

HIDRAULIČKI ASPEKTI PREPROJEKTOVANJA BRANE BEKME ČIJA IZGRADNJA SE NASTAVLJA POSLE DUŽEG PERIODA

Biljana TRAJKOVIĆ, nezavisni konsultant
Spoljni saradnik IK konsalting i projektovanje, Beograd

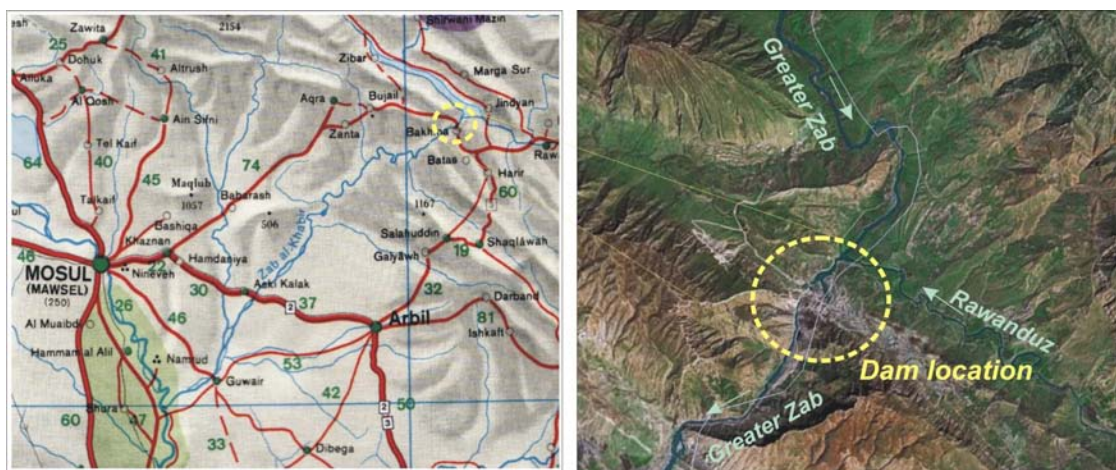
REZIME

Brana Bekme, projektovana je na reci Veliki Zab, oko 100 km severno od grada Erbila, Kurdistan, Irak. Izgradnja brane i pratećih objekata je počela, ali je zbog rata obustavljena 1990. godine kada je oko 30% radova bilo izvršeno. Posle više od 15 godina, s obzirom na izmenjenu društveno političku situaciju, projektovana visina brane od 230 m sa pratećom kotom maksimalnog uspora 599 mmm koja bi potopila oko 70 kurdskih sela nije bila prihvatljiva, pa su razmatrana rešenja sa značajno nižim kotama vode (550 mmm i 517 mmm) i krune brane. Pri razmatranju alternativnih rešenja bilo je potrebno iskoristiti izgrađene (potpuno ili delimično) objekte – optočne tunele, tunele za evakuaciju velikih voda, podzemne prostorije za hidroenergetsko postrojenje sa dovodnim i odvodnim tunnelima. U ovom radu dat je prikaz alternativnih rešenja sa osvrtom na mogućnosti i način iskorišćenja već izgrađenih objekata.

Ključne reči: brana Bekhme, evakuacija velikih voda, optočni tuneli, temeljni ispust

1. UVOD

Idejni projekat za branu Bekhme u Iraku [1], završen 1986. godine, predvideo je nasutu branu konstruktivne visine 230 m, sa svim pratećim objektima (hidroelektrana, objekti za evakuaciju velikih voda, ispusti) kao podzemnim, ukopanim u stenskoj masi na levoj obali. Već sledeće godine počela je izgradnja. Do 1990. godine, kada su zbog početka Gofskog rata radovi zaustavljeni, veći deo potrebnih iskopa za prateće objekte je bio gotov, a počelo se i sa postavljanjem betonske obloge u tunnelima. Procenjeno je da je do trenutka zaustavljanja radova stepen izvršenja radova bio 36%, ali je zbog ratnih razaranja, taj procenat pao na 27%.

