

HIDROTEHNIČKI OBJEKTI U EKSTREMnim USLOVIMA – PRIMERI PONAŠANJA I NEKE POUKE KROZ PRAKSU

Goran RADOVIĆ
Energoprojekt – Niskogradnja, Beograd

REZIME

Vrlo često veliki hidrotehnički objekti se planiraju i grade u izolovanim, slabo pristupačnim i teško osvojivim predelima koje često karakterišu ekstremno klimatsko i topografsko okruženje. Počev od projektovanja koje zahteva prilaz zoni budućih rada do poznavanja klimatsko-hidrološko-geoloških uslova terena, svaki korak koji vodi projektovanom i izvedenom hidrotehničkom objektu podložan je promenama, uvođenju novih kriterijuma i adaptaciji na nove uslove. Ideja ovog rada jeste prikaz tri hidrotehnička projekta izvedena od strane Energoprojekt Niskogradnja na tržištu Perua, i to: 1) za ekstremne hidrološke uslove, brana Sullana u sklopu velikog hidromeliacionog sistema Chira Piura 3, ponašanje brane i slapišta sa posledicama u uslovima ekstremno velikih voda prouzrokovanih klimatskim fenomenom El Niño 1997-98 i mesečnim padavinama koje su 30 do 40 puta veće od prosečnih sa prikazom rekonstrukcije izvršene 2000. godine; 2) za ekstremnu eroziju izazvanu rečnim nanosom, brana Chavimochic, problem erozije slapišta nametnutog izvanrednom količinom nanosa sa prikazima elemenata rekonstrukcije i proizvodnje materijala, i 3) za ekstremne topografske uslove, slučaj hidrocentrale Chancay Rucuy, sa posledicama od kiša 2017. godine i to u zoni cevovoda pod pritiskom i zoni mašinske zgrade. Prikaz ova tri objekta ima za cilj da ukaže na ponašanje objekata u ekstremnim uslovima, posledice istih na primenjena rešenja i pokušava izvesti neka iskustva vezana za usvojena projektantska rešenja.

Ključne reči: ekstremni hidrološki događaji, kriterijumi za projektovanje, hidrotehnički objekti.

1. UVOD

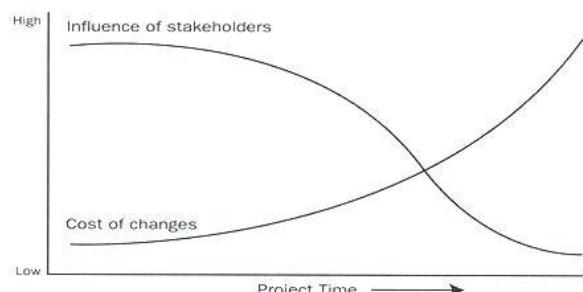
U hidrotehnici često koristimo termine kao sto su sistemske analize, vodoprivredni sistemi, bavimo se primenom matematičkih metoda, optimizacija u cilju postizanja prihvatljivog rešenja. Proces donošenja odluka

(*Decision making process*) gotovo uvek uključuje termin *povratna sprega* (engl. *feedback*). Kaže se da je povratna sprega „proces u kome informacija o prošlosti utiče na isti fenomen u sadašnjosti ili budućnosti“.

Vrlo često nismo svesni koliko naše buduće odluke zavise od načina i uspešnosti u korišćenju povratne spregе, primeni prethodnih iskustava, dobrih ili loših, na nova rešenja i nove situacije, odnosno koliko su ista sistematizovana, pri čemu da bi bila sistematizovana prvo moraju biti prepoznata i priznata. Nameće se pitanje, da li, koliko i kako koristimo povratnu spregu, i da li smo spremni da iskustva iz prethodnog perioda prepoznamo, priznamo i primenimo ubuduće.

Na slici 1 daj je grafikon (preuzet iz [1]) koji na vremenskoj skali prikazuje veličinu uticaja na projekat i stepena mogućnosti izmene projekta i trošak te promene. Ukratko, što pre se primeni povratna sprega/korekcija, niži je trošak promene, ili što pre se primeni povratna sprega/korekcija veća je mogućnost promene.

