

VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA INDIKATORA DUGOROČNE PERFORMANSE VODOPRIVREDNIH SISTEMA

Bojan SRĐEVIĆ, Zorica SRĐEVIĆ

Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za uređenje voda, Novi Sad

REZIME

U radu su definisani neki od važnih indikatora performanse vodoprivrednih sistema u višegodišnjim periodima: (a) dva statistička indikatora (indeks manjka i disperzija nivoa akumulacija) i (b) tri indikatora vezana za kritične uslove rada sistema (pouzdanost, obnovljivost i ranjivost). Zatim je predložen način njihovog korišćenja kao atributa (kriterijuma) za evaluaciju i rangiranje mogućih scenarija upravljanja. Podrazumeva se simuliranje sistema na kompjuterskom modelu sa stohastičkim sekvencama dotoka, preferentnom shemom zahteva za vodom i unapred zadatim pravilima upravljanja akumulacijama. Pristup je opšti, a za ilustraciju je izabran jednostavan numerički primer za sistem koji čine akumulacija i vodozahvat. Pokazano je kako se višekriterijumskom analizom vrednuju i rangiraju scenariji pri različitim ponderima atributa. Kombinovanjem četiri različita višekriterijumska metoda (koji, poznato je, često mogu davati različite rezultate!), pokazano je kako se najbolji scenario može identifikovati na objektivni način primenom metoda Borda iz oblasti društvenih metoda odlučivanja. Na kraju je ukazano na neka od mogućih proširenja i unapređenja predložene metodologije.

Ključne reči: vodoprivredni sistem, indikator performanse, scenario upravljanja, višekriterijumska analiza

UVOD

Indikatori performanse vodoprivrednih sistema su brojni i uključuju, npr., pouzdanost (rizik), obnovljivost (rezilijentnost), ranjivost (vulnerabilnost) i robustnost. Postoje i tradicionalnije mere kvaliteta performanse kao što su garantovane vode, indeksi manjka, stepen obezbeđenosti snabdevanja, razni statistički pokazatelji (srednje vrednosti, standardne

devijacije, asimetričnosti, unakrsne korelacije, regresije itd.).

Performansa sistema može se analizirati na različitim nivoima, a tipični su operativni (realno vreme) i strateški (planiranje). U drugom slučaju se radi o dugim vremenskim periodima od 20, 30 i više godina [1,5,6,13].

Takođe, nivo analize performanse može biti izolovana lokacija (npr. akumulacija ili vodozahvat), podsistem (grupa objekata kojom se upravlja iz jednog centra), ili kompletan sistem (npr. kada su svi objekti upravljani centralizovano). Složenost analize raste u navedenom redosledu.

Strategije upravljanja primenjene na dati vodoprivredni sistem određuju performansu sistema u dugoročnom smislu i tada je od interesa izmeriti kvalitet mogućih strategija preko pogodno odabranih indikatora. Simulacijom rada sistema na kompjuterskom modelu pod datom strategijom i operativnim pravilima upravljanja dobija se informacija kakve efekte proizvodi upravljanje. Ako se simulacije ponove za više različitih strategija, hidroloških ulaza i preferentnih shema zadovoljenja tražnje za vodom, upravljanja se na različite načine mogu međusobno porediti. Poređenje mogu vršiti pojedinci i grupe, a vrednovanje se može vršiti i tzv. objektivnim metodima samo na osnovu merenja performanse sistema. U svakom slučaju, otvara se niz mogućnosti za kombinovanje različitih tehnika systemske analize i sinergiju simulacije i višekriterijumskog odlučivanja.

U radu se tretira jedan segment opisane problematike. U cilju jednostavnosti razmatra se dugoročna performansa sistema sa jednom akumulacijom i nizvodnim vodozahvatom. Po pretpostavci, na višegodišnjem intervalu se pomoću kompjuterizovanog modela simulira rad sistema sa mesečnim

distribucijama i bilansiranjima voda po zadatim prioritetskim shemama. Akumulacijom se upravlja po zadatoj krivoj upravljanja (zapreminski mesečni nivoi), a nizvodni zahtev je procenjen za planski horizont i isti je u svim godinama uz jednaku unutargodišnju raspodelu po mesecima. Promenljivi su dotoci u akumulaciju (hidrološki ulaz), a scenariji upravljanja se definišu preko prioriteta praćenja krive upravljanja akumulacije i zadovoljenja tražnje na vodozahvatu. Vrednovanje scenarija vrši se višekriterijumskom analizom sa indikatorima dugoročne performanse kao kriterijumima za ocenu scenarija.

Proširenja i metodološke razrade su moguće u više pravaca o čemu se govori posle ilustrativnog primera i u okviru zaključaka.

INDIKATORI DINAMIČKE PERFORMANSE SISTEMA

Razmatraju se sledeći indikatori performanse vodoprivrednog sistema:

- 1) Indeks manjka
(*shortage index*) (I)
- 2) Pouzdanost
(*reliability*) (α)
- 3) Obnovljivost (brzina obnavljanja)
(*resiliency*) (γ)
- 4) Ranjivost (ekstremni deficit)
(*vulnerability*) (ν)
- 5) Disperzija nivoa akumulacije
(*dispersion of reservoir storage levels*) (d^r)

Uvođenje i razrada navedenih indikatora dešavali su se tokom nekoliko poslednjih decenija u raznim pravcima [2,3,7,8,9,12,13]. Formulacije gornjih indikatora, od kojih je poslednji (disperzija simuliranog nivoa akumulacije u odnosu na krivu upravljanja, d^r) originalan [13], predstavljaju preciziranja i poboljšanja nekih formulacija datih u ranijim radovima autora (videti npr. [9,11,12,13]). Dopune opisa indikatora su rezultat novijih istraživanja, a novost je i proširenje konteksta analize performanse sistema ocenjivanjem i rangiranjem strategija upravljanja pomoću višekriterijumskih metoda i kontrolnog mehanizma iz domena teorije društvenog odlučivanja.