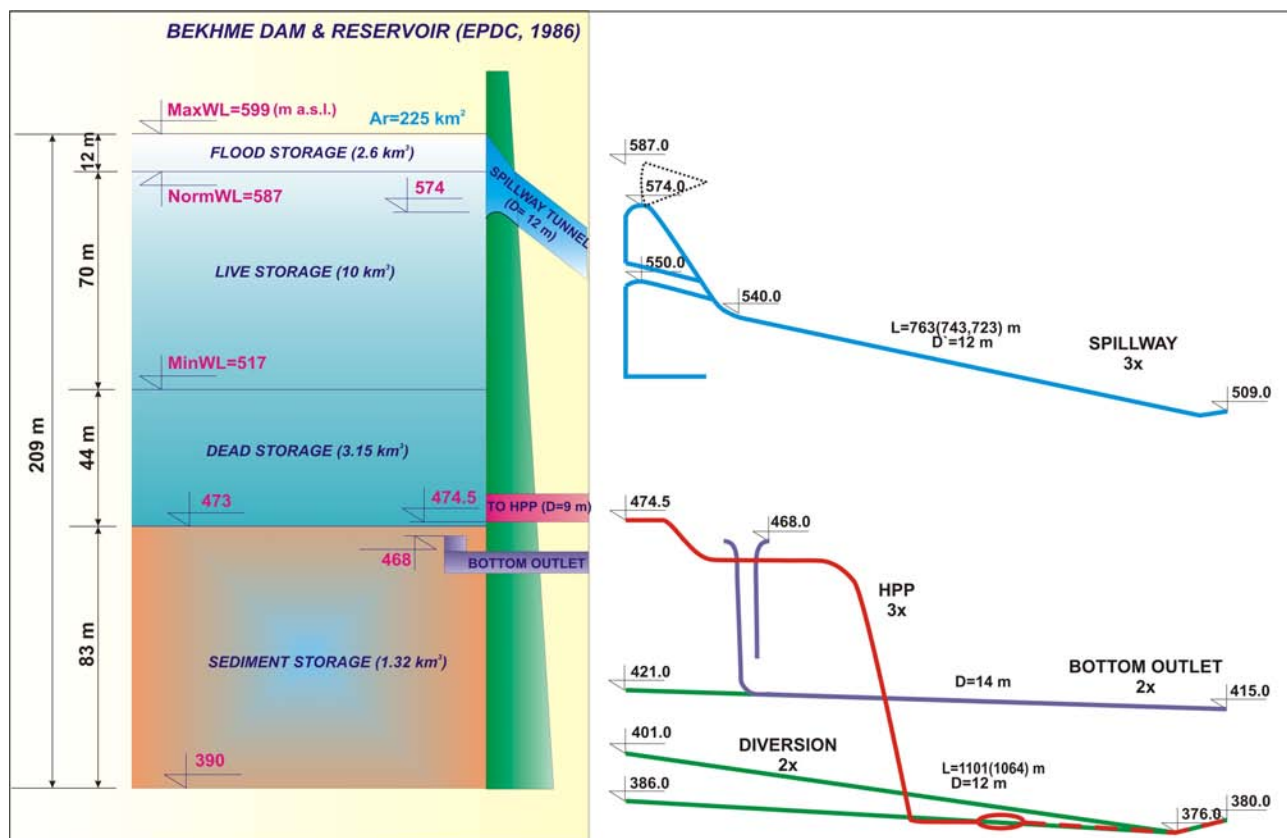


Slika 1. Lokacija brane Bekhme

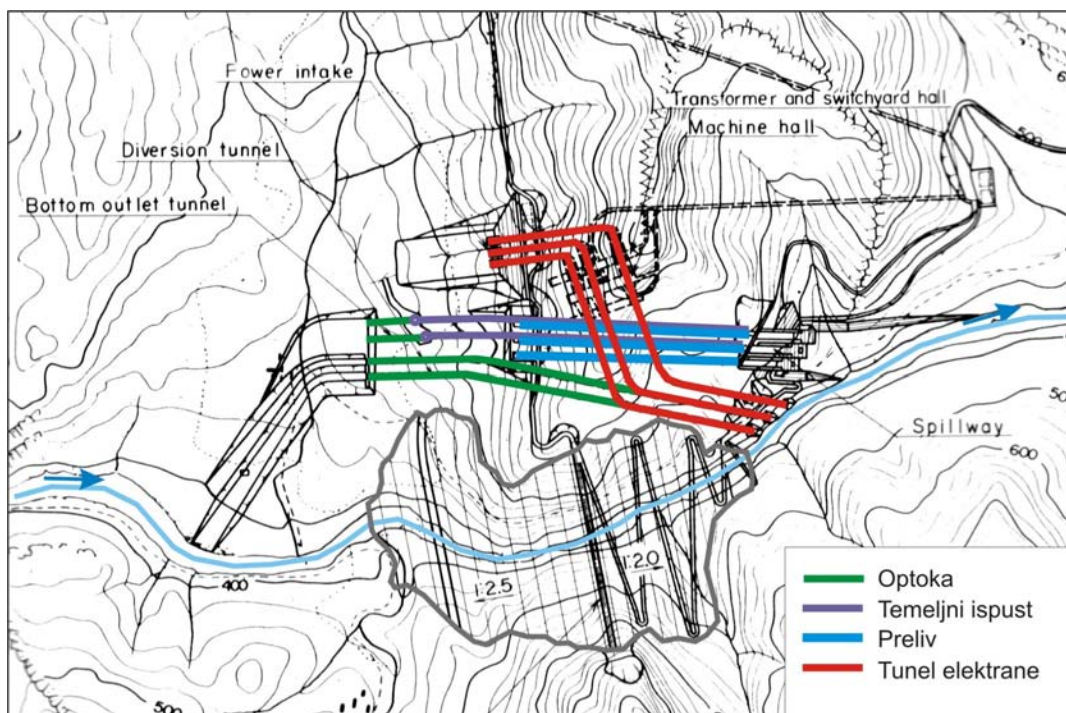
Posle više od 15 godina, pokrenuta je inicijativa da se sa izgradnjom brane nastavi. Međutim, zbog izrazitih socioloških razloga – potencijalno potapanje, tj. raseljavanje oko 70 kurdskih sela – inicijativa je zaustavljena, a započelo se sa traženjem kompromisnog rešenja. Brana sa manjom visinom bi u određenom procentu umanjila raseljavanje, ali bi svakako umanjila i sve projektom predviđene efekte – proizvodnju električne energije, količinu voda raspoloživu za navodnjavanje itd. Za potrebe procene tehničkih, ekonomskih i socioloških konsekvenci alternativnih rešenja brane sa redukovanim visinama urađena je Studija [3], čiji se jedan deo prikazuje ovde.

2. POSTOJEĆI PROJEKTNI PODACI

Brana Bekme je projektovana na reci Veliki Zab, levoj pritoci Tigra. Osnovna namena izgradnje brane visoke 230 m i formiranja jezera ukupne zapremine od 17 km³ (površine akumulacije pri maksimalnom usporu 225 km²) je regulisanje voda za potrebe navodnjavanja (550000 ha), proizvodnje električne energije (instalirana snaga 1500 MW, prosečna godišnja proizvodnja 4700 GWh), i odbrane od poplava. Karakteristični nivoi i zapremine akumulacije, kao i karakteristične kote ulaza i izlaza u hidrotehničke tunele, prikazani su na Slici 2. Dispozicija brane i objekata data je na slici 3.



