

## NOVI INDIKATORI ZA RAČUNANJE INDEKSA ODRŽIVOSTI U PLANIRANJU I UPRAVLJANJU VODNIM RESURSIMA

Zorica SRĐEVIĆ, Bojan SRĐEVIĆ  
Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet  
Departman za uređenje voda  
Grupa za sistemsku analizu i donošenje odluka

### REZIME

Početak ove decenije Sandoval-Solis, McKinney i Loucks [7] dali su opštu definiciju indeksa održivosti (*sustainability index*) kao mere za ocenjivanje menadžment strategija u oblasti voda. Fokus je na dugoročnoj performansi vodoprivrednog sistema kada postoji disbalans raspoloživih i traženih voda. Indeks je definisan kao geometrijska sredina tri indikatora: pouzdanost, obnovljivost i ranjivost sistema (*reliability, resiliency and vulnerability*). U ovom radu predloženo je proširenje definicije indeksa održivosti (u našoj terminologiji *IO*) uvođenjem dva nova indikatora koji takođe bitno opisuju kapacitet i robustnost sistema na dugoročnoj osnovi. Prvi indikator je stepen obezbeđenja godišnje garantovane vode na datoj lokaciji u sistemu (ili za ceo sistem), a drugi je disperzija nivoa jedne ili više akumulacija u odnosu na korespondentne godišnje krive (pravila) upravljanja. Drugi indikator je naročito važan kada u sistemu postoje višenamenske akumulacije kao glavni i najosetljiviji regulatori vodnog režima.

**Ključne reči:** indeks održivosti, pouzdanost, obnovljivost, ranjivost, garantovana voda, disperzija nivoa akumulacija.

### UVOD

Indeks održivosti (*IO*) u ovom radu biće re-definisan analogno indeksu *SI* (*Sustainability Index*) prvi put formulisanom u [6], a zatim dopunjenom u radu Sandoval-Solis et al. [7] tako što su poboljšani sadržaj, struktura i skale da bi se indeks učinio fleksibilnijim za primenu na različite rečne basene i pripadajuće vodoprivredne sisteme. Osnovna namena *IO* jeste da se korisnicima voda i subjektima koji brinu o vodama u rečnom slivu na zbirni način iskaže kakav je efekat alternativnih strategija gazdovanja vodnim resursima na

dugoročnoj osnovi. Drugim rečima, održivost je pitanje identifikovanja mera i akcija koje će očuvati postojeće ili poboljšati karakteristike kompleksa gazdovanja vodom u rečnom slivu u budućnosti. Imajući u vidu da vodoprivredni sistemi mogu biti u hazardnim uslovima (manjkovi vode, poplave, loše upravljanje, konflikti korisnika i dr.), da mogu biti ranjivi na razne načine, *IO* može služiti i kao mera sposobnosti sistema da se adaptira na hazardna stanja i smanji mu se ranjivost. Suština je da se ispita da li je željeno upravljanje sistema održivo, a funkcija *IO* je da pokaže da li pri tavom upravljanju sistem poseduje tehničku, ekonomsku i društvenu robustnost, odnosno sposobnost adaptacije na buduće uslove koje sve više karakterišu nedostaci vode, klimatske promene, promene društvenih ambijenata (npr. urbanizacija), briga o zaštiti životne sredine i dr.

Prema [6], *IO* treba da integriše saznanja o performansi sistema u dugim periodima i da na neki način prikaže stepen ispunjenja ciljeva koje je društvo postavilo pred vodoprivredni sistem, sada i u budućnosti; pri tome, u sistemu je potrebno očuvati integritet ekoloških, hidroloških i drugih uslova, uključujući zaštitu životne sredine. Međutim, pošto su vodoprivredni sistemi po pravilu višenamenski, često sa većim brojem površinskih akumulacija, održivost strategija upravljanja takvim sistemima u dugim periodima je teško odrediti. Problemi su dinamički, hidrološki ulazi su stohastički, procene zahteva za vodom uglavnom nepouzdana, a ambijenti upravljanja su u dobroj meri nepoznati, npr. dometi tehnološkog razvoja. Indeks održivosti treba da omogući poređenje alternativnih upravljačkih strategija za sistem u prisustvu navedenih nepoznanica tako što će obuhvatiti ključne karakteristike performanse sistema i meriti ih u odnosu na željene 'održive karakteristike' sistema.

