

BRANA "SVETA PETKA" NA RECI TRESKI HIDRAULIČKA MODELSKA ISPITIVANJA EVAKUACIONIH ORGANA

Cvetanka POPOVSKA¹⁾ i Branislav ĐORĐEVIĆ²⁾

1) Građežen fakultet, Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij", Skoplje, E-mail: popovska@f.ukim.edu.mk

2) Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, E-mail: branko@grf.bg.ac.yu

REZIME

Na reci Treski planira se brana i HE "Sv. Petka", između dve postojeće akumulacije - "Kozjaka" i "Matke", čime se upotpunjava kaskada akumulacija i hidroelektrana na toj reci. U radu se prikazuju rezultati modelskih istraživanja, kojima je proveravana hidraulička stabilnost svih objekata hidročvora i na osnovu kojih su date peporuke za poboljšanje tehničkog rešenja objekata za evakuaciju voda. Takođe, autori ukazuju na mogućnosti da se u tom veoma povoljnom profilu za izgradnju lučne brane realizuje i racionalnija izvedba postrojenja, ukoliko se iskoriste prednosti koje pruža lučna brana za evakuaciju velike vode preko središnjeg dela brane, i ako se uzvodna akumulacija "Kozjak" koristi u fazi građenja brane "Sv.Petka" za zaštitu od velikih voda i upravljanje protocima na reci Treski.

Ključne reči: reka Treska, hidroenergetski potencijali, lučna brana, hidroelektrana, šahtni preliv, hidraulički model, evakuacija velikih voda, optočni tunel

UVOD

I pored ekspanzivnog razvoja matematičkih modela i metoda kompjuterske simulacije, u savremenom hidrotehničkom inženjerstvu postoji još uvek veliki broj problema koji se moraju rešavati eksperimentalnim istraživanjem. Postoje brojni slučajevi, naročito kod složenih hidrotehničkih sistema sa sekundarnim strujnim fenomenima, koji se ne mogu pouzdano matematički opisati i rešavati, već je za pouzdano projektovanje objekata neophodno fizičko modeliranje. Fizički modeli se posebno koriste, kao nerazdvojna faza procesa planiranja, za dimenzionisanje i proveru

funkcionalnosti bezbednosno delikatnih objekata hidrotehničkih sistema. Njima se posebno proverava ponašanje objekata u uslovima delovanja fizičkih procesa ređih povratnih perioda. Taj način analize fizičkih fenomena je, naravno, u početnom trenutku znatno skuplji u poređenju sa simulacijama primenom matematičkih modela. Međutim, rezultati koji se dobijaju eksperimentalnim istraživanjem su veoma često apsolutno neophodni za valjano projektovanje, jer otklanjaju dileme pri izboru koncepcija dispozicija objekata i omogućavaju da se odaberu eksploataciono pouzdana tehnička rešenja. Prednost fizičkih modela dolazi posebno do izražaja u uslovima kada je potrebno dokazati pouzdanost (hidrauličku stabilnost) bezbednosno vrlo osetljivih objekata, kakvi su evakuacioni organi na branama. Zbog toga se može reći da prednost fizičkih modela dolazi posebno do izražaja u uslovima: • kada se na vreme - još u početnim fazama projektovanja - uoče pogreške pri izboru koncepcija tehničkih rešenja, • kada se modeliranjem iznađu racionalnija rešenja, • kada se na vreme otkriju problemi koji bi doveli u pitanje bezbednost objekata, posebno onih čiji bi ispadi iz funkcije izazvali teške posledice u socijalnom i ekološkom okruženju.

Da bi rezultati istraživanja na fizičkim modelima imali upotrebnu vrednost, tj. da bi dovoljno realno odražavali fizičku realnost, postoji više preduslova: • celovito poznavanje principa teorije sličnosti i dimenzionalne analize, • valjana kalibracija i verifikacija fizičkog modela, • odgovarajuća elektronska merna oprema, za dovoljno tačno merenje svih relevantnih dinamičkih fenomena tečenja, • umešna interpretacija dobijenih rezultata.

U ovom radu su prikazani neki važniji rezultati ispitivanja na fizičkom modelu evakuacionih organa

brane "Sv. Petka", čija se izgradnja planira na reci Treski, desnoj pritoci Vardara uzvodno od Skoplja. Ta brana se nalazi uzvodno od brane i akumulacije "Matka", prve i najstarije brane u Makedoniji (sagrađene 1938), a nizvodno od nedavno završene brane "Kozjak", najveće izgrađene brane u Makedoniji, koja formira akumulaciju od $550 \times 10^6 \text{ m}^3$, i koja ima višenamensku funkciju, jer pored hidroenergetike (pribranska HE snage $N = 2 \times 42 = 84 \text{ MW}$, $E = 150 \text{ GWh/god}$), služi i za aktivnu zaštitu Skoplja od poplava (za tu svrhu ima rezervisanu zapreminu za prijem poplavnog talasa od $100 \times 10^6 \text{ m}^3$), za poboljšanje režima malih voda, navodnjavanje, snabdevanje vodom, itd.

Modelska ispitivanja su obavljena u fazi kada je već bio završen idejni projekat, to jest, nakon već izabranog koncepta brane i svih pratećih organa. To je funkciju fizičkog modeliranja suzilo samo na proveru dimenzija i funkcionalnosti evakuacionih organa brane čiji je koncept bio potpuno determinisan u pogledu tipa, položaja i uklapanja u prostor objekata hidročvora. To suženje ciljeva fizičkog modela samo na verifikaciju parametara za izradu glavnog projekta umanjilo je mogućnosti koje fizičko modeliranje pruža, jer su propuštene mogućnosti da se razmatraju i druge dispozicije, što će biti predmet razmatranja u zadnjjoj tački ovog članka.

Modelska ispitivanja su sprovedene u Hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Skoplju. Model je realizovan kao celina čitavog hidročvora koga čine svi ključni objekti: brana, predbrana, ulazna građevina optočnog tunela, priključci u tunelu, šahtni preliv, koleno šahtnog preliva, zasek terena oko šahtnog preliva (bitno zbog sagledavanja strujne slike u akumulaciji u zoni preliva), izlazni portal odvodnog tunela, ulazna građevina temeljnog ispusta, zatvaračnice temeljnog ispusta, ulazna građevina dovodnog cevovoda, turbinski sklopovi i odvodna vada. Model je realizovan u razmeri 1:40, a ispitivanja su sprovedena u dve faze: (1) model sa čvrstim dnom, (2) model sa pokretnim (deformabilnim) dnom. Na modelu sa čvrstim dnom ispitivani su kapaciteti evakuacionih organa, režimi tečenja, lokalni fenomeni i dinamičko funkcionalno ponašanje objekata. Na modelu sa pokretnim dnom su ispitivani erozioni procesi u rečnom koritu nizvodno od brane, u raznim uslovima samostalnog ili zajedničkog rada evakuacionih organa. U obe faze su na modelu ispitivani i uticaji uspora

nizvodne akumulacije Matka na rad evakuacionih organa brane "Sv. Petka".