Slika 2. Karakteristični nivoi i zapremine akumulacije Bekme i kote ulaza i izlaza tunela – projektno rešenje po EPDC iz 1986



Slika 3. Brana Bekme sa pratećim objektima – dispozicija

Od pratećih objekata uz branu, predviđena su tri odvojena preliva sa radijalnim ustavama od kojih se svaki nastavlja u tunel (prečnika 12 m, dužina od 720m do 760 m) kojim se odvodi nizvodno do ski skoka. Ukupan kapacitet preliva je oko 9000 m³/s. Predviđena su četiri optočna tunela, dva sa ulazom na nižoj koti (386 mm i 401 mm, prečnika po 12 m, dužina 1100 i 1060 m) i dva sa ulazom na višoj koti (421 mm, prečnika po 14 m, dužina 1120m i 1100 m). Dva tunela od po 14 m se u kasnijoj fazi modifikuju u temeljne ispuste. Ulazi u temeljne ispuste projektovani kao šahtovi visine oko 35 m, prečnika 10 m koji dovode vodu do tunela, a zatim tunelom do zatvaračnice postavljene na mestu injekcione zavese – od koje se voda dalje prevodi sa po dva čelična cevovoda (prečnika 5.2 m, dužina oko 930 m) nizvodno. Uz optočne tunele projektovana je uzvodna predbrana od 80 m i nizvodna od 40m. Dalje, projektovana su i tri zahvata za hidroelektranu, svaki povezan tunelom prečnika 9 m sa elektranom. Svaki od navedena tri tunela se dalje grana na po dva cevovoda (prečnika oko 5 m) koji dovode vodu do ukupno 6 agregata. Instalirani proticaj po agregatu je 166,7 m³/s, odnosno ukupni instalirani proticaj za elektranu 1000 m³/s. Tri odvodna tunela prečnika po 12 m svaki sa vodnom komorom,

projektovana su nizvodno od podzemne mašinske hale (dimenzije hale – 26m širina, 52 m visina i 192 m dužina).

3. ZAHTEVI I USLOVI ZA PREPROJEKTOVANJE

Pri razmatranju alternativnih rešenja – redukovanih visina brana postojali su zahtevi/ograničenja Investitora koji su morali biti zadovoljeni, kao što su:

- Razmotriti dva tipa brane – nasutu i od valjanog betona
- Kotu maksimalnog uspora smanjiti sa 599 mm na oko 550 mm i ispod
- Korisni prostor akumulacije smanjiti sa 10 km³ na oko 3 km³ i manje
- Zapreminu za nanos ostaviti istu kao i u prethodnom projektu
- Zapreminu za odbranu od poplava ostaviti istu kao i u prethodnom projektu, i zadržati iste uslove za puštanje vode nizvodno
- Maksimalno iskoristiti sve već postojeće izvedene radove i uklopiti u novo rešenje

4. IZBOR ALTERNATIVNIH VISINA BRANE

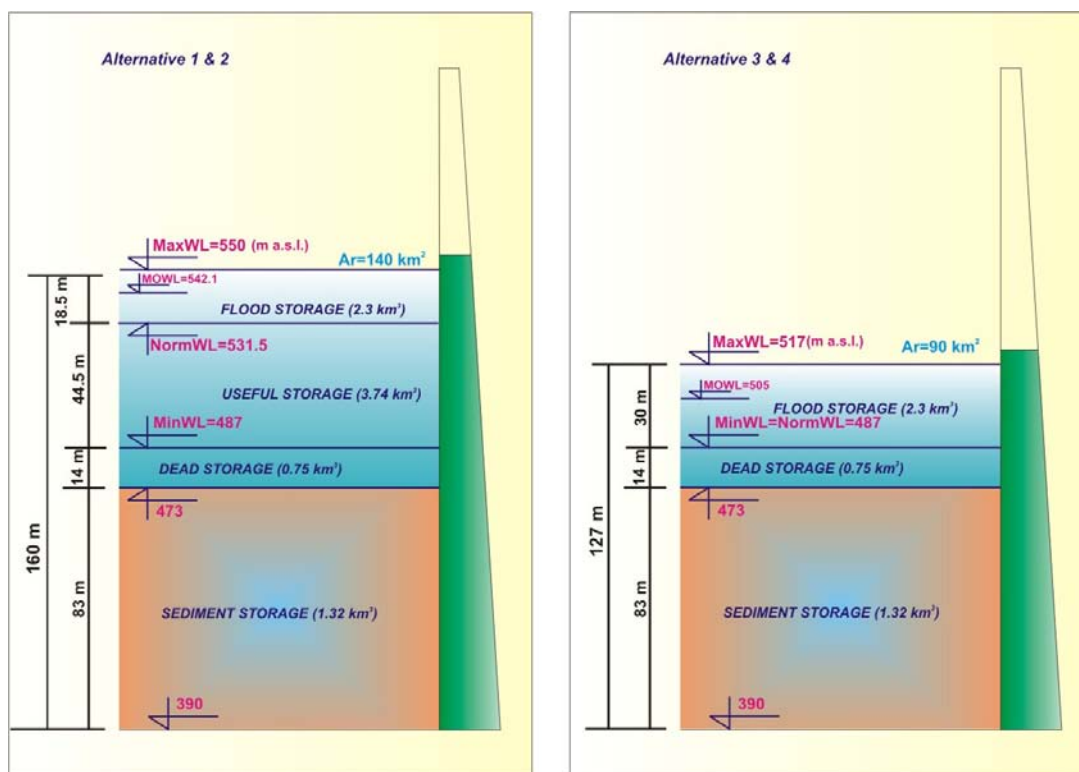
Kao merodavne, razmotrene su alternative sa spuštanjem Maksimalnog nivoa vode (MaxWL) u rezervoaru sa 599 mm na 550 mm i na 517 mm, tj. spuštanje visine brane praktično za 49 m (oko 20%), odnosno za 82 m (oko 35%). Svako dalje spuštanje ne bi moglo da zadovolji postavljene zahteve Investitora.

