

OKVIR ZA DINAMIČKO MODELIRANJE RADA AKUMULACIJA U NEPOVOLJNIM OPERATIVNIM USLOVIMA

Damjan IVETIĆ, Miloš MILAŠINOVIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Milan STOJKOVIĆ
Istraživačko-razvojni institut za veštačku inteligenciju Srbije
Aleksandar ŠOTIĆ
Visoka građevinsko-geodetska škola Beograd

REZIME

Akumulacije kao složeni vodoprivredni sistemi predstavljaju ključne infrastrukturne elemente, neophodne za pouzdano upravljanje vodnim resursima. Poslednjih godina, ovi sistemi su izloženi sve nepovoljnijim prirodnim i antropogenim uticajima (dotrajala i zasterala infrastruktura, prirodne nepogode, globalne krize, ekstremni hidrološki događaji itd.). Na ovaj način, dodatan pritisak se nameće odgovornim operaterima, koji moraju da upravljaju akumulacijama u nepovoljnim operativnim uslovima, koji se nalaze izvan projektnih okvira. Jedan od mogućih pristupa za podršku donosiocima odluka je upotreba simulacionih alata za modeliranje različitih „Šta ako?“ scenarija. Posebno se izdvaja upotreba modela dinamike sistema, koji su pokazali kapacitet da adekvatno predstavje kompleksnost ovakvih sistema. U ovom radu je predstavljen okvir, ili okvirna metodologija, od 11 koraka, za dinamičko modeliranje rada akumulacija u nepovoljnim operativnim uslovima. Okvir obuhvata celine kao što su: formiranje modela sistema, generisanje ulaznih scenarija, simuliranje rada sistema i evaluacija performansi. Fokus je na koracima koji pokrivaju konceptualnu dekompoziciju akumulacija kao složenih sistema, identifikaciju indikatora otkaza, definisanje i implementaciju funkcija otkaza u modele dinamike podsistema i dinamičko modeliranje otkaza. Kroz ove korake, predstavljen je nov pristup za dinamičko modeliranje otkaza (parcijalnih ili potpunih) akumulacije kao celine i/ili odgovarajućih podsistema, koji se neretko javljaju u nepovoljnim operativnim uslovima. Za svaki podsistem koji je sklon otkazu, definiše se indikator otkaza. Funkcije otkaza, koje koriste generičke indikatore funkcionalnosti čija vrednost može biti u opsegu od 0 do 1, modifikuju

vrednost indikatora otkaza tokom simulacija, modelirajući uticaj otkaza komponenta/podsistema na rad akumulacije. Primer akumulacije Zavoj, odnosno HE Pirot, je iskorišćen da bi se ilustrovale mogućnosti predložene metodologije. Razmatrani su hipotetički slučajevi fizičkih oštećenja na različitim objektima brane, porast merne nesigurnosti, nedostatak rezervnih delova za popravku u periodima svetskih kriznih događaja. Rezultati primene su omogućili izvođenje preliminarnih zaključaka o svrsishodnosti analiza rada akumulacija u nepovoljnim operativnim uslovima.

Ključne reči: Akumulacije, Sigurnost brana, Dinamika sistema, Hidroenergija, Modeliranje otkaza

1. UVOD

Od svih tipova hidrotehničke infrastrukture za upravljanje vodnim resursima, akumulacije predstavljaju ključne elemente kojima se omogućava prostorna i vremenska preraspodela vodnih resursa zarad upotrebe u hidroenergetici, navodnjavanju, vodosnabdevanju, zaštiti od poplava itd [1,2]. Takođe, akumulacije posredno i neposredno doprinose razvoju lokalne i regionalne ekonomije, odnosno uspostavljanju povoljnih prilika za razvoj društvenih zajednica. U poslednje vreme, na globalnom nivou, je primetan manjak dostupnosti vodnih resursa, koji primorava društvo da razmatra nove pristupe u korišćenju preostalih resursa, prebacujući težište sa analiza dostupnosti na analize zahteva za vodnim resursima [3].

Bezbednost akumulacija je od presudnog značaja za nadležne institucije, „stejkholdere“ i lokalno stanovništvo, budući da incidenti vezani za bezbednost mogu dovesti do katastrofalnih posledica [4]. Dalje,

otkazi u radu akumulacija vezani za parcijalne/privremene kvarove komponenata sistema, odnosno nemogućnost akumulacije da ispuni svoj zadatak (npr nemogućnost da proizvedu traženu količinu električne energije) mogu značajno poremetiti rad industrijskog i komunalnog sektora [5].

[6] definiše termin otkaz brane (eng. Dam failure) kao iznenadno i nekontrolisano ispuštanje akumulirane tečnosti ili jalovine, dok se manjim otkazom brane opisuju svi kvarovi i odstupanja izvan projektnih parametara koji negativno utiču na primarnu funkciju akumuliranja tečnosti. Poslednje dve decenije, postojeće brane i akumulacije su izložene rastućem riziku od otkaza, prvenstveno zbog zastarele infrastrukture, neodgovarajućih upravljačkih odluka i promenljivih klimatskih uslova [2,7,8,9]. U ovom radu, fokus je na radu akumulacija (i brana) u nepovoljnim operativnim uslovima, gde ne dolazi do otkaza brane, već je projektovana funkcija akumulacija ugrožena unutrašnjim i spoljašnjim poremećajima. Kako bi se omogućilo upravljanje i potencijalno minimiziranje rezultujuće štete (ljudske žrtve, ekonomski poremećaji...), važno je da institucije koje rukovode ovim sistemima poseduju dovoljno razumevanja i znanja kako njihovi sistemi funkcionišu u svim mogućim uslovima [1,10,11,12].

U opštem slučaju, nepovoljni operativni uslovi mogu biti podstaknuti širokim spektrom i kombinacijom događaja, uključujući prirodne poremećaje (npr zemljotresi), nepoznate dotoke ili dotoke izvan projektovanog opsega, otkaze komponenata, operativne greške, ljudske greške i propustima u projektovanju i izvođenju. Dok je tema otkaza brana detaljno izučavana u literaturi [13,14,15,16,17,18], dinamičko modeliranje otkaza sa analizom rada sistema i potencijalnih uticaja na ekonomiju i životnu sredinu je tema koja je retko obrađivana [19,20,21]. Identifikacija, potpun opis i procena lokalnih potencijalnih režima otkaza su verovatno najbitniji koraci u analizi rizika [6,22]. Stručnjaci i istraživači najčešće koriste neke od sledećih metoda [13,23,24]: FMEA (eng. Failure Modes and Effects Analysis), FTA (eng. Fault Tree Analysis), ETA (eng. Event Tree Analysis) i PMRM (eng. Partitioning Multiobjective Risk Method). Međutim, identifikovani su određeni nedostaci navedenih induktivnih metoda, kao što su ograničen kapacitet za analizu interakcije komponenata, događaja sa više povezanih incidenata i nelinearnog ponašanja sistema [25,26,27,28]. [29] ističe da su navedene metode verovatno previše pojednostavljene za analizu rada akumulacija i vodoprivrednih sistema, gde se javlja visok nivo

kompleksnosti i snažna interakcija između ljudi, infrastrukture i životne sredine.

Kao jedan od pristupa sa najvećim praktičnim potencijalom, izdvaja se upotreba modela dinamike sistema (DS) [25,29,30]. Modeli DS se koriste da simuliraju rad sistema (ovde akumulacija) u različitim „Šta ako?“ scenarijima, omogućavajući variranje ulaznih parametara, postavke sistema, graničnih i početnih uslova. Poseduju kapacitet za simultano i spregnuto simuliranje više različitih procesa (modela) unutar jednog sistema. Važan aspekt u analizi rada sistema je i modeliranje otkaza, gde jedna ili više komponenata (ili podsistema) pod uticajem određenog poremećaja imaju smanjenu funkcionalnost u konačnom vremenskom periodu (neophodnom za detektovanje kvara, nabavku rezervnih delova i popravku ugroženih komponenti). Da bi se iskoristile sve mogućnosti modela DS u analizi ponašanja nekog sistema u realnim radnim uslovima (ulaznim scenarijima), smanjena funkcionalnost (kvar) komponenata i nelinearna interakcija između samih komponenata, trebaju biti adekvatno modelirani. Ovde je predložen opšti i fleksibilan okvir za primenu modela DS, koji se sastoji od 11 koraka. Predloženi okvir uvodi korake kao što su konceptualna dekompozicija sistema u matematički opisane pod sisteme (komponente), identifikacija indikatora otkaza, definisanje funkcija otkaza i odgovarajuća primena kako bi se modelirala dinamika otkaza i rada sistema. Za matematičko modeliranje otkaza, predložena je upotreba funkcija otkaza sa promenljivom u vidu generičkih indikatora funkcionalnosti koji uzimaju vrednosti između 0 i 1. Predloženi okvir se može koristiti na bilo kojem nivou detaljnosti modela, u kojem se ključne komponente sistema mogu adekvatno matematički opisati. Sa porastom nivoa detaljnosti modela, omogućava se tačnije predstavljanje fenomena od interesa, modeliranje otkaza i ponašanja sistema (ali i veće računarsko opterećenje pri simulacijama). U ovom radu, iskorišćen je primer akumulacije Zavoj, odnosno HE Pirov, za demonstraciju primene predložene metodologije i analizu hipotetičkih scenarija rada sistema u nepovoljnim operativnim uslovima.

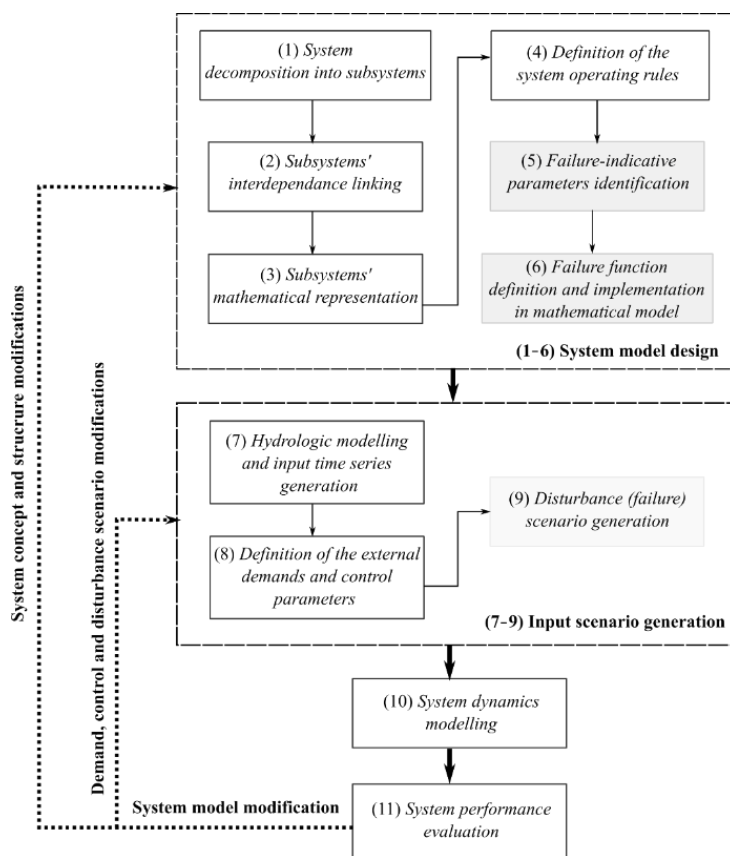
2. METODOLOGIJA

2.1. Pregled okvirne metodologije

Modeli DS, i tzv. sistemski pristup u analizi akumulacija i vodoprivrednih sistema uopšte, moraju integrisati i modele otkaza komponenata sistema, kako bi se mogli koristiti u analizama ponašanja sistema u

nepovoljnim operativnim uslovima. Iako su određeni istraživači dali doprinos ovoj temi [21,30], i dalje postoji potreba za opštim i generičkim pristupom. Stoga, u ovom radu je predstavljen opšti, fleksibilan okvir za modeliranje DS koji podrazumeva integraciju modela otkaza. Sastoji se od 11 koraka (Slika 1.), gde koraci 1-6 pokrivaju formiranje modela DS: (1) Konceptualna dekompozicija sistema na podsisteme sa identifikacijom ključnih komponenata i procesa; (2) Međusobno povezivanje podsistema, gde se ulaz/izlaz definišu za svaki podsistem; (3) Matematičko predstavljanje podsistema, gde se transformacija ulaza u izlaze emulira odgovarajućim matematičkim modelom; (4) Definisanje pravila upravljanja sistemom, koja opisuju kako se mereni podaci koriste za donošenje operativnih odluka; (5) Identifikovanje indikatora otkaza, koji se koriste za predstavljanje smanjene funkcionalnosti odgovarajućih podsistema; (6) Definisanje i implementacija funkcija otkaza u matematičke modele, koje opisuju vezu između indikatora otkaza i generičkih indikatora funkcionalnosti, preko koje se emulira kvar nekog podsistema.

