

UTICAJ SVE ČEŠĆIH POJAVA EKSTREMNIH PADAVINA NA SIGURNOST BRANA

Dalibor DRAŠKOVIĆ, Marija MILIĆ
Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd

REZIME

Sve češća pojava kiša velikog intenziteta koje po količini premašuju očekivane mesečne a neretko i višemesečne padavine na određenom području, predstavljaju rizik po sigurnost izvedenih brana kao i onih čija je izgradnja u toku ili se planira u bliskoj budućnosti. Pojava ovakvih ekstremnih padavina iziskuje aktuelizaciju hidroloških studija rađenih još za potrebe izrade Glavnih projekata na osnovu kojih su brane izvedene i u eksploataciji su decenijama. Pomenuti meteorološki fenomeni uzrokuju hidrološke promene kako na površinskim slivovima tako i u podzemlju i sve češće se dovode u vezu sa emisijom gasova staklene bašte – GSB [1]. Produženjem hidrološkog niza uz promenu metodološkog pristupa, velike vode bivaju uvećane tokom procesa inovacije hidroloških podloga što izvedene ili projektovane prelive na branama stavlja u podređen položaj jer isti nemaju kapacitet da bezbedno evakušu nove merodavne poplave.

Povećanja pikova i zapremina poplavnih talasa merodavnih povratnih perioda predstavljaju izazov u inženjerskoj praksi kako bi se u različitim okolnostima predložila najsvrsishodnija tehnička rešenja za obezbeđivanje sigurnosti brana u njihovoj daljoj eksploataciji. Kako bi se ostvario ovaj cilj može se izvršiti intervencija na kruni brane ili na postojećem prelivu, izgraditi novi dodatni preliv ili promeniti način upravljanja akumulacijom.

U okviru ovog rada prezentuju se tehnička rešenja koja su primenjena na branama u zemlji i inostranstvu kao

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 19.10.2023.

Ispravljen: 3.11.2023.

Prihvaćen: 6.11.2023.

Kontakt: ddraskovic@ephydro.com

odgovor na izmenjenu hidrološko-meteorološku stvarnost što može pomoći inženjerima da bolje razumeju složenost ove problematike.

Ključne reči: Sigurnost brana, klimatske i hidrološke promene, aktuelizacija hidroloških podloga, moguća tehnička rešenja

1. UVOD

Katastrofalna poplava, izazvana rušenjem dve brane na reci Derna u severoistočnom delu Libije, odnela je tokom noći 10 septembra 2023. godine više od 5000 ljudskih života a više od 10.000 ljudi se vode kao nestalo. Ekstremne padavine koje su se obrušile na priobalni Mediteranski grad Dernu donela je oluja „Danijel“, koja je kasnije napravila velike štete u Grčkoj, Turskoj i Bugarskoj, međutim ni približno kao u Libiji.

Derna je bujični vodotok koji je kroz istoriju veoma često plavio priobalno područje i to 1941, 1959 i 1968 godine. Kako bi se štete od poplava smanjile 70-ih godina prošlog veka na slivu reke izgrađene su dve nasute brane. Uzvodna brana Al-Bilad je manja i može da formira akumulaciju zapremine 1,5 miliona m³ a locirana je oko 13 km uzvodno od gradskog jezgra Derne. Nizvodna Abu Mansour brana je veća, sa zapreminom od 22,5 miliona m³ i nalazi se svega 1 km uzvodno od grada [2].

Najverovatniji uzrok rušenja ovih objekata je nedovoljan kapacitet šahtnih preliva na obe brane da prime zapreminu poplavnog talasa koji nije prepoznat kao moguć u vreme njihovog projektovanja. Imajući u vidu da je od puštanja u rad prošlo skoro 50 godina, ne iznenađuje pojava ovakvih ekstremnih hidroloških prilika na vodotoku koji ima izrazito bujični karakter. Postoje mišljenja da je do rušenja brana došlo zbog lošeg održavanja i složene političke situacije u zemlji poslednjih godina.



Slika 1. Pogled na uzvodnu srušenu branu Al-Bilad sa desne obale

Na žalost, katastrofalna poplava koja se dogodila u Libiji treba da služi kao opomena svima, a naročito ljudima iz struke da učine sve što je u njihovoj moći kako bi se obezbedila sveopšta sigurnost u uslovima potencijalnih pojava ekstremnih padavina kakve sve češće vidamo širom sveta.

U nastavku se prezentuje ova problematika na primerima brana iz zemlje i inostranstva kao i načini prevazilaženja koji su ocenjeni kao najadekvatniji imajući u vidu sve relevantne činioce koji su uticali na odluku.

2. BRANA ROVNI, ZAPADNA SRBIJA

Brana „Rovni“ izgrađena je na reci Jablanici, između sela Rovni, na levoj, i sela Stubo, na desnoj obali, 15 km uzvodno od Valjeva, odnosno 13 km uzvodno od sastava reka Jablanice i Obnice, koje čine reku Kolubaru. Kota krune brane je 363,50 mnm, njena dužina u kruni je 430 m, a širina 8,0 m. Maksimalna visina brane iznosi 74,5 m. Brana je izvedena prema Glavnom projektu koji je završen tokom 1987/1988 godine.

Izgradnjom brane formirana je višenamenska akumulacija kako bi se obezbedile potrebe za vodom kolubarskog regionalnog sistema vodosnabdevanja, koji obuhvata opštine Valjevo, Lajkovac, Lazarevac, Mionica i Ub. Pored toga, predviđeno je da se iz akumulacije obezbedi i voda za potrebe rashladnog sistema planirane TE-TO „Kolubara B“ (EPS), koja je u izgradnji. Buduća TE-TO bi se iz akumulacije snabdevala tehničkom vodom, kada se ti zahtevi ne mogu pokriti vodom zahvaćenom iz reke Kolubare. U ostale namene akumulacije Rovni spadaju: oplemenjivanje malih voda, zaštita od poplava i zadržavanje nanosa.

Velike vode reke Jablanice u profilu brane Rovni se evakušu preko slobodnog šahtnog preliva, lociranog na desnoj obali reke, uzvodno od brane. Kota krune preliva, KKP = 360,00 mnm, postavljena je u nivou projektovanog normalnog uspora akumulacije. Šahtni preliv je sa deflektorom i odvodnim tunelom, na čijem kraju je predviđen odskočni prag (ski odskok).

