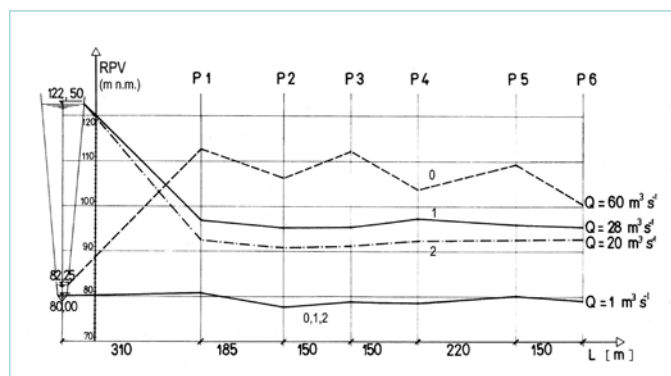
bočne zavjese čija je dužina trebala iznositi oko 1300 m. U literaturi nema na podatke o tome koja je zavjesa izvedena, ali je očito da kakva ona bila da bila nije dala željene rezultate.

Već prvo punjenje akumulacije pokazalo je da će podizanje razine vode u akumulaciji uzrokovati značajne promjene u lokalnom hidrogeološkom režimu u okolišu akumulacije. Izvori na lijevoj obali Neretve nizvodno od brane s punjenjem akumulacije postali su sve izdašniji, a kapacitet im se povećavao s porastom visine vode u akumulaciji Salakovac. Očito je bilo da je to posljedica činjenice što su izvori A, B, C, tj. cijela izvorska zona Salakovačkih vrela, potapanjem vodom iz akumulacije postala ponorska zona kroz koju se gube velike količine vode iz akumulacije Salakovac. Radilo se dakle o izravnim gubicima vode iz akumulacije što je utjecalo na smanjivanje proizvodnje električne energije.

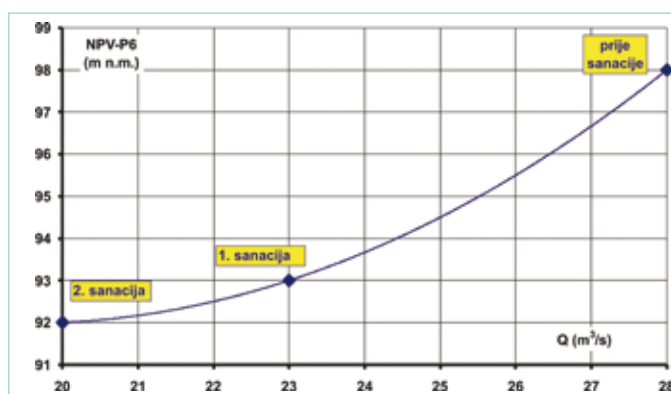
U razdoblju od veljače do studenog 1982. se prišlo prvom pokušaju sanacije tih gubitaka. U prvoj sanaciji masivnim betonskim čepom zatvoren je izlazni otvor najvećeg i najnižvodnijeg bivšeg izvora, a sada ponora C. Izvršeno je i torkretiranje u oklici tog čepa, tj. ponora C. Taj zahvat nije rezultirao zadovoljavajućim smanjenjem gubitaka vode iz akumulacije (o čemu će nastavno biti detaljno elaborirano) pa se u razdoblju od kolovoza do rujna 1983. pristupilo drugoj sanaciji. Treba naglasiti činjenicu da je prilikom pražnjenja akumulacije prije početka druge sanacije ustanovljeno postojanje brojnih novih ponora oko betonskog čepa i u području torkretiranom prilikom prve sanacije. Prilikom druge sanacije proširen je i pojačan betonski čep na ponoru C, izvršeno je torkretiranje cijele padine u širem području oko ponora C te je injektirana zona nizvodno od betonskog čepa. Međutim, niti ovi zahvati nisu polučili željene rezultate.

Na slici 2 prikazani su karakteristični istovremeno izmjereni vodostaji u akumulaciji, rijeci Neretvi i u šest piezometara u prirodnom stanju kad nema akumulacije (označeni kao 0) te prije sanacije (označeni kao 1) i poslije druge sanacije (označeni kao 2). U prirodnom stanju kod niskih vodostaja rijeke Neretve (oko 80 m n.m.) kapacitet svih nizvodnih izvora iznosio je oko $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Isti je kapacitet ovih izvora bio i prije kao i poslije oba prethodno opisana sanacijska zahvata ako bi se akumulacija Salakovac ispraznila do spomenute kote od oko 80 m n.m. (Jelin, 1987.). U prirodnom stanju kod razina vode u Neretvi od 82,25 m n.m., poslije intenzivnih i obilnih lokalnih oborina izdašnost nizvodnih izvora naglo bi i kratkotrajno narasla čak i do $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (označeno kao 0).