Koraci 7-9 se bave definisanjem ulaznih scenarija: (7) Hidrološko modeliranje sliva i formiranje dugačkih vremenskih serija doticaja i ostalih potrebnih hidro-meteoroloških veličina (ukoliko su potrebne); (8) Definisanje spoljnih zahteva od sistema i karakterističnih kontrolnih parametara (npr minimalni i maksimalni radni nivo za hidroenergetsku proizvodnju); (9) Generisanje scenarija poremećaja (otkaza), gde se širok spektar događaja treba obraditi, uključujući kombinacije sistemskih poremećaja, sa variranim magnitudama, trajanjem i vremenom pojave. Sledeći korak je (10) je simulacija ponašanja sistema u definisanim ulaznim scenarijima, nakon koje se vrši evaluacija performansi sistema (11). Na osnovu koraka (11) odnosno izvedenih zaključaka, moguće je vršiti modifikacije modela DS, gde u slučaju da treba razmotriti dodavanje novih podsistema, ili promenu logike upravljanja sistemom, svrsishodno bi bilo ponoviti sve korake u okviru. Sa druge strane ukoliko je potrebno proširiti skup ulaznih scenarija ili varirati parametre kontrolne logike, dovoljno je ponoviti korake od 7-11.



Slika 1. Shematski prikaz okvirne metodologije [31]

Detaljniji opis ključnih koraka okvirne metodologije su dati u nastavku zajedno sa ilustracijama i primerima matematičkih modela koji se mogu koristiti u modelima DS akumulacija. Međutim, kako su mogućnosti razvoja modela DS, prvenstveno sa aspekta nivoa detaljnosti i tipova različitih akumulacija, praktično neograničene, treba napomenuti da se u ovom radu kao primeri prvenstveno koriste aspekti vezane za hidrauliku ovakvih sistema kao i njihovo održavanje, dok su energetska, mehanička i ekološka aspekti dobili manje pažnje.

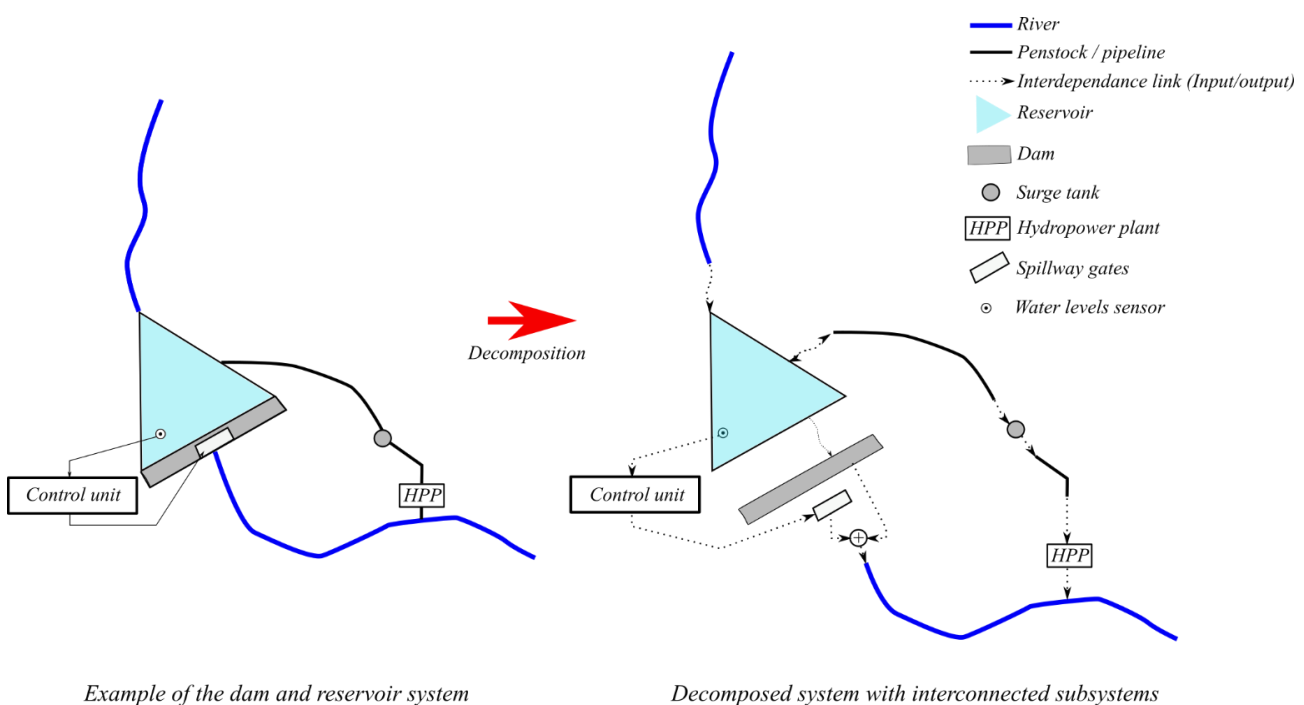
2.2. Formiranje modela dinamike sistema

Na početku potrebno je sprovođenje konceptualne dekompozicije sistema (Slika 2), gde se identifikuju ključni podsystemi i njihove međupovezanosti (koraci 1 i 2). Podsystemi se koriste za opisivanje određenog procesa ili transformacije unutrašnjih ili spoljnih ulaza u izlaze (u okviru akumulacije ovde). Podsystem može biti određena fizička komponenta ili objekat u okviru akumulacije, ali takođe može da se koristi da se opiše

određeni proces od interesa (npr evaporacija). Za svaki podsystem, potrebna je odgovarajuća matematička interpretacija dinamike tog podsystema (3). Kompleksnost matematičkog modela zavisi od traženog nivoa detaljnosti, ciljeva analize, vremenskog koraka i trajanja simulacije. Matematički model svakog podsystema se može opisati generičkom jednačinom:

$$sd_i^{out} = subsystemDynamics(sd_{ij}^{inp}, p_k) \quad (1)$$

Gde je sd_i^{out} izlaz iz modela $subsystemDynamics$ koji opisuje veze između izlaza sistema i određenog broja ulaza. Model $subsystemDynamics$ podsystema i transformiše ulaze sd_{ij}^{inp} od ostalih podsystema ($j = 1, \dots, N$; N – broj povezanih podsystema) u određeni izlaz sd_i^{out} . Način na koji podsystem i transformiše sd_{ij}^{inp} u sd_i^{out} je opisan strukturom modela (može se tumačiti kao proizvod binarnih i ostalih tipova funkcija) i parametrima modela p_k ($k = 1, \dots, M$; M – broj parametara).



Slika 2. Shematski prikaz primera konceptualne dekompozicije i definisanja međusobnih veza

Treba napomenuti da je ovde fokus na modeliranju parcijalne funkcionalnosti podsystema, karakteristične za vreme trajanja određenog kvara – prema čemu treba prilagoditi strategiju formiranja modela. Binarna stanja podsystema, ili komponentata, (radi ili ne radi) treba

upotpuniti spektrom radnih stanja „između“, gde podsystem i dalje vrši transformaciju ulaza, ali sa redukovanom funkcionalnošću (npr pogon segmentne ustave je u kvaru – ustava je zaglavljena u mestu ili ima redukovani hod).

Za analizu redukovane funkcionalnosti podsistema zaduženih za transport vode, kod tipičnog primera akumulacije, odgovarajuće jednačine treba koristiti i prilagoditi predloženom načinu primene. Primera radi, podsistemi sa funkcijom skladištenja (akumulacioni prostor, rezervoari itd) se opisuju jednačinom kontinuiteta (j-na 2). Podsistemi za transport vode (npr tunel pod pritiskom, cevovod, derivacioni tunel/kanal) se opisuju odgovarajućom formom energetske ili dinamičke jednačine (j-na 3). Ako postoje preliivi sa isticanje ispod ustave, odgovarajuća jednačina isticanja se koristi (j-na 4).

$$V_i(t + \Delta t) = V_i(t) + \Delta t \cdot (\sum Q_{in} - \sum Q_{out}) \quad (2)$$

$$Q_{ij} = \text{sgn}(\Pi_i - \Pi_j) \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \pi^2 \cdot D^5 \cdot |\Pi_i - \Pi_j|}{8 \cdot \lambda \cdot L}} \quad (3)$$

$$Q_s = C_Q \cdot e \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (Z_{res} - Z_s)} \quad (4)$$

Gde je $V_i(t)$ zapremine vode u i -tom rezervoaru u trenutku t , Q_{in} i Q_{out} ulazi i izlazi u rezervoar, Π pijezometarske kote, D prečnik cevovoda/tunela, λ Darsi-Vajzbahov koeficijent trenja, L dužina cevovoda/tunela, C_Q koeficijent isticanja, e visina otvora a B širina otvora.

Modeli DS omogućavaju modeliranje rada i kvarova sistema za monitoring, kakvi uobičajeno postoje na akumulacijama i hidroenergetskim objektima. Uobičajeno se određen broj hidrauličkih, energetskih i mehaničkih veličina prati u realnom vremenu, neophodnih za efikasno upravljanje sistemom. Neretko, u nepovoljnim operativnim uslovima, dođe do kvara na nekom od merila ili sredstvima komunikacije, utičajući kako na mernu nesigurnost tako i na postojanje samih podataka - što dalje može veoma nepovoljno uticati na performanse sistema. Primer modeliranja rada merila nivoa vode je dat u nastavku:

$$Z_{sensor,i} = Z_i + \Delta Z_{noise} + \Delta Z_{drift} \quad (5)$$

Gde je $Z_{sensor,i}$ modelirano čitanje nivoa vode, koje odstupa od stvarne vrednosti Z_i za šum ΔZ_{noise} (statistička merna nesigurnost) i klizanje nule ΔZ_{drift} (sistematska merna nesigurnost).