Prečnik ulaznog levka šahta preliva je 22,0 m, a prečnik šahta u dnu 5,0 m, koliko iznosi i prečnik odvodnog tunela. Poluprečnik krivine kolena šahta je 12,5 m. Do početka kolena, šaht je visine 53 m. Njegov gornji, levkasti deo je slobodan u visini oko 15 m (iznad terena).

Preliv je dimenzionisan tako da kota nivoa vode u akumulaciji pri evakuaciji maksimalnog mogućeg poplavnog talasa (VMVV) bude najviše na koti krune brane, KKB = 363,50 mnm, odnosno da pri evakuaciji 10.000-godišnje velike bude najviše na 1,5 m ispod KKB, tj. na 362,00 mnm.

Te noći 16 maja 2014 godine velika količina vode izlila se iz korita reke Kolubare i poplavila Obrenovac i okolinu kada je stradalo najmanje 15 osoba. Ekstremne padavine koje je ciklon „Tamara“ doneo na prostor severne Bosne i zapadne Srbije, padale su neprekidno od 13 do 15 maja usled čega je stradalo najmanje 50 ljudi, porušeno je nekoliko 1000 km puteva i na stotine mostova. U Srbiji se iz svojih korita izlilo 60 vodotokova pretežno u njenom zapadnom delu. U Kolubarskom basenu uglja došlo je do probijanja brane i Kolubara se izlila poplavivši potpuno dva basena uglja, Veliki Crljeni i Tamnava-Zapadno polje. Ukupno u oba kopa ulilo se preko 150 miliona kubnih metara vode, čime je dubina dostizala 50-60 m.



Slika 2. Pogled na nasutu branu Rovni i njen šahtni preliv u desnom boku

U pojedinim delovima centralne i zapadne Srbije padavine iz maja 2014. godine predstavljaju najveće ikada zabeležene od kada se vode meteorološka osmatranja.

Kada je naišao poplavni talas rekom Jablanicom građevinski radovi na brani Rovni su bili završeni i ostalo je da se montira hidromehanička i elektro oprema. Shvativši da brana može odigrati značajnu ulogu u zadržavanju poplave, dežurno osoblje je pokušalo da spusti zatvarač na ulaznoj građevini optočnog tunela, ali u tome nije uspelo jer je nivo vode uzvodnog jezera bio isuviše veliki. Kako željeni manevar nije uspeo voda je iz jezera tekla ka Valjevu kroz optočni tunel po količini nešto manja nego što je ka brani pristizala usled značajne zapremine uzvodnog prostora (slika 2). Hidrološko-hidrauličke analize sprovedene na osnovu zvaničnih podataka RHMZ Srbije [3], pokazale su da je brana Rovni u periodu 14-18 maj uspeła da akumulira maksimalno 4,5 miliona m^3 vode i ublaži vršni proticaj sa 118 m^3/s na 86 m^3/s . Da je zatvarač na ulaznoj građevini bio spušten, sigurno je da bi štete od poplave duž nizvodnog područja bile daleko manje.

Ovaj događaj predstavljao je svojevrsni alarm prirode koji je naveo rukovodstvo JP Kolubare iz Valjeva da pokrene aktivnosti na aktuelizaciji hidrološke studije, studije bilansa [4] i projekta upravljanja za akumulaciju Rovni [5]. Nakon što je analizama obuhvaćena poplava iz 2014. godine merodavni poplavni talasi su se povećali kako u pogledu pikova tako i u pogledu zapremine u odnosu na one iz Glavnog projekta.

U narednoj tabeli uporedno se daju pikovi i zapremine poplavnih talasa 10.000-godišnje i verovatno maksimalne velike vode iz 1987 i 2016 godine.

Tabela 1. Merodavne velike vode u profilu brane Rovni prema Glavnom projektu (1987) i aktuelizovanoj hidrološkoj studiji (2016)

		1987	2016
10.000 godišnja velika voda ($Q_{0,01\%}$)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	665,00	840,00
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	13,30	40,00
Verovatno maksimalna velika voda (VMVV)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	1.143,00	1.300,00
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	23,80	62,00

Iz tabele 1 se vidi da su se zapremine merodavnih poplavnih talasa uvećale 3 puta, što je nateralo inženjere da razmisle o mogućnostima obezbeđivanja sigurnosti brane i pri eventualnoj pojavi ovako ekstremnih hidroloških uslova.

Glavni projektom je razmatran scenario nailaska poplavnog talasa 10.000-u godišnje i verovatno maksimalne velike vode na punu akumulaciju. Imajući u vidu da zapremina akumulacionog prostora između kote normalnog uspora 360 mm i krune brane 363,50 mm iznosi svega 9,70 miliona m^3 i da su svi objekti i sklopu brane Rovni izvedeni, odlučeno je da se formira neprikosnoveni prostor za prihvatanje poplavnih talasa.

Inoviranim proračunima transformacija poplavnih talasa trebalo je odrediti kotu nivoa pri kojoj se voda mora održavati u akumulaciji, a da pri nailasku poplavnih talasa $Q_{0,01\%}$ i VMVV, nivo vode u jezera ne bude veći od 362,00 mm odnosno 363,50 mm, respektivno. Zaključeno je da su ovi uslovi ispunjeni ako se u

periodu povodnja nivo u akumulaciji održava na koti 352,00 mm, dok bi se akumulacioni prostor iznad ove kote održavao praznim, u funkciji neprikosnovenog prostora.

Ovakva upravljačka intervencija na akumulaciji Rovni ocenjena je kao najsvrsishodnija imajući na umu zapremine inoviranih poplavnih talasa, retenzionu moć akumulacionog prostora, stanje radova na gradilištu brane Rovni i naseljenost doline reke Kolubare nizvodno od brane.

