Uticaj strukturnog sklopa na cirkulaciju podzemnih voda i gubitke iz površinske akumulacije na primeru levog boka brane „Lazići“ na Tari

IGOR R. JEMCOV, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

ANA S. MLADENović, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 556.3(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika1703357J

Proces utvrđivanja gubitaka vode iz površinske akumulacije i kroz deo levog boka brane Lazići, zahtevao je primenu različitih metoda, kao što je veoma detaljan monitoring nivoa podzemnih voda, opiti trasiranja, primena strukturno-geoloških istraživanja, itd. Dobijeni rezultati gubitaka vode iz površinskog rezervoara ukazuju na tendenciju daljeg povećanja. U području injeksione zavese, na osnovu primenjenih metoda, definisane su dve veoma uske tektonske zone koje karakteriše različit hidraulički mehanizam. Utvrđen je i generalni pravac cirkulacije voda iz akumulacije kroz hidrogeološku sredinu. Važan zaključak izveden na osnovu ovih istraživanja je da u ovakvim hidrogeološkim sredinama strukturni sklop ima izuzetno važnu ulogu u formiranju pravaca kretanja podzemnih voda i stepena gubitaka kroz protivfiltracionu barijeru; u takvim uslovima nemoguće je u potpunosti sprečiti gubitke, već ih je moguće delimično kontrolisati.

Ključne reči: gubici vode iz rezervoara, manje propusni krečnjak, monitoring nivoa podzemnih voda, strukturna geologija, daljinska detekcija

1. UVOD

Površinska akumulacija Zaovine formirana je izgradnjom brane „Lazići“ u slivu Belog Rzava, na planini Tari. Ona ima funkciju gornje akumulacije reverzibilne hidroelektrane „Bajina Bašta“. Sistem reverzibilne hidroelektrane funkcioniše na principu potiskivanja vode iz donje akumulacije Perućac, u periodu niske potrošnje, i njenog smeštanja u gornju akumulaciju Lazići (na znatno višoj koti u odnosu na reku Drinu), u cilju obezbeđivanja hidro-energetskog potencijala koji bi se koristio u periodu maksimalne potrošnje. Formirana akumulacija, ukupne zapremine $170 \times 10^6 \text{ m}^3$, predstavlja održiv i obnovljiv izvor energije, koji pri padu od oko 600 m obezbeđuje maksimalni energetski sadržaj od 194 GWh. Stoga je u ovakvim sistemima veoma važno gubitke svesti na minimum i obezbediti što veću kontrolu nad cirkulacijom vode u čitavom površinskom rezervoaru.

Brana „Lazići“ je zemljana brana, sa kamenim nabačajem i glinovitim materijalom u jezgru. Visina

brane je 125 metara. Zbog nekontrolisane filtracije vode kroz branu, unutar tela brane izgrađene su drenažne galerije, čija je funkcija prikupljanje filtrirane vode i sprovođenje do akumulacije Spajići koja se nalazi na hipsometrijski nižem nivou. Na levom boku brane Lazići (Prevoj), formirana je injeksiona galerija, kako bi se sprečilo bočno gubljenje vode, koja se iz površinske akumulacije filtrira u stensku masu. Međutim, formirana protivfiltraciona barijera je samo delom sprečila pojavu gubitaka vode iz akumulacionog jezera. Sa geološkog aspekta, akumulacija Zaovine formirana je na litološki relativno povoljnom terenu. Levi bok brane „Lazići“ smešten je u slabo karstifikovanim laporovitim krečnjacima kredne starosti (slika 1).

Ipak, i pored relativno povoljne litološke sredine, gubici vode u levom boku brane, mereni u drenažnim galerijama iznose 80 – 150 l/s, zavisno od stanja nivoa vode u akumulacionom jezeru. Gubici navedenih razmera mogu se smatrati prihvatljivim, kada su u pitanju „klasične“ akumulacije u karstnim sredinama [1] [2], međutim činjenica da je ovde u pitanju sistem reverzibilne hidroelektrane, koji je moguće staviti u funkciju tek nakon potrošnje određene količine energije, svaki gubitak hidropotencijala je značajan i neophodno je svesti gubitke procurivanjem na najmanju moguću meru.

Adresa autora: Igor Jemcov, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7

e-mail: igor.jemcov@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 10.02.2017.

Rad prihvaćen: 23.05.2017.