Ne treba zaboraviti da u modelu DS, bitan element predstavlja kontrolni podsistem, koji opisuje kontrolnu logiku kroz promene stanje aktuatora (kontrolnih promenljivih) u zavisnosti od vrednosti procesnih promenljivih. Primera radi, ako se razmatra kontrola segmentnih ustava na prelivu, nivo vode u rezervoaru Z može biti procesna promenljiva koja se koristi kao ulaz

u podsistem koji simulira kontrolu ustava. Visina otvora ustave e bi u tom slučaju bila kontrolna promenljiva. Kako će se e menjati u zavisnosti od Z , treba opisati unutar kontrolnog podsistema odgovarajućim funkcijama, gde će karakteristične vrednosti Z (npr pri kojim se ustava potpuno otvara) smatraju kontrolnim parametrima. Prema predloženom okviru, logika upravljanja i upravljačke odluke se inkorporiraju model u fazi formiranja modela (koraci 1-6) dok se kontrolne promenljive, koje se mogu podešavati i optimizovati, definišu u bloku generisanja ulaznih scenarija (koraci 7-9).

Modelu DS u dosadašnjem kontekstu razmatranja, može se pridodati i podsistem koji opisuju aktivnosti na održavanju i popravkama. Za različite podsisteme mogu se definisati različiti režimi i magnitude otkaza, kao i odgovarajuća vremena nabavki $t_{proc,i}$ i trajanja popravki $t_{r,i}$. Popravka podsistema, nakon parcijalnog ili potpunog otkaza, može početi tek nakon isteka vremena nabavke $t_{proc,i}$ koje obuhvata procenjeno vreme potrebno za identifikaciju kvara i nabavku rezervnih delova. U slučaju parcijalnog otkaza, podsistem do isteka vremena $t_{proc,i}$, funkcioniše sa redukovanim kapacitetom. Nakon isteka $t_{proc,i}$, počinje popravka koja može u nekim slučajevima zahtevati potpuno isključivanje podsistema. Ovde postoji prostor za integrisanje i procedura inspekcije elemenata i redovnog održavanja, ukoliko za tim postoji potrebe u analizi.

2.2.1. Identifikovanje indikatora otkaza

Nakon dekompozicije i integrisanje odgovarajućih matematičkih modela podsistema, sledeći korak podrazumeva identifikovanje indikatora otkaza u odgovarajućim podsistemima. Funkcija indikatora otkaza je da u modelu, kroz promenu svoje vrednosti, reflektuju parcijalni otkaz pripadajućeg podsistema. Indikator otkaza može biti fizički atribut podsistema (npr koeficijent trenja, prečnik) ili čak atribut posledice otkaza (npr klizanje nule senzora, magnituda procurivanja). Pri identifikovanju indikatora otkaza, treba imati u vidu da postoje različiti vidovi poremećaji i posledičnih otkaza, koji mogu uticati na rad sistema kroz fizička oštećenja komponenata, povećanje merne nesigurnosti, nestabilnosti mrežnog napona, smanjenu dostupnost mestu kvara ekipama za popravku, smanjena dostupnost rezervnih materijala za nabavku itd.

Primera radi, ukoliko pod uticajem poremećaja kao što je zemljotres, došlo do kvara na segmentnim ustavama

preliva, različiti otkazi se mogu predstaviti korišćenjem visine otvora e i širine otvora B kao indikatora otkaza. Smanjeni hod segmentne ustave se može predstaviti kroz smanjenje, ili ograničenje vrednosti e , dok bi recimo blokada jedne od ustava u potpuno zatvorenom položaju mogla da se predstavi kroz smanjenje vrednosti B . Za modeliranje fizičkog oštećenje u tunelu ili cevovodu pod pritiskom, kao indikator otkaza se mogu koristiti prečnik D ili koeficijent trenja λ . Sa druge strane, indikator otkaza u formi atributa posledice otkaza mogu biti šum ΔZ_{noise} ili klizanje nule ΔZ_{drift} kod merila nivoa (j-na 5). U poslednje vreme, nepovoljne globalne prilike primoravaju operatore i donosiocce odluka da razmatraju posledice ovakvih događaja na upravljanje sistemima. Tako u slučaju svetskih kriza kao što je prouzrokovana pandemijom Kovida-19, ekonomskim i konvencionalnim ratovima, dolazi do poremećaja tržišta rada, transporta i usluga koje utiču na rad sistema. U ovom slučaju za predstavljanje nepovoljnih uticaja, indikatori otkaza mogu biti vremena nabavke $t_{proc,i}$ i trajanje popravke $t_{r,i}$. Treba napomenuti da se postupku identifikacije indikatora otkaza, mora pristupiti sa posebnom pažnjom i u kooperaciji sa operatorima, upravnim organima i postojećem literaturom, odnosno javno dostupnim informacijama o sličnim primerima.

2.2.2. Definisane i implementacija funkcija otkaza u matematičke modele

U ovom koraku, potrebno je implementirati funkcije otkaza koje će u modelu predstaviti parcijalne otkaze

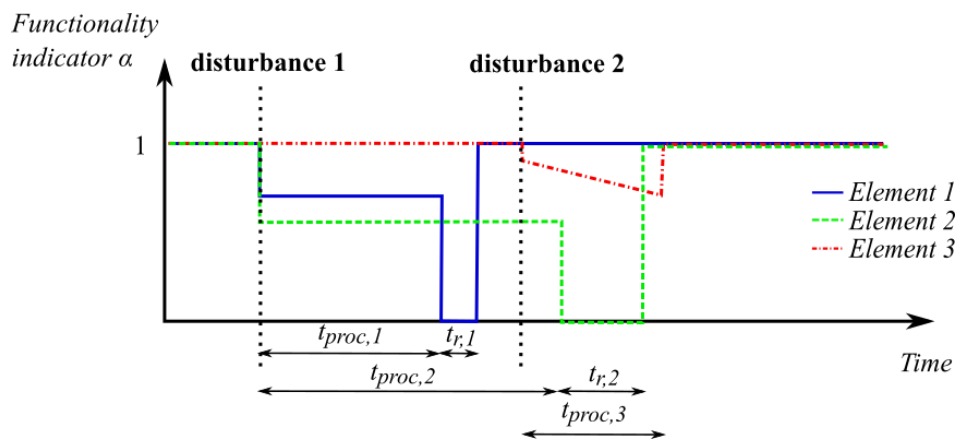
podсистema. Kako su mogući različiti tipovi otkaza, koji variraju u prirodi i posledici, pogodno je koristiti generički, odnosno opšti, pristup. Ovde se predlaže upotreba funkcija otkaza u formi $f(\alpha)$, koja množi indikator otkaza i na taj način menja njegovu vrednost u zavisnosti od stanja odgovarajućeg podсистema. Promenljiva u funkciji otkaza je generički indikator funkcionalnosti α čija se vrednost kreće u opsegu od 0-1:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{potpuno funkcionalan} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{parcijalno funkcionalan} \\ 0 & \text{van funkcije} \end{cases} \quad (6)$$

U opštem slučaju, implementacija funkcije otkaza se može predstaviti u modelu dinamike podсистema na sledeći način:

$$sd_i^{out} = subsystemDynamics(sd_{ij}^{inp}, f(\alpha_k) \cdot p_k) \quad (7)$$

Ukoliko je moguće, poželjno je definisati $f(\alpha_k)$ kao jednostavnu funkciju, čime se omogućava jednostavnost fizičke interpretacije i implementacije. U samim simulacijama, α_k se menja da reflektuje aktuelno stanje podсистeme, odnosno vrednost pada nakon poremećaja, tokom perioda otkaza ili aktivnosti kao što su održavanje i popravka. Slika 3 prikazuje hipotetički primer vremenskih serija indikatora funkcionalnosti, sa različitim odzivima podсистema nakon poremećaja, sa i bez vremenom popravke t_r (npr kod senzora nivoa popravka podrazumeva zamenu uređaja sa kalibrisanim uređajem zbog čega je $t_r = 0$):



Slika 3. Primeri vremenskih serija indikatora funkcionalnosti α

Slično kao i u prethodnom poglavlju, mogu se koristiti primeri kako bi se ilustrovala integracija funkcije otkaza $f(\alpha_k)$ u modele dinamike podsistema. Deterioracija (propadanje) materijala obloge tunela pod pritiskom ili cevovoda može dovesti do povećanja hrapavosti. Odgovarajuća funkcija otkaza bi u tom slučaju bila $1/\alpha_\lambda$; odnosno otkaz se modelira kao količnik neke vrednosti koeficijenta λ i indikatora funkcionalnosti α_λ (j-na 8). Otkaz segmentne ustave na prelivu se može modelirati množenjem širine otvora B sa α_B , ili e (e_{max}) sa α_e , gde je funkcija otkaza krajnje jednostavna $f(\alpha_k) = \alpha_k$ (j-na 9). Za modeliranje otkaza merila nivoa, indikator otkaza ΔZ_{noise} treba kombinovati sa funkcijom otkaza $f(\alpha_{noise}) = 1/\alpha_{noise}$, dok ΔZ_{drift} treba pomnožiti sa funkcijom $f(\alpha_{drift}) = 1 - \alpha_{drift}$ (j-na 10). Posebno interesantno za dugotrajne simulacije rada akumulacija u nepovoljnim operativnim uslovima su nefizički poremećaji koji utiču na održavanje i popravke podsistema. Rezultujući efekat se može predstaviti sa funkcijama otkaza $f(\alpha_{proc}) = 1/\alpha_{proc}$ i $f(\alpha_r) = 1/\alpha_r$, koje se koriste za povećanje trajanja nabavki i popravki:

$$Q_{ij} = \text{sgn}(\Pi_i - \Pi_j) \cdot \sqrt{\frac{g\pi^2 \cdot (\alpha_D \cdot D)^5 \cdot |\Pi_i - \Pi_j|}{8 \cdot (\lambda/\alpha_\lambda) \cdot L}} \quad (8)$$

$$Q_s = C_Q \cdot \alpha_e \cdot e \cdot \alpha_B \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (Z_{res} - Z_s)} \quad (9)$$

$$Z_{sensor,i} = Z_i + \frac{\Delta Z_{noise}}{\alpha_{noise}} + (1 - \alpha_{drift}) \Delta Z_{drift} \quad (10)$$

Lista primera bi mogla biti nepregledna, sa različitim primerima u zavisnosti od pristupa u modeliranju, nivoa detaljnosti, ciljeva analize itd. Svakako, ponovo je potrebno napomenuti da modelar i obrađivač koji koriste predloženi okvir, moraju definisati funkcije otkaza za određene podsisteme na osnovu prethodno sprovedene ekspertske analize, sa maksimalnim oprezom i redovno unapređivati model u zavisnosti od prikupljenih podataka o radu sistema.

