

Dinamička rezilijentnost kao mera za upravljanje rizikom kod složenih vodoprivrednih sistema: implementacija modela otkaza u vodoprivredni model

Luka Stojadinović¹ Damjan Ivetić² Miloš Milašinović³ Lazar Ignjatović⁴ Milan Stojković⁵
Nikola Milivojević⁶

APSTRAKT: Održivo upravljanje složenim vodoprivrednim sistemima, u neizvesnim i promenljivim klimatskim uslovima, kao i pod rastućim socio-ekonomskim zahtevima i ograničenjima, predstavlja kompleksan izazov. Samo u poslednjih par decenija, zabeležene su katastrofalne prirodne nepogode (poplave, suše, zemlotresi itd) koje su po intezitetu prevazilazile dosad zabeležene vrednosti. Vodoprivredni sistemi, kao što su višenamenske akumulacije, predstavljaju jedan primer vitalnih sistema čije je pouzdano funkcionisanje dodatno ugroženo u svetlu novih okolnosti. Kvantifikovanje „spremnosti“ sistema na navedene događaje, se uobičajeno sprovodi kroz analizu rizika primenom tradicionalnih statičkih veličina. Kako statičke mere imaju izvesna ograničenja, u poslednje vreme, sve više se koristi koncept dinamičke rezilijentnosti (izdržljivosti). Kako bi se obezbedila minimizacija štetnog uticaja navedenih događaja na funkcionalnost vodoprivrednih sistema, neophodno je povećati tzv. „rezilijentnost“ sistema, odnosno sposobnost sistema da izdrži i prihvati neki poremećaj i povрати pređašnju funkcionalnost. Kako bi se ispitala „spremnost“ sistema na razne nepovoljne scenarije, koji podrazumevaju smanjenje funkcionalnosti različitih komponenta sistema, neophodno je koristiti adekvatan simulacioni model vodoprivrednog sistema i model otkaza. Na osnovu ovih modela moguće je proceniti ponašanje sistema nakon širokog spektra mogućih nepovoljnih događaja. Takođe, moguće je detektovati komponente koje bi uz pravovremeno ulaganje i poboljšanje stanja ublažile pad funkcionalnosti sistema pri različitim poremećajima i povećale rezilijentnost celog sistema. U ovom istraživanju predstavljen je pristup za modeliranje otkaza i implementaciju istih u vodoprivredni model. Kao primer korišćen je vodoprivredni sistem Piroć.

Ključne reči: Upravljanje vodoprivrednim sistemima, funkcionalnost sistema, dinamička rezilijentnost, vodoprivredni model, modeliranje otkaza

Dynamics resilience as a measure for risk assessment of the complex water systems: implementation of failure model in water system model

ABSTRACT: Sustainable management of the complex water systems in uncertain and changing climate conditions, as well as in increasing socio-economic demands and limitations, is deemed as a difficult challenge. Over the last few decades, catastrophic disasters have been witnessed (floods, droughts, earthquakes etc.) which have considerably exceeded the largest recorded events. Water systems like multipurpose reservoirs, are an example of the vital systems whose functionality is challenged in these

¹Luka Stojadinović, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, istraživač, luka.stojadinovic@jcerni.rs

²dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, docent, divetic@grf.bg.ac.rs

³dr Miloš Milašinović, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, docent, mmilasinovic@grf.bg.ac.rs

⁴Lazar Ignjatović, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, samostalni istraživač, lazar.ignjatovic@jcerni.rs

⁵dr Milan Stojković, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, vodeći istraživač, milan.stojkovic@jcerni.rs

⁶dr Nikola Milivojević, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, izvršni direktor, nikola.milivojevic@jcerni.rs

new conditions. Quantification of readiness of system to address such events is usually expressed with statistical methods. As statistical methods have certain limitations, the concept of dynamic resilience is beginning to be used more often. To allow for the minimization of the negative impacts of the above-mentioned events on the system functionality, it is necessary to increase the resilience of the system, or the capability of the system withstand certain impact and bounce-back to the previous level of functionality. To analyze the system resilience, water systems simulation model along with the failure model, should be used. These models allow for the analysis of the system response to a certain impact, as well as the capability to bounce-back to previous functionality after certain system components have failed. Additionally, critical system components can be identified, which can be revitalized to increase the resilience of the overall system. In this research, a failure model is presented along with the example of implementation in the system dynamics model. Case study of Pirot water system is used.

Keywords: Water system management, system functionality, dynamic resilience, water system model, failure model

1 Uvod

Višenamenske akumulacije su vitalni infrastrukturni objekti koji obezbeđuju elementarne resurse za funkcionisanje društva, kao što su električna energija, voda za piće, voda za navodnjavanje itd. Takođe, njihova uloga je ključna u upravljanju poplavama u nizvodnim slivovima [1]. U bliskoj i daljoj budućnosti, imajući u vidu porast vrednosti vode kao resursa kao i uočene trendove u klimatskim događajima, može se očekivati da će njihova uloga u normalnom funkcionisanju društva biti sve izraženija. Samim tim, od imperativa je obezbediti pouzdanost u radu višenamenskih akumulacija, odnosno nesmetano obavljanje osnovnih funkcija ovih sistema u realnim uslovima.