U oblasti hidrotehnike proces povratne spregе može ići od generalnih i opštih organizacionih tema kao sto je npr. uredenje i gazdovanje vodoprivrednim resursima, do analize rešenja primenjenih na pojedinim hidrotehničkim objektima, kao singularnim tačkama u okviru sistema.



Slika 1. Mogućnost i cena uticaja na projekat kroz vreme (preuzeto iz [1]).

Kada je reč o vodoprivredi kao sistemu od strateškog interesa za jednu državu, izvanredan primer bi bila situacija koja je desila sa poplavama u Srbiji tokom 2014. godine [2] i tekst prof B. Đorđevića [3] koji kaže: "Padavine se, naravno, ne mogu izbeći (a biće ih sve više zbog globalnih klimatskih promena), ali bi štete bile mnogostruko manje da država par decenija nije sistematski urušavala čitav sektor voda, delatnost koju u svim zemljama smatraju najvitalnijim sistemom države. Da pomenem primer koji pokazuje svu našu nesuvllost, na koju smo uzaludno upozoravali. Da bi se površinski kopovi REIS Kolubare branili od poplava, na veoma bučnoj reci Kladnici napravljena je namenska akumulacija Paljuvi-Vis, čiji je glavni zadatak bio da štiti kopove potpuno ublažavajući bujične povodnje. Tako važnim objektima se u svemu upravlja sa najvišeg nivoa države. No, nadležni su taj vitalni objekat, od koga zavisi energetska sigurnost Srbije, poverili na upravljanje – ribolovcima. Dobro ste pročitali."

U daljem tekstu daju se tri primera izgrađenih hidrotehničkih objekata unutar kompleksnih hidrotehničkih sistema, koji su bili predmet oštećenja, rekonstrukcija i promena rešenja. Autor ovog teksta je bio angažovan na predmetnim projektima kao radnik Energoprojekt Niskogradnja. Slični primeri se mogu naći u svakodnevnoj praksi (npr. [4]).

2. PRVI PRIMER – BRANA SULLANA

2.1 Opis okruženja

Brana Sullana je derivacioni zahvat, sastavni deo treće etape kompleksnog hidromelioracionog projekta Chira Piura koji se nalazi na severu Perua. Projekat uključuje akumulacionu branu Poechos (inicijalni kapacitet oko 1 milijarde m³), derivacione brane Los Ejidos y Sullana, mrežu glavnih i sekundarnih kanala za navodnjavanje kapaciteta do 70 m³/s sa nasipima i pratećim objektima zaštite od poplava. Ukupna navodnjavana površina je oko 100,000 hektara sa zahvatanjem vode za vodosnabdevanje više gradova. Ceo projekat je projektovan i većim delom izведен od strane Energoprojekta [5], osim inicijalnog projekta brane Sullana.

Brana Sullana služi za skretanje vode u glavni kanal kapaciteta 25 m³/s, ima sloboden fiksni preliv dužine 200 m i preliv sa 8 radijalnih ustava širine 8 m. Projektovana je za maksimalni proticaj u reci Chiri od 4,000 m³/s. Na delu sa radijalnim ustavama na koji ćemo naročito obratiti pažnju, slapište je projektovano sa betonskim delom i delom kamene obloge sa nevezanim kamnom različite veličine.

2.2 Definisanje ekstremnih uslova

Pod ekstremnim hidrološko hidrauličkim uslovima ovde smatramo one nametnute klimatskim fenomenom El Niño koji se javlja svakih 10-15 godina i karakterističan je za sever Perua. Karakteriše se intenzivnim padavinama, što uzrokuje poplave i oštećenja infrastrukture. Nastaje kao posledica promene strujanja morskih struja u Tihom oceanu i to promenom smera strujanja, od obala Australije i Indonezije linijom ekvatora ka severu Perua, pri čemu dolazi do značajnog podizanja temperature mora što dolaskom do peruanske obale prouzrokuje intenzivne padavine tokom celog kišnog perioda od januara do maja.

U ovom tekstu ćemo se baviti ponašanjem brane Sullana tokom i nakon fenomena El Niño 1997/1998. Ukupne godišnje padavine u regionu brane su u kišnom periodu 1997/1998 tokom fenomena EL Niño iznosile oko 1,900 mm, što je 30 puta više od prosečnih godišnjih padavina od oko 60 mm, pri čemu je merenje u jedom danu pokazalo 210 mm/24 h.