Indeks manjka

Indeks manjka je statistička mera učestanosti i veličine godišnjih manjaka. Ako se zbir mesečnih zahteva za vodom tokom j-te godine označi sa d_j, a zbir

zabeleženih manjaka tokom godine sa m_j (pri čemu se ne uzimaju u obzir viškovi vode, ako ih ima u nekim mesecima), indeks manjka se određuje kao statistička mera:

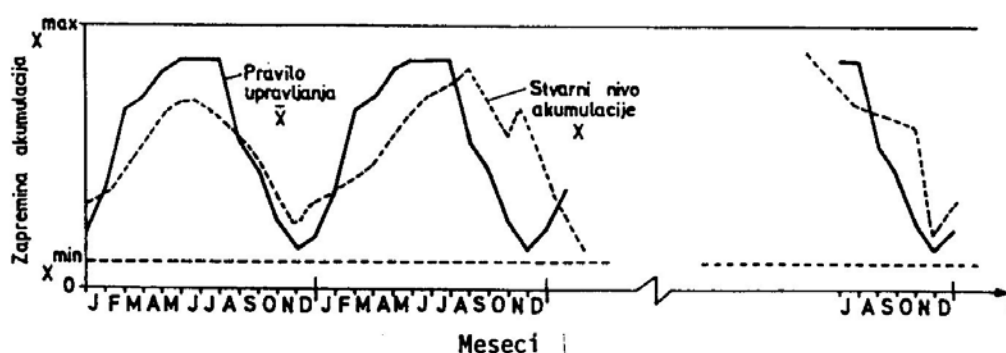
$$I = \frac{100}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{d_j} \right)^2 \quad (1)$$

Sledeća četiri indikatora performanse odnose se na tzv. deficitne (neželjene) situacije u koje akumulacija može ući, ostati u njima neko vreme i usled toga mogu nastupiti određene posledice. Suština i indikacija neželjenih stanja akumulacije (ili sistema) je sledeća:

- (1) koliko često akumulacija (sistem) ulazi u neželjena stanja (pouzdanost, α);
- (2) koliko se brzo akumulacija (sistem) vraća iz neželjenog u željeno stanje (obnovljivost, γ);
- (3) koliko je 'duboko' neželjeno stanje akumulacije (sistema) (ranjivost, ν).
- (4) koliko tekuća stanja akumulacije odstupaju od stanja definisanih pravilima (krivama) upravljanja (disperzija nivoa, d^r).

Iako se performansa akumulacije može posmatrati iz različitih uglova, sve tri veličine odražavaju njeno ponašanje u toku višegodišnjeg planskog perioda. Bez obzira koja se deskriptivna i matematička definicija koristi za izračunavanje α, γ i ν, računanja se po pravilu vrše u odnosu na godišnje bilanse voda u sistemu i po mesecima se ne kompenziraju manjkovi i viškovi vode.

Na modelu simulirana stanja akumulacije mogu se tretirati kao stacionarni stohastički proces. Drugim rečima, ako se posmatra višegodišnji niz simuliranih mesečnih količina vode u akumulaciji, pretpostavka je da se funkcija raspodele verovatnoća stanja akumulacije ne menja u toku vremena. Zbog toga je uobičajeno da se na ulazu modela definiše stacionarna upravljačka strategija kao pravilo (kriva) upravljanja približno trapeznog oblika, odnosno kao zapreminski nivoi akumulacije kojima treba težiti i koji su različiti po mesecima a konstantni na višegodišnjem intervalu, Slika 1. U probalističkom smislu, kriva upravljanja ima smisla jer definiše nizove stacionarnih stanja akumulacije, a kao realizacija dugoročne strategije ne implicira poznavanje budućih dotoka, zahteva za vodom i drugih mogućih uslova na intervalima dužim od godinu dana.



Slika 1. Stacionarna pravila upravljanja akumulacijom

Pouzdanost

Pouzdanost je široko korišćen koncept u planiranju vodoprivrednih sistema. Ako se posmatra data akumulacija, pouzdanost se može definisati kao verovatnoća da je akumulacioni prostor u dugogodišnjem periodu po mesecima bio ispunjen vodom do nivoa koji se mogu označiti kao povoljna (željena) stanja. Povoljni nivo može biti nivo sa krive upravljanja, što je strog uslov, ili se može definisati tolerantno apsolutno odstupanje od krive od npr. $\pm 10\%$. Ako se rad akumulacije simulira na intervalu od N godina sa mesečnim jediničnim intervalima, na kraju svakog meseca akumulacija je napunjena vodom do (zapreminskog) nivoa x_i^s ($i = 1, 2, \dots, 12N$). Relativno odstupanje simuliranih nivoa od nivoa x_i^p sa krive upravljanja (uvek za korespondentni kalendarski mesec) određeno je kao:

$$\varepsilon_i^a = |x_i^s - x_i^p| / x_i^p \quad (i = 1, 2, \dots, 12N) \quad (2)$$

Na sličan način može se pratiti kako je zadovoljena tražnja na vodozahvatu i definisati relativno odstupanje

$$\varepsilon_i^v = |d_i^s - d_i^z| / d_i^z \quad (i = 1, 2, \dots, 12N) \quad (3)$$

gde su d_i^s i d_i^z ($i = 1, 2, \dots, 12N$) redom simulirane isporuke i tražene vode na vodozahvatu.