2.3. Definisane ulaznih scenarija

Za simuliranje ponašanja akumulacija u širokom opsegu operativnih uslova, neophodno je generisati veliki broj realnih scenarija, odnosno ulaznih podataka. Tri ključna koraka su ovde identifikovana (i prikazana na Slici 1): Korak (7) treba da pokrije hidrološko modeliranje relevantnog sliva, uključujući očekivane i ekstremne događaje (u budućnosti), sa povećanim intezitetom i

učestalošću poplava i sušnih perioda. Korak (8) obuhvata definisanje spoljnih zahteva i kontrolnih parametara. Spoljni zahtevi su povezani za projektovanom funkcijom sistema i treba da sadrže informacije o ciljevima sistema po različitim vremenskim horizontima (npr proizvodnja energije, vodosnabdevanje, navodnjavanje, rekreacija itd). Parametri kontrole, kao deo kontrolne logike, su obično predmet optimizacije i finog podešavanja u cilju maksimizacije rezultata rada. Imajući navedeno u vidu, ovde su priključeni bloku ulaznih scenarija a ne formiranja modela.

Konačno, korak (9) je posvećen generisanju scenarija poremećaja. Više aspekta treba imati u vidu: prirodu poremećaja, magnitudu, vreme pojave, dužina trajanja, pogođeni podsistemi, verovatnoća pojave itd. Generisanje scenarija poremećaja je višedimenzionalan problem, gde se variranjem gore spomenutih atributa dobija skoro beskonačan prostor pretrage. [32] su predložili kombinatornu proceduru, potpomognutu Monte-Karlo parametrizacijom, za pokrivanje što većeg prostora. Problem se oslikava u činjenica da uprkos tome da se na ovaj način može proveriti ponašanje sistema u različitim operativnim uslovima, zanemaruje se verovatnoća otkaza kao i interakcija između različitih tipova otkaza. Može se zaključiti da bi povoljno bilo razviti realističniji generator poremećaja koji će nadoknaditi navedene nedostatke. Kako je ovo važna tema u sklopu celog okvira, koja zaslužuje posebnu pažnju, poseban rad je planiran u budućnosti kojim bi se pokušali pokriti nedostaci postojećih metoda i koja bi bila komplementarna sa predloženim okvirom.

2.4. Evaluacija performansi sistema

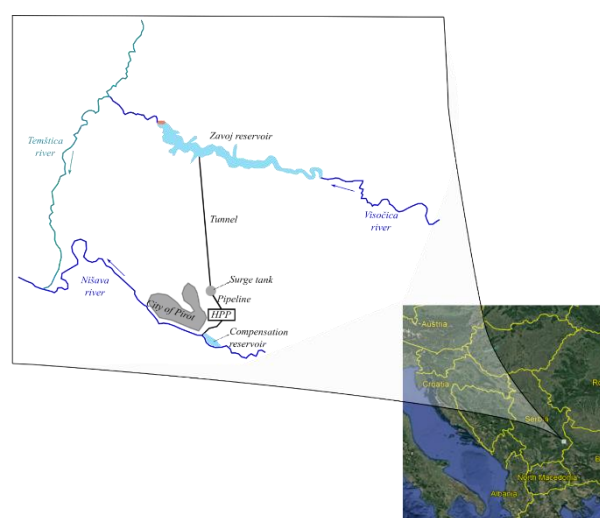
Poslednji korak podrazumeva procenu i evaluaciju performansi sistema na osnovu rezultata simulacija rada u različitim operativnim uslovima. U zavisnosti od ciljeva analize različite izvedene veličine ili parametri se mogu koristiti za kvantifikaciju performansi akumulacija i prpratnih objekata. Uobičajene su vrednosti mesečne i godišnje proizvodnje električne energije, količine izgubljene vode, isporučene vode za navodnjavanje, vodosnabdevanje itd. Takođe, hazard, osetljivost i rizik su veličine koje mogu biti indikativne u proceni. U poslednje vreme se koncept izdržljivosti sistema sve više koristi, kako statičke tako i dinamičke, kao mere za procenu stanja sistema da izdrži poremećaj i vrati se na ranije operativno stanje [33,34]. Za višenamenske akumulacije može se koristiti višeparameterska izdržljivost [30].

2.5. Primer: Akumulacija Zavoj i HE Pirot

Predloženi okvir za dinamičko modeliranje rada akumulacija u nepovoljnim operativnim uslovima je primenjen na primeru akumulacije Zavoj i pripadajuće HE Pirot, kako bi se demonstrirao postupak, kao i mogućnosti ovakvog pristupa. Akumulacija Zavoj se nalazi u jugoistočnoj Srbiji, na obroncima Stare Planine u blizini grada Pirot (Slika 4.). Akumulacija se koristi za proizvodnju električne energije (preko HE Pirot), zaštitu od poplava (Nišava i Visočica), kontrolu nanosa i oplemenjavanje malih voda. U sklopu složenog sistema se pored akumulacije Zavoj nalaze i brana sa prelivom i temeljnim ispustom, tunel pod pritiskom, vodostan, cevovod, HE Pirot, odvodna vada i kompenzacioni bazen sa kontrolisanim upuštanjem i ispuštanjem. HE Pirot se nalazi neposredno uz Pirot, i od mašinske zgrade se odvodna vada pruža do kompenzacionog bazena i reke Nišave. Više detalja o sistemu može se pronaći (www.eps.rs).

Model DS, srednjeg nivoa detaljnosti, je razvijen za gore-navedeni sistem, za razmatranje kapaciteta sistema da ispuni funkcije hidroenergetske proizvodnje i zaštite od poplava u odabranim nepovoljnim operativnim uslovima. Trajanje simulacija je 2 godine a vremenski korak simulacije je 1 sat. Primera radi, upotrebom vremenskog koraka od 1 sata, onemogućava se detaljna hidraulička analiza rada vodostana kao sastavnog elementa sistema – što je ovde smatrano prihvatljivim. Razmatrani nepovoljni operativni uslovi (neregularni scenariji) su hipotetičke (ali realne) kombinacije raznih poremećaja kao što su zemljotresi, šumski požari, puzajuće klizanje nule merila nivoa i globalna kriza

tržišta dobara. Poremećaji su nasumično raspoređeni tokom trajanja simulacija i pogađaju određen broj pod sistema, privremeno smanjujući njihovu funkcionalnost. Za potrebe poređenja, prvo je ispitan regularan scenario - ponašanje sistema bez poremećaja. Regularan i neregularni scenariji su prvo provereni na osnovnom modelu sistema. Zatim je provereno ponašanje sistema u varijanti gde su pravila upravljanja modifikovana, na način koji omogućava bolju vremensku raspodelu vodnih resursa. Takođe, proverena je nadograđena dispozicija sistema gde se dodaje pod sistem vodozahvata za vodosnabdevanje. Kompletan spisak ispitanih scenarija je dat u Tabeli 1.



Slika 4. Shematski prikaz akumulacije Zavoj i HE Pirot

Tabela 1. Kombinacije ispitanih scenarija i varijanti modela

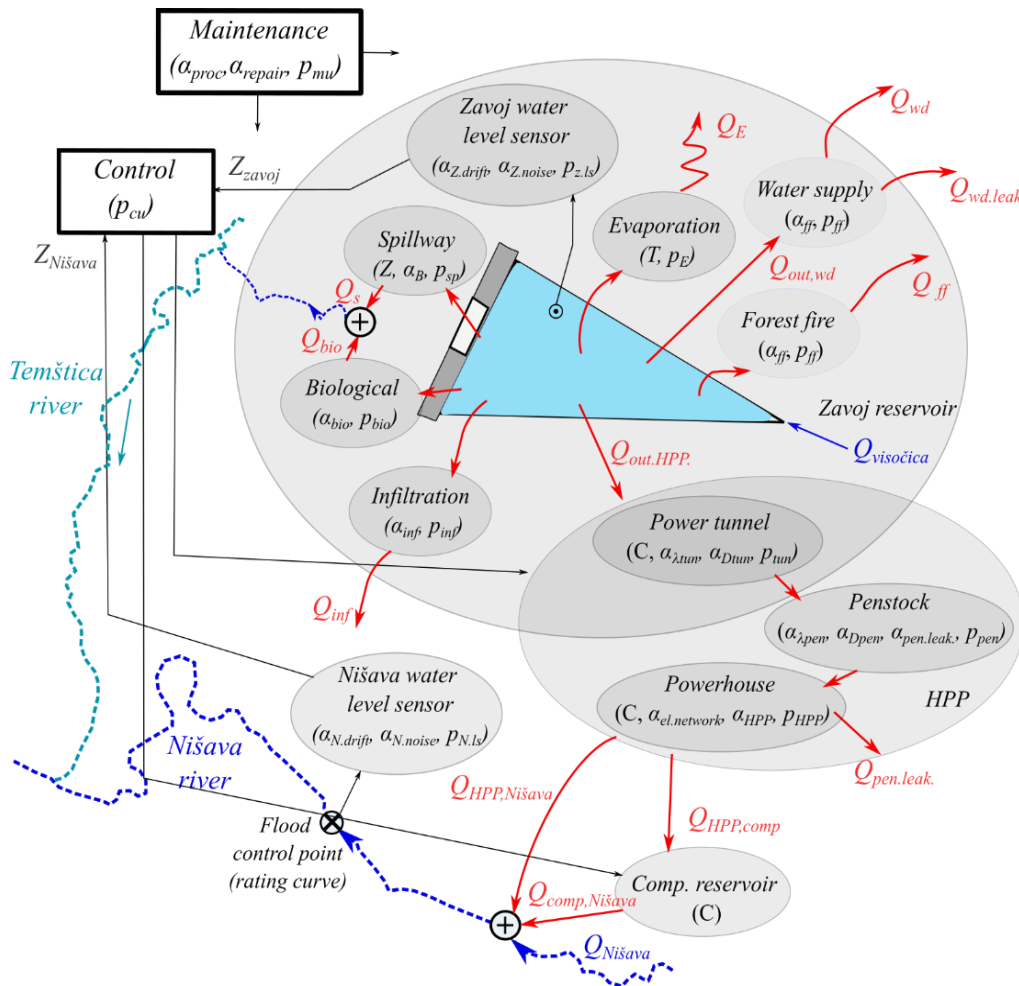
Varijante modela	Osnovni model (BM)	Model sa modifikovanim pravilima upravljanja (MMOR)	Model sa modifikovanim pravilima i strukturom (MMORS)
Scenariji			
Regularni scenario – bez poremećaja (RS)	BM-RS	MMOR-RS	MMORS-RS
Nepovoljni scenario – fizički poremećaji (AS1)	BM-AS1	MMOR-AS1	MMORS-AS1
Nepovoljni scenario – fizički + društveni poremećaji (AS2)	BM-AS2	MMOR-AS2	MMORS-AS2

Performanse sistema su evaluirane preko bazičnih izvedenih veličina: mesečna proizvodnja električne energije, količina izgubljene vode (gubitak vode usled procurivanja kroz telo brane, curenja na cevovodima i tunelu i usled ispravanja), deficit vode (početak – kraj simulacije) i mogućnost isporuke garantovanog ekološkog protoka i vode za vodosnabdevanje.