SISTEM NA TRESKI U SVETLU NOVOG PRILAZA OBNOVLJIVIM ENERGIJAMA

Značaj izgradnje HE "Sv. Petka" mora se posmatrati kroz optiku najnovijih dešavanja u svetskoj energetici. Sve ubrzanije iscrpljivanje neobnovljivih energetske resursa i zaoštavanje energetske probleme u svetu, doveli su do toga da se sve veća pažnja usmerava prema obnovljivim izvorima energije. Među obnovljivim energetske resursima posebno mesto zauzima hidroenergija, koja zahvaljujući mogućnostima velike koncentracije na mestu korišćenja, predstavlja izvor sa najvišom ukupnom energetske dohodovnošću među svim izvorima obnovljive energije. Zbog toga u svetu postoji tendencija da najveći deo tehnički iskoristivog hidropotencijala prelazi u kategoriju ekonomski iskoristivog potencijala. Generalno se može smatrati da će se u doglednoj budućnosti ukupan tehnički iskoristiv hidropotencijal, onaj koji je stavljen pod posebnu društvenu zaštitu (prostornim planovima i drugim merama zaštite namena prostora) - naći u kategoriji ekonomski iskoristivog potencijala i da će se pristupiti njegovom korišćenju. Razloga za tu tendenciju ima više, pri čemu su posebno relevantni sledeći: • sa razvojem elektroenergetskog sistema (ubuduće - EES) i promenama nivoa konzuma i strukture proizvodnje, menja se uloga hidroelektrana (ubuduće - HE) u EES: hidroelektrane preuzimaju sve važniju i delikatniju ulogu u obezbeđivanju vršne snage i energije i ostvarivanju zahtevane rezerve i pouzdanosti sistema; • akcije koje se preduzimaju u svetu, usmerene na smanjivanju emisija GHG gasova (gasova staklene bašte), stavljaju na posebno važno mesto hidroelektrane, kao najefikasnije izvore ekološki čiste, obnovljive energije, čime se na najdelotvorniji način realizuju ciljevi i obaveze koji proizilaze iz poznatog "Kjoto protokola"; • tendencije ubrzanog poskupljenja svih fosilnih goriva (koje dosledno prate porast cena nafte!) menjaju uslove vrednovanja HE: ekonomske postaju sve hidroelektrane čija je cena energije manja od cene energije najskupljih termoelektrana koje svojim ulaskom u pogon istiskuju iz EES; • kompleksno korišćenje voda, u okviru integralnih vodnih sistema, učinilo je ekonomičnim mnoge energetske objekte koji nisu bili ekonomični kada su razmatrani samo kao energetske postrojenja, • uvođenje novih HE u EES povećava ekonomsku stabilnost EES; • brzi razvoj tehnologije opreme za HE (posebno za objekte na malim padovima) značajno proširuje opseg ekonomske

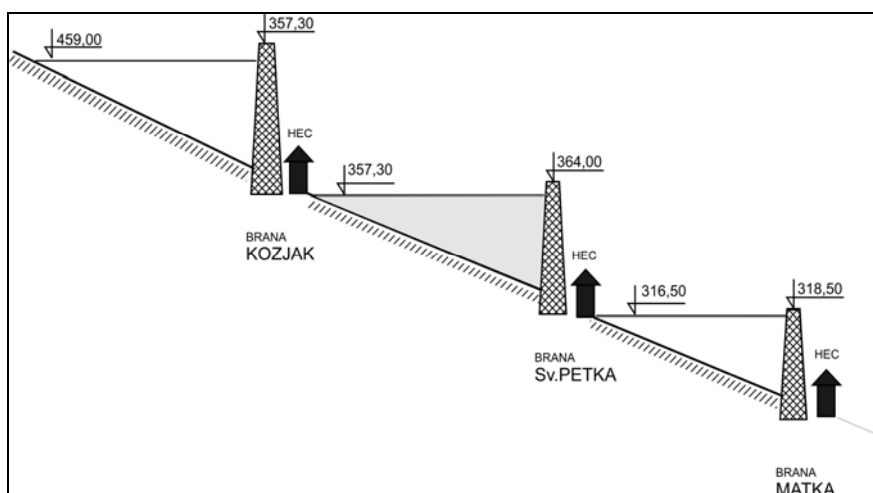
eksploatacija hidropotencijala, jer postaju ekonomski iskoristivi mnogi ranije neekonomični objekti i sistemi;

- hidroelektrane raznih tipova i veličina značajno povećavaju vitalnost EES u uslovima izvanrednih događaja i havarijskih situacija, koje se sada događaju čak i u zemljama sa najrazvijenijim sistemima (u havarijskim situacijama u EES dolazi do punog izražaja vrednost hidroelektrana kao najoperativnijih elektrana).

Navedene tendencije su veoma bitne za valorizaciju hidroenergetskih objekata i sistema, jer u svim zemljama sveta prevode u kategoriju ekonomski iskoristivog potencijala najveći deo tehnički iskoristivog potencijala, uključiv i objekte manjih hidroelektrana. Međutim, još uvek su prisutne neke od predrasuda prema hidroelektranama. Nedovoljno obaveštena javnost, pa čak i jednostrano obrazovani eksperti za pojedine oblasti, skloni su da sa neodmerenom glorifikacijom najavljuju mogućnosti korišćenja pojedinih obnovljivih izvora energije - kao zamenu za hidroelektrane, koje ne retko bez ikakvih ozbiljnijih uporednih analiza optužuju za ekološku destrukciju životne sredine. Pritom se zaboravljaju sledeće važne činjenice: • gotovo svi obnovljivi izvori energije, osim vodnih snaga, veoma su rasuti, te je neophodna njihova složena i skupa koncentracija, da bi se omogućilo korišćenje; • zbog velike rasutosti, korišćenje takvih obnovljivih resursa skopčano je sa velikim utroškom drugih materijalnih resursa (čelika, aluminijuma, bakra, stakla, plastike, betona, itd.), do kojih se dolazi upravo utroškom velikih količina energija, tako da je njihova ukupna neto energetska dohodovnost dosta mala; • za neke obnovljive resurse, kao što je npr. bioenergija, troši se velika količina druge energije (nafte) za proizvodnju i sakupljanje biomase, što se začuđujuće često previđa; • neki obnovljivi resursi (vetar, energija Sunca) vremenski su vrlo promenljivi, tako da njihovo korišćenje ne smanjuje potrebnu instalisanu snagu drugih elektrana, tako da svaki takav izvor mora biti dubliran i sa odgovarajućom klasičnom elektranom, čime se samo povećava pritisak na sve materijalne i energijske resurse; • korišćenje nekih obnovljivih izvora energije nije prihvatljivo upravo sa gledišta očuvanja životne sredine, jer se troši i / ili obezvređuje veliki prostor, odnosno, moraju se pojačano koristiti prljave tehnologije za dobijanje materijala koji su potrebni za njihovo korišćenje. Imajući sve to u vidu, može se nedvosmisleno zaključiti da Makedonija, kao i sve druge zemlje ovog dela Evrope, ulazi u period ubrzanog razvoja svojih do sada dosta zapostavljenih hidroenergetskih potencijala.

Ukupan bruto hidroenergetski potencijal Makedonije se procenjuje na oko 5,52 TWh/god. Od tog potencijala prema najnovijim analizama ESM [5] i još uvek dosta aktuelnoj studiji hidroenergetskih potencijala [1], oko 4,5 TWh/god spada u kategoriju iskoristivog potencijala - tehnički i ekonomski iskoristivog potencijala (potencijal koji se već nalazi u kategoriji ekonomski iskoristivog potencijala, ili se nalazi u kategoriji za koju se sa pravom očekuje da će u najskorije vreme preći u kategoriju ekonomski iskoristivog potencijala). Od toga je u slivu Vardara potencijal od oko 4,56 TWh/god, dok je u slivu Crnog Drima oko 0,96 TWh/god. Pošto je u Makedoniji do sada iskorišćeno samo oko 1,47 TWh/god ili oko 26,6% od procenjenih oko 5,52 TWh/god iskoristivog potencijala, vidi se da posao na realizaciji hidroenergetskih objekata tek predstoji, i da je to jedan od strateški najvažnijih pravaca energetskog razvoja Republike Makedonije u narednom periodu.