Vrednosti odstupanja ε^s i ε^v se za sistem mogu tretirati jedinstveno na više načina, npr.:

$$(a) \varepsilon_i^s = (\varepsilon_i^a + \varepsilon_i^v) / 2 \quad (4)$$

$$(b) \varepsilon_i^s = (w_1 \varepsilon_i^a + w_2 \varepsilon_i^v) / 2, \quad w_1 + w_2 = 1 \quad (5)$$

$$(c) \varepsilon_i^s = \min(\varepsilon_i^a, \varepsilon_i^v) \quad (6)$$

$$(d) \varepsilon_i^s = \max(\varepsilon_i^a, \varepsilon_i^v) \quad (7)$$

(Svuda za $i = 1, 2, \dots, 12N$)

U prva dva slučaja osrednjavaju se neotežani i otežani deficiti na akumulaciji i vodozahvatu, a u druga dva se uzima manja ili veća vrednost deficita kao mera stepena nezadovoljenja zahteva za ceo sistem.

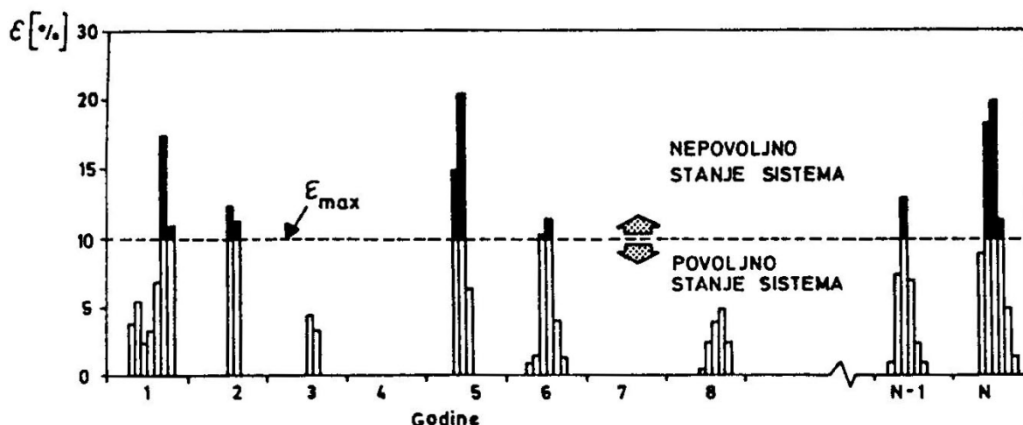
Neka je simulirano stanje sistema u datom mesecu predstavljeno vektorom $X_i(x_i^s, d_i^s)$. Pošto se nivo akumulacije x_i^s može kretati između graničnih zapremina x^{\min} i x^{\max} , a isporučena voda na vodozahvatu između 0 i d_i^s , stanje sistema se može tretirati kao povoljno ili nepovoljno na osnovu vrednosti za tolerantni nivo deficita ε_{\max} .

Ako se sa A označi skup povoljnih stanja sistema u kojima je deficit niži od ε_{\max} , a sa F skup nepovoljnih stanja, svako $X_i(x_i^s, d_i^s)$ mora pripadati A ili F . Pouzdanost sistema se može definisati kao verovatnoća

$$\alpha = P\{X_i(x_i^s, d_i^s) \in A\}. \quad (8)$$

Simulacija rada sistema omogućava da se u periodu trajanja $12N$ meseci za svaki mesec izračunaju vrednosti relativnih lokalnih deficita prema relacijama (2) i (3) i da se zatim na osnovu neke od relacija (4)-(7) izračuna sistemski deficit. Poređenjem sistemskog deficita za svaki mesec sa zadatim tolerantnim deficitom ε_{\max} , mogu se već u toku simulacije prebrojavati meseci u kojima se sistem ponašao povoljno (A) ili nepovoljno (F), Slika 2.

U cilju konciznosti izlaganja dalje ćemo umesto $X_i(x_i^s, d_i^s)$ koristiti oznaku X_i sa istim značenjem. Ako se uvede promenljiva Z koja uzima vrednost 1 ili 0 na sledeći način:



Slika 2. Određivanje povoljnih i nepovoljnih stanja sistema na osnovu manjaka vode

$$\varepsilon_i^s \leq \varepsilon_{\max}, \quad (X_i \in A) \quad Z_i = 1 \quad (9)$$

$$\varepsilon_i^s > \varepsilon_{\max}, \quad (X_i \in F) \quad Z_i = 0 \quad (10)$$

pouzdanost se može izračunati kao odnos između broja meseci u kojima je sistem bio u povoljnom stanju i ukupnog broja meseci:

$$\alpha = \frac{1}{12N} \sum_{i=1}^{12N} Z_i \quad (11)$$

Pouzdanost α se često tretira kao pojam suprotan pojmu rizika. Suprotno od pouzdanosti, rizik je verovatnoća da će se sistem naći u nepovoljnom stanju:

$$r = 1 - \alpha \quad (12)$$

Za određivanje pouzdanosti (rizika) treba imati informaciju o stepenu zadovoljenja sistemskih zahteva za vodom. Pošto bilo koji model u svakom mesecu daje informaciju o isporučenoj vodi na vodozahvatu i rezultujućem zapreminskom nivou akumulacije, taj nivo se može uporediti sa nivoom sa krive upravljanja (videti relaciju (2)).