2.3 Ponašanje brane Sullana

Na slici 2 prikazano je ponašanje slapišta brane Sullana pri različitim proticajima tokom 1997/1998, i to za $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 1,500 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q = 3,500 \text{ m}^3/\text{s}$. Vidi se da je situacija nizvodno od brane najmirnija pri maksimalnom proticaju bliskom projektovanom, ali i značajno različito ponašanje pri drugim manjim proticajima.

Na slici 3 vidi se stanje slapišta brane Sullana posle prolaska velikih voda uzrokovanih El Niñom. Više ne postoji nizvodna kamena zaštita dok je betonski deo slapišta značajno oštećen i ugrožava ceo objekat.

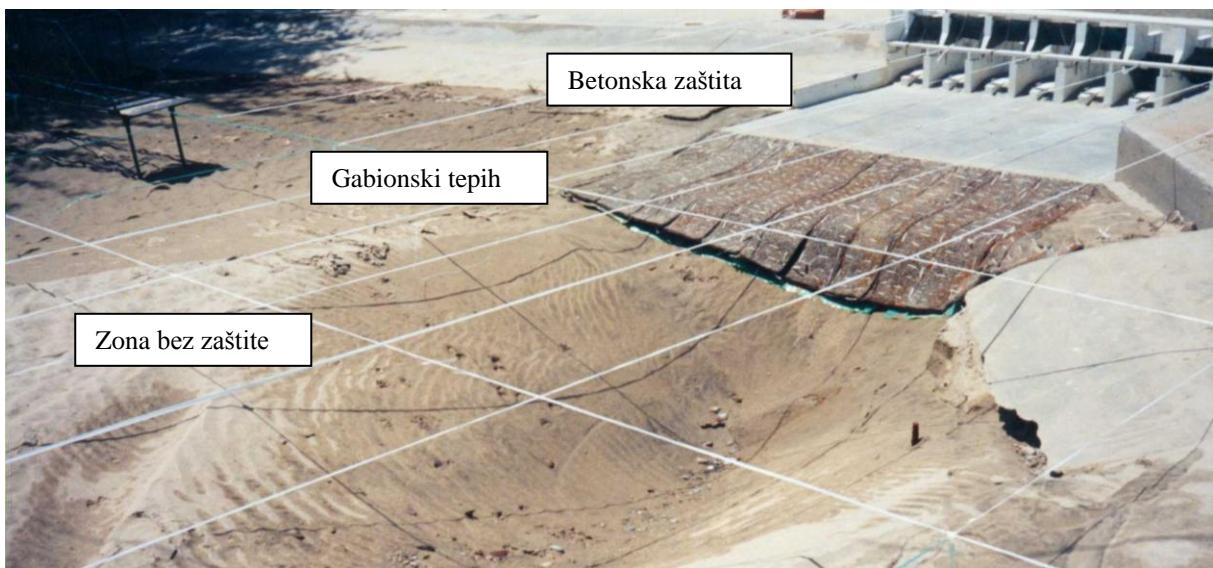
Projekat rekonstrukcije brane Suljana je urađen 1999-2000. i uključio je i analizu stanja na hidrauličkom modelu. Model je izgrađen u hidrauličkoj laboratoriji univerziteta u Piuri/Peru u saradnji sa stručnjacima Instituta Jaroslav Černi iz Beograda. Analizirano je ponašanje novoprojektovane nizvodne zaštite slapišta sa produženjem betonske zaštite plus tzv. fleksibilna zaštita koju čine gabionski tepih debljine 1,0 m upleten u mrežu armaturnog gvožđa. Rezultat hidrauličkog modela prikazan je na slici 4. Pokazalo se da ovo rešenje daje odgovarajući stepen zaštite, pri čemu fleksibilna zaštita prati kretanje rečnog dna, ali i da nizvodno od zone zaštite dolazi do znatne erozije neštićenog dela korita, do 8 m.