Punjenjem akumulacije na koti 122,50 m n.m. u stanju prije prve sanacije kapacitet nizvodnih izvora je iznosio $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (označeni kao 1 na slici 2). Poslije prve sanacije smanjen je na $23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a poslije druge na $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Kod kote akumulacije 96,0 m n.m. iz nizvodnih je izvora istjecalo oko $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



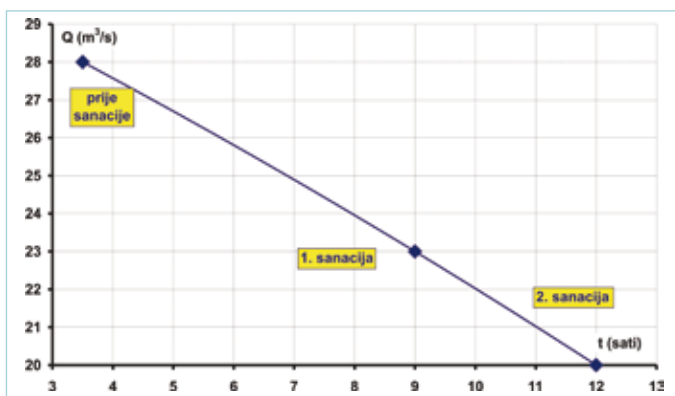
Slika 2. Prikaz istovremenih vodostaja izmjenjenih u akumulaciji i/ili rijeci Neretvi i u šest piezometara u prirodnom stanju (označeni kao 0) te prije sanacije (označeni kao 1) i poslije druge sanacije (označeni kao 2)



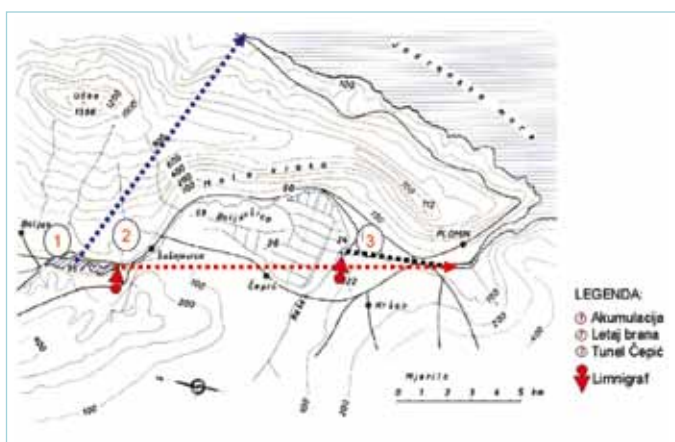
Slika 3. Prikaz odnos nivoa podzemnih voda izmjenjenih u piezometru 6, NPV-P6, izraženih u m n.m. i protoka na nizvodnim izvorima, Q, izraženih u $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ u trenutku kad je razina vode u akumulaciji bila na koti 122,50 m n.m.

Na slici 3 grafički je prikazan odnos nivoa podzemnih voda izmjenjenih u piezometru 6, NPV-P6, izraženih u m n.m. i protoka na nizvodnim izvorima, Q, izraženih u $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ u trenutku kad je razina vode u akumulaciji bila na koti 122,50 m n.m. (Bonacci i Jelin, 1988.). Uočava se da je prije prve sanacije količina vode na nizvodnim izvorima iznosila $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Prvom sanacijom smanjena je za oko $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, na $23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok je drugom sanacijom smanjena za daljnjih $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na iznos od oko $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Očigledno je da skupim sanacijskim radovima nije postignut željeni uspjeh, tj. potpuno ili barem većinsko smanjivanje gubitaka vode iz akumulacije. Postalo je jasno da se voda iz akumulacije ne gubi isključivo ili glavninom kroz otvore bivših izvora već i kroz cijeli lijevi bok akumulacije Salakovac. Važno je naglasiti da je srednji protok Neretve na profilu brane Salakovac u to doba bio određen u iznosu od $183 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

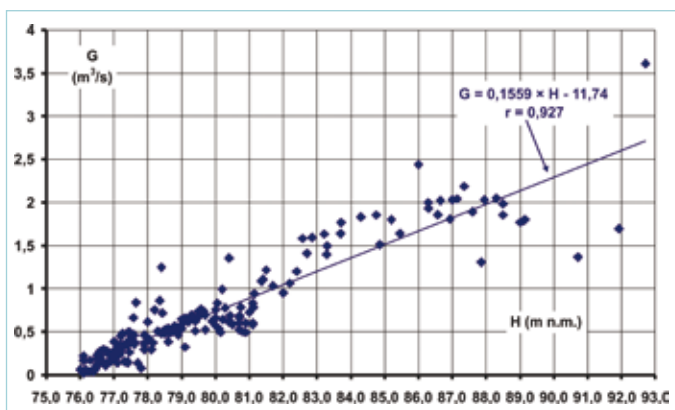
Na slici 4 prikazan je odnos nivoa podzemnih voda izmjenjenih u piezometru 6, NPV-P6, izraženih u m n.m. i vremena putovanja, t, izraženog u satima, trasera (fluoresceina) od bivšeg izvora, a sada ponora C do nizvodnih izvora u trenutku kad je razina vode u akumulaciji bila na koti 122,50 m n.m. Prije sanacije taj



Slika 4. Odnos nivoa podzemnih voda izmjerenih u piezometru 6, NPV-P6, izraženih u m n.m. i vremena putovanja, t, izraženih u satima, trasera (fluoresceina) od bivšeg izvora, a sada ponora C do nizvodnih izvora u trenutku kad je razina vode u akumulaciji bila na koti 122,50 m n.m.