Na osnovu simulacije mogu se na kraju za ceo period izračunati prosečna odstupanja simuliranih nivoa od nivoa sa krive upravljanja (relacija (13)) i prosečni relativni manjkovi u isporukama vode na vodozahvatu (relacija (14)):

$$\varepsilon^a = \left[\frac{1}{12N} \sum_{i=1}^{12N} |x_i^s - x_i^p| \right] / x_i^p \quad (13)$$

$$\varepsilon^v = \left[\frac{1}{12N} \sum_{i=1}^{12N} |d_i^s - d_i^z| \right] / d_i^z \quad (14)$$

Za dati hidrološki ulaz u sistem, prioritete akumulacije i vodozahvata, oblik krive upravljanja i veličinu godišnje tražnje vode na vodozahvatu može se uspostaviti *relacija strategija-pouzdanost* kao osnova za ocenu kvaliteta strategije u odnosu na performansu sistema definisanu pouzdanošću α .

Obnovljivost

Obnovljivost je indikator brzine vraćanja sistema iz nepovoljnog u povoljno stanje. Duže ostajanje sistema u nepovoljnom stanju predstavlja duže nezadovoljenje zahteva za vodom, što može biti ozbiljniji problem nego 'intenzitet' nezadovoljenja.

Za period od $12N$ meseci, vrednost

$$\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} Z_i$$

predstavlja odnos vremena u kome je sistem bio u povoljnom stanju prema ukupnom vremenu. Pod uslovom da je N dovoljno veliko, ova vrednost se približava verovatnoći povoljnog stanja sistema i izjednačava sa pouzdanošću sistema α :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} Z_i = \alpha \quad (15)$$

Ako se uvede još jedna (1,0) promenljiva da identifikuje prelaze sistema iz stanja A u stanje F i označi sa W_i :

$$\begin{aligned} W_i = 1 & \text{ kada } X_i \in A, X_{i+1} \in F \\ W_i = 0 & \text{ u svim ostalim slučajevima*} \end{aligned} \quad (16)$$

(* ostali slučajevi su: $X_i \in A, X_{i+1} \in A$; $X_i \in F, X_{i+1} \in A$; $X_i \in F, X_{i+1} \in F$.)

tada je za veliko N srednja vrednost veličine W na intervalu $i = 1, 2, \dots, 12N$ jednaka verovatnoći ρ da je sistem bio u A (povoljnom) stanju u datom mesecu i F (nepovoljnom) stanju u sledećem mesecu

$$\rho = P\{X_i \in A, X_{i+1} \in F\} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} W_i \quad (17)$$

Prosečno vreme koje sistem provodi u nepovoljnom F stanju je

$$\bar{T}_F = \frac{\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} (1 - Z_i)}{\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} W_i} \quad (18)$$

gde brojilac daje ukupan broj meseci u kojima je sistem bio u stanju F, a imenilac broj slučajeva kada je sistem prešao iz stanja A u stanje F.

Za N dovoljno veliko sledi

$$\begin{aligned} E\{T_F\} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{T}_F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} (1 - Z_i)}{\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} W_i} \\ &= \frac{1 - \alpha}{\rho} \end{aligned} \quad (19)$$

Obnovljivost je

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\rho}{1 - \alpha} = \frac{P\{X_i \in A, X_{i+1} \in F\}}{P\{X_i \in F\}} \\ &= \frac{\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} W_i}{\frac{1}{12N} \cdot \sum_{i=1}^{12N} (1 - Z_i)} \end{aligned} \quad (20)$$

odnosno konačno

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{12N} W_i}{12N - \sum_{i=1}^{12N} Z_i} \quad (21)$$

U sledeća dva jednostavna primera za $N=1$ (jedna godina) pokazano je kako se računaju pouzdanost i obnovljivost sistema na osnovu identifikovanih povoljnih (A) i nepovoljnih (F) stanja sistema. U primeru 1 sistem je manje pouzdan i slabije obnovljiv nego u primeru 2.

Primer 1: Nepouzdaniji i slabije obnovljiv sistem

Mesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Stanje	A	A	F	F	F	A	F	A	A	F	A	A	
Z	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	$\sum_{i=1}^{12} Z_i = 7$
W	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	$\sum_{i=1}^{12} W_i = 3$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{12} Z_i}{12} = \frac{7}{12} = 0.58$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{12} W_i}{12 - \sum_{i=1}^{12} Z_i} = \frac{3}{5} = 0.60$$

Primer 2: Pouzdaniji i bolje obnovljiv sistem

Mesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Stanje	A	A	A	F	A	A	F	F	A	A	A	A	
Z	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	$\sum_{i=1}^{12} Z_i = 9$
W	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	$\sum_{i=1}^{12} W_i = 2$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{12} Z_i}{12} = \frac{9}{12} = 0.75$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{12} W_i}{12 - \sum_{i=1}^{12} Z_i} = \frac{2}{3} = 0.67$$

Slično kao kod pouzdanosti, ocena (21) može se koristiti u fazi odlučivanja za izbor najprihvatljivije strategije upravljanja sistemom.

Ranjivost

Pokazatelji I , α i γ opisuju performansu sistema sa naglaskom na vreme koje sistem provodi u povoljnim ili nepovoljnim stanjima. Poslednji pokazatelj (po redosledu, ne po značaju) uslovno se može nazvati ekstremni deficit i on se neposredno, kao i godišnja garantovana voda, vezuje za veličinu manjka vode u sistemu. Razlog za njegovo uvođenje i postupak za izračunavanje dati su za vodozahvat na kome postoji tražnja vode.