U radovima [2,3,5-10] date su, sa manjim varijacijama, definicije sledećih indikatora performanse vodoprivrednih sistema na dugoročnoj osnovi za tzv. kritične (hazardne) uslove:

- Pouzdanost (*reliability*) ( $\alpha$ )
- Obnovljivost (brzina obnavljanja) (*resiliency*) ( $\gamma$ )
- Ranjivost (ekstremni deficit) (*vulnerability*) ( $\nu$ )

Postoje i drugi indikatori, ali su gornji najčešće elaborirani i tražene su njihove međuzavisnosti [2,3,5]. Konačni zaključci o reprezentativnosti ili merodavnosti tih indikatora kod izbora strategija upravljanja nisu izvedeni. Međutim, postoji saglasnost da su navedeni indikatori neophodni za sistemsku analizu hazardnih scenarija upravljanja.

U novijim radovima autora [8,9] predloženo je da se vrednovanje dugoročnih scenarija upravljanja sistemom sprovodi korišćenjem navedenih indikatora kao kriterijuma u okviru višekriterijumske analize. Scenario upravljanja je definisan kao ukupni kontekst u kome sistem funkcioniše u dugom vremenskom periodu (npr. do planskog horizonta), a obuhvaćeni su, pored ostalog: pravila upravljanja akumulacijama, preferentne sheme za alokaciju vode, zahtevi za vodom sa mesečnim rasodelama tokom godine, dopušteni deficiti u isporukama (tolerantni manjkovi), hidrološki ulazi (multivarijabilne sekvence istorijskih i stohastičkih dotoka), itd. Za višekriterijumsku analizu predloženo je da se kao kriterijumi koriste još dva indikatora, jedan statistički i jedan operativni:

- Indeks manjka (*shortage index*) ( $I$ )
- Disperzija nivoa akumulacije (*dispersion of reservoir storage levels*) ( $d^d$ )

Indeks manjka je statistička mera frekvencije i veličine godišnjih manjaka u sistemu. Disperzija nivoa akumulacije je mera odstupanja simuliranih nivoa akumulacije od krive upravljanja sa donje strane, odnosno samo kada su nivoi ispod krive upravljanja. Naime, pretpostavka je da je akumulacija u 'dobrom stanju' ako je njen nivo iznad krive upravljanja što odgovara situaciji da ima dovoljno rezerve vode u jezeru. Naravno, odstupanja od krive sa gornje strane mogu se ograničiti pri modeliranju da bi se predvideli uslovi preopterećenja akumulacije pri velikim vodama. Indeks  $d^d$  se može koristiti samo ako u sistemu postoji bar jedna akumulacija.

Višekriterijumska analiza indikatora performanse sistema predložena u [9] implicira održivost jer se

performansa sistema ocenjuje u odnosu na postavljene (željene) uslove, kao što su što manji deficiti u isporukama vode ili što približnije vođenje akumulacija po pravilima (krivama) upravljanja. Kada se za ocenu upravljačkih strategija kao kriterijumi koriste indikatori performanse, njima se dodeljuju težine koje su u većoj ili manjoj meri odraz kompromisa između toga šta je važnije sa stanovišta upravljanja samog po sebi, odnosno njegove održivosti u dugoročnom smislu. Npr., u nekim radovima je jasno pokazano da rast pouzdanosti sistema ne znači da je sistem istovremeno i manje ranjiv. Takođe, sposobnost adaptacije sistema na promenljive hidrološke ulaze nije jednaka po pitanjima obnovljivosti i pouzdanosti, ili stepena obezbeđenja garantovanih voda na svim lokacijama u sistemu. Itd.