Reka Treska, najveća desna pritoka Vardara, jedan je od energetske i vodoprivredno vrlo značajnih vodotoka Makedonije, sa ekonomski iskoristivim potencijalom od oko 250 GWh/god. Na njoj su već realizovane dve akumulacije i hidroelektrane: "Matka" i "Kozjak". HE Matka je jedan od najstarijih hidroenergetskih objekata u Makedoniji (puštena u rad 1938, sa jedinstvenom konstrukcijom lučne brane koju je projektovao akademik Miladin M. Pećinar). Akumulacija Kozjak je veoma važan višenamenski objekat, sa višegodišnjim regulisanjem protoka (relativna zapremina akumulacije $\beta = V_u / 31,5 \times 10^6 \times Q_{sr} = 0,769$), koje pored značajne hidroenergetske funkcije ima i veliki vodoprivredni značaj, posebno na planu uređenja vodnih režima - ublažavanje poplavnih talasa i zaštita grada Skoplja od poplava (za što se rezerviše zapremina od $100 \times 10^6 \text{ m}^3$) i popravljavanje režima malih voda (oplemenjavanje malih voda), što takođe ima veliki značaj za grad Skoplje u malovodnim periodima, jer omogućava ostvarivanje garantovanih protoka u Vardaru koji su ekološki primereni visoko razvijenom i uređenom urbanom sistemu. U okviru poboljšanja vodnih režima akumulacija Kozjak ima ulogu i u obasti navodnjavanja i snabdevanja vodom. Akumulacija "Sv. Petka" se planira između postojeće dve akumulacije, kao što je šematski prikazano na slici 1, i njome se u celosti kompletira taj deo kaskade akumulacija i hidroelektrana na Treski. Sve tri hidroelektrane su pribranske, sa kratkim dovodima, i predstavljaju jedinstven upravljački sistem.



Slika 1. Kaskadni sistem akumulacija na reci Treska

Tabela 1. Osnovne karakteristike sistema na reci Treska

Parametri i karakteristike objekta	Kozjak	Sveta Petka	Matka
Tip brane	Nasuta-kamena	Lučno-betonska	Lučno-betonska
Tip preliva	Šahtni preliv	Šahtni preliv	Bočni preliv
Kapacitet preliva (m ³ /s)	1500	1200	800
Visina brane (m)	114,00	47,50	29,50
Kota krune brane (mm)	471,00	364,00	317,50
Kota maksimalnog nivoa (mm)	469,50	362,30	318,40
Kota normalnog uspora (mm)	459,00	357,30	316,50
Dužina akumulacije (km)	32,00	9,50	5,50
Dužina krune brane (m)	270,00	127,00	64,00
Prosečni protok (m ³ /s)	22,70	23,80	24,10
Ukupna zapremina (m ³)	550×10 ⁶ m ³	9,1×10 ⁶ m ³	3,55×10 ⁶ m ³
Korisna zapremina (m ³)	260×10 ⁶ m ³	1,1×10 ⁶ m ³	2,6×10 ⁶ m ³
Retenziona zapremina (m ³)	100×10 ⁶ m ³	-	-
Mrtav prostor (m ³)	190×10 ⁶ m ³	8×10 ⁶ m ³	1,2×10 ⁶ m ³
Instalisana snaga HE (MW)	84,0	36,4	7,6 (9,6*)
Proizvodnja energije GWh/god	150 GWh/god	48 GWh/god	33 GWh/god
Godina puštanja u rad	2004	U izgradnji	1938

*Mašinska zgrada postojne brane Matka je u rekonstrukciji i planira se proširenje instalisane snage

OPIS FIZIČKOG MODELA

Fizički model brane "Sv. Petka" sa svim pratećim objektima je izveden kao kompletan hidročvor, sa evakuacionim i dovodnim organima, sa odvodnom vadom i delom rečnog korita nizvodno od brane. Radi simulacije odgovarajućih uslova strujanja u zoni prelivnih organa, zahvata temeljnog ispusta, dovodnih

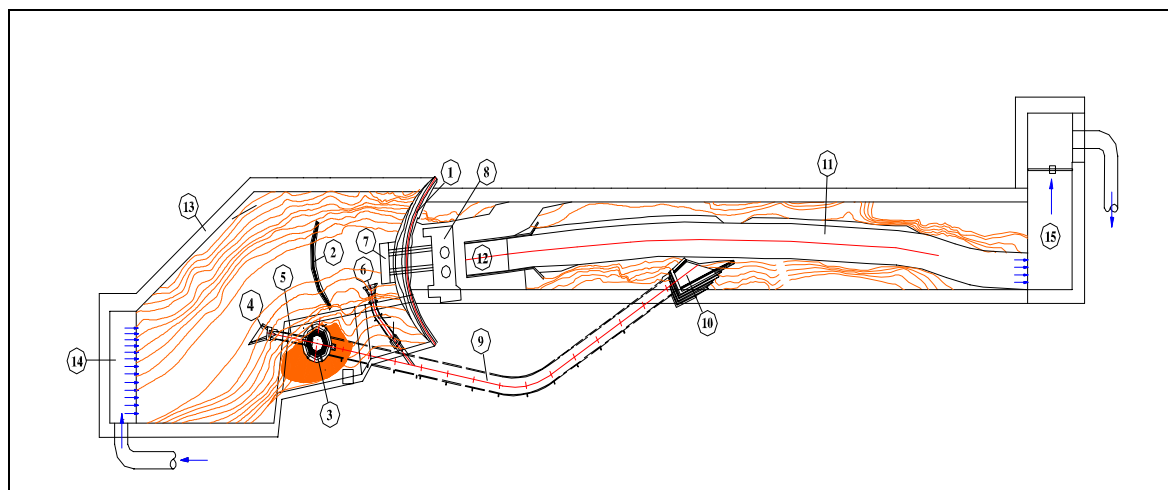
organa i optoćnog tunela - modeliran je i deo akumulacije, na dužini od oko 300 m i širine 200 m. Radi simuliranja uslova isticanja nizvodno od brane, kao i zbog ispitivanja erozionih procesa u rečnom koritu nizvodno od brane, modeliran je i deo korita kanjona nizvodno od odvodne vade na dužini od oko 400 m, a širine oko 100 m.

Imajući u vidu problem istraživanja, dimenzije objekata u okviru idejnog projekta, kao i Programa hidrauličkih modelskih istraživanja, usvojen je model u razmeri 1:40, koji omogućava simulaciju u sličnim hidrodinamičkim uslovima tečenja, uz ostvarenje visoke tačnosti merenja svih relevantnih fizičko-hidrauličkih parametara. Izabrana razmera obezbeđuje ostvarivanje valjane sličnosti modela i prototipa, tako da se rezultati i uočene pojave i izmerene veličine mogu da prenesu u prirodu realno - sa visokim stepenom pouzdanosti.

Deo modela u zoni akumulacije urađen je od peščane ispune i vododrživog betona. Punjenje akumulacije vodom obavljano je preko zatvorenog sistema koji su činili rezervoar, pumpna stanica i cevovodna mreža. Merenja i kontrola dotoka vode obavljano je trouganonim prelivom.