Ukupni mesečni manjak na ovoj tački može se kretati u opsegu $[0, D]$, gde je D apsolutno maksimalni mesečni zahtev u toku perioda analize (simulacije):

$$D = \max_i D_i \quad i = 1, 2, \dots, 12N. \quad (22)$$

Ako su d_1, d_2, \dots, d_n vrednosti manjka iz intervala $[0, D]$, po ranije uvedenim pretpostavkama sistem je u nepovoljnom stanju ($X_i \in F$) uvek kada je relativni manjak u odnosu na zahtev veći od dopustivog ε_{\max} . Zbog jednostavnosti može se usvojiti $\varepsilon_{\max} = 0$, čime se skup nepovoljnih stanja sistema proširuje na sva stanja kada na tački zahteva postoji bilo kakav manjak. Svako diskretnoj vrednosti manjka d_1, d_2, \dots, d_n može se dodeliti numerička vrednost f_k koja izražava stepen nezadovoljenja zahteva. To, npr., može biti već korišćeni parametar ε -relativni manjak, dakle

$$f_k = \varepsilon_k = \frac{d_k}{D} \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (23)$$

Ako se sa p_k označi verovatnoća da je manjak d_k (kome odgovara f_k) najnepovoljniji, tj. najveći među manjkovima dok je sistem u nepovoljnom stanju, tada se za sistem može usvojiti racionalna metrika ekstremnih deficita. Jedan od načina je da se metrika indeksa maksimalnog deficita v utvrdi preko očekivanog (srednjeg) maksimalnog nepovoljnog manjka kada sistem uđe u nepovoljno stanje:

$$v = \sum_{(X \in F)} f_k \cdot p_k \quad (24)$$

gde $(X \in F)$ označava da se sabiranje vrši nad svim intervalima u kojima je sistem bio u nepovoljnom stanju. Na taj način deskriptivni opis indeksa ekstremnog deficita v ne iskazuje koliko dugo je sistem bio u nepovoljnom stanju (što je inverzna situacija u

odnosu na onu koje opisuje obnovljivost γ), već koliko ozbiljne mogu biti posledice kada sistem već uđe u nepovoljno stanje.

Koliko je sistem 'duboko' u nepovoljnom stanju može se ocenjivati na više načina. Ako se događaj $\Omega =$ 'sistem je u k uzastopnih meseci u nepovoljnom stanju' posmatra kao složeni događaj formiran od k uzastopnih elementarnih događaja ω_r , gde je ω_r pojava manjka vode u sistemu u r -tom mesecu, tada je:

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_{1+1}, \dots, \omega_r, \dots, \omega_{1+k}\} \quad (25)$$

a pridružena mera $V(\Omega)$ predstavlja zbir manjaka:

$$V(\Omega) = V(\omega_1) + V(\omega_{1+1}) + \dots + V(\omega_r) + \dots + V(\omega_{1+k}) \quad (26)$$

U periodu od $12N$ meseci može se desiti L događaja Ω , a ako je za dati događaj Ω_L :

$$V_L^{\max} = \max_{\omega_r \in \Omega_L} V(\omega_r) \quad (27)$$

tada V_L^{\max} predstavlja maksimalni pojedinačni mesečni manjak u nizu od k uzastopnih manjaka (koji čine događaj Ω_L).

Najjednostavnije je definisati bezdimenzioni sistemski indeks ekstremnog deficita preko srednje vrednosti najvećih mesečnih manjaka u toku perioda nepovoljnog ponašanja sistema

$$v = \left(\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L V_l^{\max} \right) / D \quad (28)$$

Korišćenje srednje vrednosti za ovaj pokazatelj u metodološkom smislu je opravdano jer ne unosi pristrasnost u ocenjivanje performanse sistema.

Slično kao ranije, indikator ranjivosti (28) može se koristiti kod izbora najprihvatljivije strategije upravljanja sistemom.

Disperzija nivoa akumulacije

Razmotrimo sledeću situaciju. Za sistem koji čine akumulacija i vodozahvat na modelu su simulirani efekti primene određene strategije upravljanja. Na ulaz modela dovedena je istorijska ili generisana sekvenca mesečnih dotoka u akumulaciju dužine $12N$ meseci, a za akumulaciju je zadata stacionarna kriva upravljanja u obliku kao na Slici 1. Krajnje mesečne zapremine sa krive upravljanja za akumulaciju su \bar{x}_k , $k = 1,$

2,...,12. Za akumulaciju su tokom simulacije dobijeni krajnji mesečni zapreminski nivoi $x_{l,k}$, gde je l redni broj godine u nizu od N godina.

Srednje vrednosti simuliranih nivoa akumulacije po kalendarskim mesecima su

$$x_k^a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{l=1}^N x_{l,k}, k = 1, 2, \dots, 12. \quad (29)$$

Za svaki mesec može se odrediti prosečno višegodišnje relativno odstupanje simuliranih $x_{l,k}$ od željenih stanja sa krive upravljanja \bar{x}_k :

$$\tilde{x}_k = \frac{|x_k^a - \bar{x}_k|}{\bar{x}_k}, k = 1, 2, \dots, 12. \quad (30)$$

i zatim ukupno prosečno relativno odstupanje za akumulaciju (nezavisno od meseca u godini):

$$\bar{d}^a = \frac{1}{12} \cdot \sum_{k=1}^{12} \tilde{x}_k. \quad (31)$$

OCENA STRATEGIJA UPRAVLJANJA

Jedno izvršenje simulacionog modela na računaru može se razumeti kao simulacija kompletnog scenarija rada sistema pri zadatim:

- (1) kriva upravljanja akumulacijom,
- (2) mesečnim zahtevima za vodom na vodozahvatu,
- (3) prioritetima praćenja krive upravljanja akumulacijom i isporuka vode na vodozahvatu i
- (4) dotocima u akumulaciju.