## INDEKS ODRŽIVOSTI

Loucks [6] je predložio definiciju indeksa održivosti za  $i$ -ti sistem, ili  $i$ -tu lokaciju u sistemu, kao:

$$IO_i = \alpha_i \cdot \gamma_i \cdot (1 - \nu_i) \quad (1)$$

Definicija uzima u obzir samo indikatore performanse koji se odnose na kritične aspekte rada sistema: pouzdanost ( $\alpha$ ), sposobnost obnavljanja ( $\gamma$ ) i ekstremnost deficita (ranjivost) ( $\nu$ ).  $IO$  ima sledeće osobine: (a) vrednosti su mu između 0 i 1; (b) ako bilo koji od indikatora  $\alpha$ ,  $\gamma$ , ili  $\nu$  ima vrednost 0, održivost će takođe biti 0; (c) implicitno je sadržana informacija o težinama indikatora, jer najniža vrednost nekog indikatora najviše utiče na vrednost  $IO$ . Multiplikacija ukazuje da je svaki indikator važan i nezamenljiv.

Sandoval et al. [7] su 2011 predložili modifikaciju gonje formule. Umesto množenja, predloženo je da se računa geometrijska sredina indikatora:

$$IO_i = [\alpha_i \cdot \gamma_i \cdot (1 - \nu_i)]^{1/3} \quad (2)$$

Ako se indikatori u uglastoj zagradi shvate kao kriterijumi i ima ih  $M$ , a ne samo tri, opšta formula je:

$$IO_i = \left[ \prod_{m=1}^M C_{i,m} \right]^{1/M} \quad (3)$$

U [7] se daje sledeće objašnjenje zašto su formule (2) i (3) bolje od (1):

**Sadržaj:** Mogu se dodavati drugi kriterijumi u skladu sa potrebama analize performanse. Pošto vrednosti  $C_{i,m}$  moraju biti iz opsega (0,1) implicira se da poželjne

vrednosti treba da budu što bliže vrednosti 1. Skaliranje i komplementiranje  $(1 - C_{i,m})$  moraju se izvršiti pre uključivanja u relaciju (3); npr., skalirana ranjivost  $v$  na vrednost između 0 i 1 treba da je što manja da bi vrednost  $(1 - C_{i,m})$  bila što veća.

**Skalarizacija:** Geometrijski osrednjene vrednosti je lakše objasniti. Ako bi za  $i$ -tog korisnika pouzdanost, obnovljivost i ranjivost imali vrednost 0.5 (50%), po formulama (1) i (2) indeks održivosti imao bi redom vrednosti 0.13 i 0.50. Skalarizacija ne skriva informaciju o slabijoj performansi. Njena jedina namena je da učini indeks održivosti praktičnim i intuitivno jasnim. Pošto u formuli (3)  $M$  može biti i veće od tri, množenje više brojeva vrednosti između 0 i 1 smanjuje vrednost  $IO$  što može izazvati zabune u interpretaciji rezultata.

**Fleksibilnost:** Formula za  $IO$  se može primeniti za jednog korisnika, akumulaciju, podsistem ili ceo sistem. Za računanje  $IO$  se od slučaja do slučaja mogu koristiti različiti indikatori performanse  $C$ . Npr., za korišćenje voda u poljoprivredi  $IO$  može sadržati indikatore performanse različite od onih kada se tretira održivost korišćenja voda za gradsko-industrijsko snabdevanje. Naime, održivost ne znači isto za sve vidove korišćenja voda niti za sve korisnike voda. Drugim rečima, indeks održivosti može se prilagođavati korisniku i/ili načinu korišćenja voda.

U tretiranju održivosti išlo se i korak dalje. Tako je u [6] predloženo da se omogući razlikovanje grupa korisnika tako što bi se za grupu  $k$  računao indeks održivosti kao

$$IO^k = \sum_{i=1 \in k}^{i=j \in k} W_i * IO_i \quad (4)$$

gde je  $W_i$  relativna težina  $i$ -tog korisnika koja uzima vrednost 0 do 1, a u zbiru su težine svih korisnika jednake 1. Ako bi  $IO$  svakog korisnika bio otežan na osnovu njegovog godišnjeg zahteva za vodom u odnosu na sve zahteve članova grupe, tada bi formula (4) glasila

$$IO_k = \sum_{i=1 \in k}^{i=j \in k} \frac{D_i}{D_k} * IO_i \quad (5)$$

pri čemu je

$$D_k = \sum_{i=1 \in k}^{i=j \in k} D_i \quad (6)$$

Opisani način definisanja težina korisnika unutar grupe na osnovu godišnjih zahteva za vodom samo je jedna mogućnost. Druge su da svi korisnici mogu imati jednake težine, da težine definišu eksperti (npr. konsultanti), da se uvažavaju političke težine itd.