U cilju praćenja stanja i analize problematike prostrujavanja voda na levom boku brane Lazići, sprovedena su kompleksna hidrogeološka i geološka istraživanja, sa osnovnim zadatkom definisanja privilegovanih zona i hidrauličkog mehanizma filtracije voda iz površinske akumulacije. Sprovedena istraživanja ukazuju da geološke karakteristike terena predstavljaju veoma važan faktor u kontrolisanju cirkulacije vode u stenskoj masi, tako da je pri proučavanju navedene problematike poznavanje geološke građe u celini od izuzetne važnosti.

2. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE TERENA

Tektonski posmatrano, istraživano područje pripada Dinarskom orogenom sistemu, i nalazi se u zoni direktnog kontakta dve velike tektonske jedinice – Drinsko-ivanjičke jedinice na istoku, i Zapadne vardarske ofiolitske jedinice na zapadu područja istraživanja. Drinsko-ivanjička jedinica predstavlja distalni deo deformisane margine kontinentalne Jadranske mikroploče [3]. U širem delu područja istraživanja, ova

tektonska jedinica izgrađena je od masivnih do bankovitih organogenih krečnjaka, nastalih u plićim delovima mora (slika 1).

Zapadna vardarska ofiolitska jedinica predstavlja domene okeanske kore, ostatke mezozojskog okeana Neotetisa, koji je zatvoren u gornjoj juri [3] i čiji su ostaci obdukovani preko pasivne jadranske margine. U području istraživanja dominiraju dublji delovi ofiolitske sekvence, predstavljeni peridotitima, koji su u nekim delovima delimično serpentinizovani, i gabro – dijabaznim članovima (slika 1).

Primarni kontakt između ove dve jedinice je tektonski, a tokom geološke istorije ovaj kontakt je više puta aktiviran. Nakon procesa jurske obdukcije, ove tektonske jedinice bile su uključene u više faza navlačenja van sekvence.

Na taj način je Drinsko-ivanjička jedinica, koja inače predstavlja tektonski prozor ispod jedinstvene navlake ofiolita, lokalno dovedena u višu tektonsku poziciju u odnosu na Zapadnu vardarsku ofiolitsku jedinicu (slika 1).

Slika 1 - Geološka karta istraživanog područja (prema radnoj verziji OGK list Višegrad 1:25000);

● – tačke na kojima su vršena terenska strukturna istraživanja

3. METODE ISTRAŽIVANJA

Tokom istraživanja primenjene su metode u dva različita veličinska područja posmatranja. Uže područje bilo je vezano za veoma usku zonu neposrednog levog boka brane i injekcione galerije (slika 2), gde je vršen detaljan monitoring nivoa podzemnih voda i protoka u drenažnim galerijama, opiti obeležavanja i dr. Istraživanja u širem području levog boka brane bila

su uslovljena rezultatima detaljnih istraživanja. Ona su obuhvatila definisanje tektonskog sklopa metodama daljinske detekcije, kao i standardnim strukturno-geološkim terenskim istraživanjima.

Detaljan monitoring nivoa podzemnih voda vršen je u postojećim piježometrima koji su smešteni u neposrednoj blizini injekcione galerije i levog boka brane „Lazići“ (slika 2). Monitoring je vršen sa različitim

frekvencijama merenja. Tokom perioda od 10 godina, merenja su vršena na petodnevnom nivou, dok je tokom perioda od 8 meseci, koji je obuhvatio nekoliko perioda izdizanja i spuštanja nivoa vode u akumulaciji, monitoring vršen na minutnom i časovnom nivou. Svi prikupljeni podaci su statistički analizirani neparametarskom Spermanovom korelacijom, kao i Vilko-ksonovim testom, kao neparametarskom alternativom t-testu međusobno zavisnih uzoraka.

Pored navedenog, za utvrđivanje specifičnosti hidrauličke veze akumulacije i opserviranih pijezometara, primenjena je analiza vremenskih serija, koja obuhvata kros-korelacionu analizu u domenu vremena i kros-spektralnu analizu u domenu frekvencija.

Strukturno-tektonske karakteristike šireg dela područja istraživanja proučavane su kombinacijom dva postupka – fotogeološkom interpretacijom aerostereo snimaka i kasnijom terenskom opservacijom i verifikacijom struktura identifikovanih fotogeološkom interpretacijom.