Prva tri elementa scenarija determinišu strategiju upravljanja, a poslednji (dotoci) predstavljaju hidrološke uslove pri kojima se strategija realizuje. Kada se završi simulacija scenarija, sračunati indikatori performanse sistema:

$$(I, \alpha, \gamma, v, d^a). \quad (32)$$

predstavljaju attribute strategije upravljanja (1)-(3) pri datim hidrološkim ulazima (4). Na tom mestu otvara se niz mogućnost za sistematičnu analizu različitih strategija i scenarija. Svaki element (1)-(4) može se menjati da bi se kreirao novi scenario i uvek je moguće generisati ocenu (36). Ako bi se, na primer, fiksirala jedna strategija prema elementima (1)-(3), a na ulaz modela dovodile različite sekvence dotoka (4), za svaku

sekvencu sistem bi se drugačije ponašao i bile bi izračunate drugačije vrednosti u (36).

Pretpostavimo da je na ulaz modela pod jednakim uslovima (1)-(3) dovedeno J istorijskih ili generisanih sekvenci dotoka u akumulaciju, sa različitim periodima pojavljivanja, dužinama i veličinama malovodnih i velikovodnih perioda. Ponavljanjem simulacija za sve ulazne sekvence mogu se odrediti prosečni indikatori performanse sistema po formuli (33) i formirati ocena familije od J scenarija (34).

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J (I)_j & \bar{\alpha} &= \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J (\alpha)_j \\ \bar{\gamma} &= \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J (\gamma)_j & \bar{v} &= \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J (v)_j \\ \bar{d}^a &= \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J (d^a)_j \end{aligned} \quad (33)$$

$$(\bar{I}, \bar{\alpha}, \bar{\gamma}, \bar{v}, \bar{d}^a). \quad (34)$$

Brojne vrednosti sadržane u oceni (34), izračunate za više scenarija u opisanom slučaju, ili za razne kombinacije elemenata (1)-(4), mogu se tretirati kao rejtinzi scenarija. Primenom nekog od metoda višekriterijumske optimizacije konačno se mogu vrednovati scenariji i odabrati najpovoljnija strategija upravljanja.

Naime, svaki scenario je alternativa, svaki indikator je atribut (ili kriterijum), formira se matrica odlučivanja i potrebno je iskoristiti neki od poznatih metoda da bi se sve varijante vrednovala protiv kriterijuma, odredila rang lista i odabrala najbolja alternativa.

ILUSTRATIVNI PRIMER

Rad sistema simulira se 6 puta sa J različitih sekvenci dotoka u akumulaciju, istom stacionarnom krivom upravljanja za akumulaciju i istom unutargodišnjom raspodelom zahteva za vodom na vodozahvatu.

Razlike u simulacijama označenim kao scenariji S1-S6 sadržane su u Tabeli 1. U scenarijima se menjaju prioriteti praćenja krive upravljanja na akumulaciji i isporuka vode na vodozahvatu, tolerantni sistemski manjak i tražnja vode na vodozahvatu koja je u prva tri scenarija bazna (D), a u poslednja tri uvećana za 20%.

Tabela 1. Scenariji upravljanja vodama u sistemu akumulacije i vodozahvata

Scenario	Parametri simulacije			
	Međusobni prioritet		Tolerantni deficit $/\epsilon_{\max}/$	Zahtev na vodozahvatu
	Akumulacija	Vodozahvat		
S1	Isti	Isti	0.10	D
S2	Veći		0.10	D
S3		Veći	0.10	D
S4	Isti	Isti	0.15	D*1.2
S5	Veći		0.15	D*1.2
S6		Veći	0.15	D*1.2

Tabela 2. Rejtnizi scenarija (strategija upravljanja)

	Indeks manjka	Pouzdanost	Obnovljivost	Ranjivost	Disperzija
	(\bar{I})	$(\bar{\alpha})$	$(\bar{\gamma})$	$(\bar{\nu})$	(\bar{d}^a)
S1	0.672	0.87	0.46	0.63	0.075
S2	0.853	0.82	0.67	0.85	0.062
S3	1.172	0.89	0.69	0.46	0.084
S4	1.564	0.92	0.78	0.73	0.070
S5	1.971	0.90	0.34	0.80	0.066
S6	1.423	0.94	0.55	0.68	0.079
	Min	max	max	min	min

Pretpostavimo da je dobijena matrica performanse sistema sa vrednostima indikatora kao u Tabeli 2. Osenčene su najbolje vrednosti po svakom indikatoru i jasno je da se ne može odmah odrediti koji scenario je najbolji.

Svi su, osim S5, po nekom indikatoru bolji od drugih, ali nijedan nije bolji od drugih bar po dva indikatora. Pored toga, za višekriterijumsku analizu je potrebno definisati međusobni relativni značaj indikatora, a treba odabrati i metod po kome će se vrednovati scenariji.

Primenjena su četiri metoda višekriterijumske analize [4,9,12,13,14]:

1. SAW – Simple Additive Weighting (aditivni metod)
2. SPW – Simple Product Weighting (produktni metod)
3. TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
4. CP – Compromise Programming

Prva dva su težinski, a druga dva su metodi idealne tačke.