Slika 5. Položaj akumulacije Boljunčica, brane Letaj, Čepić polja, tunela iz polja u Jadransko more kao i hidroloških mjernih postaja te smjerova kretanja vode koja se gubi iz akumulacije



Slika 6. Odnos između dnevnih gubitaka vode iz akumulacije Boljunčica, G, izraženih u m³ s⁻¹ i odgovarajućih razina vode u akumulaciji, H, izraženih u m n.m.

je put trajao 3,5 sati. Poslije prve sanacije produljio se na 9, a druga ga je sanacija produljila za daljnja tri sata na 12 sati.

Zbog velikih gubitaka vode iz akumulacije Salakovac kod vodostaja viših od oko 95 m n.m. nije se isplatilo u njoj držati ne samo maksimalnu moguću kotu vode nego

čak niti vodostaj iznad spomenute razine od oko 95 m n.m. Potrebno je naglasiti da se ovaj izvještaj odnosi na stanje do 1988. godine. Stoga nije poznato da li su poslije tog razdoblja vršeni bilo kakvi novi sanacijski zahvati te kakav je bio njihov uspjeh.

AKUMULACIJA BOLJUNČICA (HRVATSKA)

Akumulacija Boljunčica je izgrađena na rijeci Boljunčici u Istri, dakle u sjeverozapadnom dijelu Dinarskog krša Hrvatske. Betonska lučna brana Letaj izgrađena je 1970. godine, ali je punjenje akumulacije Boljunčica započelo tri godine kasnije 1973. godine (Rubinić, 2001.). Zapremina vode pune akumulacije na visini preljeva od 93,0 m n.m. iznosi $6,5 \times 10^6$ m³. Površina sliva do profila brane iznosi 74 km². U prirodnom stanju, dakle prije izgradnje i početka funkcioniranja akumulacije u razdoblju 1961.-1972. prosječni godišnji protok je iznosio 0,656 m³ s⁻¹, a varirao je od minimalnih 0,268 m³ s⁻¹ (1967. godine) do maksimalnih 1,26 m³ s⁻¹ (1965. godine). Vodotok Boljunčica je tipična bujica koja presuši tijekom ljetnog sušnog razdoblja, a čiji je maksimalni protok procijenjen na oko 200 m³ s⁻¹.

Akumulacija je trebala služiti za zaštitu od poplava nizvodnog plodnog krškog Čepić polja, za skladištenje vode za potrebe navodnjavanja tijekom vegetacijskog razdoblja te za zadržavanje sedimenta. Položaj akumulacije Boljunčica, brane Letaj, Čepić polja, tunela iz polja u Jadransko more kao i hidroloških mjernih postaja dat je na slici 5. S namjerom da se spriječe gubici vode iz akumulacije izgrađena je injekcijska zavjesa ispod i oko brane Letaj. Dubina zavjese je bila oko 20 m. U eksploataciji se pokazalo da ova injekcijska zavjesa nije u mogućnosti spriječiti gubitke vode iz akumulacije.

Slika 6 prikazuje odnos između dnevnih gubitaka vode iz akumulacije Boljunčica, G, izraženih u m³ s⁻¹ i odgovarajućih razina vode u akumulaciji, H, izraženih u m n.m. (Rubinić, 2001.). Gubici iz akumulacije toliko su veliki da se voda u njoj vrlo kratko vremena zadržava, tek nekoliko dana. Osim toga, kad se voda iz akumulacije potpuno isprazni infiltracijom u podzemlje, na dnu akumulacije Boljunčica se javljaju velike urušene ponikve koje su funkcionirale kao ponori kroz koje je voda iz akumulacije vrlo brzo prodrla u krško podzemlje. Očito je da akumulacija Boljunčica ne može ispunjavati jednu od svojih osnovnih uloga zbog koje je bila izgrađena, a ta je skladištenje vode tijekom vlažnog razdoblja za potrebe njenog korištenja za navodnjavanje Čepić polja tijekom sušnog, ljetnog razdoblja.