Za obe navedene kote, analizirani su slučajevi dva tipa brane – nasute brane i brane od valjanog betona (RCC). Navedena alternativna rešenja Alternativa 1 – MaxWL = 550 mm i RCC brana, Alternativa 2 – MaxWL = 550 mm i nasuta brana, Alternativa 3 – MaxWL = 517 mm i RCC brana, Alternativa 4 – MaxWL = 517 mm i nasuta brana. Sheme rezervoara sa karakterističnim kotama i zapreminama za razmatrane alternative prikazane su na slici 4.

Izbor alternativnih kota za MaxWL nije bio slučajan. Kota 517 mm usvojena je kao minimalna kota pri kojoj se zadovoljavaju uslovi zadržavanja potrebnih zapremina rezervoara za nanos i poplave i omogućava rad hidroelektrane – kao protočne. “Mrtvi prostor”,

postavljen iznad prostora za akumulaciju, smanjen je sa 44 m (usvojen u postojećem projektu isključivo radi omogućavanja većeg pada za rad elektrane) na 14 m (samo minimalnu visinu potrebnu za sprečavanje uvlačenja vazduha u cevovode elektrane), pa je kota normalnog uspora spuštena na NormWL = 487 mm.

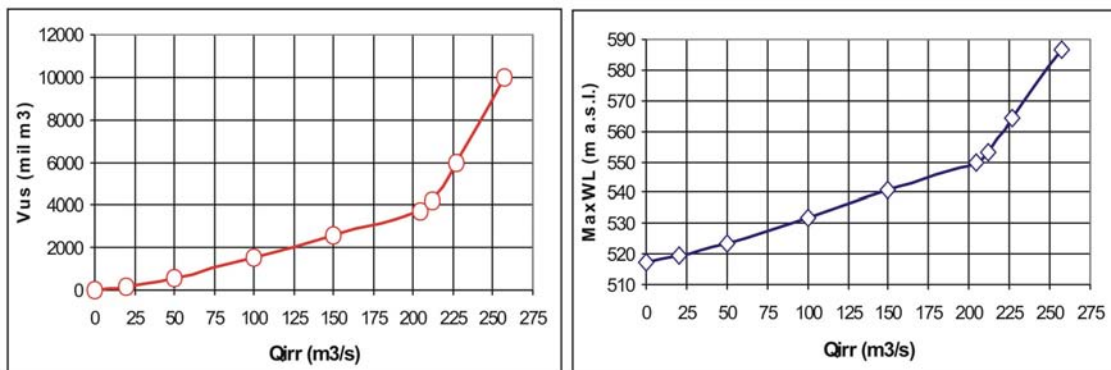
Kota 550 mm, kao kota MaxWL, usvojena je posle analize količina vode Q_{irr} koje se iz akumulacije mogu ispuštati za potrebe navodnjavanja (sva navedena voda za navodnjavanje se ispušta kroz elektranu), a za različite veličine korisne zapremine (V_{us}). Na dijagramima na slici 5 su dati rezultati analize (bilansiranja akumulacije), gde se jasno primećuje da zavisnost raspoložive količine vode od veličine korisne zapremine ima prelomnu tačku za $V_{us} = 3.74 \text{ km}^3$ i $Q_{irr} = 204 \text{ m}^3/\text{s}$. Svako malo povećanje raspoložive količine voda za navodnjavanje preko $204 \text{ m}^3/\text{s}$, vodi značajnom povećanju korisne zapremine. Tako se povećanjem zapremine sa $3,74 \text{ km}^3$ na 10 km^3 (povećanje 167%) raspoloživa količina povećava sa $204 \text{ m}^3/\text{s}$ na $257 \text{ m}^3/\text{s}$ (26%). Za $Q_{irr} = 204 \text{ m}^3/\text{s}$ odgovarajuća kota maksimalnog uspora je 550 mm, usvojena za dalja razmatranja.



Slika 4. Shema rezervoara za razmatrana alternativna rešenja

Značajno smanjenje korisne zapremine akumulacije, imalo je za posledicu smanjenje instalisanog kapaciteta elektrane. Tako je za slučaj $MaxWL = 550$ mm instalisani proticaj $Q_{ins} = 780 \text{ m}^3/\text{s} = 2.1 \cdot Q_{av}$ (Q_{av} je

srednji višegodišnji proticaj reke na lokaciji brane $370 \text{ m}^3/\text{s}$), a instalisana snaga 840 MW , dok je za slučaj $MaxWL = 517$ mm instalisani proticaj $Q_{ins} = 480 \text{ m}^3/\text{s} = 1,3 Q_{av}$, a instalisana snaga 380 MW .