3. REZULTATI

Sledeći korake predloženog okvira, prvo je izvršena konceptualna dekompozicija složenog sistema koji čine akumulacija Zavoj i HE Pirot, odnosno definisani su ključni podsistemi i njihove međuzavisnosti (Slika 5.). Dekompozicija je izvršena na samo jedan od mogućih načina, pogodnim za analizu hidroenergetske proizvodnje i zaštite od poplava. Prvi koraci metodologije imaju svrhu formiranje osnove za razvoj

modela DS, gde bi se konceptualnom analizom identifikovali suštinski aspekti sistema, čime bi se olakšao kasniji rad u odgovarajućim programskim paketima za razvoj modela DS. U primeru prikazanom ovde, budući da je bilansiranje vode u akumulacije ključno za analizu hidroenergetske proizvodnje, akumulacija Zavoj kao podsistem je definisana na višem hijerarhijskom nivou i sastoji se od broja podsistema na nižem hijerarhijskom nivou koji opisuju procese od interesa i modeliraju ulazno/izlazne transformacije (merila nivoa u akumulaciji Zavoj, preliv, ispust, infiltracija kroz telo brane...). Neki od podsistema na nižem hijerarhijskom nivou su deljeni između dva podsistema na višem nivou (npr tunel pod pritiskom). Evidentno je da se svaki podsistem može dalje deliti na niže nivoe, dodavajući dodatne detalje i povećavajući kapacitet modela da reprodukuje prirodu.



Slika 5. Konceptualna dekompozicija akumulacije Zavoj i HE Pirot

U sklopu sledećeg koraka (korak 3), definišu se matematički modeli podsistema i sistema kao celine, koji bi trebalo adekvatno da predstavljaju njihov rad u toku simulacija. Tako su akumulacija Zavoj i kompenzacioni bazen predstavljeni jednačinom kontinuiteta (2), gubitak energije kroz tunel i cevovod Bernulijevom jednačinom (3), rad preliva jednačinom isticanja (4), dva merila nivoa vode na akumulaciji Zavoj i na HS Pirot, jednačinom (5) itd.

Upravljanje i operativni rad ovakvim sistemima je generalno izuzetno složen postupak, gde se na osnovu velikog broja prikupljenih podataka o stanju opreme i sistema kao i vrednostima referentnih hidrauličkih, mašinskih i drugih procesnih veličine. U ovom primeru, jednostavna upravljačka pravila su integrisana u kontrolni podsistem, koja opisuju kako i kada radi HE Pirot, kako se kontrolisano ispušta voda iz akumulacije (prelivanje i garantovani ekološki protok), kako se puni i prazni kompenzacioni bazen, odnosno kako se dalje voda ispušta u reku Nišavu. Primera radi, uslov rada HE Pirot je da izmereni nivo vode $Z_{sensor,Zavoj}$ u akumulaciji Zavoj bude između minimalnog $Z_{zavoj,min}$ i maksimalnog radnog nivoa $Z_{zavoj,max}$, kao i da nivo vode na HS Pirot bude ispod kote redovne odbrane od poplava. U osnovnom modelu, ako su navedeni uslovi ispunjeni HE Pirot će raditi traženi broj sati, dok se u nadograđenim varijantama modela koristi pravilo diskretnog skaliranja časova rada HE (eng. One-point hedging policy) prema nivou vode $Z_{sensor,Zavoj}$, koje omogućava bolju vremensku distribuciju akumuliranih vodnih resursa i samim tim efikasnije iskorišćenje prirodnog pada [35]. Navedeno pravilo koristi jedan kontrolni parametar S , čije definisanje, zajedno sa ostalim kontrolnim parametrima se obavlja u sklopu generisanja ulaznih scenarija.

Sam model DS je razvijen u namenskom programskom paketu Vensim [36]. Na slici 6 je dat prikaz razvijenog modela iz softvera, gde su elementi modela u najvećoj meri grupisani prema konceptualnom prikazu datom na slici 5. Model koristi vremenski korak od $\Delta t = 1$ h. U odgovarajuće elemente modela integrisani su matematički obrazci koji opisuju dinamiku podsistema i promenu stanja relevantnih veličina u svakom vremenskom. Primera radi, bilans vode u akumulaciji Zavoj, sa dotokom iz reke Visočice $Q_{visočica}^t$ i izlazima u formi protoka ka HE $Q_{out,HPP}^t$, garantovanog ekološkog protoka Q_{bio}^t , prelivanja Q_{of}^t , procurivanja

Q_{inf}^t , isparavanja Q_E^t , protivpožarnog opterećenja Q_{ff}^t i vodosnabdevanja Q_{wd}^t je predstavljen na sledeći način:

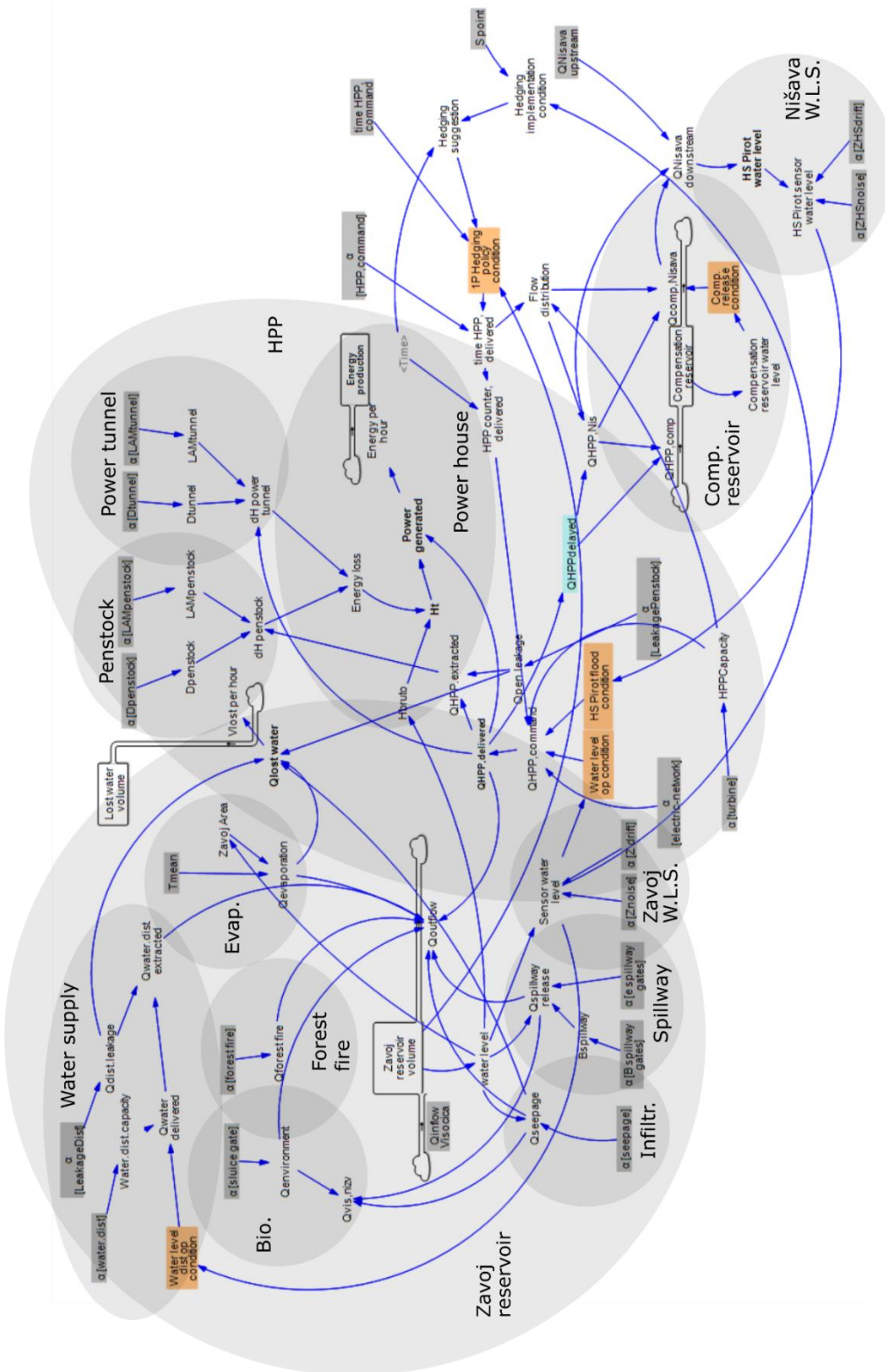
$$V_{zavoj}^{t+\Delta t} = V_{zavoj}^t + \Delta t \cdot (Q_{visočica}^t - Q_{out,HPP}^t - Q_{bio}^t - Q_{of}^t - Q_{inf}^t - Q_E^t - Q_{ff}^t - Q_{wd}^t) \quad (11)$$

Gde V_{zavoj}^t ($V_{zavoj}^{t+\Delta t}$) označava zapreminu vode u Zavoj u trenutku t ($t + \Delta t$). Q_{wd}^t postoji samo u MMOR i MMORS varijantama modela. Nivo vode u akumulaciji Z_{zavoj}^t se računa preko krive zapremine. Na nižem hijerarhijskom nivou, svaki od izlaza iz akumulacije je opisan posebnim modelom, u okviru kojeg su identifikovani indikatori otkaza (korak 5) i integrisane odgovarajuće funkcije otkaza (korak 6). Ukupno, 17 + 2 (u MMORS) funkcije otkaza, za većinu podsistema (neki podsistemi nemaju indikatore otkaza) su implementirane u model DS i prikazane u Tabeli 2.

Tako, protok ka HE je modeliran na sledeći način:

$$Q_{out,HPP}^t = \underbrace{HPP, OP^t \times \alpha_{HPP}^t \times Q_{HPP,capacity}}_{Q_{HPP}^t} + (1 - \alpha_{pen.leak}^t) Q_{pen.leak}^t \quad (12)$$

Gde je HPP, OP^t binarni operator koji opisuje signal (komandu) za rad HE, α_{HPP}^t indikator funkcionalnosti koji modelira otkaz rada turbina (npr jedna turbina je potpuno funkcionalna a druga potpuno ne funkcionalna $\alpha_{HPP}^t = 0.5$), $Q_{HPP,capacity}$ ukupan kapacitet HE (ne instalisani nego realni), $\alpha_{pen.leak}^t$ indikator funkcionalnosti procurivanja na cevovodu dok je $Q_{pen.leak}^t$ maksimalno procenjeno procurivanje (zapravo indikator otkaza procenjen na osnovu ekspertske analize materijala, uslova tečenja itd.). Slično se može napisati i za ostale komponente bilansa vode u akumulaciji Zavoj, ali će se radi čitljivosti u nastavku dati samo kratki osvrt bez detaljnijeg objašnjenja. Garantovani ekološki protok Q_{bio}^t se računa slično kao (12) ali bez mogućnosti procurivanja na ispustu, dok se prelivanje Q_{of}^t dobija kao (8). Procurivanje iz akumulacije Q_{inf}^t je opisano pojednostavljenim eksponencijalnim modelom, dok je za isparavanje Q_E^t korišćen obrazac [37] sa temperaturom vazduha kao promenljivom. Protivpožarno opterećenje Q_{ff}^t je aktivno samo u slučaju požara dok je vodosnabdevanje Q_{wd}^t u varijantama modela MMORS.