Slika 2. Slapište brane Sullana pri različitim proticajima



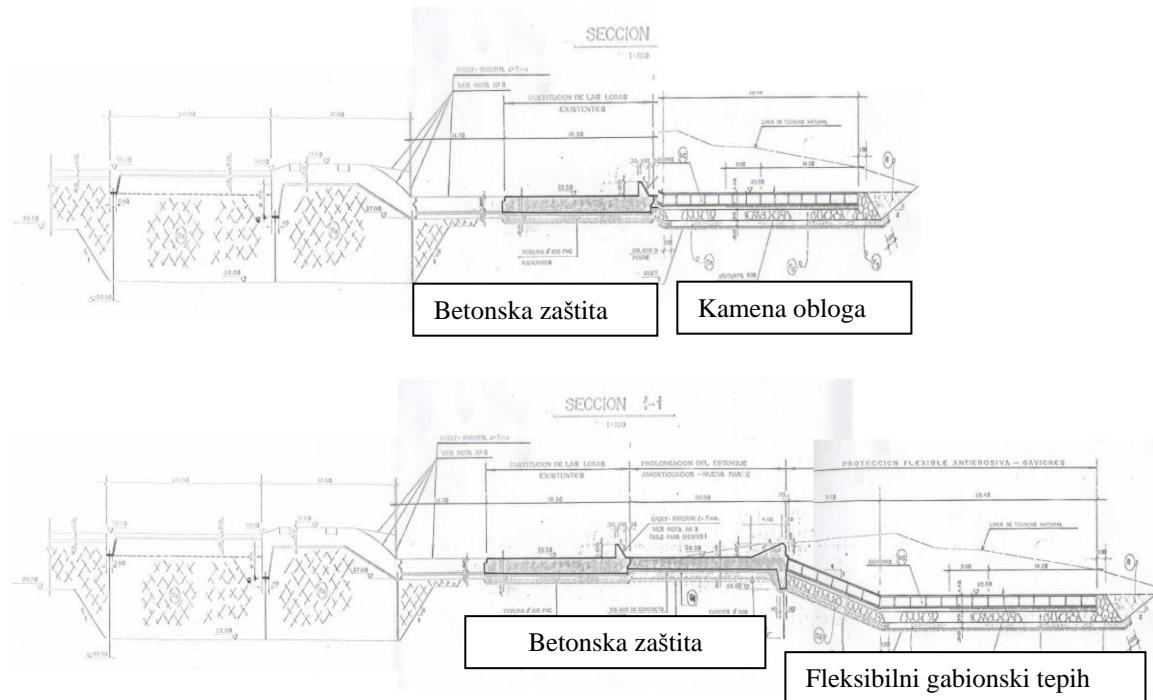
Slika 3. Slapište brane Sullana posle prolaska povodnja 1997/1998



Slika 4. Hidraulički model slapišta sa nizvodnim delom

Ponašanje fleksibilnog i stanje novoprojektovane zaštite brane je, nakon analize na hidrauličkom modelu, ocenjeno kao zadovoljavajuće. Naravno, ovo rešenje je, iako je analiza sveobuhvatna, ograničeno elementima iz inicijalnog/osnovnog projekta, što nas vraća na krive sa slike 1 i uvodi u igru princip povratne sprege, pri čemu

se naravno u analizi jedne novonastale situacije pored čisto tehničkih razloga i objašnjenja i dokaznica mora voditi računa i o troškovima odnosno sredstvima sa kojima raspolaže investitor. Poprečni presek inicijalnog rešenja i novo projektovanog rešenja izvedenog stanja 2000. godine su prikazani na slici 5.



Slika 5. Poprečni presek slapišta brane Sullana- inicijalni projekt naspram projekta rekonstrukcije iz 1999.

3. DRUGI PRIMER – BRANA CHAVIMOCHIC

3.1 Opis okruženja

Brana Chavimochic je derivaciona brana slična brani Sullana. Nalazi se na reci Santa iznad grada Trujillo severno od glavnog grada Lime. Na brani se zahvata voda za navodnjavanje za više od 120 hiljada hektara i vodosnabdevanje za skoro milion stanovnika. Ima fiksni preliv i tri radijalne ustave. Izgrađena je krajem sedamdesetih godina prošlog veka. Radovi rekonstrukcije slapišta su izvedeni u periodu 2010-2012 [6].