Šahtni preliv je urađen od smole sa staklenom vunom, a vertikalni šaht, koleno i odvodni tunel su urađeni od bezbojnog pleksiglasa, sa ciljem da se obezbedi vizuelno osmatranje u uslovima tečenja. Za merenje pritisaka na ulaznom delu i kolenu šahtnog preliva ugrađeno je ukupno 32 piježometara, od čega 19 na ulaznom delu i 13 na kolenu. Duž odvodnog tunela izvedeno je ukupno 25 piježometara. Temljni ispust sa

ulaznom građevinom i zatvaračnicom izrađen je od bezbojnog pleksiglasa i spojen je sa odvodnim tunelom. Za merenje pritisaka u temeljnom ipustu ugrađeno je ukupno 13 piježometara. Odvodni tunel se završava izlaznim portalom sa ski skokom, koji je na modelu izveden od betona. Jedan piježometar je ugrađen i na pragu na izlaznom portalu prelivnog tunela, za merenje pritisaka ispod mlaza u zoni praga. Optočni tunel sa izlaznom građevinom i svim priključcima na tunel su izvedeni, takođe, od bezbojnog pleksiglasa. Odvodna vada i deo regulisanog korita (u prvoj fazi ispitivanja) su izrađeni od betona, odnosno, kao model sa fiksnim koritom. U drugoj fazi ispitivanja rečno korito oko izlaznog portala odvodnog tunela i nizvodno izvedeno je od nevezanog materijala, u skladu sa geološkim podlogama, da bi se na modelu sa deformabilnim dnom mogli da simuliraju erozioni procesi nizvodno od brane i njenih evakuacionih organa. Mašinska zgrada sa dovodnim organima je takođe modelirana, pri čemu su modelom obuhvaćeni i predturbinski završaci. Nizvodni modeliran deo završava se sabirnim kanalom, na čijem se kraju nalazi tariran merni prelivnik. Osnova modela sa svim glavnim i pratećim objektima prikazan je na slici 2, a razmere osnovnih geometrijskih, kinematskih i dinamičkih parametara su prikazani u tabeli 2.



LEGENDA:

1-Brana	5-Optočni tunel	9-Prelivni/optočni tunel	13-Akumulacija
2-Uzvodni zagat	6-Temeljni ispust	10-Izlazni portal	14-Sistem za dovod vode
3-Šahtni preliv	7-Ulazna građevina za HEC	11-Rečno korito	15-Sistem za odvod vode
4-Ulazna optočnog tunela	8-Mašinska zgrada	12-Odvodna vada	

Slika 2. Osnova modela sa lokacijama objekata

Tabela 2. Hidraulička sličnost

Parametar	Dimenzij a	Razmera prototip / model
Dužina, visina, pritisak, krupnoća zrna	m	$L_R = 40$
Površina	m^2	$L_R^2 = 40^2 = 1600$
Brzine	m/s	$L_R^{1/2} = 6,32$
Protok	m^3/s	$L_R^{5/2} = 10119$
Vreme	s	$L_R^{1/2} = 6,32$
Koeficijent rapavosti	$m^{-1/3} s$	$L_R^{1/6} = 1,85$

REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Optočni tunel. Optočni tunel je dužine 40 m ($L_M=1,0$ m), prečnika 4,0 m ($d_M=0,1$ m). Kapacitet tunela je $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_M=0,01186 \text{ m}^3/\text{s}$). Ulazna građevina je visine 11,0 m ($h_M=0,275$ m) i dužine 4,7 m ($L_M=0,1175$ m). Uzvodni zagat je visine 11,0 m, sa kotom krune 330,00 mm.

Rezultati ispitivanja optočnog tunela na fizičkom modelu omogućavaju da se izvuču sledeći zaključci. Ukazna građevina je dobro locirana imajući u vidu strujnu sliku tečenja u toj zoni. Protok od $120 \text{ m}^3/\text{s}$ se uspešno evakuše pri nivou vode u akumulaciji od 330,00 mm, što znači da kruna uzvodnog zagata treba da bude viša za 1,0 m. Ukoliko se usvoji kapacitet optočnog tunela od $100 \text{ m}^3/\text{s}$, tada se kota krune uzvodnog zagata može da spusti na 327,7 mm, što bi izgradnju predbrane učinilo jeftinijom. U slučaju da optočni tunel radi sa projektovanim maksimalnim kapacitetom - erozija rečnog korita nizvodno od izlaznog portala na odvodnom (kauzalno: prelivnom) tunelu iznosi 6,6 m. Deponovanje erodiranog materijala visine oko 1,4 m registruje se oko 25 m nizvodno od izlaznog portala.

Temeljni isput. Temeljni isput je planiran sa prečnikom 3,5 m ($d_M=0,0875$ m), sa šahtnom zatvaračnicom dimenzija 3,0/2,4 m ($a_M/b_M=0,075/0,06$ m). Dužina ulazne građevine je 11,0 m ($L_M=0,25$ m), a visina je 4,0 m ($h_M=0,1$ m). Projektovani kapacitet temeljnog ispusta je $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Ispitivanja temeljnog ispusta su obavljena u uslovima samostalnog rada temeljnog ispusta pri normalnom nivou u akumulaciji 357,00, pri čemu su varirani različiti stepeni otvaranja zatvarača: 100%, 75%, 50% i 25%. U slučaju potpunog otvaranja zatvarača kapacitet temeljnog ispusta je $158 \text{ m}^3/\text{s}$, što predstavlja povećanje od 14% u odnosu na projektovani računski kapacitet. To je rezultat i

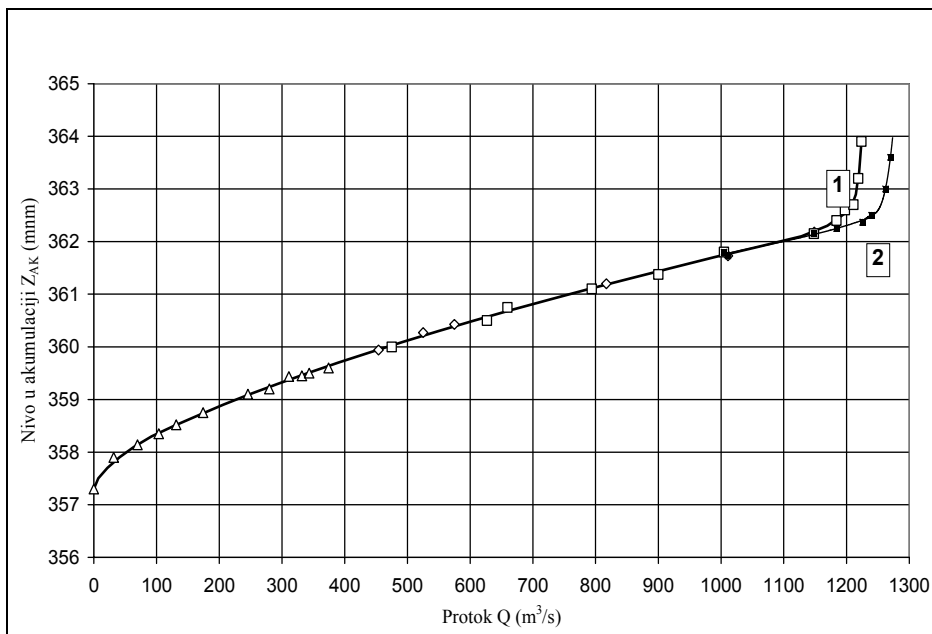
delimično podcenjenih lokalnih gubitaka u projektu, a delimično i zbog registovanih negativnih pritisaka iza zatvarača. U cilju smanjivanja negativnih pritisaka preporučuje se povećanje aeracione cevi sa 800 mm na 900 mm. U zoni priključka aeracione cevi pulsacije pritisaka su u granicama od 11,8 kPa do -22,0 kPa. Slobodni mlaz iz temeljnog ispusta na mestu priključka u odvodni (prelivni) tunel udara u suprotni zid odvodnog tunela i u toj zoni mereni hidrodinamički pritisak iznosi 93,4 kPa. Maksimalni hidrodinamički pritisak od 289,5 kPa je izmeren na ulaznoj građevini za temeljni isput. U uslovima samostalnog rada temeljnog ispusta pri modeliranju sa deformabilnim koritom registovana je erozija korita od 7,8 m neposredno nizvodno od izlaznog potrala, i deponovanje materijala od 1,1 m na desnoj strani, na rastojanju od oko 30 m od izlaznog praga.