Slika 5. Zavisnost korisne zapremine V_{us} i kote maksimalnog uspora $MaxWL$ od količine vode za navodnjavanje Q_{irr}

5. IZBOR ALTERNATIVNIH REŠENJA HIDROTEHNIČKIH OBJEKATA

5.1 Skretanje vode tokom građenja – optočni tuneli

S obzirom da su optočni tuneli praktično završeni, isti bi se koristili u slučaju bilo kog izbora alternativnog rešenja. Dimenzionisani su na 200-godišnju veliku vodu (pik poplavnog talasa je $12250 \text{ m}^3/\text{s}$). Ukupni kapacitet tunela je $9160 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2 Zaštita od poplava – evakuacija velikih voda

Iako slivna površina Velikog Zaba do brane Bekme iznosi samo 12% od slivne površine Tigra uzvodno od Bagdada, prosečan godišnji oticaj na profilu brane čini čak 30% od oticaja Tigra kod Bagdada. Imajući ovo u vidu, projekat brane Bekme je ekstremno važan za stanovišta zaštite od poplava nizvodnih područja.

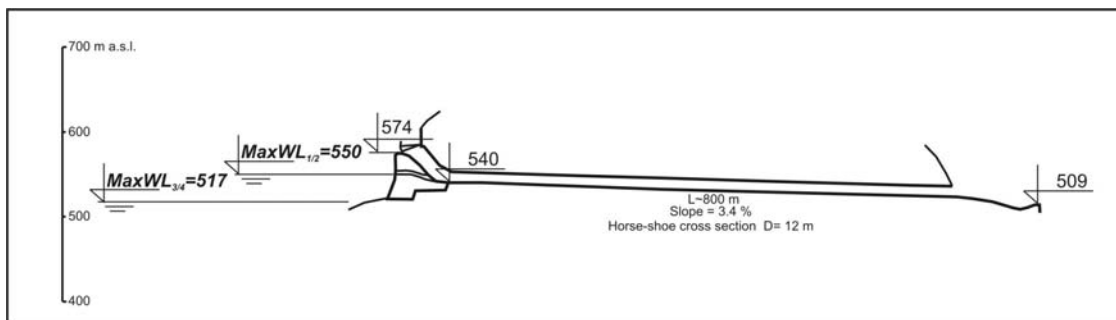
Pravila ispuštanja velikih voda su precizno definisana u postojećem projektu, a ista se moraju zadržati i u slučaju alternativnih rešenja:

- Poplave do povratnog perioda 1 u 1000 godina se moraju kontrolisano (ustavama) ispuštati nizvodno sa maksimalnim proticajem do $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri nailasku poplave 1 u 1000 godina u rezervoar sa kotom normalnog uspora maksimalna kota u rezervoaru koja se dostiže se označava sa $MaxOWL$.

- U slučaju nailaska velikih voda manje verovatnoće pojave, proticaj koji se ispušta nizvodno se kontroliše ustavama do proticaja $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (kada se dostiže nivo u akumulaciji – $MaxOWL$), a zatim se ustave potpuno otvaraju
- Maksimalni proticaj koji se sme ispuštati nizvodno u slučaju nailaska PMF je $12130 \text{ m}^3/\text{s}$ (najveći do sada zabeleženi proticaj na mestu brane).
- Slučaj incidentne situacije kada je jedna ustava ne otvara mora se takođe razmotriti, i u ovom slučaju, poplavni talas pojave 1 u 10000 godina se mora propustiti nizvodno bez preliivanja brane.

Za evakuaciju velikih voda, prvo je razmotrena mogućnost korišćenja tri projektovana preliiva sa ustavama sa tunnelskim odvodima čiji je iskop u većoj meri završen. Upoređivanjem alternativnih $MaxWL$ sa kotama ulaza i izlaza navedenih tunela zaključeno je da se oni ni u kojoj varijanti i ni u kom svom delu ne mogu koristiti za svrhu evakuacije voda. To se vidi na slici 6.

Dalje je, proverom proračuna transformacije PMF (Probable Maximum Flood) talasa kroz akumulaciju za projektovano rešenje preliiva, zaključeno da je maksimalni nivo rezervoara nešto niži od 599 mm , pa zapremina predviđena za zaštitu od poplava nije $2,6 \text{ km}^3$ već $2,3 \text{ km}^3$, sa čim se ušlo u dalje analize alternativnih rešenja.



Slika 6. Projektovani i delimično izvedeni podužni profil preliva sa tunelom – sa označenim maksimalnim nivoima u rezervoaru u slučaju alternativnih rešenja

Projektovani prelivi su širine prelivne ivice 12 m, dok je maksimalna visina prelivnog mlaza čak 25 m (vidi sliku 2). Ako se sličan metod postavljanja preliva primeni i u slučaju alternativnih manjih visina brane, dolazi se do visina prelivnog mlaza od 30 m, pa do 40 m, što nije primenjeno u dosadašnjoj praksi. Zbog navedenih problema, tražena su drugačija rešenja koja bi zadovoljila sve zadate kriterijume i operativna pravila, a koja sa druge strane ne bi značajno povećala troškove.

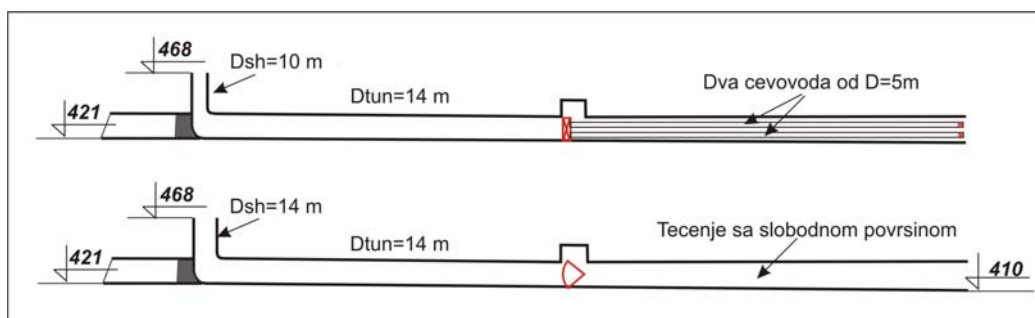
Kao pragmatično rešenje, razmotreno je korišćenje tunela temeljnog ispusta za kontrolu velikih voda do 1000-godišnje, tj kontrolisanog ispuštanja do 4000 m³/s. Naime, proveren je kapacitet objekata budućeg temeljnog ispusta šaht-tunel (bez postavljanja čeličnih cevovoda) i uočeno je da se potreban kapacitet od 4000 m³/s za kotu minimalnog uspora, za oba tunela dobija ukoliko se ulazni šaht proširi sa 10 m na 14 m (Slika 7). U ovom slučaju zatvaračnica bi se postavila na isto mesto – lokacija injekcione zavese, sa radijalnim