3.2 Definisanje ekstremnih uslova

Ako je brana Sullana bila građena u nekoherentnom materijalu, brana Chavimochic je locirana u potpuno drugačijim uslovima, tvrdoj steni i rečnom dnu sa krupnim materijalom sa permanentnim promenljivim proticajima i velikom količinom agresivnog nanosa reke Santa. Nanos u reci Santi dolazi iz celog sliva koji se karakteriše izostankom bilo kakvog vegetacionog

pokrivača. Nanos čine čestice granodiorita čiji osnovni element je kvarc, koji kristališe po heksagonalnoj strukturi i u osnovi mu je sastojak silicijum dioksid. Po Mosovoj skali čvrstoće od 1 do 10, pri čemu je 1 – talk a 10 – dijamant, kvarc se nalazi na mestu broj 7. Visoka tvrdoća i oštrovična struktura mineralu kvarca daju agresivne erozione karakteristike. Na slici 5 prikazana je brana Chavimochic gde se vidi stalno tamna boja reke Santa usled velike količine nanosa sa prikazom strukture minerala kvarca.

3.3 Ponašanja brane Trujillo

Štete nastale kao posledica erozije na slapištu i stubovima brane Trujillo su popravljane više puta do rekonstrukcije 2010-2012. Pitanje je da li je pod ovim uslovima visoke erozione agresivnosti uopšte moguće dati trajno rešenje. Na slici 6 prikazana su oštećenja već rekonstruisanog preliva, stubova preliva i dela slapišta, pri čemu je prethodna rekonstrukcija uključivala oblaganje osnovnog betona kamenim pločama, ali nedovoljne mase i debljine.



Slika 5. Brana Chavimochic, pogled sa nizvodne strane. Gore desno, struktura minerala kvarca



Slika 6. Brana Chavimochic, oštećenja preliva i slapišta usled nedovoljne zaštite



Slika 7. Brana Chavimochic, rekonstrukcija 2010-2012. godine



Slika 8. Brana Chavimochic, proizvodnja materijala u pozajmištu

Rekonstrukcija brane Chavimochic koju je izvela firma Energoprojekt Niskogradnja 2010-2012. godine uključivala je sledeće elemente: a) izrada novih betonskih elemenata, masivnih ploča debljine 2 m, na koje su b) po celoj površini preliva i slapišta u dnu locirane kamene

kocke 1x1x1 m zalivene u betonu, a c) sa strane, betonski zidovi i stubovi brane su obloženi kamenim kvadrama 0.2x0.2x0.4 m. Važno je napomenuti da su ove velike kocke i manje kvadre od istog prirodnog materijala iz kojeg dolazi nanos u reci Santi, granodiorit.

Odnosno, rešenje koje je primjenojeno jeste prirodan materijal istih karakteristika kao i materijal koji uzrokuje problem, pri čemu su uključena znatna ojačanja. U ovom momentu nije poznato kako se ponaša novo rešenje primjenojeno 2012. (investitor nije imao reklamacije do sada), ali se mora računati sa redovnim periodičnim održavanjem. Na slici 7 prikazan je deo procesa rekonstrukcije preliva i slapišta 2010-2012 godine.

Interesantan je način na koji se proizvode kamene kocke. Radi se o tradicionalnom načinu izrade od strane ljudi sa iskustvom uz minimalnu primenu mehanizacije. Vadenje kocki iz brdske stenske mase i dovodenje na projektovanu meru praktično je rađeno ručno, kao što se to vidi na slici 8.

Uместo zaključka u ovom slučaju se možemo zapitati u kojoj meri je pri projektovanju slapišta na brani Chavimochic moguće uključiti ovako ekstremnu situaciju

kada je reč o abrazivnom dejstvu rečnog toka sa velikom količinom agresivnog nanosa, a da pri tome ne pristupimo čistom iskustvenom pristupu kao što je učinjeno pri projektu rekonstrukcije 2010-2012. Ako podemo od pretpostavke da je inicijalno rešenje za slapište verovatno uključivalo ojačanu betonsku podlogu sa površinskom zaštitom, a da su zatim popravke koje su usledile uključivale granitne kocke manjih dimenzija (30cm debljine), onda je ponovna povratna sprega doveća do rešenja koje uključuje masivne betone pokrivenе masivnim kamenim kockama debljine 1 m. Da je rešenje iz 2010. godine bilo primjenojeno prilikom izgradnje brane, problemi naknadne popravke bi bili manji. Ovde se u svakom slučaju može zaključiti da se radi o slučaju kada silama prirode treba odgovoriti sa istim prirodnim materijalima. Takođe, kao u slučaju brane Sullana, treba uključiti i vreme kao promenljivu, dajući dinamički karakter objektu, tokom kog voda i njeni tokovi i elementi utiču na projektovana rešenja.