## KORAK DALJE

U navedenim pristupima računanju indeksa održivosti fokus je bio na kritičnim scenarijima rada vodoprivrednih sistema. O indikatorima performanse sistema u kritičnim ali i normalnim uslovima pisano je u [10]. Pored pouzdanosti, obnovljivosti i ranjivosti, definisani su i pokazatelji performanse indeks manjka i disperzija akumulacionih nivoa, a tretirane su i godišnje garantovane vode i njihova obezbeđenost.

Ovde se polazi od toga da svi scenariji (na koje se odnose pouzdanost, obnovljivost i ranjivost) nisu po intenzitetu niti potpuno niti konstantno kritični, već da su za održivost upravljanja od interesa i drugi, 'blaži', indikatori performanse kao što su već navedeni indeks manjka i disperzija nivoa akumulacija (kada u sistemu ima akumulacija).

Uopšteno posmatrano, indikatori performanse se najbolje računaju u odnosu na stanja sistema, ili delova sistema, deklarisan na neki način kao poželjna ili prihvatljiva ( $A$  – *acceptable*), odnosno nepoželjna ili uslovno rečeno 'stanja ispada iz skupa prihvatljivih stanja' ( $F$  – *failure*).

U mnoštvu mogućih indikatora performanse, korak dalje je da se formule (2) i (3) za računanje održivosti date strategije upravljanja sistemom prošire sledećim indikatorima:

- Disperzija nivoa akumulacija (*dispersion of reservoirs' levels from rule curves*) ( $d^d$ )
- Obezbeđenost godišnje garantovane vode (*reliability of annual firm yield*) ( $\rho^{GGV}$ )
- Standardna devijacija (*standard deviation*) ( $\sigma$ )
- Najveći manjak (*maximum deficit*) ( $D^{max}$ )

Prva dva su fokus ovog rada i predlog autora, treći je naveden u [1,4], četvrti u [5], a oba su referencirana i korišćena u [7].

*Disperzija nivoa akumulacija* je indikator koji se koristi samo kada u sistemu ima akumulacija. Definicija i matematički model ovog indikatora, kao i način njegovog korišćenja, biće detaljnije opisani u sledećoj sekciji na primeru sistema sa dve akumulacije.

Obezbeđenost godišnje garantovane vode ( $\rho^{GGV}$ ) [8,10] može se odrediti za bilo koju lokaciju u sistemu u kojoj se vrši odvođenje vode za neku namenu, ili, što je češće, na izlazu sistema. U prvom slučaju dobija se informacija o mogućnostima dela sistema (npr. date akumulacije sa vodozahvatom), a u drugom, celog sistema da u toku svake godine isporuči količinu vode određene pouzdanosti.

Za određivanje pouzdanosti garantovane vode za lokaciju  $i$  obično se koristi dopustivi manjak u odnosu na garantovanu vodu prema formuli:

$$\rho_i^{GGV} = 1 - \frac{M_i}{GGV_i} \quad (7)$$

$M_i$  može da se definiše na više načina, npr.: (1) kao najveći zabeleženi godišnji manjak i (2) kao prosečni godišnji manjak. Ako su u toku simulacije za lokaciju  $i$  utvrđeni godišnji manjkovi  $m_{i,j}$ ,  $j = 1, \dots, N$ , pri čemu je  $m_{i,j}$  neisporučena voda u odnosu na godišnji zahtev  $D_i$  (jednak u svim godinama), tada se za  $j$ -tu godinu može izračunati razlika

$$m_{i,j} = D_i - \sum_{l=1}^{12} y_{i,l,j} \quad (8)$$

i dopustivi manjak prema prvoj definiciji kao

$$M_i = \max_j m_{i,j} \quad (9)$$

ili prema drugoj definiciji kao

$$M_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N m_{i,j} \quad (10)$$

U oceni pouzdanosti prema (7) i (9), ili (7) i (10), u obzir se uzimaju svi godišnji manjkovi, pri čemu je  $D_i = GGV_i$ .