Slika 6. Primer modela dinamike sistema za akumulaciju Zavoj i HE Pirot

Tabela 2. Podsystemi modela dinamike sistema akumulacije Zavoj i HE Pirot sa indikatorima i funkcijama otkaza

Podsystem	Indikator otkaza	Funkcija otkaza	Nepovoljni scenario 1 (AS1)	Nepovoljni scenario 2 (AS2)
Garantovani ekološki protok (GEP)	Q_{bio}	$\alpha_{stuiice.gate}$	(E1)	(E1)
Procurivanje	$k, Q_{seepage}$	$1/\alpha_K$	(E1, E2)	(E1, E2)
Prelivanje	$B, Q_{spillway}$	α_B	(E1, E2)	(E1, E2)
Protivpožarno opterećenje	Q_{ff}	$1 - \alpha_{ff}$	(FF1, FF2)	(FF1, FF2)
Tunel pod pritiskom	D_{tun}, H_T	$\alpha_{D,tun}$		
	λ_{tun}, H_T	$1/\alpha_{\lambda,tun}$		
Cevovod	D_{pen}, H_T	$\alpha_{D,pen}$	(E1)	(E1)
	λ_{pen}, H_T	$1/\alpha_{\lambda,pen}$	(E1, E2)	(E1, E2)
	$Q_{pen.leak.}$	$1 - \alpha_{pen.leak.}$	(E1, E2)	(E1, E2)
Hidroelektrana	Q_{HPP}^t	α_{HPP}	(F)	(F)
	P_{HPP}^t	$\alpha_{el.net.}$	(E2)	(E2)
Merilo nivoa vode – Akumulacija Zavoj	$\Delta Z_{noise}, Z$	$1/\alpha_{Zavoj,noise}$		
	$\Delta Z_{drift}, Z$	$1 - \alpha_{Zavoj,drift}$	(WLSZD)	(WLSZD)
Merilo nivoa vode – HS Pirot	$\Delta Z_{HS,noise}, Z$	$1/\alpha_{HS,noise}$		
	$\Delta Z_{HS,drift}, Z$	$1 - \alpha_{HS,drift}$		
Održavanje	$t_{proc,ik}$, (i – subsystem; k – failure)	$1/\alpha_{proc}$		(GMC)
	$t_{r,ik}$, (i – subsystem; k – failure)	$1/\alpha_r$		(GMC)
Vodosnabdevanje	$Q_{wd.}$	$\alpha_{wd.gate.}$	*(E1, E2)	*(E1, E2)
	$Q_{wd.leak.}$	$1 - \alpha_{wd.leak.}$	*(E1, E2)	*(E1, E2)

Proračun proizvodnje električne energije se zasniva na proračunu neto pada turbine H_T^t , gde su energetske gubici u tunelu i cevovodu procenjeni pomoću Bernulijeve jednačine. Sama snaga turbine P_{HPP}^t se računa kao:

$$P_{HPP}^t = \alpha_{el.net.}^t \cdot \underbrace{\eta_T \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{HPP}^t \cdot H_T^t}_{P_{cap,HPP}^t} \quad (13)$$

Gde je $P_{cap,HPP}^t$ realna trenutna snaga HE, a $\alpha_{el.net.}^t$ je indikator funkcionalnosti koji se koristi za modeliranje ispadanja HE sa električne mreže. Sistemi za monitoring nivoa vode u akumulaciji Zavoj i na HS Pirot su modelirani kao što je prikazano jednačinom (10).

Podsystem za održavanje u sklopu razvijenog modela služi samo da kontroliše trajanja nabavki i popravki za

svaki podsystem, odnosno mogući otkaz. U jednom od ispitanih scenarija (AS2) javlja se kriza globalnog tržišta koja posledično dovodi do produženja vremena nabavki rezervnih mašinskih delova za popravku mašinske opreme, koja se modelira sa jednostavnom funkcijom otkaza $f(\alpha_{proc})$, kao što je i prikazano u Tabeli 3.

3.2. Generisanje ulaznih scenarija

Tri različita aspekta se trebaju pokriti pri formiranju ulaznih scenarija za analizu: (7) Hidrološko modeliranje sliva, (8) Definisane spoljne zahteve i kontrolnih parametara kao i (9) Generisanje scenarija poremećaja. Fokalna tačka rada je na dinamičkom modeliranju otkaza pa su tako u svima simulacijama korišćeni isti hidrološki nizovi, sintetisani na osnovu izmerenih

nizova sa nekoliko hidroloških i meteoroloških stanica (Ignjatović i sar., 2021). Konkretno korišćeni su nizovi doticaja na reci Visočici $Q_{visočica}^t$ (u akumulaciju Zavoj), protoka na Nišavi kod HS Pirot $Q_{Nišava}^t$ i temperature vazduha kod akumulacije Zavoj za potrebe modeliranja isparavanja.

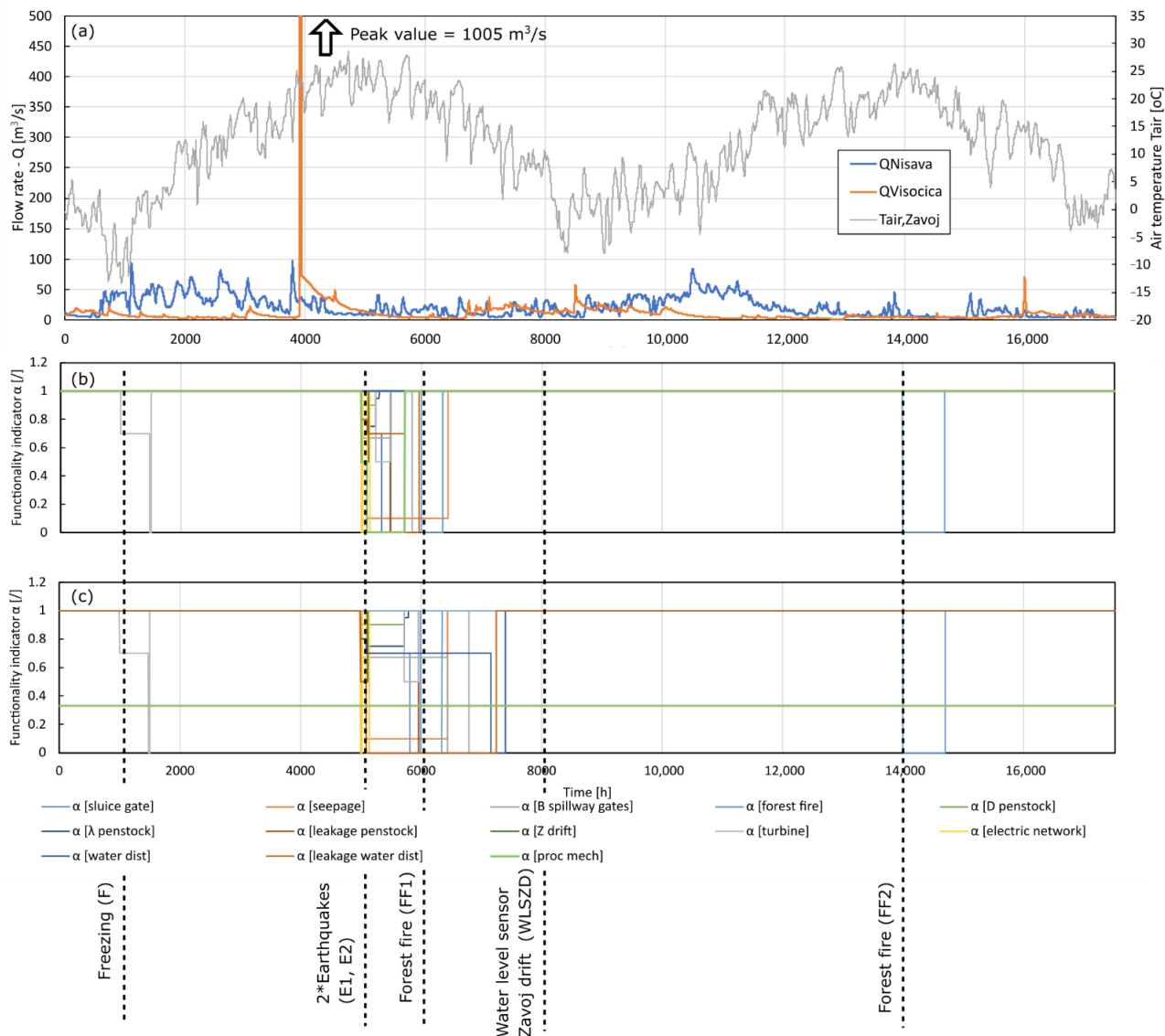
Spoljni zahtevi za proizvodnjom električne energije su integrisani u model kroz kontrolni podsistem. Pretpostavljeno je da zahtevi nadležnog elektroenergetskog operatera se dostavljaju na dnevnom nivou u formi broja radnih sati HE Pirot, sa raspoloživom snagom. Zahtevi mogu a i ne moraju biti ispunjeni, u zavisnosti od izmerenih nivoa na akumulaciji Zavoj Z_{zavoj} i na HS Pirot $Z_{Nišava}$. Kontrolni parametri, konkretno karakteristični nivoi $Z_{zavoj,min}$, $Z_{zavoj,max}$, $Z_{Nišava,f.d.}$, kao i parametar S (korišćen u formi modela sa unapređenom logikom upravljanja – MMOR i MMORS) su definisani u sklopu koraka (8), gde je definisano tako da se maksimizuje proizvodnja energije u razmatranom periodu.

Konačno, generisanjem poremećaja koji se javljaju tokom simulacije, kao što su zemljotresi, požari, otkaza opreme usled starosti se kompletiraju ulazni scenariji. Predloženi okvir pruža mogućnost da se svi poremećaji kao i njihove posledice na rad podsistema definišu vremenskim serijama indikatora funkcionalnosti α za odgovarajuće funkcije i indikatore otkaza. Jasno je da tajming, trajanje i magnituda poremećaja igraju presudnu ulogu, pogotovo u kontekstu podudaranja sa ekstremnim hidrološkim događajima. Kao što navedeno prethodno, ovde su u svim simulacijama korišćeni isti hidrološki nizovi u kojima se nalazi izrazito ekstremni poplavni talas tokom proleća prve godine. U osnovnom, regularnom scenariju (RS) sve serije indikatora funkcionalnosti α su konstantne sa vrednostima jednake 1, odnosno svi podsistemi su tokom simulacija u punoj funkcionalnosti. Međutim, u scenariju AS1, nasumično odabrani poremećaji su uvedeni: dva zemljotresa srednjih magnituda, dva šumska požara, klizanje nule na merilu nivoa na akumulaciji Zavoj i zamrzavanje vode na ulazu u tunel pod pritiskom za HE. Zemljotresi su doveli do hipotetičkog oštećenja zatvarača temeljnog ispusta, povećanog procurivanja, smanjenog kapaciteta preliva [21], oštećenja na cevovodu i u MMORS varijanti modela, do oštećenja vodozahvata za vodosnabdevanje. Šumski požari su aktivirali protivpožarno opterećenje, dok je zamrzavanje dovelo

do smanjenja kapaciteta vodozahvata za HE. Dalje u scenariju AS2, pored navedenih poremećaja, ubačena je i globalna kriza tržišta koja pogađa podsistem za održavanje. Slika 7 prikazuje sve definisane vremenske serije ulaznih scenarija. Iako su ovde, odabrani poremećaji iskorišćeni za demonstriranje metodologije, treba napomenuti da je pitanje realističnog generisanja poremećaja veoma važno za adekvatnu analizu rada ovakvih kompleksnih sistema. Zbog toga će u budućem istraživanju, fokus upravo biti na definisanju jednog takvog probablističkog generatora.