3. BRANA ARILJE – PROFIL SVRAČKOVO, ZAPADNA SRBIJA

Kada je 2010. god. započela izgradnja pristupnog puta ka profilu Svračkovo, praktično je označen i početak aktivne izgradnje brane „Arlje“ i pribranskih objekata. Radovi se izvode prema projektnoj dokumentaciji koju je po fazama izrađivala kompanija Energoprojekt-Hidroinženjering tokom poslednje decenije prošlog veka. Pojava klizanja terena leve obale nizvodno od brane u zoni izvođenja pristupnih puteva u velikoj meri usporila je planiranu dinamiku izvođenja radove i primorala sve učesnike da se aktivno posvete rešavanju ovog kompleksnog problema. Uporedo sa projektovanjem i izvođenjem sanacionih radova na pomenutom klizištu, tekli su radovi na probijanju optočnog tunela, tunela temeljnog ispusta, energetskog tunela, vertikalnog šahta preliava kao i radovi na izvođenju vodotzahvatne kule.

Brana "Arlje" locirana je na profilu „Svrčakovo“ 9 km uzvodno od ušća Velikog Rzava u reku Moravicu. Nasutog je tipa sa kosim uzvodnim glinenim jezgrom, dvoslojnim filtrima i potpornim telom od kamenog nabačaja. Konstruktivna visina brane je 68 m, dužina u kruni je 211 m, a širina krune 8,00 m. Kota krune brane je 423,60 mm, 5,40 m iznad kote normalnog uspora.

Izgradnjom brane formirala bi se akumulacija koja bi u budućnosti trebala da obezbedi prosečno 1132 l/s vode za regionalni vodovodni sistem "Rzav" za potrebe snabdevanja gradova Arilja, Požege, Lučana, Čačka i Gornjeg Milanovca i kontinualno 700 l/s u hladnom delu godine i 1030 l/s u letnjem delu godine za ekološki protok nizvodno od brane. Viškovi voda u periodima povodnja energetski bi se prerađivali u mašinskoj zgradi HE Svračkovo [6].

Ukupna zapremina akumulacije do kote normalnog uspora 418,20 mm iznosi 26,2 miliona m^3 a korisna 19,3 miliona m^3 .

Nakon ekstremne hidrološke situacije iz 2014. god. ocenjena je kao neophodna izrada aktuelizovane studije računskih velikih voda za profil brane „Arlje“ a analize su završene septembra meseca 2021 godine [7].

Tabela 2. Merodavne velike vode u profilu brane Arilje prema Glavnom projektu (1998) i aktuelizovanoj studiji velikih voda (2021)

		1998	2021
1.000 godišnja velika voda ($Q_{0,1\%}$)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	691,00	744,80
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	49,31	48,31
10.000 godišnja velika voda ($Q_{0,01\%}$)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	849	1.183,20
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	60,86	76,84
Verovatno maksimalna velika voda (VMVV)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	1.362,00	1.866,20
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	97,63	121,25

Ako se zna da primarni šahtni preliv, čija je izgradnja u toku, pri koti nivoa vode u akumulaciji od 423,60 mm (kota krune brane) ima kapacitet od 1.190 m^3/s a da inovirani pik ulaznog hidrograma verovatno maksimalne velike vode iznosi 1866,20 m^3/s , jasno je da treba pronaći način da se količina od oko 680 m^3/s bezbedno evakuise nizvodno od brane i time osigura njena sigurnost tokom buduće eksploatacije.

Imajući u vidu ograničeni kapacitet primarnog šahtnog preliava i stanje radova na gradilištu brane „Arlje“ odlučeno je da se tehno-ekonomski sagledaju 3 mogućnosti evakuacije dodatnih količina voda i to:

- varijanta 1: pomoću dodatnog bočnog preliava u desnom boku
- varijanta 2: pomoću dodatnog šahtnog preliava u desnom boku
- varijanta 3: promenom tipa brane – kako radovi na nasipanju brane u trenutku izrade tehničke dokumentacije nisu započeli, kao moguć je ocenjen scenario izvođenja betonske brane od valjanog betona preko koje bi bilo dozvoljeno kratkotrajno preliavanje



Slika 3. Pogled na profil brane „Arlje”, izvedene objekte na levom boku

Detaljnim sagledavanjem količina radova ustanovljeno je da je varijanta 3 skuplja od varijante 1 oko 30 % a u odnosu na varijantu 2 oko 37 %. Ova varijanta je opterećena i činjenicom da nasuti materijal koji je deponovan tokom izvođenja pristupnih saobraćajnica i stabilizacije klizišta (oko 300.000 m³) ne može biti iskorišćen već se mora ukloniti što stvara dodatne troškove Izvođaču radova a time i Investitoru.

Za izvođenje šahtnog preliva sa odvodnim tunelom (varijanta 2) potrebno je oko 14 % manje novčanih sredstava nego za bočni preliv sa stepenastim brzotokom (varijanta 1). Strogo posmatrajući finansijski aspekt varijanta 2 je najpovoljnija.

Imajući u vidu da se u periodu od završetka Glavnog projekta do danas pojavilo nekoliko poplavnih talasa koji su značajno uticali na povećanje merodavnih računskih proticaja, čini se opravdanim bojazan da se iste pojave mogu ponoviti u budućnosti i dodatno izmeniti hidrološke uslova na profilu „Svrackovo“. S tim u vezi analizirane su mogućnosti evakuacije velikih voda koje su veće od trenutno aktuelnih u varijanti sa bočnim i šahtnim prelivom.

Prevazilaženje problematike evakuacije dodatnih količina voda svodi se na projektovanje i izvođenje objekata kojima se brana nadvišava i time stvara prostor za povećanje prelivnog malaza na evakuacionim organima. S obzirom da su levak i deflektor dodatnog šahtnog preliva projektovani da pri koti krune brane (423,60 mnm) propuste oko 640 m³/s, dalje povećanje prelivnog mlaza bilo bi praćeno „deflektorskim isticanjem“ koje karakteriše malo povećanje proticaja. Tako na primer nadvišenje brane za 1,00 m omogućilo bi evakuaciju svega 10 m³/s dodatnih količina vode.

Bočni preliv je evakuacioni organ koji ima znatno veću sposobnost evakuacije dodatnih količina velikih voda. Nadvišenje brane za 1,00 m u ovoj varijanti omogućilo bi evakuaciju dodatnih 330 m³/s.