Šahtni preliv i odvodni (prelivni) tunel. Najobimnija istraživanja na fizičkom modelu su posvećena šahtnom prelivu i odvodnom tunelu na koji se on nadovezuje (uslovno nazvanom: tunel preliva). To je usledilo stoga što je prilikom projektovanja bilo najviše dilema i otvorenih pitanja upravo u vezi sa izborom tipa preliva, njegovog kapaciteta, oblika i dimenzija. Dileme su bile posebno zbog proporcija oblika šahtnog preliva (kratak visinski nedovoljno razvijen levak), koji odstupa od preporuka koje se daju za takve prelivne objekte. Dileme su se posebno odnosile na: • veličinu šahta; • položaj šahta u odnosu na obalu (dileme zbog uslova nastrojavanja u zoni šahta), • nedovoljnu visinu za povezivanje koničnog dela i kolena šahta, • mali radijus kolena, • veliki prečnik odvodnog (prelivnog) tunela.

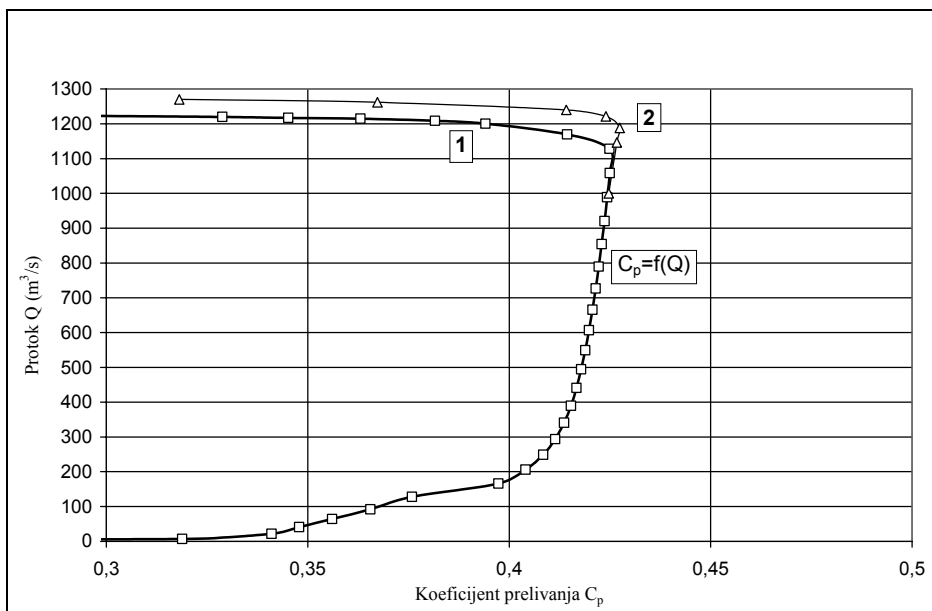
Prečnik odvodnog tunela je 9,4 m ($d_M=0,235$ m), a dužina je 280 m ($L_M=7,0$ m). Prečnik šahta je 22,0 m ($D_M=0,55$ m), a visina vertikalnog dela šahta je 20,0 m ($H_M=0,5$ m). Projektovani kapacitet šahtnog preliva je $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, i taj protok se prema rezultatima fizičkog modela evakuše pri nivou akumulacije 362,5 mm, što je za 0,2 m više od projektovanog maksimalnog nivoa u profilu brane. Strujna slika oko šahta je vrtložna, sa brzinama čiji vektori nisu upravni na ivice prelivnih polja. Zbog takvog vrtložnog tečenja prelivna polja nisu ravnomerno zahvaćena prelivanjem. Fenomen "vodene pečurke" se pojavljuje do nivoa 360,80 mm. Da bi se eliminisali zabeleženi lokalni fenomeni izvedena su sledeća ispitivanja na modelu: (a) sa pregradnim platnom na zaseku, (b) sa poboljšanjem geometrije zaseka, na njegovom uzvodnom kraju. Prvo rešenje nije poboljšalo hidrauličku sliku tečenja u zoni preliva, dok

je drugo rešenje znatno popravilo strujnu sliku u zoni oko šahta i povećalo kapacitet preliva. Tačnije, u tom drugom slučaju zahtevana maksimalna evakuacija od $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ ostvarena je pri projektovanoj maksimalnoj koti u zoni brane od 362,30 mm, znači, bez

prekoračenja definisane maksimalne kote. Modelom ustanovljena kriva protoka šahtnog preliva $Q=f(Z_{AK})$ prikazana je na slici 3, a na slici 4 data je grafička zavisnost koeficijenta preliivanja i protoka, tj. funkcija $C_p=f(Q)$.



Slika 3. Kriva protoka šahtnog preliva: 1 - za projektovanu geometriju zaseka, 2 - za geometriju zaseka koja je korigovana na bazi modelskih ispitivanja.

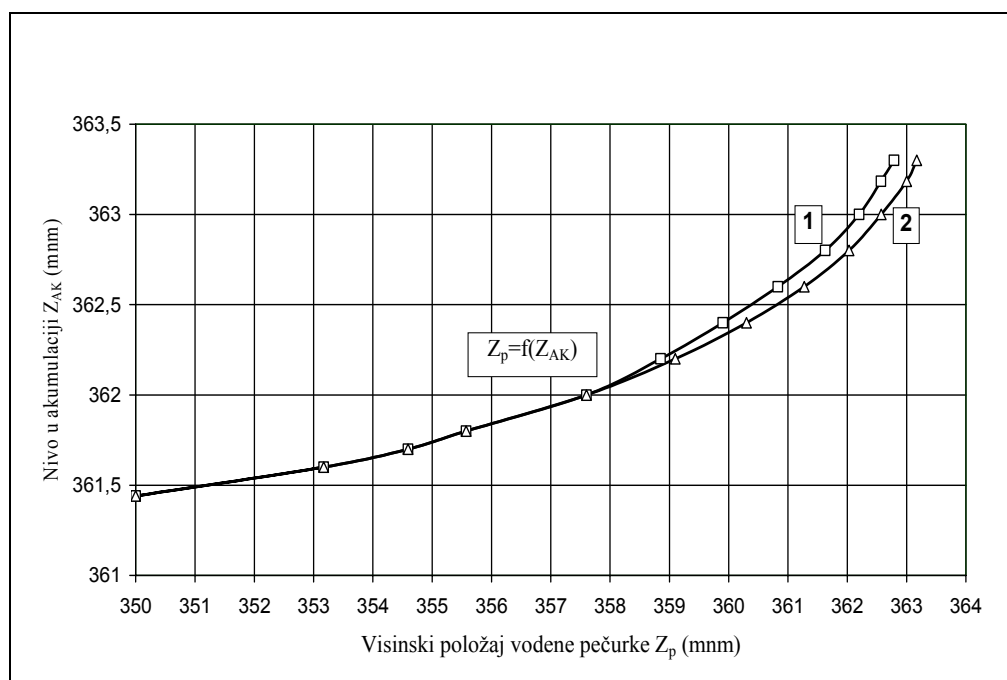


Slika 4. Grafička zavisnost koeficijenta preliivanja C_p i protoka Q (m^3/s). 1 - za projektovanu geometriju zaseka, 2 - za geometriju zaseka koja je korigovana na bazi modelskih ispitivanja.