Poslednjih godina pritisak na ove sisteme raste, kako se zahtevi za uslugama povećavaju usled porasta stanovništva, dok se klimatski uslovi nepovoljno menjaju i postaju sve neizvesniji. Samo u poslednjoj deceniji zabeleženo je nekoliko katastrofalnih prirodnih nepogoda, kao što su poplave, suše i zemljotresi, koji su po intenzitetu premašili dosad zabeležene nizove. Posledice su takođe katastrofalne, prvenstveno u pogledu broja ljudskih žrtava, a zatim u ekonomskoj šteti kao i u dugotrajnim poremećajima u funkcionisanju elementarnih sistema u pogođenim društvima. U kontekstu višenamenskih akumulacija, dodatan problem neretko predstavlja i činjenica da je prateća infrastruktura i oprema zastarela zbog čega je povećana opasnost od pojave otkaza elementa sistema kao i pada njegove ukupne funkcionalnosti. Upravljanje kompleksnim vodoprivrednim sistemima u ovim uslovima, postaje sve složenije, kako se sami sistemi sve učestalije nalaze u stanjima koja nisu obuhvaćena originalnom projektnom dokumentacijom [2].

Jedan od alata koji su na raspolaganju vodoprivrednim preduzećima su metode za procenu rizika koje se mogu kombinovati sa odgovarajućim matematičkim modelima za simulaciju rada samih sistema. Ispitivanje raznih mogućih scenarija, koristeći „what if“ koncept analiza, može dati korisne informacije o mogućim opasnostima po sistem i njegovo funkcionisanje. U procenama sposobnosti sistema da prihvati i izdrži određeni neželjeni događaj, kao i da posle povrati funkcionalnost, uobičajeno se koriste tradicionalne statičke mere kao što su rezilijentnost, pouzdanost i ranjivost. Međutim, pokazano je [3] da statičke mere imaju određena ograničenja, zbog čega se predlaže upotreba dinamičke rezilijentnosti (izdržljivosti). Ključna prednost dinamičke rezilijentnosti se ogleda u činjenici da se ova mera može sračunati za svaki vremenski korak simulacije, kao i da omogućava kvantifikaciju „izdržljivosti“ sistema na kombinovane pritiske od poremećaja različitih priroda. Sam proračun ove veličine se zasniva na proceni funkcionalnosti sistema u svakom vremenskom koraku matematičkog modela koji simulira rad sistema, odnosno sposobnosti sistema da ispuni svoju (svoje) projektovanu funkciju. Na samu funkcionalnost sistema utiču stanja, odnosno funkcionalnosti, sastavnih elemenata sistema. Tako, matematički model koji simulira rad sistema, tj. Simulacioni model, pored mogućnosti da „oponaša“ rad

u normalnim uslovima, mora biti sposoban da adekvatno „oponaša“ i rad u vanrednim uslovima u kojima je npr. došlo do oštećenja njegovih sastavnih elemenata. Ovaj dodatak uobičajenom simulacionom modelu se obično naziva model otkaza.

U ovom radu predložena je metodologija za eksplicitno modeliranje otkaza odnosno pada funkcionalnosti pojedinih komponenata, kao i sistema kao celine. Modeliranje pada funkcionalnosti se vrši preko kvantitativnog indikatora funkcionalnosti koji se za svaki element integriše u odgovarajući matematički model koji se koristi za opisivanje fizičkog procesa u kojem analizirani element učestvuje. Na primeru HE Pirot, pokazan je opšti pristup za implementaciju modela otkaza, gde su analizirani realni scenariji otkaza pojedinih komponenata i odgovarajuće posledice na funkcionalnost sistema.

2 Metodologija

Jedan od načina najčešćih pristupa u analizi vodoprivrednih sistema je upotreba odgovarajućih matematičkih i numeričkih, odnosno simulacionih modela sistema. Simulacioni model u opštem smislu, oponaša rad sistema korišćenjem matematičkog modela sistema, gde su izlazi modela određeni kao odgovor sistema na definisani set ulaza [4]. U simulacijama vodoprivrednih sistema, dva osnovna ulaza predstavljaju hidrološke ulaze (istorijski ili hipotetički scenariji) kao i poremećaji sistema, ili ekstremni događaji, koji se dešavaju u okviru simulacije.

Prema tome, da bi se izračunala dinamička rezilijentnost sistema za određene hidrološke uslove i pri određenim poremećajima, potrebno je razviti simulacioni vodoprivredni model koji može da adekvatno simulira uticaj različitih poremećaja na elemente modela. Na osnovu složene interakcije pojedinačnih elemenata modela u simulaciji, na koje je uticao zadati poremećaj (jedan ili više njih), dobija se rezultat simulacionog modela koji predstavlja odgovor sistema na zadate poremećaje i zadate hidrološke ulaze.

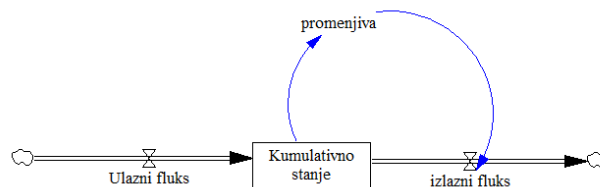
2.1 Simulacioni (Vodoprivredni) model

Koncept simulacionog (vodoprivrednog) modela se zasniva na sistemskoj teoriji. Osnovni postulati generalne sistemske teorije predstavljaju posmatranje sistema kao celine koja se sastoji iz različitih međusobno povezanih delova i granice sistema koja razdvaja elemente sistema od njene okoline. Sistem predstavlja skup različitih strukturnih i nestrukturnih elemenata koji su povezani na takav način da ostvaruju određene ciljeve kroz kontrolu i distribuciju materijalnih resursa, energije i informacije.

Osnovne komponente simulacionog modela predstavljaju kumulativna stanja (eng. Stocks ili Levels) i fluksevi (eng. Flux ili Rate) koji menjaju navedena stanja kao i promenjive koje predstavljaju veze između navedenih elemenata pomoću kojih se ostvaruje povratna sprega. Osnovna jednačina kojom se opisuje simulacioni model kroz vreme je [5]:

$$levels(t) = \int_0^t rates(t) dt \quad \frac{d}{dt} levels = rates \quad (1)$$

Na Slici 1. predstavljen je jednostavan model sa ulaznim i izlaznim fluksom i jednim kumulativnim stanjem. Promenjiva kontroliše izlazni fluks na osnovu kumulativnog stanja prema matematičkom modelu promenjive. Matematički model može predstavljati određeni fizički zakon ili zadato pravilo upravljanja.