Sve gore navedeno govori da je potencijalne negativne posledice klimatskih promena i antropogenih uticaja u slivu (intenzivna seča šuma) moguće efikasnije prevazići sa bočnim prelivom zbog njegove bolje evakuacione sposobnosti koja nije praćena pojavama zagušenja kao što je to slučaj sa šahtnim prelivom.

Takođe ocenjeno je da se bočni preliv može brže realizovati, izvođenje radova je izvesnije, predvidljivije, bez velikih rizika i potrebe za dodatnim istražnim radovima. Sve to je opredelilo stručni tim da predloži dodatni bočni preliv u desnom boku kao objekat za evakuaciju dodatnih količina merodavnih velikih voda u profilu brane „Arlje“.

4. BRANA SEKLAFI, LAGHOUAT, ALŽIR

„Seklafa“ je naziv vodoprivrednog sistema kojeg čine dve brane sa svojim akumulacijama i objektima za transfer vode između njih. Glavna akumulacija je zapremine oko 42 miliona m³ na reci M'zi koja nastaje izgradnjom brane Seklafa, a pomoćna akumulacija je Šergi (Chergui) na istoimenoj reci odakle se transfernim kanalom vode prevode u glavnu akumulaciju. Objekti su smešteni u vilaji Laghouat na obroncima planinskog venca Atlas oko 450 km južno od glavnog grada Alžira. Ceo sistem namenjen je navodnjavanju 1500 ha obradive površine i vodosnabdevanju stanovništva iz 12 okolnih komuna.

Brana Seklafa je betonska gravitaciona brana građevinske visine 52 m sa dužinom u kruni 250 m. Kruna brane postavljena je na koti 1.038 mnm na kojoj je predviđena izgradnja valobrana do kote 1.039,35 mnm. Sistem za zahvatanje vode sa 3 selektivna vodozahvata nalazi se u sklopu leve neprelivne lamele brane. Glavni projektom koji je izradila portugalska kompanija Coba (2008) predviđeno je da se evakuacija velikih voda obavlja preko prelivnog dela brane kojeg čine: 40 m široki slobodni preliv, glatki brzotok i slapište tipa roller bucket za umirenje energije. Jedna od glavnih modifikacija Energoprojekt-Hidroinženjering-a po dobijanju posla na izradi izvođačkih projekata jeste promena tipa slapišta zbog utvrđene nefunkcionalnosti istog pri svim scenarijima preliivanja koji se mogu javiti tokom eksploatacije. Predloženo je klasično dvostepeno slapište sa nizvodnim pragom. Akumulacijom i slobodnim prelivom se pik poplavnog talasa 1.000 godišnje velike vode retenduje sa 1.357 m³/s na 870 m³/s pri čemu se na prelivu formira prelivni mlaz visine 4,50 m a u akumulaciji uspostavlja kota maksimalnog uspora 1.036,50 mnm.

Radovi na izgradnji brane Seklafa odpočeli su 2012. Godine, a već tri godine kasnije, 8. septembra, gradilište se suočilo sa prvom velikom poplavom. Voda je prešla zagate pomoću kojih se štitila građevinska jama I faze izgradnje od nailaska 10-o godišnje velike vode (466 m³/s). Štete su pretrpeli zagati, delovi izvedenog objekta i mehanizacija izvođača. Kontrolni hidraulički proračuni su pokazali da se gradilište toga dana potencijalno suočilo sa poplavnim talasom čiji pik iznosi oko 780 m³/s.

Ako se i mislilo da je poplava iz septembra 2015. slučajnost, onda je 30. septembar 2016. promenio stavove svih koji su učestvovali na realizaciji projekta. Naišla je poplava još veća od prošlogodišnje, voda je srušila zagate, prodrila u građevinsku jamu II faze izgradnje i napravila nove štete izvođaču. Kontrolni hidraulički proračuni sprovedeni na osnovu informacija o nivoima vode sa gradilišta ukazivali su da je najverovatnije naišao poplavni talas sa maksimalnim protokom u granicama 1.000-1.200 m³/s.

Ove poplave bile su povod za aktualizaciju studije velikih voda koja je završena 2018. godine [8] u okviru koje je, između ostalog, dat kritički osvrt na Hidrološku studiju iz Glavnog projekta (2007). Određena rezerva se iskazuje prema sračunatim i usvojenim velikim vodama, a pogotovo velikim vodama povratnih perioda 1000 i 10000 godina, obzirom da je uočeno da je u kratkom

raspoloživom nizu pojavljenih maksimalnih godišnjih proticaja na vodomernoj stanici Seklafa (locirana je približno u profilu brane), u svega osam punih godina njenog raspoloživog rada iz perioda 1975-1985. godina, osmotreno nekoliko visokih maksimalnih proticaja od 636 m³/s 1978. godine, 450 m³/s 1985. godine. Primenjena statistička metoda na vrlo kratkoj seriji podataka daje samo orijentacione rezultate velikih voda. Da bi ublažio problem kratkog niza projektant je tada primenio metodu parcijalnih serija prema modelu „Langbein“, no na nehomogenom nizu ta metoda može dati problematične rezultate i značajno podcenjene vrednosti za više povratne periode, a precenjene za niže, što smatramo da je ovde bio slučaj.

U nastavku se daje uporedni prikaz pikova i zapremina poplavnih talasa prema hidrološkim analizama iz 2007 i 2018 godine.

Tabela 3. Merodavne velike vode u profilu brane Seklafa prema Glavnom projektu (2007) i aktuelizovanoj studiji velikih voda (2018)

		2007	2018
1.000 godišnja velika voda (Q _{0,1%})			
Maksimalni proticaj	m ³ /s	1.357,00	1.676,00
Zapremina poplavnog talasa	miliona m ³	47,00	71,40
10.000 godišnja velika voda (Q _{0,01%})			
Maksimalni proticaj	m ³ /s	1.821,00	2.653,00
Zapremina poplavnog talasa	miliona m ³	66,90	113,00

Ovakve promene hidroloških uslova prouzrokovale su nužne modifikacije na prelivnom delu brane. Ako se uzme u obzir samo period izgradnje i broj poplava koji je pogodio gradilište, bilo je jasno da će preliivanje biti česta pojava na brani. Kako bi se voda iz akumulacije kontrolisano ispuštala a preliivanje generalno smanjilo, odlučeno je da se kota normalnog uspora akumulacije poveća sa 1.032 mnm na 1.033,50 mnm uz opremanje preliiva adekvatnom hidromehaničkom opremom. Izdizanjem kote normalnog uspora obezbedile bi se dodatne količine voda za korisnike akumulacije (navodnjavanje i vodosnabdevanje).