Slika 2 - Šematizovan prikaz injektione i drenažne galerije i pijezometara na levom boku brane „Lazići“ /plan i profil/

Fotogeološka analiza urađena je na fotostkicama srednje razmere 1:15 000, dobijenim povećanjem fotograma. Korišćeni su aerosnimci načinjeni pre izgradnje brane i formiranja akumulacije, snimljeni 1959. godine u srednjoj razmeri 1:32 000. Stereoskopska analiza snimaka omogućila je dobijanje stereomodela visokog kvaliteta, koji je predstavljao izvor podataka o detaljnom rupturnom sklopu. Fotogeološka karta detaljnog rupturnog sklopa sadrži podatke o rupturama šireg područja brane „Lazići“. Pod rupturama se ovde podrazumevaju svi mehanički diskontinuiteti stenske mase koji se u razmeri fotostkice mogu registrovati. Rupture su najčešće dobro izražene, markirane su jasnim prelomima u reljefu, dubokim linearnim tokovima ili linearnim tonskim promenama na površini terena

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Primenjene metode monitoringa nivoa podzemnih voda omogućile su prikupljanje velike količine podataka, čija je analiza dala veoma zanimljive rezultate. Ovi rezultati se dobro korelišu sa rezultatima opita obeležavanja, kao i sa strukturno-geološkim istraživanjima šireg prostora levog boka brane „Lazići“.

Na osnovu dugog perioda osmatranja nivoa vode, može se videti da se protok vode u galerijama naglo povećava kada nivo vode u akumulaciji pređe kotu od 850 m n.v. Ova osmatranja takođe ukazuju na povećanje trenda protoka vode u galeriji D-2 od 2006. godine (slika 3). Ta pojava je verovatno posledica naglih i čestih promena nivoa vode u akumulaciji, što rezultira progresivnim povećanjem procurivanja tokom vremena. Na osnovu toga se može zaključiti da čak ni u slabije vodopropusnim krečnjacima nije moguće potpuno eliminisati procurivanje vode, ali je makar moguće privremeno ga smanjiti do određene granice.

Slika 3 - Dijagram promene nivoa vode u akumulaciji „Lazići“ (KGV) i protoka u drenažnim galerijama D2 i G4 u levom boku brane

Pijezometri P-1a, P-1, P-2D, Pd-11, P-2c i P-2f pokazuju visoke vrednosti koeficijenta korelacije sa akumulacijom, koje su između 0.6 i 0.87. Rezultati

Vilkoksonovog testa ukazuju na značajne razlike između piježometara P-2C i Pd-11, dok kros-korelaciona analiza pokazuje veoma jak i različit uticaj na ponašanje izlaznog signala na ova dva piježometra, što je direktan uticaj akumulacije (slika 4).

Detaljan monitoring nivoa vode jasno pokazuje hidrauličku vezu gorepomenutih piježometara i akumulacije. Ova analiza pokazuje visoku korelaciju između piježometara Pd-11 i Pd-12. Procurivanje vode u injeksionoj galeriji detektovano je na dva različita dela. Prva lokacija se nalazi u blizini piježometara P-2f i P-2C, na kojoj se javlja relativno malo procurivanje kroz injeksionu zavesu pri koti vode u akumulaciji u opsegu 871 – 872 m n.v. Na dijagramu (slika 5) se ovo procurivanje manifestuje promenom nagiba, a nakon toga ponovnim uspostavljanjem trenda povećanja nivoa vode u piježometru. Za razliku od toga, u zoni piježometara P-2D i Pd-11 nivo vode zadržava isti trend nakon kote od 850 m n.v. (slika 5). To ukazuje da je ovo dominantna zona procurivanja kroz injeksionu zavesu.

Slika 4 - Kros-korelogram zavisnosti nivoa vode u akumulaciji „Lazići“ i karakterističnih piježometara u levom boku

Slika 5 - Dijagram promene KGV i reprezentativnih piježometara

Injektiranje koncentrovanog rastvora natrijum-hlorida u bušotinu (slika 6) i merenje promene elektroprovodljivosti i pritiska (nivoa vode u piježometru) takođe pokazuje interesantne rezultate. Nakon sprovedenog opita, konstatovana je značajno brža reakcija

između piježometara P-2f i P-2C, u odnosu na Pd-11 i P-2D, što upućuje na zaključak da je direktno prostrujavanje voda kroz injeksionu zavesu u zoni P-2f i P-2C, dok je cirkulacija voda u zoni Pd-11 i P-2D posredna.

Slika 6 - Šematski prikaz rasporeda injeksionih i opservacionih bušotina tokom opita injektiranja koncentrovanog rastvora NaCl u bušotinu ispred injeksione zavesu (gore) i fotografija opita (dole)

Ovi rezultati inicirali su istraživanja nešto šire zone, i strukturno-geološka istraživanja primenom metoda daljinske detekcije i terenskog istraživanja.