Na slici 7 prikazan je niz srednjih godišnjih protoka izmjerenih na limnigrafu Čepić na rijeci Boljunčici u razdoblju 1961.-2005. (Bonacci i Rubinić, 2009.). Radi se o vodomjernoj postaji lociranoj na dnu Čepić polja nedaleko od ulaza u tunnel. Važno je uočiti da je u prirodnom stanju dok u rad nije bila puštena akumulacija Boljunčica, dakle u razdoblju 1961.-1972., prosječni

godišnji protok bio $1,282 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a da je s početkom funkcioniranja akumulacije (u razdoblju 1973.–2005.) smanjen za $0,744 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, te sada iznosi $0,538 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Radi se o značajnom smanjenju prirodnog protoka, više od 50 %. Logično je pretpostaviti da su osnovni razlog tom smanjenju gubici vode iz akumulacije Boljunčica. Vrlo vjerojatno se radi o tome da veći dio gubitaka iz akumulacije bude preusmjeren na jugozapad. Na slici 5 modrom crtkanom strelicom ucrtan je taj pretpostavljeni smjer gubitaka uzrokovan funkcioniranjem akumulacije. Njegovo postojanje je dokazano mjerenjima podzemne vode u nizu piezometara, ali tim mjerenjima nije bilo moguće utvrditi i njihove kvantitativne iznose (Bonacci i Rubinić, 2009.). Treba naglasiti da je mjerenjima utvrđeno postojanje smjera kretanja podzemne vode i prema Čepić polju (crvena crtkana strelica na slici 5). Moguće je da dio voda koje poniru u akumulaciji Boljunčica prodru u dublje slojeve te oteku u Jadransko more ispod razine Čepić polja.

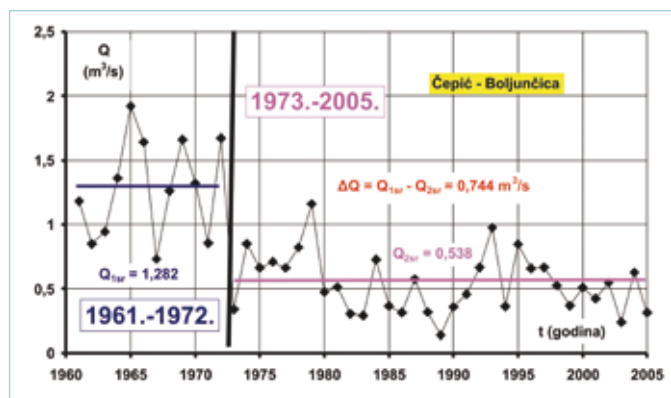
AKUMULACIJA RIČICA (HRVATSKA)

Akumulacija Ričica je smještena u središnjem dijelu Dinarskog krša na granici između Hrvatske i Bosne i Hercegovine. Puštena je u rad 1987. godine. Brana je izgrađena kao kamena nasuta s kosom glinenom jezgrom i zaštitnim filtarskim zonama, konstruktivne visine 45 m, širine u kruni 8 m i ukupne dužine 177,8 m. Namjera izgradnje ove akumulacije je bila da zaštiti od poplava nizvodno Imotsko-Bekijsko polje te da osigura potrebne količine vode za navodnjavanje oko 8000 ha poljoprivrednih površina.

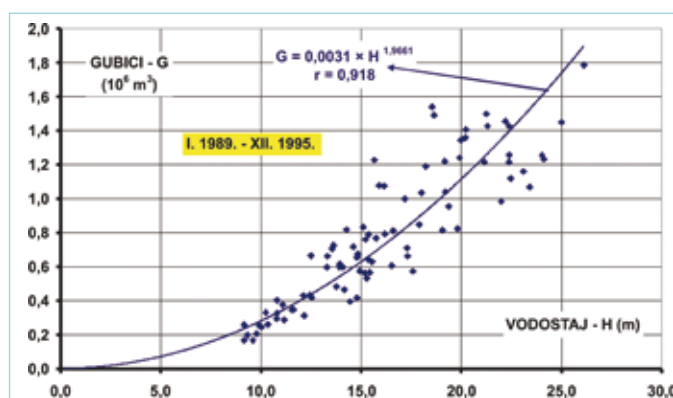
Točna površina sliva do akumulacije nije mogla biti određena, ali je procijenjeno da se kreće između 300 i 340 km^2 . Sam vodotok Ričica tipična je bujica koja redovito presušuje svake godine, a maksimalni protok je procijenjen na oko $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pri tome treba naglasiti da je ova procjena prilično nepouzdana. Akumulacija je projektirana na srednji godišnji protok od oko $1,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ali se tijekom eksploatacije pokazalo da je protok znatno niži, čak četiri puta, te da prosječno godišnje iznosi samo $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Poslije intenzivnih i obilnih kiša koje padaju u tom području akumulacija se brzo napuni, ali se u njoj voda zadržava vrlo kratko vrijeme zbog velikih gubitaka vode kroz bokove i dno akumulacije.