Razmatrane su dve varijante ustava kojima su opremljeni preliivi.



Slika 4. Pogled na prelivni deo brane Seklafa sa montiranim klapnama

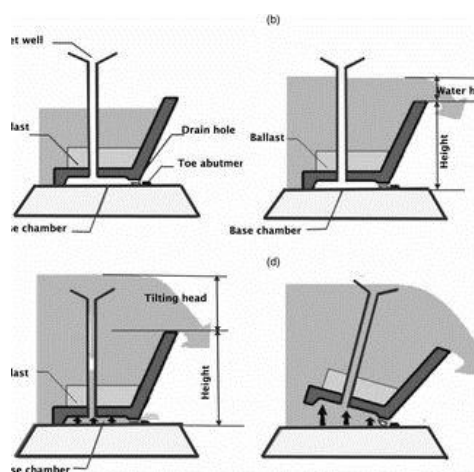
Varijanta 1: prelive opremljeni klapnama – 40 m širok prelivni deo brane pomoću 2 stuba širine 2 m deli se na 3 prelivna polja. Svako prelivno polje biva opremljeno regulacionim zatvaračem na uljno-hidraulički pogon. Zatvarači su klapne tipa riblji trbuh. Usled povećanja merodavnog računskog proticaja i smanjenja širine preliivanja dolazi do povećanja računске visine prelivnog mlaza sa 4,50 m na 5,64 m. Ovaj prelivni mlaz uspostavlja se na prelivu pri maksimalnom transformisanom proticaju inoviranog poplavnog talasa 1000 godišnje velike vode koji iznosi $1.001 \text{ m}^3/\text{s}$ umesto nekadašnjih $870 \text{ m}^3/\text{s}$. Gornja kontura klapne oblikovana je tako da se pri opisanim uslovima preliivanja spreči pojava odlepljivanja mlaza od konture, a time i pojava podpritisaka.

Varijanta 2: prelive opremljeni Fusegate ustavama - 40 m širok prelivni deo brane, izveden do kote 1.030,40 mnm, sa 2 stuba širine 2 m deli se na 3 prelivna polja. Svako prelivno polje biva opremljeno sa po tri fusegate-a širine 4 m. Svih fusegate-ovi postavljeni su na koti 1.030,40 mnm. Kruna svih fusegate-ova postavljena je na koti 1.033,60 mnm što je 10 cm iznad nove kote normalnog uspora akumulacije. To znači da su fusegate-ovi visoki 3,2 m. Fusegates se ruše na sledeći način: 1) na prvom prelivnom polju pri prelivnom mlazu od 1,5 m odnosno pri koti u akumulaciji 1.035,10 mnm, 2) na drugom prelivnom polju pri prelivnom mlazu od 2,0 m odnosno pri koti u akumulaciji 1.035,60 mnm. 3) na trećem prelivnom polju pri prelivnom mlazu od 3,0 m odnosno pri koti u akumulaciji 1.036,60 mnm.

Osnovne karakteristike Fusegate ustava su:

- jednostavna konstrukcija koje obezbeđuje formiranje uspora u akumulaciji i preliivanje merodavnog proticaja preko nje;
- pri nailasku veće vode od merodavnog proticaja automatski dolazi do njenog rušenja. Nema uticaja ljudskog faktora na njeno funkcionisanje;

- minimalni troškovi nabavke i održavanja u eksploatacionom periodu;



Slika 5. Princip rada Fusegate ustava

Osnovni razlozi koji su uticali da se varijanta 1 usvoji za realizaciju:

- fusegate ustave su privremenog karaktera i njihova funkcija prestaje kad proticaj i nivo vode dostigne određenu vrednost u akumulaciji kad dolazi do njihovog rušenja;
- rušenjem će kota normalnog uspora u akumulaciji (KNU) biti oborena na nivo platoa na kom su bile postavljene fusegate. Ponovo uspostavljanje KNU moći će da se realizuje nakon ponovnog postavljanja fusegate-ova koji su srušeni, što uključuje vreme za ugovaranje, fabrikaciju, transport i montažu.
- Rušenjem fusegate, oni nekontrolisano padaju na prelivni beo brane čime ga površinski oštećuju. U slapištu, u izuzetno turbulentnim i vrtložnim uslovima doći će i do oštećenja slapišta (dna i zidova).

- Pri rušenju fusegate dolazi do pojave naglog povećanja protoka koji se plasira nizvodno od brane što nije posledica hidroloških prilika već rušenja fusegate

5. BRANA POECHOS, PIURA, PERU

Među najgrandioznije objekte koje je kompanija Energoprojekt realizovala u svojoj 67-o godišnjoj istoriji kako u projektantskom tako i u izvođačkom smislu je svakako vodoprivredni sistem Chira – Piura sa branom Poechos koja po značaju zauzima centralno mesto. Kada je 1997. završena poslednja od 3 etape realizacije sistema pustinjnski region Piura ne severu Perua pretvoren je u nepregledne plantaže pirinča, banana, šećerne trske i kokosa.

Energoprojekt-Hidroinženjering je završio radove na projektovanju brane Poechos početkom 70-ih godina prošlog veka, izvođenje je povereno Energoprojekt-Niskogradnji, dok je sve radove nadzirao Binnie & Partners Corporacion. Izgradnja je trajala od 24 juna 1972 do 4 juna 1976.

Nasuta brana Poechos sa glinenim jezgrom je izgrađena na reci Chira oko 40 km severoistočno od grada Sullana. Najveća građevinska visina brane iznosi 48 m sa dužinom u kruni 8.455 m. Tokom izgradnje je iskopano 9,2 miliona m³ zemlje, a u telo brane je ugrađeno 18 miliona m³ materijala. Nakon završetka izgradnje brane formirano je jezero sa kotom normalnog uspora 103 mnm ukupne zapremine 1.000 miliona m³. Oko 885 miliona m³ koristi se za navodnjavanje doline reke Chire, srednje i donje Piure. Ukupna navodnjavana površina iznosi 81.800 ha.