Garantovana voda se može zadati i unapred, npr. kao godišnji zahtev date raspodele na ulazu simulacionog modela.  $GGV$  i  $\rho^{GGV}$  predstavljaju pokazatelj performanse sistema na dugoročnoj osnovi koji se se može koristiti kao referentni za ostale pokazatelje ponašanja sistema, u višekriterijumskim analizama scenarija upravljanja sistemom, a kada je potrebno i u određivanju indeksa održivosti  $IO$ .

Standardna devijacija date promenljive definiše se i skalarizuje na vrednosti između 0 i 1 na sledeći način [1,4]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\bar{t}_i} * \sqrt{\frac{1}{12(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{12} (y_{i,l,j} - \bar{y}_i)^2} \quad (11)$$

gde su

$$\bar{y}_i = \frac{1}{12N} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{12} y_{i,l,j}, \quad \bar{t}_i = \frac{1}{12N} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{12} t_{i,l,j} \quad (12)$$

U formulama (11) i (12)  $y_{i,l,j}$  je isporučena,  $t_{i,l,j}$  je zahtevana voda na vodozahvatu, a indeksi su:  $i$  – identifikator korisnika vode,  $j$  – godina i  $l$  – mesec. Indikator  $\sigma_i$  se može uvrstiti u formule (2) i (3) za  $IO$  kao još jedan množitelj, tačnije kao komplement  $(1 - \sigma_i)$  pošto je za veću održivost dobro da standardna devijacija bude što manja. U formulama (12),  $\bar{y}_i$  i  $\bar{t}_i$  predstavljaju višegodišnje srednje vrednosti isporučene i tražene vode za  $i$  – tog korisnika.

Najveći manjak je indikator definisan u [5]. To je najveći godišnji manjak koji se za  $i$ -tog korisnika (ili lokaciju) desio u toku intervala dužine  $N$  godina. Skalarizovani indikator je prema

$$D_i^{\max} = \frac{M_i}{D_i} \quad (13)$$

gde je  $M_i$  dat relacijom (9).

Ovaj indikator takođe može biti deo formule za indeks održivosti, nezavisno od ranjivosti, ili kao zamena za ranjivost.

\*

Kompletanija definicija indeksa održivosti bi na osnovu izloženog mogla da glasi: 'Za datu tačku ili sistem u celini indeks održivosti  $IO$  predstavlja meru pogodnosti i adaptabilnosti tačke (akumulacije, vodozahvata, podsistema ili celog sistema) na buduće uslove gazdovanja vodama usled primene određene strategije menadžmenta koja uključuje režime upravljanja, pri čemu se poštuje stohastički karakter i varijabilnost hidroloških i drugih ulaza, kao i konstruktivne i nekonstruktivne mere i akcije koje će omogućiti ispravno funkcionisanje sistema u odnosu na dugoročne ciljeve društva'.

Polazeći od ove definicije, indeks održivosti (dobre) performanse sistema mogao bi se napisati kao

izbalansirani geometrijski osrednjeni proizvod indikatora kritične i normalne performanse sistema:

$$IO_i = [\alpha_i \cdot \gamma_i \cdot (1 - \nu_i) \cdot (1 - d_i^a) \cdot \rho_i^{GGV} \cdot (1 - \sigma_i) \cdot (1 - D_i^{\max})]^{1/7} \quad (14)$$

Napomenimo da je definicija indikatora *dispersije nivoa akumulacije*, odnosno multiplikatora  $(1 - d_i^a)$  u relaciji (14) detaljno opisana u okviru primera u sledećoj sekciji.

Broj članova (multiplikatora) u formuli (14) može se smanjiti u zavisnosti od sistema i problema koji se tretiraju, uz saglasno smanjenje i eksponenta pri geometrijskom osrednjavanju.