Slika 1. Jednostavan simulacioni model.

Sa aspekta vodoprivrednog sistema, kumulativna stanja predstavljaju akumulacije sistema, dok su fluksevi različiti dovodi ili odvodi iz akumulacije (prirodni dotoci u akumulacije, evakuacioni organi, tuneli hidroelektrana itd). Fluksevi se opisuju odgovarajućim matematičkim modelima, sa ciljem verodostojnog modeliranja odgovarajućih fizičkih procesa u prirodi koji definišu analizirane protoke mase, zapremine i energije. Promenljive mogu predstavljati i upravljački deo sistema, npr. operatera akumulacije koji na osnovu nivoa u akumulaciji određuje ispuštanje.

2.2 Implementacija otkaza u simulacioni model

Kako bi se testiralo ponašanje sistema u slučaju nekih ekstremnih događaja neophodno je implementirati model otkaza u simulacioni model. Svrha modela otkaza (eng. failure model) je da u toku simulacije generiše promene na pojedinim elementima koje će dovesti do pada funkcionalnosti sistema. Na osnovu pada funkcionalnosti sistema i trajanja te smanjene funkcionalnosti može se videti osetljivost sistema na pojedine otkaze. Konačno, moguće je na vreme doneti upravljačke odluke koje će omogućiti što brži oporavak sistema i vraćanje na potreban nivo funkcionalnosti.

Generalno, postoje različiti pristupi implementaciji i modeliranju otkaza [2][6]. U mnogim slučajevima otkazi se implementiraju sa unapred zadatim vrednostima promenljivih koji predstavljaju operativna stanja pojedinih elemenata. Za ovakav pristup neophodno je imati odgovarajuću bazu podataka iz koje se mogu proceniti operativna stanja tih elemenata (npr. protok preko preliva na brani, protok kroz temeljni ispušt itd). Za razliku od tih pristupa ovaj rad predstavlja novi, univerzalni pristup za implementaciju otkaza elemenata sistema uvođenjem indikatora funkcionalnosti α [7]. Za ovakav pristup implementaciji otkaza neophodno je za svaki od elemenata sistema definisati matematički obrazac kojim se opisuje rad tog elementa. Dalje, u sklopu tog obrazca, potrebno je definisati promenljivu koja direktno utiče na funkcionalnost tog elementa (npr. raspoloživa visina otvaranja ustave preliva ili brzina kojom se ustava otvara). Za svaku od tih promenljivih koja direktno utiče na performanse elemenata i samog sistema uvodi se indikator α kao množilac te promenljive. Npr. u slučaju zemljotresa moguće je doći do deformacije niše ustave a samim tim i visine do koje se ustava može otvoriti, čime se direktno smanjuje kapacitet preliva. Stepenn deformacije niše, tj. stepen smanjenja raspoložive visine otvaranja preliva predstavlja se pomenutim parametrom koji može imati vrednosti u rasponu od 0 do 1. Za svaki od elemenata koji čine sistem definiše se indikator α :

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{Element je u potpunosti funkcionalan} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{Redukovana funkcionalnost elementa} \\ 0 & \text{Element je van funkcije} \end{cases} \quad (1)$$

U slučaju jednostavnijeg modeliranja sistema gde se ne modeliraju kompletne fizičke zavisnosti elemenata (položaji ustava, prečnik tunela ili slično) već se elementi modeliraju kao fluksevi, indikator α može predstavljati i ograničenje u maksimalnom protoku elementa. Ovakvo korišćenje indikatora α je opravdano u slučajevima kada se promena fizičkog parametara direktno utiče na promenu maksimalnog protoka elementa.

Postupak procene vrednosti parametra α tokom simulacije zavisi od samog pristupa modeliranju otkaza koji može biti potpuno nasumičan (nasumičan izbor vrednosti α za svaki od elemenata) do različitih probabilističkih ili determinističkih pristupa. Ovaj rad bavi se samo implementacijom otkaza u vidu jedinične pobude/promene parametra α , odnosno promene vrednosti α , i analize uticaja na promenu funkcionalnosti i rezilijentnosti celog sistema.

2.3 Procena dinamičke rezilijentnosti

Rezilijentnost (izdržljivost) sistema u opštem smislu predstavlja mogućnost sistema da se oporavi od poremećaja. Dinamička rezilijentnost daje procenu rezilijentnosti u svakom trenutku simulacije na osnovu gubitka učinkovitosti [3]:

$$\rho(t) = \int_{t_0}^t [P_0 - P(\tau)] d\tau \quad (2)$$

Gde veličina $\rho(t)$ predstavlja gubitak učinkovitosti u trenutku t , P_0 predstavlja učinkovitost pre poremećaja dok je $P(\tau)$ učinkovitost nakon τ vremena od poremećaja. U matematičkom smislu, gubitak učinkovitosti ρ predstavlja površinu ispod krive učinkovitosti od pojave poremećaja do kraja procesa oporavka od poremećaja.