Fotogeološkom analizom aerostereosnimaka utvrđena su tri glavna sistema raseda, koji imaju pružanje: I – Z, ISI – ZJZ i SSI – JJZ (slika 7). Pritom, dominantni sistem raseda je onaj pružanja ISI – ZJZ.

Na osnovu rasednih površi opserviranih na terenu i indikatora kretanja po njima, izračunati su tenzori napona koji su bili odgovorni za (re)aktivaciju ovih raseda (slika 8). Definisane su tri deformacione faze, na osnovu orijentacija glavnih osa napona i modela Andersonovog rasedanja (jedna osa je vertikalna, a preostale dve horizontalne). Najstarija deformaciona faza (slika 8a) predstavlja kompresioni tektonski režim, sa maksimalnom osom kompresije orijentisanom u pravcu SSI – JJZ. Tokom ove faze aktivirani su reversni rasedi generalnog pružanja SI – JZ i I – Z. Druga deformaciona faza (slika 8b) odlikuje se aktivacijom normalnih raseda, uglavnom iz sistema pružanja S – J. Tektonski režim rekonstruisan za ovu deformacionu fazu je ekstenzioni, sa maksimalnom

osom ekstenzije orijentisane u pravcu SI – JZ. Najmlađa deformaciona faza (slika 8c), aktivna i u recentno vreme, predstavlja fazu aktivacije transkurentnih raseda pružanja S – J (sa desnim kretanjima) i ISI – ZJZ (sa levim kretanjima). Tenzor napona odgovoran za aktivaciju ovih sistema raseda odlikuje se maksimalnom osom kompresije orijentacije S – J i maksimalnom osom ekstenzije orijentisanom u pravcu I – Z.

Slika 7 - Fotogeološka interpretacija šireg područja levog boka brane „Lazići“

Slika 8 - Šmitovi dijagrami aktiviranih raseda po fazama i tenzora napona odgovornih za njihovu aktivaciju

Rasedi koji su opservirani na terenu potvrđuju fotogeološku interpretaciju. Regionalno značajni rasedi na fotogeološkoj interpretaciji su na terenu opservirani kao rasedi generalnog pružanja istok – zapad, i aktiviraju se kao levi transkurentni rasedi. Sistem raseda lokalnog značaja je na terenu predstavljen strukturama orijentacije SSI – JJZ.

Terenskim istraživanjima utvrđeni su i veoma razvijeni sistemi klivaža, koji su prikazani fotografijama na slici 9 a, c, d. Neke od ruptura lokalnog značaja koje su interpretirane fotogeološki takođe pripadaju ovom veoma razvijenom sistemu klivaža. Klivaž se javlja u obliku veoma strmih do subvertikalnih sistema pukotina. Duž ovih pukotina intenzivirana je cirkulacija vode i pojačano je ispiranje zdrobljenog stenskog materijala. Kao što se jasno može videti na slici 9 b, levi bok brane „Lazići“ izgrađuje geološka jedinica koju karakteriše smena krečnjaka i laporaca (tj. stena sa više karbonatne komponente i onih sa više glinovite komponente), pa su procesi brečiranja i odnošenja materijala intenzivniji u onim delovima koje pretežno grade laporci.

Slika 9 - Fotografije geoloških struktura: a. i c. – subvertikalne ravni klivaža metarsko-dekametarskih dimenzija, duž kojih je pojačana cirkulacija vode; b. – smena slojeva izgrađenih od krečnjačke i laporovite komponente; d. – odnos slojevitosti (subhorizontalne ravni) i klivaža (subvertikalne ravni) u rasednoj zoni

Ovi rezultati strukturnih istraživanja u direktnoj su vezi sa rezultatima hidrogeoloških istraživanja, a njihovom kombinacijom mogu se utvrditi najverovatniji privilegovani pravci filtracije podzemnih voda (slika 10). Prvi pravac vezan je sa rupturama (rasede ili pukotine po ravnima klivaža) orijentacije SSZ – JJI i generalno I – Z, po kojima se dešava filtracija vode iz akumulacije u geološku sredinu,