Kako bi se onemogućilo preliivanje nasute brane u sklopu nje su izvedena 2 prelivna objekta. Glavni preliv je betonski objekat sa 3 prelivna polja pri čemu je svako snabdeveno segmentnim ustavama. Sigurnosni preliv čine 4 nasipa čije su krune postavljene na kotama 105; 105.30; 105.60 i 105.90 m i selektivno se ruše pri nailasku poplavnog talasa. Širina svakog nasipa je 100 m. Nasipi su razdvojeni betonskim stubovima koji formiraju 4 zasebna polja.

Već nakon nekoliko godina eksploatacije primećeno je da je trend zasipanja akumulacije nešto brži od očekivanog da bi se nakon batimetrijskih merenja 2002. godine ispostavilo da je od početne korisne zapremine na raspolaganju ostalo oko 60 %. S obzirom da uzvodni vodotoci Alamor, Catamayo i Quiroz produkuju i u akumulaciju Poechos deponuju velike količine nanosa,

već tada se izdizanje kote uspora akumulacije nametalo kao jedino rešenje kako bi se obezbedila dodatne količine voda za navodnjavanje.

U periodu od marta 2006 do maj 2017 rađena je projektna dokumentacija namenjena ovoj problematici različitih nivoa obrade realizovana od peruanskih i španskih konsultantskih kuća.

Nakon što su analize iz 2016. pokazale da rasppoloživa korisna zapremina iznosi 45 % početne ubrzalo se sa aktivnostima na ugovaranju projekta za izvođenje sa tehničkim specifikacijama izdizanja kote uspora akumulacije Poechos. Kako je predmet projekta bio izdizanje kote uspora akumulacije sa 103 m na 106 m, sigurnosni preliv se morao preprojektovati kako bi se sprečilo rušenje sigurnosnih nasipa. Predviđeno je da se 3 od 4 sigurnosna nasipa nadvisu zajedno sa pripadajućim razdelnim zidovima na kote 106,80; 107,10 i 107,40 m. Četvrto polje više ne bi pregrađivao nasip već betonska konstrukcija sa 6 propusta snabdevenih segmentnim ustavama.

S obzirom da su svi sigurnosni nasipi izvedeni na betonskoj ploči koja je postavljena na koti 100 mnm, rekonstrukcija sigurnosnog preliva podrazumevala bi obaranje kote nivoa u jezeru ispod pomenute vrednosti. Predviđeno je uklanjanje starih nasipa i zamena sa novim i višim. Nakon rušenja postojećih nasipa otvorila bi se mogućnost da se rekonstruišu ploče na sva 4 polja. Predviđena je ugradnja 2.470 m novih spojnika, 2.264 ankera ukupne dužine 9.300 m kao i izvođenje injekcione zavese sa ukupnom dubinom bušenja od 3.270 m. Za nadvišenje postojećih i izgradnju novih armirano-betonskih konstrukcija potrebno je 31.000 m³ betona dok je za izvođenje novih nasipa sigurnosnog preliva potrebno ugraditi oko 48.000 m³ materijala različite krupnoće i fizičko-mehaničkih svojstava.

Za priobalni pojas Ekvadora, centralnog i severnog Perua, pojava klimatološkog fenomena poznatog pod nazivom „El Niño“ veoma je česta tokom letnjeg perioda godine (januar-maj). Kada se na ovom prostoru vlažna vazдушna struja iz Kolumbije i Brazila sudari sa toplim vazduhom iznad Pacifika, nastaju kiše koje izazivaju poplave duž gusto naseljenih rečnih dolina. Marta 2017 godine, fenomen „El Niño costero“ pogodio je priobalne regione Perua: Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad i Ancash, tom prilikom izazvavši ogromne poplave koje su odnele najmanje 100 ljudskih života. U Ekvadoru su posebno pogođene provincije El Oro, Loja, Azuay i grad Guayaquil, gde su padale kiše 5 puta veće od uobičajenih za to doba godine.

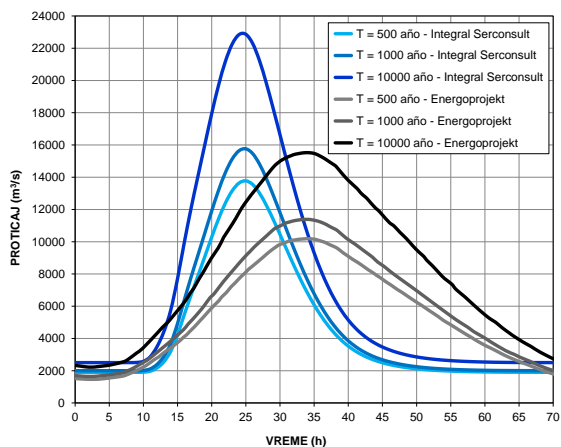


Slika 5. Brana Poechos – pogled na slapište glavnog preliva i levi nasuti deo brane pre izvođenja radova na njenoj kruni

Imajući u vidu da je region Piura od završetka brane Poechos pogodilo nekoliko ekstremnih kišnih epizoda, 2017. godine urađena je inovacija hidrološke studije koja je obuhvatila i aktualizaciju velikih voda merodavnih sa stanovišta obezbeđivanja sigurnosti brane Poechos. U nastavku se daje uporedni prikaz velikih voda prezentovanih u Glavnom projektu i inoviranoj hidrološkoj studiji [9].

Tabela 4. Merodavne velike vode u profilu brane Poechos prema Glavnom projektu (1970) i aktualizovanoj studiji velikih voda (2017)

		1970	2017
1.000 godišnja velika voda ($Q_{0,1\%}$)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	11.383,90	15.760,00
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	1.629,70	1.333,70
10.000 godišnja velika voda ($Q_{0,01\%}$)			
Maksimalni proticaj	m^3/s	15.525,50	22.862,40
Zapremina poplavnog talasa	miliona m^3	2.221,80	1.867,00



Slika 6. Merodavne velike vode u profilu brane Poechos

Pri nailasku velike vode verovatnoće pojave jednom u 1000 godina 2 od 3 nasuta sigurnosna preliva bi bila srušena, a u nizvodno rečno korito bi se plasirao protok $16.500 m^3/s$, što je $740 m^3/s$ veće od pika ulaznog hidrograma.