Učinkovitost sistema se može predstaviti na različite načine [3][7][8][9]. Uobičajeno se koriste pojednostavljene, praktične forme, kao na primer u [3], gde se učinkovitost definiše odnosom ostvarene i zahtevane isporuke određene veličine u svakom trenutku. Na primeru hidroenergetskog sistema, ukoliko nije poznata zahtevana isporuka električne energije, ta veličina može predstavljati protok hidroelektrane, pa je učinkovitost:

$$P_{HE}(t) = \frac{Q_{HE}(t)}{Q_{HE}^{REF}(t)} \quad (3)$$

Konačno, dinačka rezilijentnost u svakom trenutku simulacije dobija se normalizacijom gubitka učinkovitosti:

$$R(t) = 1 - \left[\frac{\rho(t)}{P_0(t-t_0)} \right] \quad (4)$$

Dinamička rezilijentnost je sada izražena u jedinicama rezilijentnosti od 0 do 1.

S obzirom da tema ovog rada implementacija modela otkaza u vodoprivredni model, rezultati proračuna rezilijentnosti se neće prikazivati u ovom radu.

2.4 Test primer

2.4.1 Opis vodoprivrednog sistema Pirot

Prethodno opisana metodologija je implementirana na primeru vodoprivrednog sistema Pirot prikazanog na Slici 2. Vodoprivredni sistem Pirot pušten je u rad 1990. godine i sastoji se iz akumulacije Zavoj zapremine $170 \times 10^6 \text{ m}^3$ i derivacione hidroelektrane Pirot instalisane snage $2 \times 44,5 \text{ MW}$. Na oko 6 km uzvodno od brane voda se preko ulazne građevine i dovodnog tunela dovodi do elektrane, a odatle odvodnim kanalom dužine 1,3 km odvodi u kompenzacioni bazen zapremine $650,000 \text{ m}^3$ u kome se vrši dnevno izravnavanje protoka ka reci Nišavi pomoću ustava na izlazu iz kompenzacionog bazena. Na brani akumulacije nalaze se evakuacioni organ preliv sa brzotokom maksimalnog protoka $1840 \text{ m}^3/\text{s}$ kao i temeljni ispušt pomoću kog se reguliše garantovani ekološki protok nizvodno od brane.



Slika 2. Dispozicija vodoprivrednog sistema Pirot sa ključnim elementima

2.4.2 Elementi simulacionog modela

Simulacioni model vodoprivrednog sistema Pirot predstavlja složeni dinamički model implementiran u softverskom okruženju Vensim i može se podeliti u sledeće celine:

- akumulacija Zavoj
- Kompenzacioni bazen
- Hidroelektrana Pirot
- Prelivi akumulacije
- Upravljački sklop

Akumulacija Zavoj predstavljena je bilansnim elementom kumulativno stanje (stock). Ulaz u akumulaciju predstavlja dotok Visočicom (Q_{vis}) dok su izlazi iz akumulacije protok hidroelektrane (Q_{HE}), protok preliva (Q_{pr}), garantovani ekološki protok (Q_{gep}), isparavanje (Q_{et}) i procurivanje kroz telo brane (Q_{proc}):

$$\frac{d}{dt} V_{zavoj} = Q_{vis} - Q_{HE} - Q_{pr} - Q_{GEP} - Q_{et} - Q_{proc} \quad (5)$$

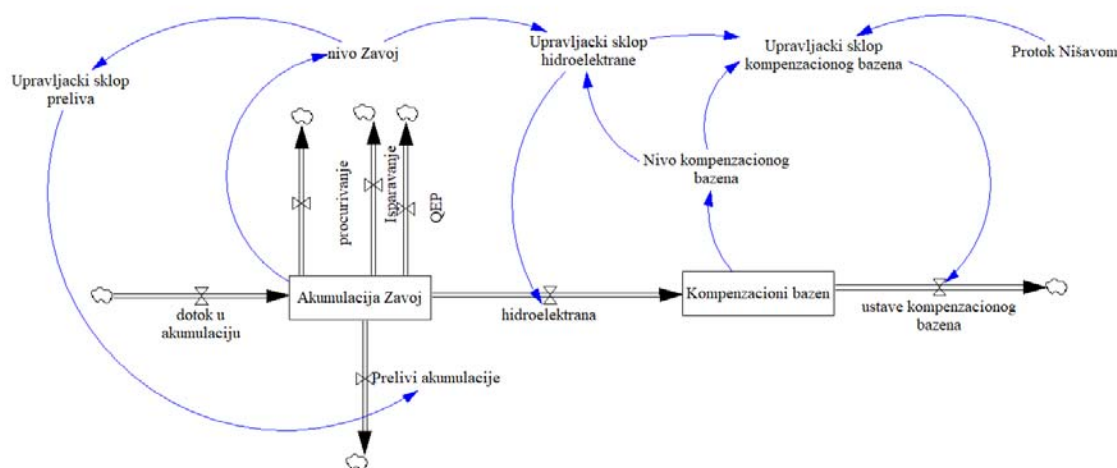
Kompenzacioni bazen je takođe predstavljen elementom kumulativnog stanja. Ulaz u kompenzacioni bazen predstavlja protok hidroelektrane (Q_{HE}), dok je izlaz iz kompenzacionog bazena protok ispod ustava kompenzacionog bazena ka Nišavi (Q_{KP}):

$$\frac{d}{dt} V_{KP} = Q_{HE} - Q_{KP} \quad (6)$$

Protok ustava kompenzacionog bazena je upravljiva veličina koju kontroliše upravljački sklop.

Hidroelektrana Pirot je u vodoprivrednom modelu predstavljena kao izlazni fluks akumulacije Zavoj sa pripadajućim upravljačkim sklopom (Q_{HE}). S obzirom da je HE Pirot vršna hidroelektrana, pretpostavlja se da hidroelektrana uvek radi sa maksimalnim protokom, pa je prema tome izlazni fluks hidroelektrane jednak maksimalnom protoku hidroelektrane pomnoženim sa signalom iz upravljačkog sklopa koji uzima vrednost 0 ili 1.