generalno ka istoku. Dalja redirekcija pravca kretanja podzemne vode kontrolisana je rasedima generalnog pružanja SSI – JJZ i dešava se paralelno sa njima. Moguće je da do ovakve promene pravca kretanja podzemnih voda ne dolazi isključivo zbog geoloških struktura, već i litoloških karakteristika stenske mase. Kako je već napomenuto, terenska istraživanja pokazuju da je filtracija vode i drobljenje stenskog materijala intenzivnije u delovima stenske

mase u kojima je dominantno prisustvo laporovite komponente. Tako je moguće da se duž ruptura pružanja SSZ – JJI do I – Z vrši pojačano ispiranje laporovitog materijala, koji voda zatim transportuje i taloži duž raseda iz sistema pružanja SSI – JJZ. Na taj način se duž ovih struktura formira lokalna hidrogeološka barijera, usled čega se kretanje vode preusmerava paralelno rasedima koji pripadaju tom sistemu.

Slika 10 - Pretpostavljeni pravci cirkulacije podzemnih voda i voda iz akumulacije na užem području levog boka brane „Lazići“

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata, može se konstatovati, kada su u pitanju ispucale i karstifikovane stene, da gubici predstavljaju neizbežnu pojavu, čak i u slučaju relativno povoljne geološke građe, kao što je slučaj sa levim bokom brane „Lazići“. Detekcija veoma malih iznosa procurivanja zbog toga zahteva primenu vrlo detaljnih istraživanja i kombinaciju različitih hidrogeoloških i geoloških metoda, iz razloga što rezultati nedovoljno fokusiranih istraživanja mogu biti neodređeni. Osnovni motiv sprovođenja ovih istraživanja je stvaranje optimalnih uslova kontrole gubitaka i sprečavanje njihove dalje progresije sa relativno malim obimom sanacionih radova.

Na levom boku brane „Lazići2, primenjenim istraživanjima, detektovane su dve zone procurivanja. U prvoj zoni dešava se brzo procurivanje vode relativno

velikih razmera, usled intenziviranja procesa karstifikacije i/ili oštećenja injekcione zavese u delu kontakta između tela brane i okolne stenske mase, stoga sanacione radove treba usmeriti ka ovoj zoni. Procurivanje u drugoj zoni vezano je za dublji deo stenske mase, manjih je razmera, i ukazuje na smanjenu karstifikaciju stenske mase ili tek manjim delom oštećenu injekcionu zavesu, tako da ovu zonu još uvek nije neophodno sanirati već vršiti kontinuirani monitoring u cilju praćenja mogućeg porasta gubitaka.

Metode daljinske detekcije i strukturno-geološke analize su komplementarne sa primenjenim hidrogeološkim metodama u cilju utvrđivanja cirkulacije podzemnih voda i analizi gubitaka voda iz površinske akumulacije. Dobijeni rezultati istraživanja nedvosmisleno ukazuju da se cirkulacija podzemnih voda i prostrujavanje, kroz i oko protivfiltracione barijere,

obavlja duž tektonskih struktura, kao glavnim konduktorima cirkulacije voda u karstifikovanoj sredini, ali je i delom kontrolisana litološkim karakteristikama stenske mase.

LITERATURA

- [1] Milanović P. T, *Water Resources Engineering in Karst*, CRC, Boca Raton, 2004.

- [2] Ford D, Williams P, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Wiley, 2007.

- [3] Schmid S, Bernoulli D, Fügenschuh B, Matenco L, Schefer S, Schuster R, Tischler M, Ustaszewski K. The Alpine – Carpathian – Dinaride orogenic system: correlation and evolution of tectonic units, *Swiss Journal of Geosciences*, 101, 139 – 183, doi: 10.1007/s00015-008-1247-3, 2008.

SUMMARY

AN IMPACT OF TECTONIC STRUCTURES ON THE GROUNDWATER CIRCULATION AND LOSSES FROM SURFACE ACCUMULATION IN THE AREA OF THE LEFT BANK OF LAZIĆI DAM ON THE TARA MTS.

The process of water leakage determination in the area of water accumulation and left bank of the Lazići dam requires extensive application of different methods: very detailed monitoring data, tracing, structural and tectonic investigations, etc. Obtained results of water losses from the reservoir indicate a tendency for further increases. According to the applied analyses, two zones at the narrow zone of the grout curtain, characterized by different hydraulic mechanisms were detected. Additionally, the general direction of water leakage from the reservoir was detected. An important conclusion is that in such hydraulically intense conditions leakage is unstoppable, but can be partially controlled or slowed down.

Key words: reservoir water losses, less permeable limestone, water level monitoring, structural geology, remote sensing