ustavama za regulaciju proticaja. Nizvodno od zatvaračnice je tečenje sa slobodnom površinom što smanjuje troškove tunelske obloge u odnosu na slučaj tečenja pod pritiskom u potpunom tunelu. Za slučaj proticaja u jednom tunelu od 2000 m³/s, srednja brzina toka pod pritiskom je 13 m/s. Kapacitet jednog tunela je dat tabelarno.

Tabela 1. Kapacitet jednog modifikovanog tunela temeljnog ispusta Q_b za različite nivoe u akumulaciji Z_r

Z_r (m a.s.l.)	487.0	517.0	531.5	550.0
Q_b (m ³ /s)	2167	2621	2815	3043

Modifikacija tunela temeljnog ispusta je povoljna sa stanovišta smanjenja kapaciteta i troškova dodatnih novih objekata za evakuaciju velikih voda (jer se očigledno projektovani, i delimično izvedeni prelivi, ne mogu iskoristiti).



Slika 7. Shema modifikacije tunela temeljnog ispusta za potrebe evakuacije dela velikih voda (slika gore – postojeće rešenje, slika dole – alternativno rešenje)

Proračun transformacije talasa 1000-godišnje vode u akumulaciji, sa korišćenjem ispuštanja do $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ kroz ispušt ukazao je na maksimalnu kotu koja se u tom slučaju dostiže u rezervoaru – MaxOWL. U slučaju alternativa 1 i 2 ta kota je MaxOWL = 542,1 mm, a u slučaju alternativa 3 i 4 je MaxOWL = 505,0 mm. Navedene kote su merodavne za dalje dimenzionisanje novih preliva za prihvatanje dela voda manjih verovatnoća pojave.

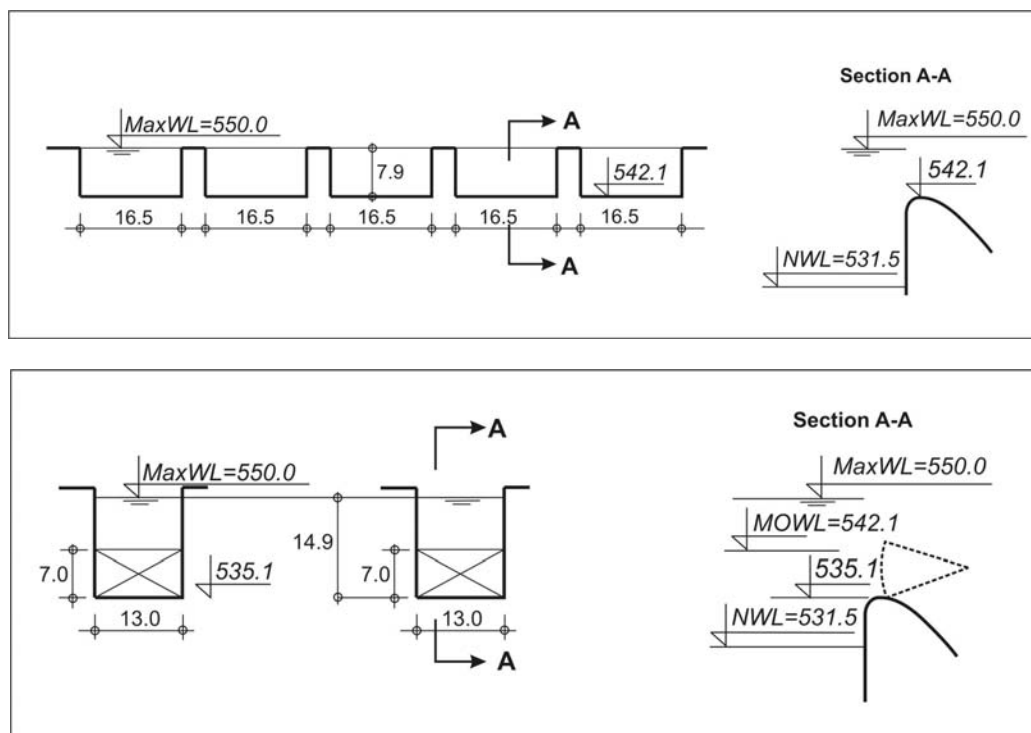
U slučaju rešenja sa branom od valjanog betona predložen je preliv sa slobodnim prelivanjem smešten u centralnom delu brane (kota krune preliva je na koti MaxOWL). U slučaju rešenja sa nasutom branom predviđeni su prelivi sa ustavama i sa tunelskim odvodom (ustavama se održava MaxOWL sve dok može, a zatim se ustave kompletno otvaraju). Dalje, za slučaj alternativa sa većom kotom maksimalnog uspora (550 mm), usvojeno je da temeljni ispušt povećava ispuštanje sa 2000 na $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ po ispuštu, kako bi se usvojile racionalnije dimenzije dodatnih preliva.