Slika 9. Hidrocentrala Chancay Rucuy, položaj cevovoda pod pritiskom



Slika 10. Hidrocentrala Chancay Rucuy: oštećenja cevovoda

4. TREĆI PRIMER – HIDROCENTRALA CHANCAY RUCUY

4.1 Opis okruženja

Hidrocentrala Chancay Rucuy nalazi se u zoni Lime, centralni Peru. Uključuje zahvat sa slobodnim prelivom na reci Chancay sa peskolovom i otvorenim i zatvorenim (tunelskim) dovodnim kanalom sa slobodnim tečenjem do cevovoda pod pritiskom, ukupne dužine oko 21 km na koti od oko 2,700 m.n.m. Instalisan snaga je 2x20 MW. Hidrocentrala je privatna investicija izgrađena za potrebe rudarskih kompanija [7].

4.2 Definisanje ekstremnih uslova

U ovom slučaju pod ekstremnim uslovima podrazumevamo topografske uslove. Čak ne toliko nadmorskiju visinu od 2,700 m.n.m, što za Peru i nije čudno jer se mnogi projekti izvode na visinama od 4-5,000 metara, pa ni trasa projekta koja ide strmim liticama planina, niti samom serpentinskom pristupu delovima projekta, nego ćemo se više baviti lokacijom cevovoda pod pritiskom, načinom fundiranja, posledicama odabira lokacije prćenom promenama usled intervencije čoveka u prirodnom okruženju i posledicama pri prvom intenzivnijem kišnom periodu.

4.3 Ponašanje objekta

Cevovod pod pritiskom na HC Chancay je metalni cevovod prečnika 1,200 mm, dužine 1,290 m i denivelacije oko 700 m. Lociran je u prirodnom useku sa zonama osutog materijala. U donjem delu je zaliven u betonski blok ili postavljen na betonsku podlogu, a na prelomima je oslojen samo na ankerne blokove bez značajnijeg osiguranja dubljim iskopima ili ankerima. (slika 9).

Konstrukcija ovakvog cevovoda je sama po sebi morala biti komplikovan i težak zadatak. Obzirom na uslove terena, lokaciju i pristupe, izgradnja je uključivala mnogo ručnog rada, pre svega kada je reč o transportu, iznošenju i ugradnji materijala kao i montaži cevovoda na skučenom prostoru.

Godina 2017. je bila kišna godina. Prve intenzivnije padavine su uticale da dođe do oštećenja cevovoda i onemogućavanja rada hidrocentrale. Voda od kiša je: 1) našla put kroz usečeni deo trase cevovoda, 2) pojačala eroziju i dovela do 3) ispiranja materijala u zoni cevovoda i ankernih blokova, što je uticalo na 4) dislokaciju blokova i cevovoda, a što je na kraju dovelo do 5) pučanja cevovoda (slika 10).

Kao što je inicijalna ideja dovoda vode od zahvata na reci do cevovoda pod pritiskom predviđala otvoreni kanal u stenskom useku, koji je tokom izgradnje preprojektovan na (većim delom) tunelski vod sa slobodnim tečenjem, tako se posle pretrpljenih šteta i kod cevovoda pod pritiskom analizira varijanta ukopavanja u stensku masu kroz vertikalni šah ili kosu tunelsku cev, čime bi se eliminisao uticaj spoljnih faktora kao što su padavine i erozija. Ovakvo tunelsko rešenje, ako se usvoji, verovatno će biti nešto skuplje, ali izvesno značajno bezbednije i dugotrajnije u odnosu na spoljašnji cevovod što, može se reći, kompromituje inicijalno primenjeni način donošenja odluka i uspostavlja povratnu spregu u ovom singularnom slučaju, ali tek kada je šteta nastala menjajući ciljnu funkciju pri čemu ekonomski kriterijum vrlo često ne treba biti glavni kriterijum optimizacije građevinskih objekata.