Visina krune brane nalazi se na 402 m n.m. dok je preljev lociran na nadmorskoj visini od 393,62 m n.m. Toj visini odgovara zapremina akumulacije od $18,4 \times 10^6 \text{ m}^3$. Žugaj i Plantić (1997.) su izračunali da se procjeđivanjem gubi iz akumulacije oko 50 l s^{-1} pri niskim vodostajima (oko kote 375,8 m n.m.) dok kod visokih vodostaja (oko kote 393,6 m n.m. što predstavlja razinu krune preljeva) gubici mogu dosegnuti pa i preći iznos od 800 l s^{-1} . Pri tome treba naglasiti da gubici vrlo vjerojatno zavise o razinama podzemne vode u okolici akumulacijskog



Slika 7. Niz srednjih godišnjih protoka izmjenjenih na limnigrafu Čepić na rijeci Boljunčici u razdoblju 1961.-2005.



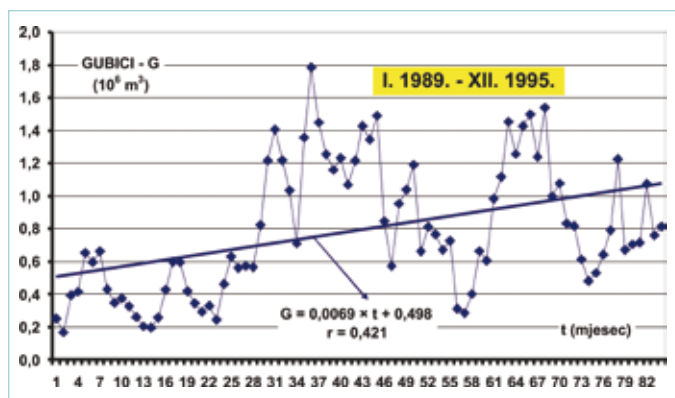
Slika 8. Odnos između mjesečnih gubitaka vode iz akumulacije Ričice, G , izraženih u 10^6 m^3 i srednjih mjesečnih vodostaja, H , u akumulaciji izraženih u m , definiranih u razdoblju od siječnja 1989. do prosinca 1995.

jezera. Međutim, kako se ne raspolaže s mjerenjima tih podataka ovu pretpostavku nije moguće detaljno verificirati.

Slika 8 prikazuje odnos između mjesečnih gubitaka vode iz akumulacije Ričice, G , izraženih u 10^6 m^3 i srednjih mjesečnih vodostaja, H , u akumulaciji izraženih u m , definiranih u razdoblju od siječnja 1989. do prosinca 1995. Kota nule vodokaza akumulacije Ričice iznosi 367 m n.m.

Na slici 9 ucrtan je vremenski niz srednjih mjesečnih gubitaka vode, G , izražen u 10^6 m^3 na mjesec (Žugaj i Plantić, 1997.). Ovi su gubici izračunati za vremensko razdoblje od siječnja 1989. do prosinca 1995. Na istoj slici je ucrtan i linearni trend koji jasno ukazuje da se gubici iz akumulacije povećavaju s vremenom. Iako se raspolaže samo s obradama nizova podataka do 1995. godine čini se da je taj negativni trend nastavljen sve do danas. Čini se da je akumulacija Ričice u posljednjih nekoliko godina sve duže vremena bez vode. To može biti povezano i s klimatskim varijacijama koje su uzrokovale dugotrajne suše u posljednjih nekoliko godina.

Analizom mjerenih razina vode u akumulaciji Ričice u razdoblju od 1989. do 2003. ustanovljeno je da je srednja



Slika 9. Vremenski niz srednjih mjesečnih gubitaka vode za razdoblje od siječnja 1989. do prosinca 1995., G, izražen u 10^6 m^3 na mjesec

visina vode u tom razdoblju iznosila 383,94 m n.m. što odgovara zapremini od $6,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Bonacci i Roje-Bonacci, 2008.). To znači da je u razdoblju od analiziranih 15 godina akumulacija bila prosječno ispunjena samo s oko 35 %, što je apsolutno nezadovoljavajuće i krajnje zabrinjavajuće.

Iako su vršene određena hidrogeološka mjerenja i njihove analize (Ivičić, 1998.; Ivičić et al., 2003.) do sada nisu pouzdano utvrđene lokacije kroz koju se voda gubi iz ove akumulacije.

HIDROENERGETSKI SUSTAV GORNJA ZETA (CRNA GORA)

Rijeka Zeta gornjim tokom teče kroz Nikšićko polje, primajući niz pritoka. Nadmorska visina polja se kreće između 600 i 630 m n.m. Zeta ponire južnim obodom polja te ponovo izvire nakon nekoliko kilometara na nadmorskoj visini od 50 m n.m. Visinska razlika između područja njenog poniranja i ponovnog izviranja iznosi fascinirajućih 550 m. Površina sliva svih vodotoka Nikšićkog polja do ponorske zone procijenjena je na 1170 km^2 . Sliv gornjeg toka Zeta vrlo je bogat padavinama. U prosjeku one prelaze godišnji iznos od 2000 mm. Samo Nikšićko polje krško je povremeno plavljeno polje. 80 % godišnjih oborina padne u tri do četiri zimska mjeseca. Tijekom ljetnog razdoblja ovaj prostor pati od suša dok je u zimskom periodu uglavnom poplavljen.