Kao ilustracija, na slici 8 je dat shematski prikaz rešenja preliva za Alternative 1 i 2, a u tabeli 2, za iste alternative, rezultati proračuna transformacije PMF

talasa u akumulaciji, kao i slučaj nailaska talasa 10000-godišnje vode u slučaju da se jedna ustava temeljnog ispusta ne otvori (posebno su dati i proticaji kroz temeljni ispušt i preko preliva). Na slikama 9 i 10 prikazane su dispozicije brane i pratećih objekata za slučaj Alternativa 1 i 2 respektivno. Za alternative 3 i 4 primenjena je ista metodologija, pa rezultati neće biti posebno prikazivani.

5.3 Temeljni ispušt

Kapacitet temeljnog ispusta određen je uslovima kao što su: a) Temeljni ispušt mora da propusti trostruki srednjegodišnji proticaj Q_{irr} . Navedeni proticaj mora biti obezbeđen i pri minimalnom nivou vode u rezervoaru, b) Temeljni ispušt mora da omogući pražnjenje rezervoara od normalnog do minimalnog nivoa za ne više od dva meseca c) Tokom početnog punjenja akumulacije, potrebno je da se brzina punjenja može do izvesnog stepena kontrolisati pomoću ustava na ispuštu. S obzirom da je temeljni ispušt povećao kapacitet za potrebe preuzimanja evakuacije dela velikih voda, uslovi koji su bili zadovoljeni u prvobitnom rešenju, zadovoljeni su i u alternativnim rešenjima.



Slika 8. Shematski prikaz dimenzija preliva za Alternativno rešenje 1 (gore) i Alternativno rešenje 2 (dole)

Tabela 2. Maksimalni nivo akumulacije Z_{max} i proticaj nizvodno od brane Q_{max} u slučaju nailaska PMF, kao i u slučaju incidentne situacije da se jedna ustava u tunelu temeljnog ispusta ne otvori pri nailasku 10000-godišnje vode

Alternativa 1

	Zmax	Qmax	Q_{bottom}	$Q_{spillway}$
	m a.s.l.	m^3/s	m^3/s	m^3/s
PMF	550.0	8900	5000	3900

One gate (in bottom outlet) closed:

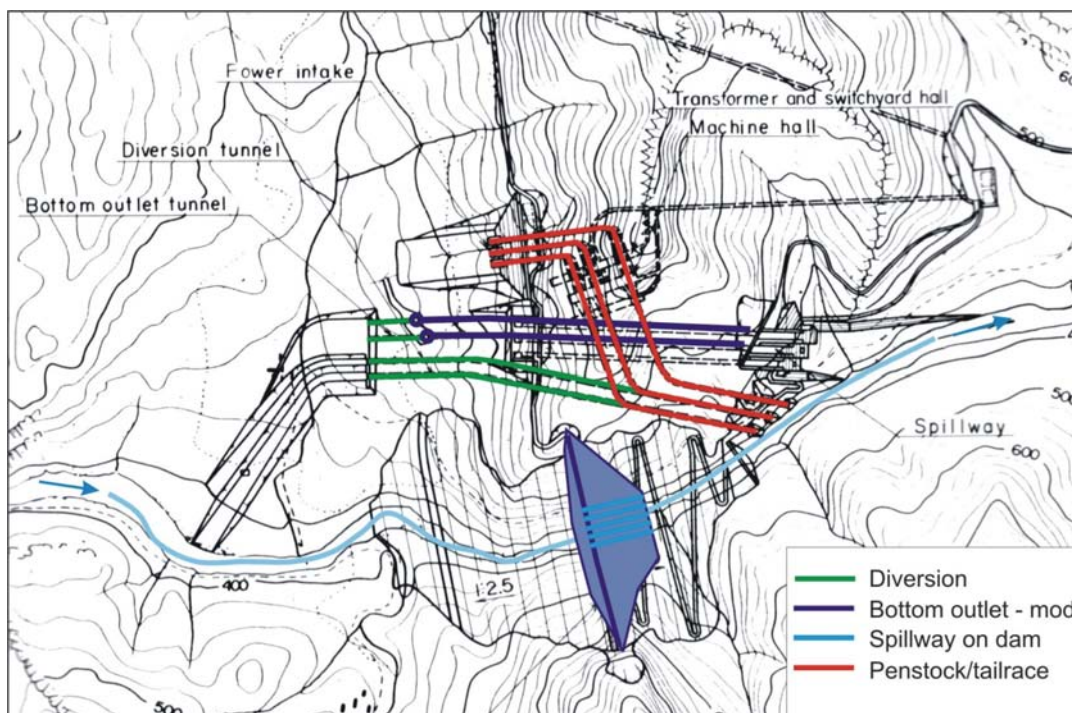
10000-year	548.0	4940	2500	2440
------------	-------	------	------	------