Razmotrimo tri varijante višekriterijumske analize kada se za sistem analitičara (i/ili donosioca odluka) menjaju

težine pet analiziranih indikatora performanse. Težine indikatora u varijantama A1, A2 i A3 su kako sledi:

- A1 – Svi indikatora imaju iste težine
- A2 – Pouzdanost i disperzija imaju jednaku težinu koja je dvostruko veća od težina ostalih indikatora
- A3 – Indikatora pouzdanost, obnovljivost i ranjivost imaju jednaku i dvostruko veću težinu od preostala dva indikatora.

U tabelama 3, 4 i 5 sabrani su rezultati proračuna višekriterijumskog vrednovanja 6 scenarija alokacije vode i prioritnog upravljanja sistemom po sva četiri metoda (SAW, SPW, TOPSIS i CP). Posle rangiranja, primenjen je kontrolni agregacioni mehanizam Borda [11] po kome su u svakoj tabeli sabirani rangovi da bi se stekao u nekoj meri objektivniji uvid u stvarne rangove scenarija ('nezavisno od višekriterijumskog metoda'). Napomenimo da je ovo indikacija mogućeg objedinjavanja analize po više metoda, a ne i konačna ocena. Na primer, mogao je biti odabran samo jedan metod i obaviti analizu. Takođe, poznato je da se sa rangovima ne može mnogo računati (po poznatim pravilima tretiranja redoslednih informacija). Metodi koji su ovde korišćeni samo rangiraju alternative (scenariji S1-S6) i ne daju kardinalnu informaciju o njihovim stvarnim kvalitetima kao neki drugi metodi (npr. AHP).

Tabela 3. Rejtinzi scenarija (strategija upravljanja)

	Indeks manjka	Pouzdanost	Obnovljivost	Ranjivost	Disperzija
	(\bar{I})	$(\bar{\alpha})$	$(\bar{\gamma})$	(\bar{v})	(\bar{d}^a)
A1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
A2	0.143	0.286	0.143	0.143	0.286
A3	0.125	0.250	0.250	0.250	0.125

Tabela 4. Rangiranje scenarija (strategija upravljanja): *Varijanta A1 težina indikatora*

	SAW	SPW	TOPSIS	CP	Borda	RANG
S1	1	3	3	4	11	3
S2	3	1	2	3	9	2
S3	2	2	1	1	6	1
S4	4	4	4	6	18	4
S5	6	6	6	2	20	5-6
S6	5	5	5	5	20	5-6

Tabela 5. Rangiranje scenarija (strategija upravljanja): *Varijanta A2 težina indikatora*

	SAW	SPW	TOPSIS	CP	Borda	RANG
S1	2	2	2	2	8	2
S2	1	1	1	1	4	1
S3	3	3	3	3	12	3
S4	4	4	4	4	16	4
S5	6	6	6	6	24	6
S6	5	5	5	5	20	5

Tabela 6. Rangiranje scenarija (strategija upravljanja): *Varijanta A3 težina indikatora*

	SAW	SPW	TOPSIS	CP	Borda	RANG
S1	3	3	1	4	11	3
S2	4	4	5	5	18	5
S3	1	1	1	1	4	1
S4	2	2	2	2	8	2
S5	6	6	6	6	24	6
S6	5	5	3	3	16	4

Pregled Tabela 3-6 pokazuje da je scenario S3 najbolji ako se indikatori tretiraju sa jednakim težinama (A1), ili se hazardnim indikatorima (pouzdanost-obnovljivost-ranjivost) (A3) dodeli dvostruko veća težina nego indikatorima indeks manjka i disperzija nivoa akumulacije. Ovaj scenario pokazuje najmanju ranjivost sistema, obnovljivost je druga najbolja, pouzdanost je četvrta, a indeks manjka treći. Po tom scenariju je najveća disperzija nivoa akumulacije. Scenario karakteriše veći prioritet zahteva za vodom na vodozahvatu nego praćenje krive akumulacije, dopušteni manjak u sistemu je 10% i zahtev na vodozahvatu je D.

Za varijantu težina indikatora A2 najbolji je scenario S2 po kome je akumulacija sa višim prioritetom u odnosu na vodozahvat i indeks manjka (ukupna statistika, pre svega frekvencija) manjaka u dugoročnom periodu ima veći značaj od sva tri indikatora hazarda. Iz Tabela 5 vidi se da je dobar i scenario S1 sa najmanjim indeksom manjka i prihvatljivim vrednostima ostalih indikatora.

ZAKLJUČAK

Sistemska analiza višegodišnje performanse vodoprivrednog sistema podrazumeva korišćenje matematičkih modela, tehnika simulacije i optimizacije,

statističkih metoda, stohastičke hidrologije, estimacije zahteva za vodom i brojnih drugih znanja i alata. Sve zajedno ne može se objediniti bez računara, baza podataka, a pomoću metoda višekriterijumske analize i u konačnom ishodu teorije i metoda donošenja odluka, ne mogu se kvalitetno valorizovati moguće strategije upravljanja i odabrati najpovoljnija rešenja za efikasan i produktivan rad sistema.

U radu je predložena grupa indikatora pomoću kojih se na osnovu simulacije rada sistema može pratiti ponašanje sistema pri različitim shemama prioriteta zahteva za vodom. Indikatori su postavljeni kao statistički, hazardni i operativni. Jedan indikator prati statistiku manjaka u zadovoljenju zahteva za vodom u višegodišnjem periodu, a tri indikatora opisuju koliko je sistem pouzdan, obnovljiv iz nepovoljnih stanja i ranjiv u pogledu 'dubine upada' u nepovoljna stanja. Ako u sistemu postoji akumulacija, operativni indikator pokazuje koliko je kvalitetno pravilo upravljanja po kome se akumulacija vodi, odnosno kolike su disperzije simuliranih nivoa akumulacije u odnosu na nivoe definisane pravilima.