Tijekom 1952. godine započeta je izgradnja hidroenergetskog sustava nazvanog „Gornja Zeta“. Glavni energetski objekt predstavlja HE Perućica. Za osiguravanje izravnavanje dotoka, tj. za osiguravanje pouzdane proizvodnje hidro energije HE Perućice izgrađene su akumulacije Krupac, Slano, Vrtac u Nikšićkom polju i Liverovići na lijevoobalnom pritoku Zete, Gračanici. HE Perućica puštena je u rad u srpnju 1960. godine.

Akumulacija Krupac se nalazi na najvišem i najzuvodnijem sjeverozapadnom dijelu Nikšićkog polja.

Formirana je izgradnjom nasute brane dužine 1500 m i visine 28 m te izvođenjem injekcijske zavjese ispod brane kao i injektiranjem ponora Krupačke jame. Zapremina akumulacije Krupac iznosi $42,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Dužina injekcijske zavjese na lijevoj obali je 504 m s prosječnom dubinom od 18,41 m. Na desnoj obali dužina injekcijske zavjese je kraća te iznosi 159 m, ali je dubina veća te iznosi prosječnih 26,73 m. Posebno velika i gusta injekcijska zavjesa je izvedena oko ponora Krupac u dužini od 247,5 m i s prosječnom visinom od 41,83 m. Zogović (1993.) tvrdi da je tim zahvatima postignuto zadovoljavajuće smanjenje gubitaka vode iz akumulacije. Podatke o tome koliki su gubici i danas te da li se oni povećavaju nisu izneseni.

Akumulacija Slano se nalazi oko 10 km južnije od akumulacije Krupac te je smještena na najzapadnijem dijelu južnog ruba Nikšićkog polja koje je dvadesetak metra više od najnižeg i najzuvodnijeg dijela istog polja. Stvorena je izgradnjom nasute brane Slano dužine 1700 m, visine 30 m. Injekcijska zavjesa izrađena je ispod same brane i duž južnog oboda. Zapremina akumulacije Slano iznosi $111,2 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ukupna dužina injekcijske zavjese je 3660 m, a prosječna dubina injektiranja je bila 66,42 m. Izbušeno je 18,178 km bušotina kroz koje se ubacilo 10.446,110 tona suhe smjese. Iako je u ovom slučaju injektiranje bilo mnogo dublje i s mnogo više suhe smjese nije postignuta zadovoljavajuća vododrživost akumulacije Slano. Zogović (1993.) smatra da injektiranje moralo biti mnogo dublje.

Akumulacija Vrtac se nalazi u srednjem dijelu na južnom rubu Nikšićkog polja, neposredno nizvodno od akumulacije Slano. Formirana je izgradnjom brane dužine 2500 m, visine 16 m. Zapremina akumulacije Vrtac iznosi $71,9 \times 10^6 \text{ m}^3$. I u ovom slučaju injekcijska zavjesa izrađena je ispod same brane i duž južnog oboda. Ukupna dužina zavjese u ovom je slučaju bila imponirajućih 6 km (1,5 km ispod brane i 4,5 km na južnoj obali). Izbušeno je 26,617 km bušotina u koje je ubačeno oko 12.700 tona suhe smjese. U slučaju akumulacije Vrtac postignuti su vrlo slabi učinci brtvljenja. Uz to je došlo i do urušavanja površine terena i otvaranja novih ponora (estavela) u području akumulacije na južnom rubu polja. Prišlo se poduzimanju raznih zahvata na njihovoj sanaciji (Bonacci, 1987., Zogović, 1993.). Na tim novotvorenim ponorima koji su u biti funkcionirali kao estavele (tijekom vlažnog razdoblja kad su razine podzemne vode u Nikšićkom polju bile visoke ti su otvori imali funkciju izvora, dok su kod niskih podzemnih voda funkcionirali kao ponori) građeni su posebni objekti koji su trebali onemogućiti poniranje vode, ali su omogućavali njeno izviranje, tj. punjenje akumulacije. Torkretirane su velike površine južnog boka akumulacija Vrtac. Visokim betonskim tornjevima čija je visina na nekim mjestima prelazila i 10 m pokušalo se izolirati pojedine ponore. Uskoro po torkretiranju pojavila su se još snažnija urušavanja

terena i to upravo onog torkretiranog, a otvarali su se novi ponori u blizini građevina. Može se slobodno reći da je brtvljenje akumulacije Vrtac i pored svih uloženi golemih sredstava doživjelo potpuni neuspjeh. To je u biti i bilo za očekivati jer je ta akumulacija najizvodnija i s najnižim dnom od tri spomenute u Nikšićkom polju, a uz to njen južni bok predstavlja prirodnu ponorsku zonu kroz koju se vode Nikšićkog polja prirodno ponirale.