Alternativa 2

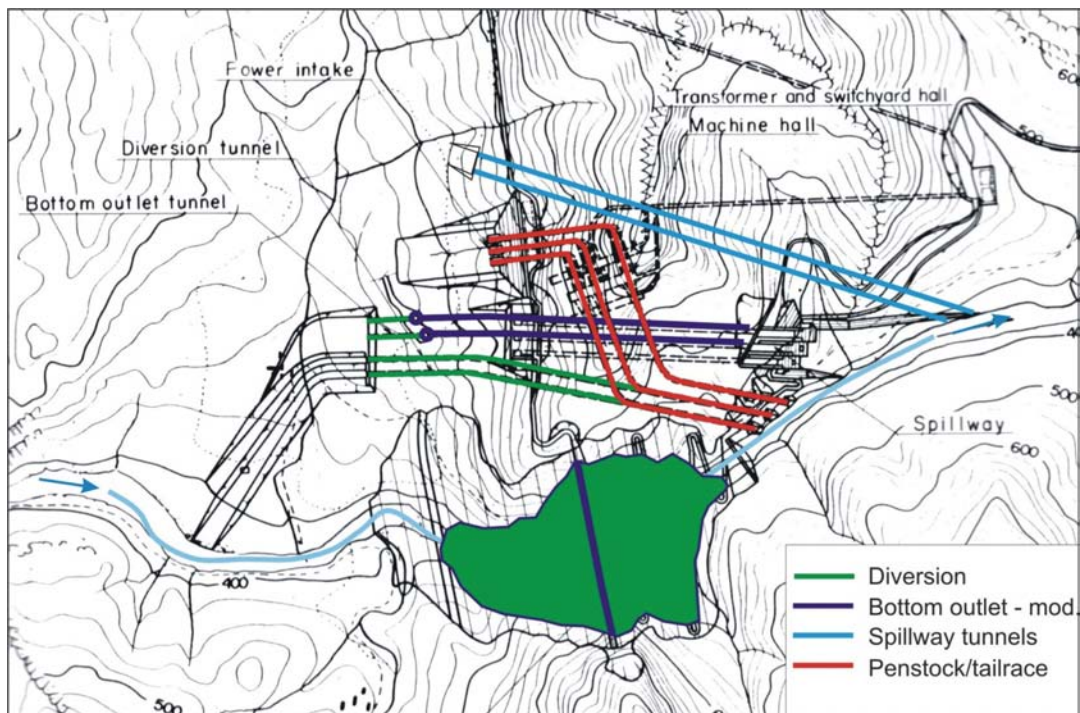
	Zmax	Qmax	Q_{bottom}	$Q_{spillway}$
	m a.s.l.	m^3/s	m^3/s	m^3/s
PMF	550.0	8240	5000	3240

One gate (in bottom outlet) closed:

10000-year	547.5	4900	2500	2400
------------	-------	------	------	------



Slika 9. Alternativno rešenje 1 - dispozicija RCC brane i pratećih objekata



Slika 10. Alternativno rešenje 2 - dispozicija nasute brane i pratećih objekata

6. ZAVRŠNE NAPOMENE

U ovom radu dat je kratak prikaz jednog – hidrotehničkog dela Studije [3], koja je razmatrala tehničke, ekonomske, sociološke, ekološke i druge aspekte rešenja brane Bekhme sa visinama brane nižim od zadate projektom iz 1986 [1]. Razmatralo se smanjenje visine brane od 20 do 35%, i ukazalo na mogućnosti iskorišćenja već izvršenih radova na hidrotehničkim objektima uz branu. Neki od objekata su modifikovani i iskorišćeni za namene za koje nisu prvobitno predviđeni (tuneli temeljnih ispusta), dok su drugi morali biti napušteni (prelivi sa odvodnim tunelima)

Ovde je izvršen pokušaj da se bar delimično ilustruje problematika na koju se naišlo u slučaju gde je gradnja brane započela i stala pre skoro 20 godina i gde je oko 27% izvršenih radova trebalo uklopiti u novo rešenje sa strogim ograničenjem visine brane, kao i sa drugim brojnim i kompleksnim projektnim zahtevima i uslovima.

Napomena

Na izradi Studije [3] čiji je jedan deo prikazan u ovom radu učestvovao je multidisciplinarni tim firme „IK konsalting i projektovanje”. Posebna pomoć i podrška timu, naročito u hidrotehničkom delu, je bio inženjer Branislav Kovačević, koji je svojim savetima i sugestijama dao značajan doprinos Studiji.

LITERATURA

- [1] EPDC, Japan, (1986), Bekhme Dam Project – Bekhme Dam and Power Plant, Planning Report.
- [2] IK Consulting Engineers, Srbija, (2005), *Bekhme Dam Project – Bekhme Dam and Power Plan*, Updated planning report.
- [3] IK Consulting Engineers, Srbija, (2007), *Prefeasibility study of alternatives with reduced Bekhme Dam heights*, Prefeasibility study report.
- [4] Savić, Lj. (2003), *Uvod u hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet, Beograd.
- [5] USBR (1987), *Design od small dams*, A Water Resources Technical Publication.

HYDRAULIC ISSUES OF THE REDESIGN OF BEKHME DAM THE CONSTRUCTION OF WHICH IS PLANNED TO BE RESTARTED AFTER A LONG PERIOD OF TIME

by

Biljana TRAJKOVIĆ, independent consultant
External consultant of IK Consulting Engineers, Belgrade

Summary

Bekhme Dam has been planned to be built on the river Greater Zab, some 100 km north from Erbil town, in Kurdistan, Iraq. The building of the dam and appurtenant structures has been interrupted and suspended in 1990 due to Gulf War. The percentage of completed works was about 30%. After more than 15 years, the dam project was reconsidered and it was found that the dam height of 230 m with the corresponding maximum reservoir water level at 599 m a.s.l. was unacceptable as in that case, some 70 Kurdish villages would be flooded. Therefore alternative solutions had to be investigated - with reduced dam

height and water level (550 m a.s.l. and 517 m a.s.l.). These solutions should as much as possible include the already realized (completely or partially) works for water conveyance - e.g. diversion tunnels, tunnels for flood waters, underground machine hall with intake tunnels and penstocks, tailrace tunnels etc. This paper discusses the analysed alternative solutions, with special attention to the possibility and way of utilization (incorporation) of the existing structures.

Key words: Bekhme dam, flood conveyance, diversion works, bottom outlet works

Redigovano 19.11.2009.