Pri nailasku 10.000-u godišnje velike vode na punu akumulaciju sva tri nasuta sigurnosna preliva bila srušena, maksimalni protok ulaznog hidrograma bi se redukovao na $21.352 m^3/s$ ($\approx 6,40\%$) a kruna brane (108 mm) bi bila prelivena. Kako bi se to sprečilo projektovan je betonski parapet postavljen na kruni brane sa kotom krune 109,00 mm.

Veoma nepovoljna situacija koja bi se mogla desiti u eksploatacionim uslovima vezana je za mogućnost zaglavljivanja ustava, bilo na glavnom bilo na sigurnosnom prelivu. U procesu varijantnih simulacija analizirana je i pojava koincidencije zaglavljivanja 3 ustave na sigurnosnom prelivu pri nailasku 10.000-u godišnje velike vode na punu akumulaciju. Rezultati proračuna su pokazali da i pri ovom malo verovatnom scenariju koincidencije ekstremno nepovoljnih hidroloških i eksploatacionih uslova ne bi došlo do preliivanja betonskog parapeta postavljenog na kruni brane.



Slika 7. Betonski parapet na kruni brane Poechos

6. ZAKLJUČCI

Ekstremne padavine jakog intenziteta sve češće izazivaju poplave na površinskim vodotokovima odnoseći neretko ljudske živote i praveći ogromnu materijalnu štetu. Ovakvi hidrološko-meteorološki fenomeni predstavljaju opasnost za brane koje su projektovane i izvedene u vreme kada takve pojave nisu prepoznate kao moguće. Iz tih razloga ljudi iz struke moraju pronaći adekvatna tehnička rešenja kako bi se osigurala sveopšta sigurnost kako postojećih tako i brana čija se izgradnja planira u budućnosti. Kako bi se donele valjane odluke, neophodno je pristupiti aktualizaciji velikih voda merodavnih za dimenzionisanje objekata kojima se obezbeđuje sigurnost brane. Najčešće su od interesa pikovi i zapremine ulaznih hidrograma 1000 godišnje ($Q_{0,1\%}$), 10.000-u godišnje ($Q_{0,01\%}$) i verovatno maksimalne velike vode (VMV).

Na izbor rešenja koje treba da osigura bezbednost brane u uslovima evidentnih klimatskih promena, utiče mnogo faktora: tip brane, retenzionu moć akumulacionog prostora, gustina naseljenosti nizvodnog područja, stanje radova na gradilištu ako objekat nije završen itd.

Obezbeđivanje sigurnosti nasutih brana mnogo je zahtevnije nego što je to slučaj kod betonskih. I dok se prelivanje nasutih brana ne sme dozvoliti, kod betonskih se ta pojava može kratkotrajno dopustiti pri nailasku poplavnog talasa merodavnog povratnog perioda.

Ako je uvećanje poplavnog talasa u pogledu pika i zapremine takvo da se dodatne količine voda mogu zadržati u akumulaciji uz izgradnju parapeta na kruni brane, svakako treba pribeći ovakvom elegantnom i jeftinom rešenju.

Ako su svi građevinski radovi na objektu završeni, malo je stepeni slobode u procesu odabira mogućih rešenja. Najsvrsishodnije je dodatnu količinu inoviranog merodavnog poplavnog talasa prihvatiti dodatnim evakuacionim objektom – prelivom. Ako nema mogućnosti za izgradnju dodatnog preliva, mora se pribeći formiranju neprikosnovenog prostora za prijem poplavnog talasa. Stvaranje nove operativne zone u akumulaciji u njenim najvišim delovima moguće je uz obaranje aktuelne kote normalnog uspora. Može se reći da je ovakav manevar efikasan ali nepopularan, jer se njim smanjuje korisna zaprelina za korisnike akumulacije.

Izdizanje kote normalnog uspora akumulacije može biti rešenje za prihvatanje velikih voda, ako za to postoje mogućnosti. Ovakva intervencija može se efikasno realizovati uz upotrebu adekvatne opreme za održavanje uspora. Prednost uvek treba dati stalnoj hidromehaničkoj opremi koja ostaje u funkciji i nakon prolaska poplave. Privremeni objekti kao što su fugegate prelivi ili zečji nasipi mogu biti dobra rešenja kod velikih vodotoka kod kojih je došlo do značajnog uvećanja merodavnih velikih voda. Pogodnost u tom slučaju bilo bi postojanje širokih uvala (jaruga) na kojima bi se izgradili pomenuti objekti koji su predviđeni da se ruše u slučaju pojave najekstremnijih hidroloških situacija.

Neke zemlje, poput Francuske, razvile su strategiju reagovanja na uticaje klimatskih promena usled kojih brane bivaju izložene sve ekstremnijim poplavama. Kompanija EDF - Electricite de France, koja je vlasnik mnogih hidroenergetskih postrojenja, pokrenula je kampanju inoviranja velikih voda na profilima brana od kojih su pojedine u eksploataciji više od 50 godina. Uz aktualizaciju hidroloških podloga uporedo je rađena provera kapaciteta postojećih preliva na fizičkim modelima u hidrauličkim laboratorijama.

Prva brana koja je podvrgnuta hidrološko-hidrauličkoj kontroli bila je gravitaciona betonska brana Goulours na reci La Lauze čija je izgradnja završena ranih 1940-ih. Ispitivanja na fizičkom modelu razmere 1/20 pokazala su da postojeći evakuacioni objekat (preliv sa ustavama) može da evakuise maksimalno $92 \text{ m}^3/\text{sec}$. Ažurirane hidrološke analize pokazale su da je potreban kapacitet preliva za odbranu od poplava $162 \text{ m}^3/\text{sec}$. Dodatna količina vode od $70 \text{ m}^3/\text{s}$ evakuisaće se pomoću Piano Key preliva (PKW) koji je 2006 godine izgrađen u desnom boku brane.