Definicije indikatora date u radu nisu nove, ali su neke ranije date sada detaljnije razrađene. Novo je okruženje u kome se oni koriste: (1) višestruke simulacije rada sistema sa izmenjivim prioritetskim shemama zahteva za vodom, (2) metodologija za definisanje manjaka na lokalnim tačkama u sistemu i za sistem u celini, (3) tretman povoljnih i nepovoljnih stanja sistema korišćenjem diskriminacionog nivoa tolerancije na manjkove u zadovoljenju zahteva i (4) metodologija za primenu višekriterijumskih metoda i analizu njihovih rezultata pri vrednovanju strategija upravljanja sistemom. Strategije su plod višestrukih simulacija rada sistema u različitim hidrološkim uslovima sa istorijskim i generisanim sekvencama, estimiranim zahtevima za vodom na planskom horizontu itd.

Ilustrativni numerički primer pokazuje kako se gore navedeno može praktično realizovati i kakvi rezultati se dobijaju. Uopštenja definicija indikatora i proširenja 'okruženja analize' mogući su u raznim pravcima, na primer: (1) na sisteme sa više akumulacija i zahteva za vodom (uključujući podele na podsisteme i razne sheme agregacije); (2) za različite preferentne sheme zahteva za vodom; (c) alternativne skupove krivih upravljanja akumulacijama; (d) multivarijabilne sekvence stohastičkih ulaza vode u sistem (dotoci u akumulacije, koncentrisani dotoci u kontrolne tačke nizvodno od akumulacija); (e) generalizacija predloženih i uvođenje novih indikatora performanse (garantovane vode i

njihova pouzdanost, robustnost) itd. Za simulaciju rada sistema postoje brojni softveri, od MODSIM, ACQUANET i, MIKEBASIN do WEAP [9,10].

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Pokrajinskom sekretarijatu za nauku i tehnološki razvoj koji je finansirao istraživanja na projektu Mrežno modeliranje i evaluacija funkcionalne adaptibilnosti regionalnih vodoprivrednih sistema u Vojvodini, 2011-2015.

LITERATURA

- [1] Đorđević B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd.
- [2] Hashimoto T. (1980): Robustness, Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water resources planning, Ph. D. dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
- [3] Hashimoto T., Stedinger J.R., Loucks D.P. (1982): Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation, Water Resources Research 18(1): 14-20.
- [4] Hwang C.L., Yoon K.S. (1981): Multiple attribute decision making: methods and applications, Springer, Berlin.
- [5] Klemes V., Srikanthan R., McMahon, T.A. (1981): Long-memory flow models in reservoir analysis: What is their practical value, Water Resources Research 17(3): 737-751.
- [6] Loucks D.P. (1997): Quantifying trends in system sustainability, Hydrol. Sci. J. 42(4): 513-530.
- [7] McMahon T.A., Adeloye A.J., Sen-Lin Z. (2006): Understanding performance measures of reservoirs, J. Hydrol. (Amsterdam) 324: 359-382.
- [8] Moy W.S., Cohon J.L., Reville C.S. (1986): A programming model for analysis of reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir, Water Resources Research 22(4): 489-498.
- [9] Srđević B., Srđević Z. (2016): Vodoprivredna systemska analiza- sa primenama u menadžmentu vodnih resursa, str. 321, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.

- [10] Srđević B., Srđević Z., Blagojević B., Bajčetić R. (2015): Mrežni model regionalnog hidrosistema Krivaja u Vojvodini, *Vodoprivreda* 47: 101-109.
- [11] Srđević B. (2007): Linking Analytic Hierarchy Process and Social Choice Methods to Support Group Decision-Making in Water Management, *Decision Support Systems* 42 (4): 2261-2273.
- [12] Srđević B. (2003): Systems Analysis Methods in Engineering with Extensions in Environmental Engineering, p. 136, Federal University of Bahia, Salvador, Brazil.
- [13] Srđević B. (1987): Identifikacija dugoročnih strategija upravljanja sistemima akumulacija primenom mrežnih modela, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, str. 121, Novi Sad.
- [14] Zeleny M. (1982): Multiple Criteria Decision Making, McGraw Hill, New York.

MULTICRITERIA ANALYSIS OF THE WATER RESOURCES SYSTEM PERFORMANCE

by

Bojan SRĐEVIĆ and Zorica SRĐEVIĆ

University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Department of Water Management, Novi Sad
(bojans, srdjevic)@polj.uns.ac.rs

Summary

Several important indicators of long-term system performance are described in the paper. Two indicators are related to the statistical properties of the systems operation (shortage index, and dispersion of reservoir levels from the rule curve), while additional three are related to system reliability, resilience and vulnerability as descriptors of system behavior in so-called hazard (extreme) operational scenarios. A framework is proposed to enable evaluation of system's performance once computations (simulations) are completed for various reservoirs' rule curves, priority schemes, tolerant shortages (make distinction of desirable from failure operational conditions) and multiple long-term time series of inflows. For evaluation of system's performance under different operational scenarios, a

multi-criteria decision-making methods are recommended for use, followed by control mechanism (Borda count) from the social choice theory. A simple system consisting of single surface reservoir with downstream diversion is used to illustrate how indicators may be computed for six different operational scenarios and how scenarios can be evaluated and ranked for three different weighting schemes applied to performance indicators. Recommendations for extensions of proposed systems approach as well as indication of further research are given in conclusions.

Keywords: water resources system, performance indicator, scenario, multi-criteria analysis

Redigovano 08.11.2016.