U slučaju korigovane geometrije zaseka na desnom boku akumulacije u zoni šahta - fenomen "vodene pačurke" se registruje na nižim nivoima, odnosno, ista se podiže do kote 359,70 mm, što je za 1,1 m niže od ispitivanja pri projektovanom rešenju zaseka padina kanjona. Na bazi modelskih ispitivanja konstruisane su grafičke zavisnosti, koje definišu položaj "vodene pečurke" u funkciji nivoa u akumulaciji $Z_p=f(Z_{AK})$ - slika 5, i u funkciji protoka $Z_p=f(Z_Q)$ - slika 6. Maksimalni pritisak od 271 kPa izmeren je na spoljnom delu kolena koje povezuje vertikalni šaht sa odvodnim (prelivnim) tunelom.

Odvodni tunel šahtnog preliva se za sve protoke, uključiv i maksimalni, nalazi u režimu sa slobodnim tečenjem (bez pritiska) i dobro je aerisan. Maksimalna ispunjenost tunela je oko $0,7 \cdot D$. Lokalne deformacije toka se uočavaju na delu tunela od horizontalne krivine

u planu (videti sliku 1), gde tok u tankom mlazu gotovo u celosti obuhvata perimetar tunela. Tečenje nizvodno od horizontalne krivine je u blagoj depresiji, pod uticajem proširenja na izlaznoj građevini odvodnog tunela. Mlaz vode koji napušta izlazni portal ima značajnu kinetičku energiju, a izmerena brzina je veća od 20 m/s. Leva strana rečnog korita na dužini od oko 100 m je neposredno izložena hidrodinamičkom uticaju tog jakog izlaznog mlaza. Na modelu sa deformabilnim dnom zabeležena je erozija korita od 11,34 m. Deformacije rečnog dna (erodiranje i deponiranje) su uočene i nizvodno i uzvodno od izlaznog portala na dužini od oko 180 m. Erozijska jama se rasprostire po celoj širini dela toka u klisuri na širini približno 28 m, a dugačka je oko 40 m. Erodirani materijal se deponuje nizvodno u rečnom koritu, u visini od oko 1,1 m, a uzvodno prema odvodnoj vadi u visini od oko 2,54 m što je rezultat retrogradnog vrtložnog tečenja.



Slika 5. Visinski položaj "vodene pečurke" u funkciji nivoa u akumulaciji. 1 - za projektovanu geometriju zaseka, 2 - za geometriju zaseka koja je korigovana na bazi modelskih ispitivanja.

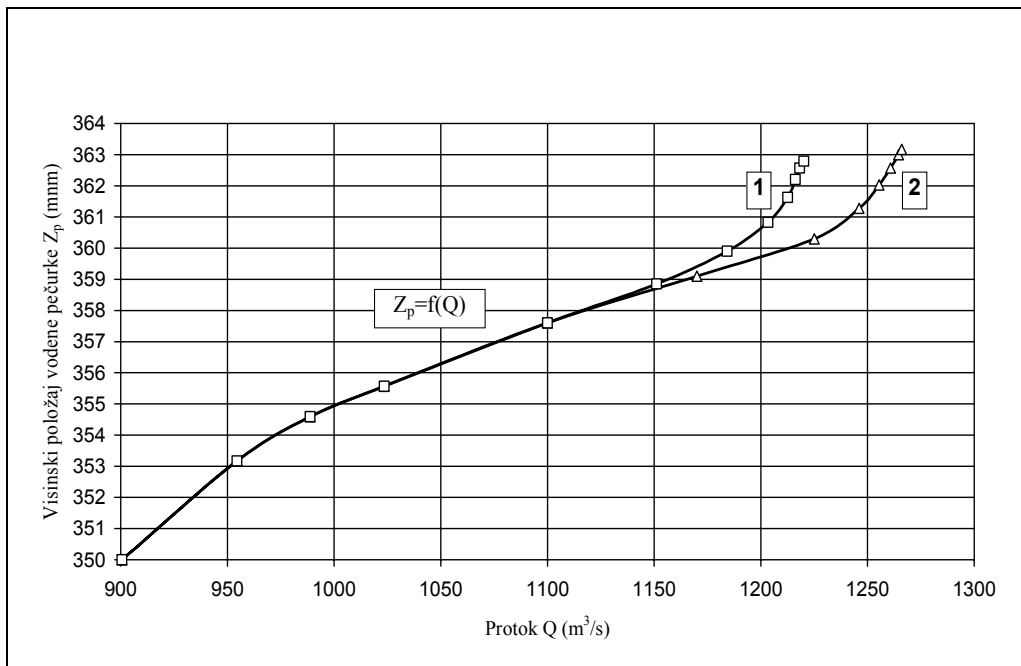
ZAKLJUČCI MODELSKIH ISPITIVANJA

Ispitivanja na fizičkom modelu evakuacionih organa brane "Sv. Petka" sprovedena su zbog realizacije sledećih ciljeva: • definisanje kapaciteta optočnog tunela, temeljnog ispusta, šahtnog preliva; • definisanje režima tečenja u optočnom tunelu, temeljnog ispusta,

odvodnom tunelu šahtnog preliva i u rečnom koritu nizvodno od izlaznog portala; • određivanje strujne slike u akumulaciji, posebno imajući u vidu položaj evakuacionih objekata u odnosu na obalne konture akumulacije; • sagledavanje uticaja konstantnog uspora od nizvodne akumulacije "Matka" na režime rada evakuacionih objekata na brani "Sv. Petka"; •

sagledavanje i kvantificiranje erozionih procesa u rečnom koritu nizvodno od izlaznog portala i odvodne vade; • određivanje međusobne uskađenosti rada evakuacionih organa odvodnog tunela i temeljnog ispusta, u uslovima rada turbina i radnih nivoa vode u

turbinskom slapištu (odvodnoj vadi) mašinske zgrade. Istraživanja su bila realizovana sa vizuelnim opservacijama, sa preciznim merenjem svih relevantnih hidrodinamičkih veličina, i sa registrovanjem svih fenomena tečenja fotografijama i video kamerom.