Preliv akumulacije je implementiran kao izlazni fluks akumulacije (Q_{pr}) i veličinu tog fluksa takođe diktira upravljački sklop.



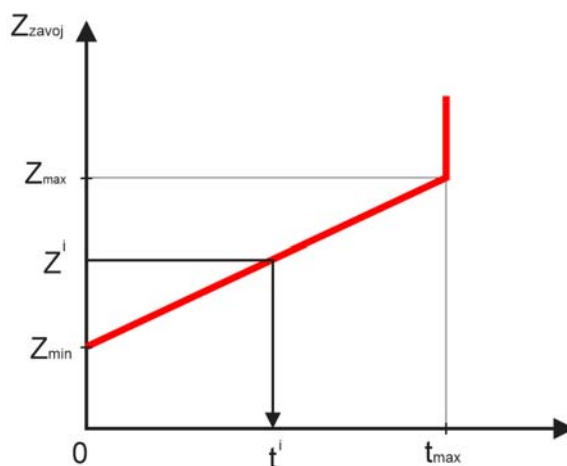
Slika 3. Šema simulacionog modela vodoprivrednog sistema Pirot.

2.4.3 Upravljanje sistemom i ograničenja

Upravljački sklop sistema može se podeliti u podsisteme upravljanja hidroelektranom, prelivom brane i ustavama kompenzacionog bazena.

Plan rada hidroelektrane zadaje se na dnevnom nivou: na osnovu trenutnog nivoa u akumulaciji u trenutku planiranja (06h svakog dana simulacije) određuje se planirani broj sati rada hidroelektrane [10]. Ukoliko je trenutna kota u akumulaciji ispod unapred zadate kote Z_{min} , hidroelektrana neće raditi tog dana, a ukoliko je kota u akumulaciji iznad Z_{max} , hidroelektrana će raditi t_{max} sati (u ovom slučaju 10 sati). Ukoliko je kota akumulacije između minimalne i maksimalne kote, planiran broj sati rada hidroelektrane određuje se linearnom interpolacijom. Ovakva pravila ilustrovana su na Slici 4. Vrednosti Z_{min} i Z_{max} zadate su za svaki prvi dan meseca u godini dok se za sve ostale dane dobijaju linearnom interpolacijom.

Paljenje hidroelektrane se ne dešava u istom trenutku kada se i donosi upravljačka odluka već se vreme paljenja hidroelektrane proračunava na takav način da je svakog dana u 16h hidroelektrana radila polovinu od planiranog vremena rada.



Slika 4. Ilustracija pravila upravljanja hidroelektrane

Protokom ispod ustava kompenzacionog bazena se takođe upravlja na dnevnom nivou. Odluka o veličini ispuštanja kroz ustave kompenzacionog bazena se donosi u trenutku paljenja hidroelektrane, na takav način da se u narednih 24 sata ravnomerno ispusti trenutna zapremina vode u kompenzacionom bazenu kao i zapremina vode koju tog dana hidroelektrana planira da ispusti. Osnovna ideja ovakvog rada je da se kompenzacioni bazen u narednih 24 sata (do pretpostavljenog paljenja hidroelektrane narednog dana) potpuno isprazni uz ravnomerno ispuštanje vode u Nišavu. Jednačina kojom se dobija protok kompenzacionog bazena je:

$$Q_{KP}^i = \frac{V_{KP}^i}{24 \cdot 3600} + \frac{t_{HE}^i Q_{max,HE}}{24} \quad (7)$$

Prelivom akumulacije upravlja se zadavanjem protoka koji si računa na osnovu trenutne kote u akumulaciji, linearnom interpolacijom između $Z_{min,pr}$ i $Z_{max,pr}$ i protoka.

U vodoprivrednom modelu implementirana su i određena „upravljačka“ ograničenja:

- Ograničenje nivoa kompenzacionog bazena: u slučaju da nivo kompenzacionog bazena prevaziđe određeni zadati nivo $Z_{max,kp}$, hidroelektrana se gasi čime se prekida dotok u kompenzacioni bazen
- Ograničenje paljenja hidroelektrane: ukoliko se hidroelektrana ugasi pre ispunjenog dnevnog plana broja sati rada, hidroelektrana se ne može ponovo upaliti do narednog dana

- Ograničenje protoka Nišave: ispuštanje kompenzacionog bazena ne može biti veće od raspoloživog protoka koji Nišava može da prihvati. Raspoloživi protok računa se kao razlika unapred zadatog maksimalnog dozvoljenog protoka Nišave i trenutnog protoka Nišave.

2.4.4 Implementacija otkaza elemenata

Na primeru simulacionog modela vodoprivrednog sistema Pirot implementirani su otkazi sledećih elemenata:

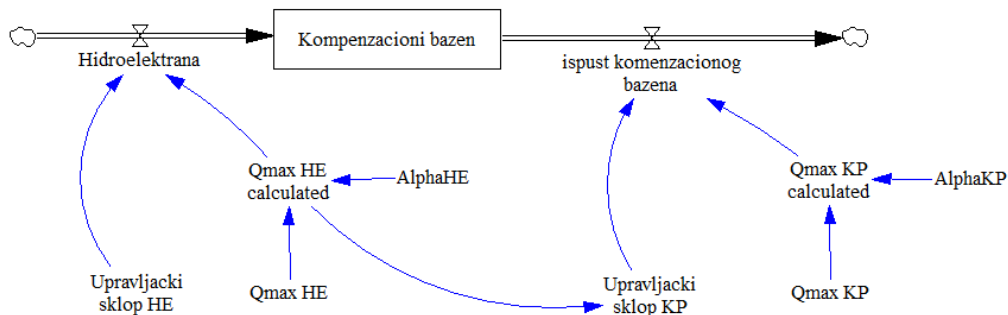
- Otkaz hidroelektrane
- Otkaz ustava kompenzacionog bazena
- Otkaz preliva akumulacije