3.3. Performanse sistema u razmatranim nepovoljnim operativnim uslovima

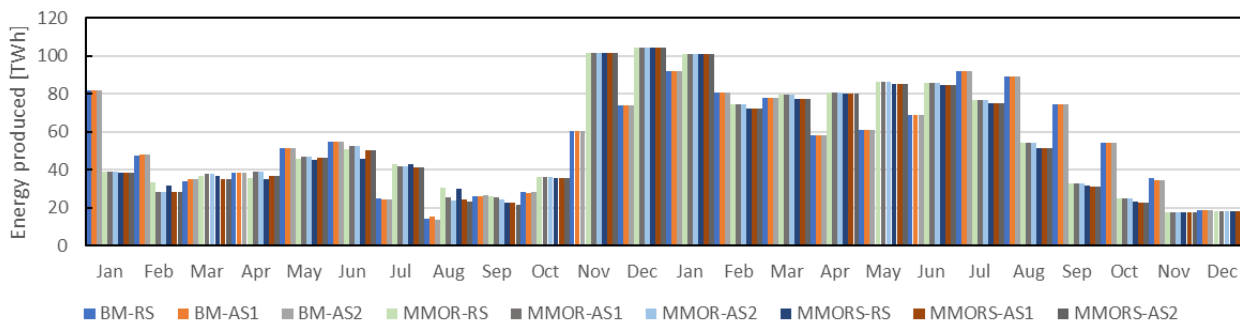
Korišćenjem rezultata simulacija za sve ispitane varijante modela DS akumulacije Zavoj i HE Pirot, za analizirane scenarije, može se izvršiti osnovno poređenje performansi sistema. U varijantama modela MMOR i MMORS korišćena je pravilo diskretnog skaliranja rada HE Pirot, što je dovelo do bolje raspodele vodnih resursa kao što je i očekivano. Ukupna proizvodnja električne energije je približno ista kao i količina ukupne izgubljene vode (devijacije do 0,5%), dok je deficit zapremine vode na početku i kraju simulacije značajno smanjen za 45%. Mesečna proizvodnja električna energije je prikazana na Slici 8, dok su mesečne količine izgubljene vode date na Slici 9. Ukupna proizvodnja energije se ukupno smanjila za do 0,7% uvođenjem dodatnih poremećaja u AS1 i AS2, uglavnom zbog porasta gubitaka vode. Iako je u mesecima gde su se javljali poremećaji (odnosno dok je trajala nabavka i popravka odgovarajućih podsistema) smanjena proizvodnja električne energije, usled velike zapremine akumulacije Zavoj, proizvodnja je nadoknađena u mesecima nakon popravke, bez značajnog gubitka akumulirane vode. Međutim, u AS1 i AS2 došlo je do značajnog porasta količine izgubljene vode do 57,8% u odnosu na regularni scenario (RS). U apsolutnim brojevima, ovaj porast količine izgubljene vode iznosi do $8,39 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ukoliko bi se pretpostavila medijana pada turbine H_T (iz sprovedenih simulacija), i prosečna cena po kilovat-času u EU od 0,219 €/kWh, ovaj gubitak bi se monetizovao na ~ 1000000 €! Upravo na ovaj način se može ukazati na neophodnost detaljnijih analiza dinamike kompleksnih sistema, odnosno na potrebu modeliranja otkaznih stanja odgovarajućih podsistema.



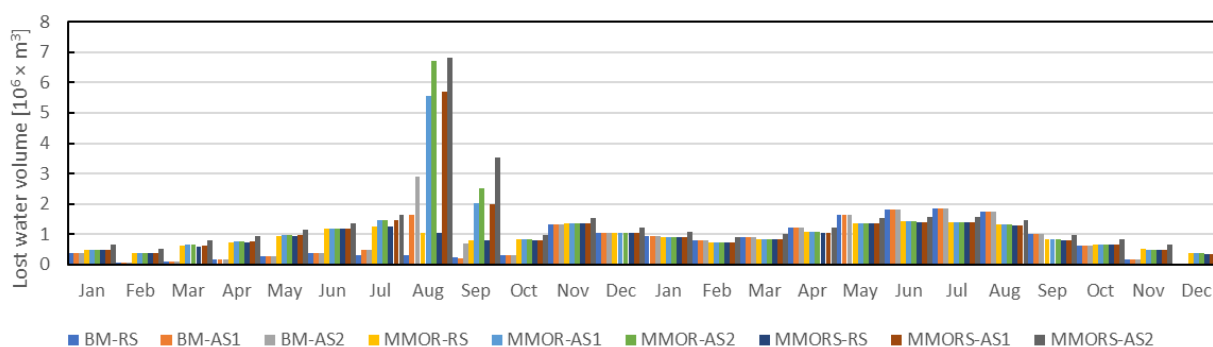
Slika 7. Ulazne vremenske serije: a) Protoci na Visočici i Nišavi sa temperaturama vazduha na Zavojju; b) Serije indikatora funkcionalnosti za AS1 scenario; c) Serije indikatora funkcionalnosti za AS2 scenario

Pored uticaja na rad HE, hipotetički poremećaji su posredno uticali i na ostale funkcionalnosti sistema. Iako je aspekt zaštite od poplava sistem uspešno sproveo u svim simulacijama (nije došlo do porasta nivoa iznad nivoa redovne odbrane od poplava na HS Piro), ispuštanje garantovanog ekološkog protoka i vodosnabdevanje (u MMORS varijanti) je bilo

ugroženo. Tako su deficiti u isporukama GEP-a i vodosnabdevanja u AS1 dostigli vrednosti od 320100 m^3 odnosno 482400 m^3 , respektivno. Sa dodatkom krize globalnog tržišta, ovi deficiti su drastično porasli na 527500 m^3 odnosno 949000 m^3 za GEP i vodosnabdevanje, respektivno.



Slika 8. Mesečna proizvodnja električne energije za svaku varijantu modela i ispitani scenario



Slika 9. Mesečna količine izgubljene vode za svaku varijantu modela i ispitani scenario

4. DISKUSIJA

Predloženi okvir za dinamičko modeliranje akumulacija u nepovoljnim operativnim uslovima je predstavljen u okviru ovog rada i primenjen u hipotetičkoj analizi primera sistema akumulacije Zavoj i HE Pirot. Okvir definiše 11 koraka, gde koraci 1-6 pokrivaju formiranje modela dinamike sistema, 7-9 definisanje ulaznih scenarija, a 10 i 11, simulacije i evaluaciju performansi sistema respektivno. U okviru prvog bloka (koraci 1-6) sprovodi se konceptualna dekompozicija sistema na podsisteme koji predstavljaju neki proces odnosno transformaciju ulaza u izlaze sa nivoom detaljnosti prilagođenim ciljevima analize. Moguća je primena hijerarhijske dekompozicije, gde se podsistemi mogu dalje dekomponovati na nižim hijerarhijskim nivoima, kako bi se modelom obuhvatile sve relevantne karakteristike. Ovde je težište stavljeno na predloženi pristup za identifikaciju indikatora otkaza, odnosno definiciju i implementaciju funkcija otkaza u model dinamike sistema. Kroz indikatore otkaza se u samom modelu menjaju stanja podsistema i modeliraju razni otkazi komponenata, koji se mogu javiti u redovnom životnom veku hidrotehničkih sistema, pri radu u

nepovoljnim operativnim uslovima. Primenom funkcija otkaza, koje koriste generičke indikatore funkcionalnosti kao promenljive, sa rasponom vrednosti od 0 do 1, menjaju se vrednosti indikatora otkaza i time simuliraju parcijalni i potpuni otkazi podsistema. Vreme trajanja smanjene funkcionalnosti (otkaza) podsistema je jednako zbiru trajanja nabavke i popravke. Kroz vreme trajanje nabavke obuhvaćena su i vremena potrebna za detekciju i identifikaciju otkaza, kao i samu nabavku potrebnih resursa za popravku. Vreme trajanje popravke zavisi od vrste otkaza i podsistema. Blok generisanja ulaznih scenarija obuhvata hidrološko modeliranje, definisanje spoljnih zahteva i kontrolnih parametara kao i definisanje scenarija poremećaja. Ovaj blok je razmatran u kraćoj formi, gde je apostrofirana kompleksnost ovog problema kao i potreba za realnim, probabilističkim, generatorom scenarija kojim bi mogao da se pokrije najširi opseg mogućih nepovoljnih scenarija. Konačno, poslednji koraci okvira predviđaju simulacije rada sistema i evaluaciju performansi sistema na osnovu rezultata modela koja bi služila kao podrška donošenju kako kapitalnih investicionih tako i redovnih operativnih odluka.

Primer akumulacije Zavoj sa HE Pirot je iskorišćen za ilustraciju primene predloženog okvira u jednostavnoj hipotetičkoj analizi kapaciteta sistema za rad u odabranim nepovoljnim uslovima. Kroz dva nepovoljna scenarija (AS1 i AS2) sistem je izložen pored ekstremnog hidrološkog događaja i zemljotresima, šumskim požarima, otkazom opreme za merenje nivoa, čak i globalnom krizom tržišta. Simulacijom pada funkcionalnosti određenih komponenata sistema, usled fizičkog oštećenja, kao i nepovoljnih uslova na tržištu sa aspekta nabavke rezervnih delova, uticano je na kapacitet sistema da obavi svoje funkcije. Na konkretnom primeru, u poređenju sa baznim scenarijom bez fizičkih i društvenih poremećaja, uočen je značajan pad performansi sistema. Kako se ovakvi realni efekti postojećih hazarda ili poremećaja, često adekvatno ne kvantifikuju, može se zaključiti da primena ovakvih simulacija može pomoći nadležnim upravljačkim strukturama.

Međutim, neophodno je jasno definisati i nasledna ograničenja primene ekspertskog znanja u generisanju mogućih scenarija poremećaja (npr scenariji „Crnog labuda“) kao i u određivanju vrednosti indikatora otkaza za predstavljanje parcijalnih otkaza podsistema. Svakako da su dodatna istraživanja neophodna da bi se nadoknadila ova ograničenja. Predloženi okvir može da se koristi kao preporuka za definisanje modela dinamike sistema i generisanja ulaznih scenarija, međutim on ne pruža rešenja modelaru za sve praktične dileme. Za definisanje adekvatnog i pouzdanog modela dinamike sistema, neophodno je konsultovati se sa iskusnim operaterima na samom sistemu, upravnim i nadležnim strukturama, kao i ekspertima iz relevantnih inženjerskih, ekoloških i socioloških nauka. Sve nesigurnosti koje proističu iz korišćenja tzv. ekspertskog znanja bi trebale biti „uračunate“ prilikom korišćenja i interpretaciji rezultata modela.