Položaj akumulacije Liverovići nije u samom Nikšićkom polju već je smještena istočnije u kanjonu rijeke Gračanice koja predstavlja lijevi pritok rijeke Zete. Akumulacija Liverovići bila je prvenstveno izgrađena za potrebe opskrbe vodom željezare u Nikšiću, ali je trebala pripomoći stabilnosti proizvodnje hidroenergije sustava „Gornja Zeta“. Površina sliva rijeke Gračanice do profila brane iznosi oko 189 km². Kruna brane je na koti 740,50 m n.m. Brana ima građevinsku visinu od 45,50 m. Lučna brana Liverovići projektirana je na morfološki najpovoljnijem i geološki stabilnom, ali vrlo vodopropusnom terenu. Zbog takvih prirodnih uvjeta neophodno je bilo izvođenje injekcijskih zavjesa ispod brane i duž jednog dijela lijevog i desnog boka akumulacije. Zbog velike vodopropusnosti dna i bokova izvršeni su brojni injekcijske radovi. Ispod brane je predviđeno i izvedeno konsolidacijsko i vezno injektiranje te injekcijska zavjesa. Svi ovi skupi i dugotrajni radovi nisu spriječili velike gubitke vode iz akumulacije. Godinu dana nakon završetka izgradnje brane, u siječnju 1958. godine, otvorio se ponor na desnom obodu akumulacije. U tijeku 15 godina mjerenja, od 1946. do 1961. godine, prosječan protok rijekom Gračanicom na profilu brane bio je 2,01 m³ s⁻¹. Proračuni izvršeni sa srednjim mjesečnim vodostajima pokazuje da je prosječno poniranje vode iznosilo 0,963 m³ s⁻¹, tj. da se skoro 50 % vode dotekle u akumulaciju gubi poniranjem u krško podzemlje.

NEKI SLUČAJEVI GUBITAKA VODE IZ AKUMULACIJA U SAD-U

U SAD-u na područjima u kojima podlogu tvori gips javile su se relativno često gubici vode iz akumulacija. Katastrofalni propust se desio na brani Quail Creek 1989. godine na jugozapadu državi Utah. Voda je iz akumulacije iscurila kroz do tada neidentificirani krški provodnik formiran u gipsu ispod zemljane brane što je izazvalo njeno djelomično urušavanje. Brana je obnovljena, a za obnovu je utrošeno 12 milijuna US dolara. Izrađen je rov dug 600 m i dubok 25 m.

Ostale brane i akumulacije u SAD-u u kojima su se pojavili problemi gubitaka vode kroz naslage gipsa su: 1) Horsetooth akumulacija u Colorado-u; 2) Carter akumulacija u Colorado-u; 3) Anchor brana u Wyoming-u (Johnson, 2008.).

Brana Horsetooth duljine 570 m i visine 47 m građena je u razdoblju od 1946. do 1949. Akumulacija je 10 km duga i prosječno 1 km široka s prosječnom dubinom od 40 m. Zapremina rezervoara je 193 × 10⁶ m³, a osnovni razlog izgradnje je opskrba vodom grada Fort Colinsa i navodnjavanje. Podloga su uglavnom pješčenjaci u kojima postoje slojevi gipsa i vapnenaca u kojima dolazi do formiranja urušenih dolina kroz koje se voda gubi u podzemlje. Gubici vode se javljaju kroz vapnenačke slojeve koji se prostiru ispod cijele akumulacije te leže i ispod same brane.

Brana akumulacija Great Falls u državi Tennessee izgrađena je i puštena u rad 1917. Visina joj iznosi 28 m a dužina 240 m. Dužina akumulacije je 6,6 m a širina oko 1 km. Prosječna dubina vode je oko 6 m. Zbog postojanja slojeva vapnenaca gubici vode iz akumulacije su rasli tijekom vremena. 1926. godine iznosili su samo 0,47 m³ s⁻¹. 1939. su porasli na 6,6 m³ s⁻¹, a 1945 su dosegli razinu od 12,7 m³ s⁻¹. Počevši od 1946. godine izvedene su injekcijske zavjese koje su nešto smanjile gubitke. ■