Otkaz ovih elemenata implementiran je u sva tri slučaja na sličan način: množenjem maksimalnog protoka elementa sa indikatorom α svakog elementa pa se konačni protok elementa u svakom trenutku simulacije dobija prema sledećoj jednačini:

$$Q_{max,k,calc}^i = Q_{max,k} \alpha_k^i$$

$$Q_k^i = \min(Q_{k,up}^i, Q_{max,k,calc}^i) \quad (8)$$

Veličina $Q_{max,k}$ predstavlja maskimalni protok elementa u regularnim uslovima dok $Q_{max,k,calc}$ predstavlja „raspoloživi“ maksimalni protok elementa k u svakom vremenskom trenutku i sa implementiranim otkazom elementa, a veličina Q_k predstavlja ostvareni protok elementa koji je u zavisnosti od upravljača i raspoloživog maksimalnog protoka.



Slika 5. Implementacija modela otkaza u vodoprivredni model

Potrebno je napomenuti da u slučaju otkaza agregata hidroelektrane ne postoji povratna sprega između upravljačkog sklopa hidroelektrane i otkaza hidroelektrane (ne postoji promena pravila u slučaju otkaza) dok je u slučaju upravljačkog sklopa ustava kompenzacionog bazena kreirana veza između raspoloživog maksimalnog protoka hidroelektrane i upravljačkog sklopa kompenzacionog bazena jer je opravdano pretpostaviti da je pri planiranju srednjeg protoka ustava kompenzacionog bazena operateru dostupna informacija sa kojim će protokom hidroelektrana raditi i u slučaju otkaza.

2.4.5 Ispitani scenariji

Prethodno opisan vodoprivredni model ispitan je u uslovima pojave zemljotresa kao spoljnog poremećaja koji dovodi do pada funkcionalnosti elemenata u sistemu. Pretpostavlja se da spoljni poremećaj može da utiče na pad funkcionalnosti sledećih elemenata:

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.

- Hidroelektrana: spoljni poremećaj može da izazove otkaz jednog od dva agregata u hidroelektrani, pa je pri pojavi spoljnog poremećaja $\alpha_{HE} = 0,5$
- Ustave kompenzacionog bazena: spoljni poremećaj može da dovede do potpune blokade jedne ustave u zatvorenom položaju dok je druga ustava delimično upravljiva pa je $\alpha_{KB} = 0,1$

Za oba elementa se pretpostavlja da je α od pojave spoljnog poremećaja do povratka potpune funkcionalnosti konstantna a da je za povratak potpune funkcionalnosti potrebno 3 meseca.

Prema tome formirani su sledeći scenariji:

- Referentni scenario (REF): u ovom scenariju se ne dešavaju otkazi elemenata. Ovaj scenario će se koristiti kao referentni scenario pri analizi uticaja otkaza drugih elemenata.
- Scenario 1 (S1): spoljni poremećaj ima uticaja samo na hidroelektranu
- Scenario 2 (S2): spoljni poremećaj ima uticaja samo na kompenzacioni bazen
- Scenario 3 (S3): spoljni poremećaj ima uticaja na hidroelektranu i na kompenzacioni bazen

Tabela 1. Scenariji pada funkcionalnosti elemenata.

Scenario	α_{HE}	α_{KB}
REF	1	1
1	0,5	1
2	1	0,1
3	0,5	0,1

Kao hidrološki ulazi u model (dotok u akumulaciju) korišćeni su osmotreni istorijski podaci iz 2003. godine. Diskretizacioni korak modela je 1 sat i uslovljen je dinamikom kompenzacionog bazena.

Pored različitih kombinacija otkaza elemenata, ispitan je i uticaj perioda u kome se pojavljuje otkaz, pa su prethodni scenariji ispitani u dve varijante:

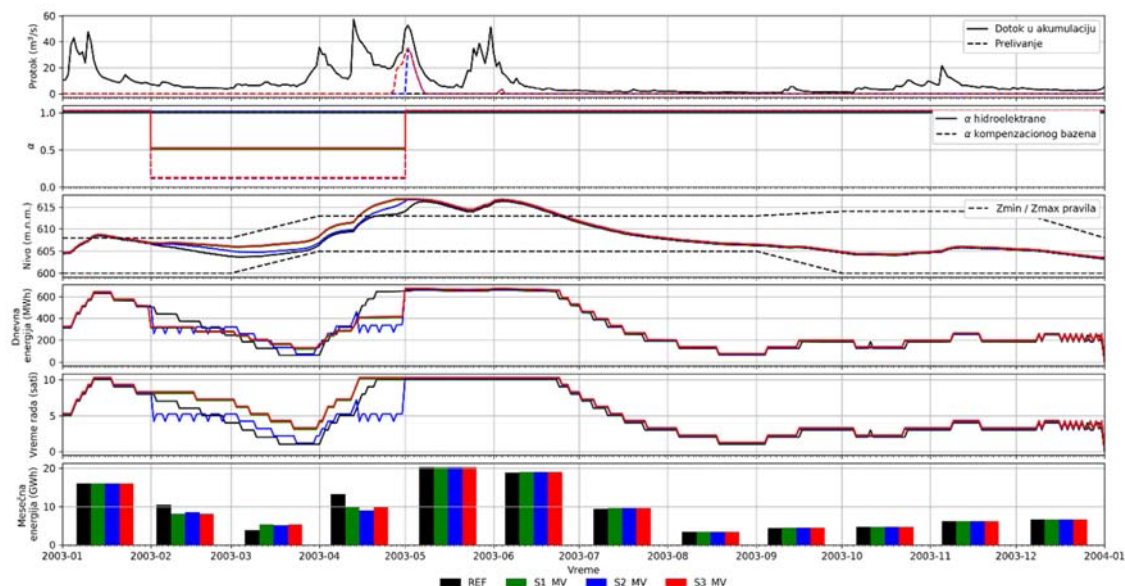
- Pojava otkaza u periodu manjih dotoka u akumulaciju: zemljotres se dešava 1. februara i pad funkcionalnosti traje do 1. maja (MV)
- Pojava otkaza u periodu većih dotoka u akumulaciju: zemljotres se dešava 1. marta i pad funkcionalnosti traje do 1. juna (VV)