5. ZAKLJUČAK

Iz navedenih primera vidimo kako su tri objekta evoluirala, pri čemu svaki sledeći korak ili primenjeno rešenje nije posledica neke velike matematičke pa ni ekonomskе kalkulacije, nego više posledica poruka koja

nam šalje ili nameće priroda. Faktor koji je teško uključiti u model optimizacije ili sistemske analize.

Povratna sprega, kako je napred navedeno, uglavnom je lične prirode, iskustvo pojedinca ili grupe ljudi angažovanih na projektima. U ovom slučaju povratna sprega je na neki način nametnuta. Čini se, da ako se želi bolje razumevanje prirode, treba izaći na teren, detaljno ga obići i dobro osmotriti mesto budućeg objekta, jer pri izgradnji hidrotehničkih objekata uvek treba imati na umu da postoji značajna interakcija sa prirodom i prirodnim okruženjem, pri čemu prisustvo vode daje izražen dinamički faktor čije delovanje kroz vreme treba posebno razmatrati.

ZAHVALNOST

Autor se zahvaljuje svim kolegama koji su saradivali na izgradnji hidrotehničkih objekata koji se navode u ovom tekstu.

LITERATURA

- [1] PMI (2009) *A Guide to Project Management Body of Knowledge*, Project Management Institute, fourth edition.
- [2] Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., Todorović N., Božović N. (2014) Karakteristike jakih kiša koje su prouzrokovale čestu pojavu poplava na teritoriji Srbije u periodu april-septembar 2014. godine, *Vodoprivreda*, 46: 3-13.
- [3] Đorđević B. (2014) Kako smo urušili vodoprivrednu, *Politika*, 29.5.2014., www.politika.rs/scc/clanak/294766/Kako-smo-urusili-vodoprivrednu.
- [4] Trajković B. (2009) Hidraulički aspekti preprojektovanja brane Bekme čija izgradnja se nastavlja posle dužeg perioda, *Vodoprivreda*, 41(4-6): 169-178.
- [5] EPH (2000) Reconstrucción y rehabilitación de la Represa Sullana (Rekonstrukcija i rehabilitacija brane Suljana), Energoprojekt – Hidroinženjering.
- [6] Chavimochic (2010) Reconstrucción Bocatoma Chavimochic, Proyecto Especial Chavimochic (Rekonstrukcija zahvata Chavimochic, Specijalni projekat Chavimochic).
- [7] Chancay Rucuy (2014) Proyecto de central hidroeléctrica Chavimochic (Projekat hidrocentrale Chavimochic).

HYDRAULIC STRUCTURES IN EXTREME CONDITIONS – EXAMPLES AND LESSONS LEARNED FROM PRACTICE

by

Goran RADOVIĆ
Energoprojekt – Niskogradnja, Beograd

Summary

Very often large hydrotechnical structures are planned and constructed in isolated, hardly accessible areas characterized by extreme climatic and topographic environment. Starting with design that requires access to the area of future site to the knowledge of the climatic-hydrological-geological conditions every step that leads to the designed and executed hydrotechnical facility is subject to changes, introduction of new criteria and adaptation to new conditions. The idea of this paper is to show three hydrotechnical projects carried out by Energoprojekt Niskogradnja constructing company in Peru: i) for extreme hydrological conditions, Sullana dam, as a part of a huge land conservation system Chira Piura 3rd stage, the consequences on the dam and its stilling basin after the extreme floods caused by the climatic phenomenon El Niño 1997-98 with monthly precipitation which were 30 to 40 times bigger than an

average, and the dam stilling basin reconstruction in 2000, ii) of extreme erosion triggered by sediment materials, dam Chavimochic, the problem of stilling basin erosion imposed by extraordinary amounts of sediments with views to the elements of reconstruction and material production, and iii) for extreme topographical conditions, the case of a hydropower plant Chancay-Rucuy, the consequences of the 2017 year rains on the penstock and power plant area. These three cases aim to draw attention to the behaviour of structures under the extreme conditions, and the consequences of the extreme conditions on applied solutions trying to outline some experiences related to the engineering solutions adopted.

Key words: extreme hydrological events, design criteria, hydraulic structures.

Redigovano 3.11.2018.