LITERATURA

- Ahmadipour M. 2005. The effect of sinkholes on leakage of water from the Sarabchenar dam, Southwest Iran. *Journal of Environmental Hydrology*, 13(1), 1-5.
- Bonacci O. 1987. *Karst Hydrology with Special References to Dinaric Karst*. Springer Verlag, Heidelberg. 184 str.
- Bonacci O, Jelin J. 1988. Identification of a karst hydrological system in the Dinaric karst (Yugoslavia). *Hydrological Sciences Journal*, 33(5), 483-497.
- Bonacci O, Gottstein S, Roje-Bonacci T. 2009. Negative impacts of grouting on the underground in karst environment. *Ecohydrology*, 2(4), 492-502.
- Bonacci O, Roje-Bonacci T. 2008. Water losses from the Ričice reservoir built in the Dinaric karst. *Engineering Geology*, 9(3-4), 121-127.
- Bonacci O, Roje-Bonacci T. 2012. Impact of grout curtains on karst groundwater behaviour: an example from the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 26(18), 2765-2772.
- Bonacci O, Rubinić J. 2009. Water losses from a reservoir built in karst: the example of the Boljunčica reservoir (Istria, Croatia). *Environmental Geology*, 58(2), 339-345.
- Boreli M. 1966. O gubicima vode iz krških akumulacija. Akumulacija Buško Blato. Saopštenja Instituta Jaroslav Černi 36, 17-30.
- Breznik M (1998.) *Storage Reservoirs and Deep Wells in Karst Regions*. A. A. Balkema, Rotterdam. 251 str.
- Drew D, Hötzl H. 1999. *Karst Hydrogeology and Human Activities – Impacts, Consequences and Implications*. A. A. Balkema, Rotterdam. 322 str.

- Dreybrodt W, Romanov D, Gabrovšek F. 2002. Karstification below dam sites: a model of increasing leakage from reservoirs. *Environmental Geology*, 42(5), 518-524.
- Fazeli MA. 2007. Construction of grout curtain in karstic environment case study: Salmon Farsi Dam. *Environmental Geology*, 51(5), 791-796.
- Günay G, Milanović P. 2005. Karst engineering studies at the Akkopru reservoir area, SW of Turkey. *Proceedings of the International Conference and Field Seminars „Water Resources and Environmental Problems in Karst“*, Beograd i Kotor, 651-658.
- Hiller T, Kaufmann G, Romanov D. 2011. Karstification beneath dam sites: from conceptual models to realistic scenarios. *Journal of Hydrology*, 398(3-4), 201-211.
- Ivanković T. 1974. Parametri injekcije zavjese HE Salakovac. *Zbornik Radova III. Jugoslavenskog Simpozija o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji*, Opatija. Knjiga II, 59-70.
- Ivičić D. 1998. Akumulacija Ričice – Hidrogeološki Istražni Radovi u 1997. Institut za Geološka Istraživanja, Zagreb. Npublicirani elaborat.
- Ivičić D, Pavičić A, Buljan R. 2003. Akumulacija Ričice. *Zbornik Radova 3. Hrvatske Konferencije o Vodama*, Osijek, 785-791.
- Jelin, J. 1987. Hidrološka Analiza Funkcioniranja Krškog Sistema. Doktorska disertacija obranjena na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.
- Johnson KS. 2008. Gypsum-karst problems in constructing dams in the USA. *Environmental Geology*, 53(5), 945-950.
- Karimi H, Keshavarz T, Mohammadi Z, Raeisi E. 2007. Potential leakage at the Khersan 3 Dam Site, Iran: a hydrogeological approach. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 66(3), 269-278.
- Kaufmann G, Romanov D. 2008. Leakage of dam sites in karst terrains. *Geophysical Research Abstracts 10*. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008- A-02229.
- Milanović P. 2000. Geological Engineering in Karst. Zebra Pbl. Co., Beograd. 347 str.
- Milanović P. 2002. The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst regions. *Episode*, 25(1), 13-21.
- Rogers D. 2007. Hales Bar Dam and the pitfalls of constructing dams on karst foundation. Missouri University of Science & Technology (<http://web.mst.edu/~rogerssda/dam/>).
- Romanov D, Gabrovšek F, Dreybrodt W. 2003. Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam. *Engineering Geology*, 70(1-2), 17-35.
- Romanov D, Gabrovšek F, Dreybrodt W. 2007. Leakage below a dam sites in limestones terrains by enhanced karstification: a modelling approach. *Environmental Geology*, 51(5), 775-779.
- Rubinić J. 2001. Hidrološki Aspekti Planiranja i Upravljanja Akumulacijama – Primjer Akumulacije Boljunčica u Istri. Magistarski rad obranjen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Splitu.
- Turkmen S. 2003. Treatment of the seepage problem at the Kalecik Dam (Turkey). *Engineering Geology*, 68(3-4), 159-169.
- Unal B, Eren M, Yalcin MG. 2007. Investigating of leakage at Ataturk dam and hydro electric power plant by means of hydrometric measurements. *Engineering Geology*, 93(1-2), 45-63.
- Waltham T, Bell F, Culshaw M. 2005. *Sinkholes and Subsidence – Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Constructions*. Springer Verlag & Praxis Publishing, Heidelberg & Chichester. 382 str.
- Zogović D. 1993. Storage watertightness problems and technical solutions in the highly developed karst area of the Nikšić Polje, Yugoslavia. *IAHS Publications*, 207, 85-93.
- Žugaj R, Plantić K. 1997. Hidrološke Obrade za Potrebe Akumulacije Ričica. Institut za Elektroprivredu i Energetiku, Zagreb. Npublicirani elaborat.