U narednom poglavlju prikazaće se dobijeni rezultati za referentni scenario i kao i za scenarije S1, S2 i S3 u periodu malih voda (MM) i velikih voda (VM). Pri proračunu proizvedene električne energije, pretpostavlja se konstantan koeficijent korisnog dejstva turbine i agregata.

3 Rezultati i diskusija

Na narednoj slici prikazan je rezultat referentnog scenarija zajedno za rezultatima scenarija S1, S2, S3 za otkaze u periodima malih dotoka u akumulaciju (MV).

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.



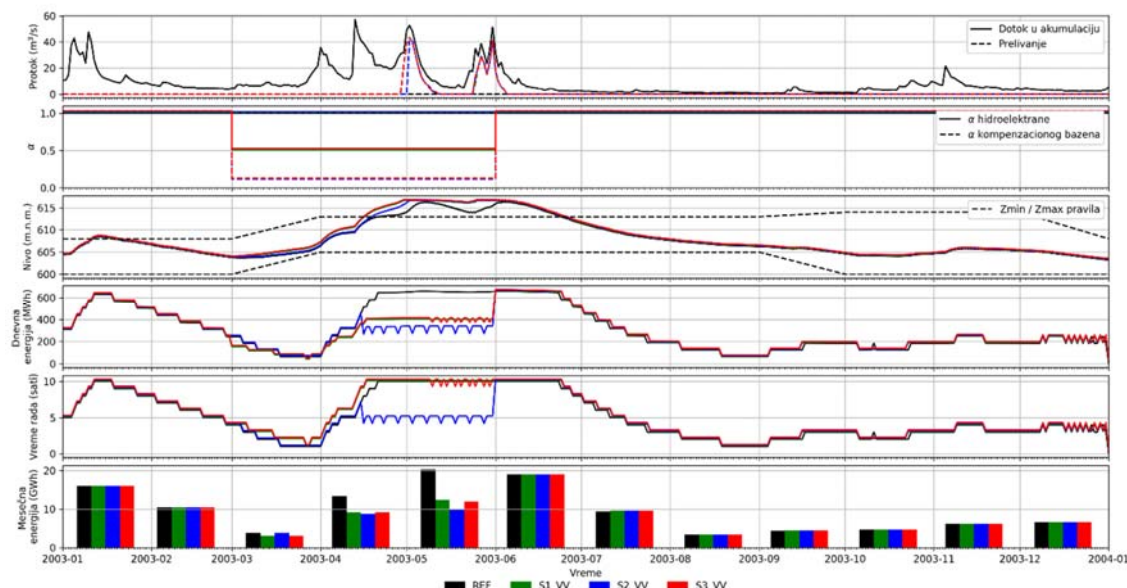
Slika 6. Rezultati scenarija za otkaze u periodu malih voda

U slučaju scenarija S1_MV, u periodu smanjene funkcionalnosti hidroelektrane primećuje se povećan broj sati rada hidroelektrane u danu: pravila hidroelektrane su ostala nepromenjena i u slučaju otkaza, pa je pri brzina kojom nivo u akumulaciji teži ka Z_{min} sporija.

U slučaju scenarija S2_MV (otkaz ustava kompenzacionog bazena), primećuje se generalno smanjenje realizovanog broja sati rada hidroelektrane iako su nivoi u akumulaciji viši od referentnog nivoa. Ovo se dešava kao posledica toga da kompenzacioni bazen ne može da ispusti planirani srednji protok ispod ustava, usled čega dolazi do bržeg punjenja kompenzacionog bazena i prekoračenja dozvoljenog nivoa u bazenu, pa se prema zadatom ograničenju hidroelektrana ugasi pre ispunjenog dnevnog plana rada.

Scenario S3_MV (otkaz hidroelektrane i kompenzacionog bazena) je praktično identičan kao i scenario S1_MV (povećano vreme rada hidroelektrane). Može se zaključiti da smanjena funkcionalnost ustava kompenzacionog bazena nema uticaja na sistem u periodu malih voda ukoliko je došlo do smanjenja funkcionalnosti kompenzacionog bazena, jer kompenzacioni bazen usled smanjenog dotoka iz hidroelektrane i dalje može izvršiti dnevno izravnjanje.

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.



Slika 7. Rezultati scenarija za otkaze u periodu velikih voda

U slučajevima otkaza elemenata pri velikim dotocima u akumulaciju (Slika 7), primećuju se slične zavisnosti kao i u prethodnim primerima MV. Međutim, u svim scenarijima VV primećuju se veća preliivanja i manje proizvodnje. Manje proizvodnje se dešavaju jer je upravo u periodu kada HE treba da radi sa maksimalnih 10 sati punim kapacitetom smanjen ili broj sati usled otkaza kompenzacionog bazena ili je smanjen kapacitet HE.