5. ZAKLJUČCI

Korišćenjem pouzdanog modela dinamike sistema, moguće je sprovesti širok spektar analiza performansi vodoprivrednih sistema. Akumulacije i pripadajuće HE su primeri složenih sistema, koji kontrolišu brojne kritične procese, gde razne stvari mogu krenuti „po zlu“ dovodeći do stanja parcijalnih i potpunih otkaza komponenata i smanjene funkcionalnosti. Na osnovu preliminarnih rezultata dobijenih na osnovu hipotetičke analize akumulacije Zavoj i HE Pirot, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Kompleksni vodoprivredni sistemi se mogu dekomponovati na podsisteme, gde svaki podsystem opisuje određeni proces ili transformaciju ulaza u izlaze i ima interakciju sa ostalim podsistemima. U zavisnosti od ciljeva analize, različite forme hijerarhijske dekompozicije se mogu koristiti sa različitim nivoima detaljnosti.
- Identifikacijom indikatora otkaza, definisanjem i implementacijom funkcija otkaza sa generičkim indikatorom funkcionalnosti kao promenljivom, mogu se modelirati različiti otkazi i njihova dinamika (fizička oštećenja komponenata, otkazi merne opreme, krize tržišta itd.).
- Fleksibilnost predloženog pristupa otvara mogućnosti za dalji razvoj funkcija otkaza, odnosno primenu u analizama performansi vodoprivrednih sistema, kao i u okviru koncepta digitalnih blizanaca [38].
- Predloženi okvir se može koristiti kao vodič za formiranje modela dinamike vodoprivrednih sistema, generisanje ulaznih scenarija, i manipulacija nad modelom. Međutim, on ne pruža rešenje na pitanje kako se rešavaju praktični izazovi u modeliranju.
- Primena ekspertskog znanja u formiranju modela, i dalje ostaje mana predloženog pristupa. Modelar bi morao da ima na umu nesigurnosti koje proističu iz ove činjenice.
- U cilju kompletiranja okvira predloženog u ovom radu, potrebno je razviti i realniji, probabilistički generator poremećaja kojim bi se omogućilo ispitivanje najšireg spektra mogućih nepovoljnih operativnih uslova u kojima se mogu naći vodoprivredni sistemi.

LITERATURA

- [1] DeNeale, S.T.; Baecher, G.B.; Stewart, K.M.; Smith, E.D.; Watson, D.B. Current state-of-practice in dam safety risk assessment. (No. ORNL/TM-2019/1069). Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). 2019
- [2] Đorđević, B.; Dašić, T.; Plavšić, J. Uticaj klimatskih promena na vodoprivredu Srbije i mere koje treba preduzimati u cilju zaštite od negativnih uticaja. *Vodoprivreda* 2020, 52(303–305), 39–68

- [3] Winz, I.; Brierley, G.; Trowsdale, S. The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management. *Water Resour. Manag.* 2008, 23, 1301–1323.
- [4] King, L.M.; Schardong, A.; Simonovic, S.P. A Combinatorial Procedure to Determine the Full Range of Potential Operating Scenarios for a Dam System. *Water Resour. Manag.* 2019, 33, 1451–1466.
- [5] CDA (Canadian Dam Association). Available online: <https://cda.ca/dams-in-canada/dams-in-canada> (assessed on 26 March 2022).
- [6] FEMA, M. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. 2015, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [7] Chernet, H.H.; Alfredsen, K.; Midttømme, G.H. Safety of Hydropower Dams in a Changing Climate. *J. Hydrol. Eng.* 2014, 19, 569–582.
- [8] Li, W.; Li, Z.; Ge, W.; Wu, S. Risk Evaluation Model of Life Loss Caused by Dam-break Flood and Its Application. *Water* 2019, 11, 1359.
- [9] Badr, A.; Yosri, A.; Hassini, S.; El-Dakhkhni, W. Coupled Continuous-Time Markov Chain–Bayesian Network Model for Dam Failure Risk Prediction. *J. Infrastruct. Syst.* 2021, 27, 04021041.
- [10] Srivastava, A. A Computational Framework for Dam Safety Risk Assessment with Uncertainty Analysis. Ph.D. Dissertation, Utah State University, Logan, UT, USA, 2013.
- [11] Nápoles, O.M.; Delgado-Hernández, D.J.; De-León-Escobedo, D.; Arteaga-Arcos, J.C. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: Methodology and quantification. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2013, 10, 589–603.
- [12] Delgado-Hernández, D.-J.; Nápoles, O.M.; De-León-Escobedo, D.; Arteaga-Arcos, J.C. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: An application. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2012, 10, 225–238.
- [13] Hartford, D.N.; Baecher, G.B. Risk and Uncertainty in Dam Safety; Thomas Telford Ltd: London, UK, 2004.
- [14] Jiang, J.P.; Yang, Z.H. Laws of dam failures of small-sized reservoirs and countermeasures. *Chin. J. Geotech. Eng.* 2008, 30, 1626–1631.
- [15] Zhang, L.; Xu, Y.; Jia, J. Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk: Assess. Manag. Risk Eng. Syst. Geohazards* 2009, 3, 184–189.
- [16] Cleary, P.; Prakash, M.; Mead, S.; Lemiale, V.; Robinson, G.K.; Ye, F.; Ouyang, S.; Tang, X. A scenario-based risk framework for determining consequences of different failure modes of earth dams. *Nat. Hazards* 2014, 75, 1489–1530.
- [17] Andreini, M.; Gardoni, P.; Pagliara, S.; Sassu, M. Probabilistic Models for Erosion Parameters and Reliability Analysis of Earth Dams and Levees. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A: Civ. Eng.* 2016, 2, 04016006.
- [18] Ribas, J.R.; Severo, J.C.R.; Guimarães, L.F.; Perpetuo, K.P.C. A fuzzy FMEA assessment of hydroelectric earth dam failure modes: A case study in Central Brazil. *Energy Rep.* 2021, 7, 4412–4424.
- [19] King, L.M.; Simonovic, S.P.; Hartford, D.N.D. Using system dynamics simulation for assessment of hydropower system safety. *Water Resour. Res.* 2017, 53, 7148–7174.
- [20] King, L.M. Using a Systems Approach to Analyze the Operational Safety of Dams. Ph.D. Dissertation, University of Western Ontario, London, ON, Canada 2020.
- [21] Rakić, D.; Stojković, M.; Ivetić, D.; Živković, M.; Milivojević, N. Failure Assessment of Embankment Dam Elements: Case Study of the Pirot Reservoir System. *Appl. Sci.* 2022, 12, 558.
- [22] Stowasser, E.L. Dam failure system modeling in the muskingum watershed—Beach City Dam. In Proceedings of the 31st Annual USSD Conference, San Diego, CA, USA, 11–15 April 2011.
- [23] Haimes, Y.Y.; Petrakian, R.; Karlsson, P.O.; Mitsiopoulos, J. Multiobjective Risk Partitioning: An Application to Dam Safety Risk Analysis; Environmental systems management, Inc.: Charlottesville, VA, USA, 1988.
- [24] Baecher, G.; Ascila, R.; Hartford, D.N.D. Hydropower and dam safety. In STAMP/*STPA Workshop; Cambridge, MA, USA, 2013.
- [25] Regan, P.J.. Dams as systems—a holistic approach to dam safety. In Proceedings of the 30th Annual USSD Conference, Sacramento, CA, USA, April 12–16 2010; pp. 554–563.

- [26] Leveson, N.G. *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*; The MIT Press: Cambridge, MA, USA 2011; p. 560.
- [27] Thomas IV, J.P. *Extending and Automating a Systems—Theoretic Hazard Analysis for Requirements Generation and Analysis*. Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA 2013.
- [28] Komey, A.; Deng, Q.; Baecher, G.B.; Zielinski, P.A.; Atkinson, T. Systems reliability of flow control in dam safety. In *Proceedings of the 12th International Conference on Application of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, Vancouver, BC, Canada, 12–15 July 2015*; pp. 1–8.
- [29] Komey, A. *A Systems Reliability Approach to Flow Control in Dam Safety Risk Analysis*. Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, MD, USA, 2014.
- [30] Ignjatović, L.; Stojković, M.; Ivetić, D.; Milašinović, M.; Milivojević, N. Quantifying Multi-Parameter Dynamic Resilience for Complex Reservoir Systems Using Failure Simulations: Case Study of the Pirot Reservoir System. *Water* 2021, 13, 3157.
- [31] Ivetić, D.; Milašinović, M.; Stojković, M.; Šotić, A.; Charbonnier, N.; Milivojević, N. Framework for Dynamic Modelling of the Dam and Reservoir System Reduced Functionality in Adverse Operating Conditions. *Water* 2022, 14(10), 1549.
- [32] King, L.M.; Schar dong, A.; Simonovic, S.P. A Combinatorial Procedure to Determine the Full Range of Potential Operating Scenarios for a Dam System. *Water Resour. Manag.* 2019, 33, 1451–1466.
- [33] Hashimoto, T.; Stedinger, J.R.; Loucks, D.P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.* 1982, 18, 14–20.
- [34] Behboudian, M.; Kerachian, R.; Pourmoghim, P. Evaluating the long-term resilience of water resources systems: Application of a generalized grade-based combination approach. *Sci. Total Environ.* 2021, 786, 147447.
- [35] Tayebiyani, A.; Mohammad, T.A.; Al-Ansari, N.; Malakootian, M. Comparison of Optimal Hedging Policies for Hydropower Reservoir System Operation. *Water* 2019, 11, 121.
- [36] Vensim-Ventana Systems Inc. Available online: <https://vensim.com/docs/> (assessed on 26 March 2022).
- [37] Linacre, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agric. Meteorol.* 1977, 18, 409–424.
- [38] Savić, D. (2022) “Digital Water Developments and Lessons Learned from Automation in the Car and Aircraft Industries,” *Engineering*, 9, pp. 35–41. doi: 10.1016/j.eng.2021.05.013.

FRAMEWORK FOR THE DYNAMIC MODELLING OF THE RESERVOIR OPERATION IN ADVERSE OPERATING CONDITIONS

by

Damjan IVETIĆ, Miloš MILAŠINOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Milan STOJKOVIĆ
The Institute for Artificial Intelligence Research and Development of Serbia, Novi Sad

Aleksandar ŠOTIĆ
College of Applied Studies of Civil Engineering and Geodesy, Belgrade
Summary

Complex water resources systems as reservoirs are critical control infrastructure, needed for reliable water resources management. In the last years, reservoirs are increasingly affected by adverse natural and anthropogenic disturbances (aged and outdated infrastructure, natural disasters, global crisis etc.). This way, additional pressure is imposed on the reservoir operators, forcing them to navigate the system outside the design envelope. Use of the simulation tools for various “what-if” analysis is one of the possible approaches used to support the operator decision making. Particularly, the system dynamics models have shown the capacity to deal with the inherent complexity of the reservoirs. In this paper, an eleven (11) step framework is suggested for the dynamic modelling of the reservoir operation in adverse operating conditions. Framework considers blocks as system dynamic model design, generation of the input scenarios, system operation simulation and performance evaluation. Focus is on the steps covering the conceptual decomposition of the reservoirs, identification of the failure indicators, definition and implementation of the failure functions in

the system dynamics model and dynamic failure modelling. Through these steps, a novel methodology for the dynamic failure modelling (partial and full) of the reservoirs as whole and appropriate subsystems. For each subsystem which can experience failure, a failure indicator is defined. Failure functions, utilizing generic functionality indicators spanning in value 0 – 1, modify the values of the failure indicators representing the effects of the component/subsystem failures on the reservoir operation. Case study of the Zavoj reservoir and HPP Pirot is used to illustrate the capacity of the proposed methodology. Hypothetical scenarios of the physical damage on the various dam objects, increase of the measurement uncertainty, the lack of the spare parts for the repairs during the global crisis are analyzed. Results indicated the need for these types of analysis to help mitigate the adverse operating condition effects on the reservoir operation.

Key words: Reservoirs, Dam safety, System dynamics, Hydropower, Failure modelling