Slika 8. Brana Goulours, Francuska



Slika 9. Brana Saint-Marc, Francuska – pre i nakon rekonstrukcije

Brana Saint-Marc je betonska gravitaciona brana izgrađena između 1926. i 1930. godine. Nalazi se u blizini Limoža na reci Taurion. Za evakuaciju velikih voda predviđeni su prelive sa segmentnim ustavama, jedan širok 7,50 m na desnoj obali i drugi sa dva prelivna polja širine 10 m u sredini brane. Ispitivanjima u hidrauličkoj laboratoriji utvrđeno je da je maksimalni kapacitet svih prelivnih polja $623 \text{ m}^3/\text{s}$. Kako ovaj kapacitet nije bio dovoljan da se propusti maksimalni proticaj inoviranog poplavnog talasa 1000 godišnje velike vode od $750 \text{ m}^3/\text{s}$, izgradnjom 15 m širokog PKW prelive neprelivni deo brane je pretvoren u prelivni i tako je obezbeđena sigurnost brane za naredni period [10], [11].



Slika 10. Brana Gloriettes, Francuska

Lučna betonska brana Gloriettes na reci Gave d'Estaubé, nalazi se u francuskim Pirinejima. Brana je sagrađena između 1949. i 1951. Velike vode se evakušu preko brane pomoću 4 slobodna prelivna polja.



Kapacitet postojećeg prelive je oko $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Ažuriranjem hidroloških podloga definisan je novi merodavni protok velike vode povratnog perioda od 1000 godina koji iznosi $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Dogradnjom PKW prelive u desnom boku, maksimalnog kapaciteta $80 \text{ m}^3/\text{s}$, obezbeđena je sigurnost brane za naredni period.

Od strane EDF u Francuskoj prvi PKW tip prelive je realizovan 2006. godine na Goulours brani. Od tada ovaj tip prelive je korišćen za povećanje kapaciteta prelive sledećih brana u cilju bolje odbrane od poplava i zaštite hidroenergetske opreme: Marc (2008), Etroit (2009), Gloriettes (2010), Malarce (2012) and Charmine (2014). Danas postoji 10 brana u Francuskoj opremljenih PKW tehnologijom.

Iako je francuska strategija zaštite postojećih objekata od sve češćih i intenzivnijih poplava, jednodimenziona, može se smatrati veoma organizovanom i svrsishodnom. Ona može poslužiti kao dobar model drugim državama, pa i Srbiji, za razvijanje sopstvene strategije sa preporukama za najadekvatnije obezbeđivanje sigurnosti brane u aktuelnim hidrološko-meteorološkim uslovima eksploatacije.

LITERATURA

- [1] Đorđević, B., Dašić, T., Plavšić, J. (2020): Uticaj klimatskih promena na vodoprivredu Srbije i mere koje treba preduzimati u cilju zaštite od negativnih uticaja, Vodoprivreda, Beograd, N° 303-305 (p. 39-68)
- [2] <https://eos.org/thelandslideblog/the-failed-dams-in-wadi-derna-in-libya>

- [3] Zlatanović, N., Prohaska, S. (2015), Preliminarna hidrološka rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare, Vodoprivreda, Beograd, N° 276-278 (p. 161-175)
- [4] Vodoprivredni sistem Rovni, Knjiga III. Brana i akumulacija Rovni, Sveska III/20. Studija bilansa voda akumulacije „Rovni“ (2016), Energoprojekt-Hidroinženjering
- [5] Vodoprivredni sistem Rovni, Knjiga III. Brana i akumulacija Rovni, Sveska III/21. Projekat upravljanja akumulacijom „Rovni“ (2016), Energoprojekt-Hidroinženjering
- [6] Projekat upravljanja akumulacijom Arilje (2023), Energoprojekt-Hidroinženjering
- [7] Aktualizacija proračuna velikih voda reke Veliki Rzav – brana i akumulacija „Arilje“ – profil „Svrčakovo“ (2021), Energoprojekt-Hidroinženjering
- [8] Studija velikih voda za brane Seklafa i Chergui (2018), Energoprojekt-Hidroinženjering
- [9] Estudio de Factibilidad Afianzamiento del Reservorio Poechos Sistema Hidráulico Chira Piura, Tomo III. Hidrología y Balance Hídricos (2017), Proyecto Especial Chira Piura
- [10] Laugier, F., Lochu, A. (2009), Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France, Électricité de France (EDF)
- [11] Ribeiro, M.L., Boillat, J.L., Kantoush, S.A. (2007), Rehabilitation of St-Marc dam: Model studies for the spillways

IMPACT OF EVER MORE FREQUENT EXTREME RAINFALLS ON THE DAM SAFETY

by

Dalibor DRAŠKOVIĆ, Marija MILIĆ
Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd,

Summary

The ever growing frequency of high-intensity rainfall events which exceed in their amount the expected monthly, and quite often even the several-month rainfall in a particular area, represents a safety risk for constructed dams and those which are currently under construction, or planned to be constructed in the near future. The occurrence of such extreme rainfalls requires updating of hydrological studies prepared as far back as at the time of developing the Final Designs on the basis of which the dams were constructed, and have been operating for decades. The mentioned meteorological phenomena cause hydrological changes both in surface water basins and in groundwater, and they are increasingly brought into correlation with greenhouse gas (GHG) emissions [1]. By extension of hydrological series alongside changing the methodological approach, floods have become increased during the process of hydrological inputs updating, which puts the constructed or designed spillways on dams in an inferior position, because they do not

possess the capacity to safely discharge such new design floods.

The increase in the peaks and volumes of flood waves with design return periods represents a challenge in the engineering practice which aims to offer, under different circumstances, the most purposeful technical solutions for ensuring the dam safety and further operation. To attain this goal, an intervention could be made on the dam crest or on the existing spillway, a new additional spillway may be constructed, or the reservoir management method may be changed.

This paper presents some technical solutions implemented on dams in the country and abroad, in response to the altered hydrological-meteorological reality, which may help engineers to better understand the complexity of this issue.

Key words: Dam safety, climate and hydrological changes, updating of hydrological inputs, possible technical solutions