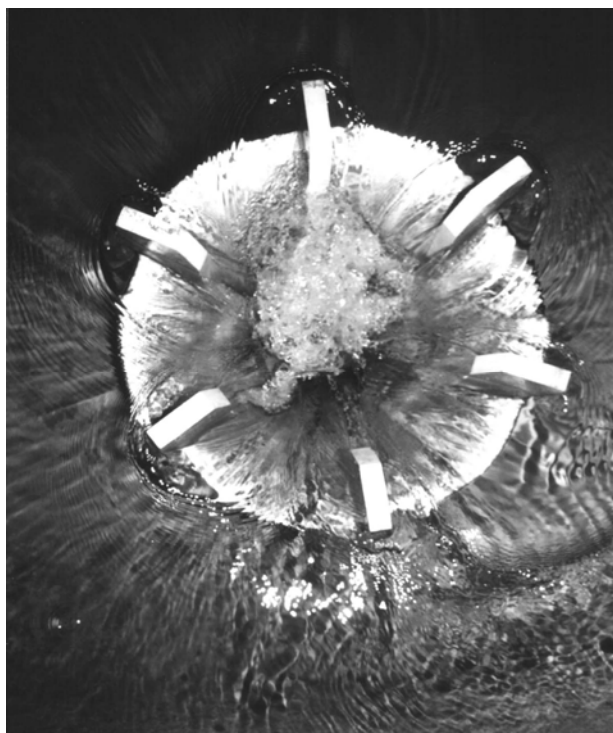
Slika 6. Visinski položaj "vodene pečurke" u funkciji protoka. 1 - za projektovanu geometriju zaseka, 2 - za geometriju zaseka koja je korigovana na bazi modelskih ispitivanja.



Slika 7. Izgled šahtnog preliva sa projektovanim zasekom



Slika 8. Izgled šahtnog preliva sa vodenom pečurkom za maksimalni proticaj u slučaju korigovanog uzvodnog dela zaseka



Slika 9. Položaj vodene pećurke za maksimalni proticaj u slučaju korigovanog zaseka

Nakon izvršenih ispitivanja predložene su neke korekcije dispozicije hidročvora i promene dimenzija nekih objekata, kao na primer: • povećanje visine uzvodnog zagata za merodavan protok skretanja reka od $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ili, smanjivanje računске vode za skretanje reke za $20 \text{ m}^3/\text{s}$; • povećavanje površine aeracione cevi na temeljnom ispustu, radi smanjivanja negativnih pritisaka iza zatvarača; • dislociranje aeracione cevi šahtnog preliiva sa jednog od prelivnih polja na desni bok akumulacije, kako bi se poboljšala strujna slika u zoni šahta; • korigovanje geometrije zaseka padine kanjona u zoni šahta, većim otvaranjem prema uzvodnom delu rečnog korita. Modelska ispitivanja su potvrdila da su svi objekti oko brane dispoziciono i položajno (položaj u planu i visinski odnosi objekata) dobro rešeni projektom. Pored toga, model je dao i vema korisne informacije ne samo sa hidrotehničkog, već i sa konstruktorskog stanovišta, jer su determinisana maksimalna dinamička pulsaciona opterećenja na zidove tunalskih objekata, i pokazana tačna mesta koja konstrukciono treba zaštititi od neželjenih hidrauličkih posledica.

NEKA ZAPAŽANJA I O DRUGIM DISPOZICIONIM MOGUĆNOSTIMA ZA RACIONALNU IZVEDBU HIDROČVORA

Kao što je istaknuto u prethodnim zaključcima, uz usvojena poboljšanja koja su preporučena nakon izvršenih istraživanja na fizičkom modelu, može se reći da je predloženo dispoziciono rešenje hidročvora brane, hidroelektrane i svih pratećih objekata - tehnički sasvim korektno i hidraulički stabilno, te se kao takvo može usvojiti. Međutim, u hidrotehničkom inženjerstvu po tehnno-ekonomskoj logici racionalnija rešenja se traže u fazi projektovanja sve dok se ne pristupi izgradnji. Postavlja se pitanje: da li je predloženo rešenje ujedno i najracionalnije, imajući u vidu prirodne okolnosti koje pruža konkretna odabrana lokacija u uzanom kanjonu Treske u kome se može tako uspešno realizovati veoma racionalna lučna brana. Drugo pitanje je takođe logično: da li se postojanje velike uzvodne akumulacije Kozjak može iskoristiti da se realizuje jeftinije dispoziciono rešenje, posebno sa stanovišta objekata za skretanje reke u fazi građenja. Ovde će se dati razmišljanja autora na tu temu. Njih treba shvatiti kao najdobronamerniju sugestiju autora Investitorima i projektantima ovakvih objekata. Pritom se ima u vidu i činjenica da se takvi objekti mogu realizovati po koncesionim i BOT aranžmanima, a iskustvo pokazuje da koncesionari uvek žele da pored ponuđenog rešenja provere i neke druge opcije, one koje bi omogućile racionalniji objekat, sa istim energetske performansama, i ako je moguće, sa bržim puštanjem u pogon makar jednog agregata.

Ključna "hipoteka" koja ekonomski opterećuje ovo rešenje su veoma veliki tuneli - optočni i odvodni, od kojih je odvodni tunel šahtnog preliiva dugačak 280 m, prečnika čak 9,4 m. Takvo rešenje, sa šahtnim prelivom i ogromnim odvodnim tunelom, nametnuto je insistiranjem na lociranju mašinske zgrade u središnjem delu kanjona, nizvodno od lučne brane. Takvo rešenje je, naravno, tehnički korektno, ali u ovom slučaju nije bilo i jedino izvodljivo, imajući u vidu prirodne topografske i geotehničke okolnosti i postojanje uzvodne velike akumulacije. Čak bi se moglo reći, na bazi poznavanja velikog broja objekata brana i hidroelektrana u svetu, da se u slučaju tako skladno i vrlo racionalno plasiranih lučnih brana u dubokim kanjonima - najređe, gotovo samo u izuzetnim situacijama, primenjuje šahtni preliv, upravo zato jer priroda nudi druge, racionalnije dispozicije.

Pregradni profil, pogodan za veoma racionalnu izvedbu lučne brane, omogućavao je još dve veoma racionalne varijante rešenja hidročvora: (1) sa podzemnom mašinskom zgradom u levom boku kanjona, (2) sa tzv. prelivnom mašinskom zgradom, sa prelivom preko krova mašinske zgrade i odbačenim ski skokom. U oba slučaja otpala bi potreba za šahtnim prelivom, optočnim i odvodnim tunelima. U prvom slučaju, ako bi se mašinska zgrada smestila u stenskom masivu u levom boku, preliv bi se mogao realizovati kao čeon preliv preko lučne brane, sa ustavama i odgovarajućim slapištem (ta dispozicija je po koncepciji slična dispoziciji HE "Piva" na Pivi). To je veoma racionalna izvedba hidročvora, koja se veoma često primenjuje u sličnim terenskim okolnostima (lučna brana u kanjonu sa pogodnim geotehničkim uslovima stenskih masa). Međutim, visinski odnosi u zoni pregradnog profila pružaju mogućnost za realizaciju i druge izvedbe, sa pribanskom elektranom u sredini kanjona, neposredno nizvodno od lučne brane, sa prelivom koji bi se realizovao preko krova mašinske zgrade. I to je izvedba koja je veoma česta u sličnim okolnostima, i upravo po toj dispoziciji u sličnim terenskim i geotehničkim okolnostima bila je projektovana HE Buk Bijela. Ma da je i ta varijanta sasvim ostvarljiva i racionalna, čini se da znatno prihvatljivija varijanta sa podzemnom mašinskom zgradom u levom boku. Takvu varijantu je Projektant na početku projektovanja paralelno razrađivao, ali se od nje prerano odustalo, zbog razloga koji nisu bili tehnički znatno ubedljivi, posebno u svetlu dole navedenih razmatranja mogućnosti racionalnijeg skretanja reke u fazi građenja.