Ono što je zanimljivo primetiti je da se pri kraju perioda otkaza (maj 2003.) za scenario 3_VV povremeno smanjuje broj radnih sati sa maksimalnih 10 na 9. Kompenzacioni bazen se polako puni jer je planirano srednje ispuštanje ispod ustava kada hidroelektrana radi 10 sati smanjenim kapacitetom nešto veća od maksimalnog ispuštanja, pa se u periodima konstantnog rada od 10 sati taj ostatak akumulira. U prethodnom primeru MV se ovo nije primetilo jer je period konstantnog rada od 10 sati bio previše kratak da bi ova akumulirana zapremina u kompenzacionom bazenu dovela do prekida rada hidroelektrane.

U svim slučajevima otkaza, kako u periodima MV tako i u periodima VV, primećuje se pad proizvodnje električne energije. Ovaj pad je drastičniji u periodu VV jer su u tom periodu preliivanja veća pa dolazi do većeg gubitka energetskeg potencijala.

4 Zaključak

U ovom radu prikazan je način implementacije modela otkaza u vodoprivredni (simulacioni) model korišćenjem indikatora funkcionalnosti α elemenata modela. Model otkaza se zasniva na eksplicitnoj integraciji indikatora funkcionalnosti u simulacionom modelu, i omogućava jednostavno i fizički zasnovano modeliranje otkaza komponenata i sistema kao celine. Opšti karakter pristupa je komplementaran sa tehnikama simulacije dinamike sistema i omogućava širu primenu pri analizi višenamenskih akumulacija i vodoprivrednih sistema.

Predloženi koncept je primenjen u analizi vodoprivrednog sistema Piroto. Formiran je vodoprivredni model sistema u softverskom paketu Vensim® sa osnovnim komponentama sistema međusobno povezanih pomoću odgovarajućih matematičkih relacija. U model su integrisana pravila upravljanja sistemom, preko upravljačkog sklopa. Zatim je na modelu primenjen model otkaza da bi se ispitao uticaj otkaza elemenata hidroelektrana i ustave kompenzacionog bazena. Pokazalo se da je zadato pravilo upravljanja hidroelektrane neadekvatno u situacijama otkaza jer je u svim kombinacijama otkaza

došlo do preliivanja i gubitka vode iz sistema koje je moglo biti sprečeno boljim upravljanjem u periodima otkaza. Navedena preliivanja i gubici vode direktno utiču na sposobnost sistema da obavlja funkciju proizvodnje električne energije, odnosno dovode do pada učinkovitosti sistema.

Pored toga, poređenjem rezultata otkaza u periodu malih voda i otkaza u periodu velikih voda, može se zaključiti da u slučaju otkaza oba elementa (HE i KP) otkaz KP nema uticaja u periodu malih voda. Uticaj otkaza KP u kombinaciji sa otkazom HE dolazi do izražaja tek nakon dužeg perioda rada HE sa maksimalnim dnevnim vremenom rada.

U narednim koracima istraživanja, predloženi model otkaza će biti dopunjen i proširen na ostale relevantne komponente vodoprivrednog sistema. U proširenoj formi će biti korišćen za procenu dinamičke rezilijentnosti (izdržljivosti) vodoprivrednih sistema, sa akcentom na sistem Pirot, u širokom spektru mogućih scenarija koji postaju sve izvesniji sa promenama klimatskih uslova. Poseban element u razvoju okvirne metodologije za ispitivanje izdržljivosti sistema je i generator otkaza, kojim će se omogućiti generisanje velikog broja realnih scenarija u kojima se u različitim vremenskim trenucima događaju ekstremni događaji, ili njihove kombinacije, koje zajedno sa nepovoljnim hidrološkim uslovima mogu izazvati značajne poremećaje u radu sistema. Povećanjem kapaciteta za modeliranje iliti numeričko ispitivanje stanja sistema omogućava se razvoj alata za podršku u upravljanju sistemom i donošenju investicionih odluka.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Fondu za nauku Republike Srbije na podršci kroz projekat PROMIS poziva, 6062556, DyRes System: „Dynamics resilience as a measure for risk assessment of the complex water, infrastructure and ecological systems: Making a context”. Autori se zahvaljuju profesoru Slobodanu .P. Simonoviću (Faculty of civil and environmental engineering, University of Western Ontario) na korisnim komentarima i sugestijama tokom izrade projekta.

Literatura

1. Men, B., Liu, H., Tian, W., Wu, Z., Hui, J. (2019). The Impact of Reservoirs on Runoff Under Climate Change: A Case of Nierji Reservoir in China. *Water*, 11, 1005, doi:10.3390/w11051005.
2. King, L.M. (2020). Using a Systems Approach to Analyze the Operational Safety of Dams. Doctoral Dissertation, Western University: London, Ontario, Canada, <https://ir.lib.uwo.ca/etd/6880>; Electronic Thesis and Dissertation Repository. 6880.
3. Simonovic, S.P., Arunkumar, R. (2016). Comparison of Static and Dynamic Resilience for a Multipurpose Reservoir Operation. *Water Resour. Res.* 52, 8630–8649, doi:10.1002/2016WR019551.
4. Simonovic, S. P. (2009), Managing Water Resources, UNESCO, London.
5. Ventana Systems Inc. <https://vensim.com/docs/> Vensim Reference Manual 2021.
6. Song Y (2012) Applying System-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP) to Hazard Analysis. MSc Thesis. McMaster University
7. Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks (1982), Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water Resour. Res.*, 18(1), 14–20, doi:10.1029/WR018i001p00014.
8. Ayyub, B. M. (2015). Practical resilience metrics for planning, design, and decision making. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 1(3), 04015008.
9. Francis, R., & Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90-103.
10. Tayebiyan, A., Mohammad, T. A., Al-Ansari, N., & Malakootian, M. (2019). Comparison of optimal hedging policies for hydropower reservoir system operation. *Water*, 11(1), 121.