U oba slučaja pri izboru dispozicije i parametara objekata čitavog hidročvora "Sv. Petka" potrebno je znatno više no što je to u sadašnjem projektu učinjeno - osloniti se na činjenicu da uzvodno postoji akumulacija Kozjak. Njena velika zapremina (samo korisna zapremina je $260 \times 10^6 \text{ m}^3$, a ukupna $550 \times 10^6 \text{ m}^3$), može se znatno aktivnije iskoristiti za dispoziciono razvijanje, planiranje i realizaciju racionalnije verzije hidročvora "Sv. Petka". Ukoliko bi se akumulacija "Kozjak" aktivnije koristila tokom fundiranja brane "Sv. Petka", mogla bi se odabrati znatno racionalnija dispozicija i izvedba, pre svega sa stanovišta objekata za skretanje reke.

Klasična opcija skretanja reke bila bi sa kratkim optočnim tunelom i uzvodnim i nizvodnim zagatom. Svi ti objekti realizovali bi se znatno racionalnije no u standardnim uslovima, zbog toga što gradilište štiti uzvodna velika akumulacija Kozjak. Međutim, trebalo

bi ispitati i varijantu koja bi bila bez optočnog tunela, samo sa skretanjem reke privremenim zagatima u samom koritu reke. U toj izvedbi temeljni deo približno polovine brane - sa nisko lociranim otvorom ispusta mogao bi se realizovati samo sa skretanjem reke lokalnim zagatom u koritu Treske, bez optočnog tunela (ispust bi se mogao rešiti i samo kao gradilišna konstrukcija, radi lakše organizacije izvođenja, tako da se kasnije zatvori, pod zaštitom tablastih zatvarača, koji bi se spustili u za to specijalno izgrađene vodice). Sve to, naravno, podrazumeva da se u toj fazi građenja uzvodna akumulacija Kozjak drži u posebnom režimu rada (delimično oborene kote u jezeru - zbog prijema eventualnih talasa većih voda, limitirano ispuštanje), sa smanjenom raspoloživošću njene hidroelektrane u tom kraćem intervalu vremena fundiranja konzole lučne brane u kojoj se nalazi otvor ispusta. Kada se realizuje taj deo fundamenta sa proticajnim otvorom, reka se lokalnim zagatima usmerava prema tom otvoru, realizuje se druga faza zagata u samom toku reke, i pod njihovom zaštitom se obavlja iskop i betoniranje ostalih konzola lučne brane u najdubljem delu osnovnog korita Treske. Privremenim zagatom se štiti i gradilište mašinske zgrade u levom boku.

Izvesne racionalizacije se mogu postići i na postojećoj, idejnim projektom razrađenoj dispoziciji, takođe imajući u vidu da se ta elektrana nalazi pod zaštitom moćne uzvodne akumulacije i da je središnja u kaskadi. Sasvim je izvesno da nije neophodno da se na turbinskim dovodima realizuju, pored leptirastih predturbinskih zatvarača još i remontni tablasti zatvarači, za koje je predviđena dosta skupa i prilično rogovatna konstrukcija zatvaračnice između brane i elektrane. Sa dosta sigurnosti se može proceniti da čak i najoprezniji koncesionar ne bi prihvatio da objekat opterećuje još i tim sadržajem, koji uopšte nije neophodan za objekat koji je tako smešten u kaskadi i koji raspolaže relativno malom snagom i malom korisnom zapreminom akumulacije. Leptirasti zatvarači su veoma pouzdani, a u slučaju njihovog eventualnog otkaza uvek se može, bez ikakvih većih posledica po EES i čitavu kaskadu, pod zaštitom akumulacije Kozjak oboriti kota u jezeru Sv. Petka, tako da leptirasti zatvarači postanu pristupačni za popravku. Uostalom, čitava filozofija planiranja manjih objekata u okviru kaskadnih sistema i jeste da se takvi objekti oslobode svih nepotrebnih elemenata, onih čije funkcije zaštite može da primi na sebe neki uzvodni objekat sa većim stepenom regulisanja protoka.

ZAKLJUČAK I PREPORUKA

Na osnovu istraživanja na fizičkom modelu i na bazi razmatranja čitavog projekta, može se zaključiti sledeće: (a) projektno rešenje brane, elektrane i pratećih objekata u okviru hidročvora "Sv. Petka", uz realizaciju mera korekcije koje su predložene nakon modelskih istraživanja - predstavlja hidraulički korektno i stabilno rešenje, koje će obezbediti pouzdanu eksploataciju; (b) to rešenje se može učiniti još racionalnijim, ukoliko se računa sa mogućnostima koje pruža uzvodna akumulacija "Kozjak", kao objekat koji omogućava vrlo operativno kontrolisanje vodnih režima; (c) autori smatraju da varijanta sa mašinskom zgradom u levom boku veoma izgledna i preporučuju da se i ona dovede do istog nivoa projektnog razmatranja, jer može da pruži ekonomičnije rešenje.

LITERATURA

- [1] Đorđević, B. i drugi, (1980). Studija tehnički i ekonomski iskoristivih potencijala SFRJ, JUGEL, Beograd
- [2] Đorđević, B., (1989). Korišćenje vodnih snaga, Objekti hidroelektrana, Naučna knjiga-Gravevinski fakultet, Beograd
- [3] French, R.H. (1986). Open Channel Hydraulics, McGraw Hill Book Company, New York
- [4] Jasna Ivanova Davidović (2002), Hidropotencijalot vo RM, Segašna izgradenost i možnosti za iskoristivanje, Savetovanje Vodostopanstvo'2002, Uvodni referat
- [5] Novak, P., Čábelka, J. (1981). Models in Hydraulic Engineering, Physical Principles and Design Applications, Pitman Advanced Publishing Program, Boston-London
- [6] Popovska, C., Cvetkovski, S., Ivanoski, D., Gešovska, V., (2004). Hidraulički modelski ispitivanja na evakuacionite organi na branata "Sv. Petka", Gradežen fakultet, Skopje
- [7] Popovska, C., (2000). Hidraulika, Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij", Gradežen fakultet, Skopje

HYDRAULIC SCALE MODEL INVESTIGATIONS OF THE ST. PETKA DAM ON THE TRESKA RIVER

by

Cvetanka POPOVSKA ¹⁾ i Branislav ĐORĐEVIĆ ²⁾

¹⁾ Faculty of Civil Engineering, University of "Ss. Cyril and Methodius", Skopje, E-mail: popovska@gf.ukim.edu.mk

²⁾ Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Belgrade, E-mail: branko@grf.bg.ac.yu

Summary

The "St. Petka" dam and hydropower plant is planned to be built on the Treska River, to be located between two existing reservoirs - "Kozjak" and "Matka", thus completing the cascade of dams aiming at the full utilization of the hydropower potential of the river. The paper presents the results of scale model tests by which the hydraulic performance and stability of the dam and appurtenant structures was verified, and on the ground of which proposals were made to improve the technical solution of the spillways. The tests have moreover

indicated the possibility of a more rational solution, taking into account that the river canyon is very convenient for the construction of an arch dam, with a spillway in its middle part. During the stage of dam construction, the upstream reservoir "Kozjak" could be used for flood protection and flow regulation.

Key words: river Treska, hydropower potential, arch dam, hydropower plant, shaft spillway, hydraulic model, evacuation of floods, diverse tunnel, erosion

Redigovano 05.12.2005.