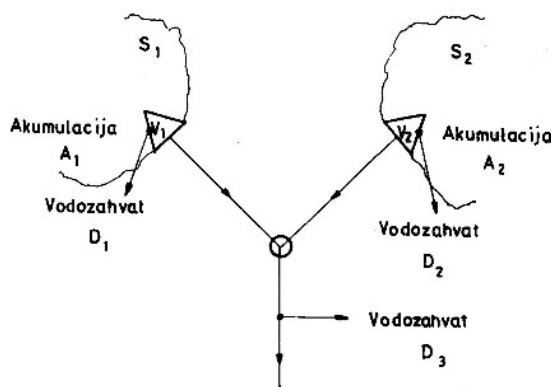
$IO$  dat formulom (14) treba prilagođavati prema sistemu koji se tretira, vrsti scenarija upravljanja, značaju lokacija na kojima se traže vode, preferencama korisnika, vlasnika i upravljača itd. Članovi formule koji se odnose na ranjivost  $\nu$  i maksimalni manjak  $D^{\max}$

samo su delimično redundantni, jer se prvi najčešće računa kao 'produženi' (za ceo period) sintezni pokazatelj, a drugi samo za izolovani 'tačkasti' ekstremni događaj deficita.

Od fundamentalnog značaja za korišćenje formula za indeks održivosti (2), (3) i (14) jeste način tretiranja željenih i neželjenih (A i F) stanja sistema i njegovih delova, što će biti detaljno pokazano na ilustrativnom primeru u sledećoj sekciji rada.

### PRIMER

Sistem čine dve akumulacije u paraleli (A1 i A2) i tri vodozahvata. Iz akumulacije A1 se vrši direktno zahvatanje vode za navodnjavanje (D1), a iz akumulacije A2 vrši se gradsko-industrijsko snabdevanje (D2). Na nizvodnom vodozahvatu koji se kontroliše iz obe akumulacije (D3) vrši se kombinovano navodnjavanje i snabdevanje industrije. Akumulacija A1 ima dvostruko veći aktivni prostor.



Slika 1. Sistem sa dve akumulacije i tri vodozahvata

Simulacija rada sistema vrši se na kompjuterskom modelu na intervalu od 10 godina sa istorijskim ili generisanim sekvencama dotoka sa slivnih površina S1 i S2; koncentrisani dotoci nizvodno od akumulacija su po pretpostavci mali i zanemareni. Globalna upravljačka strategija je:

- Na akumulacijama treba pratiti zadate krive upravljanja sa jednakim prioritetom, nižim od prioriteta lokalnih (D1 i D2) i nizvodnog (D3) vodozahvata.
- Lokalni vodozahvati (D1 i D2) imaju jednak međusobni, a viši prioritet u odnosu na nizvodni vodozahvat (D3).

Indeks održivosti samo strategija upravljanja akumulacijama A1 i A2 može se odrediti kao:

$$IO_{A1} = [\alpha_{A1} \cdot \gamma_{A1} \cdot (1 - d_{A1}^a)]^{1/3} \quad (15)$$

$$IO_{A2} = [\alpha_{A2} \cdot \gamma_{A2} \cdot (1 - d_{A2}^a)]^{1/3} \quad (16)$$

U oba slučaja uvažavaju se dugoroča pouzdanost  $\alpha$  i obnovljivost  $\gamma$  akumulacija u smislu ocenjivanja koliko su često bile u željenom (A) režimu, odnosno koliko su se dugo zadržavale u neželjenom režimu (F), kao i odstupanja nivoa akumulacija  $d^a$  u odnosu na krive upravljanja.

Po analogiji, za vodozahvate se mogu definisati indeksi održivosti ('dobrog snabdevanja korisnika vode D1 i D2 direktnim zahvatanjima iz akumulacija kao i ispuštanjima iz akumulacija za nizvodnog korisnika D3'), npr. kao:

$$IO_{D1} = [\gamma_{D1} \cdot \rho_{D1}^{GGV} \cdot (1 - \sigma_{D1}) \cdot (1 - D_{D1}^{\max})]^{1/4} \quad (17)$$

$$IO_{D2} = [\gamma_{D2} \cdot (1 - \sigma_{D2}) \cdot (1 - D_{D2}^{\max})]^{1/3} \quad (18)$$

$$IO_{D3} = [\gamma_{D3} \cdot \rho_{D3}^{GGV} \cdot (1 - \sigma_{D3}) \cdot (1 - D_{D3}^{\max})]^{1/4} \quad (19)$$

Na prvom i trećem vodozahvatu važan je stepen obezbeđenja godišnje garantovane vode, a na sva tri poželjna je što brža obnovljivost, što niža standardna devijacija isporučenih u odnosu na tražene vode i što manji ukupni godišnji manjak. Određivanje obnovljivosti može se vršiti na osnovu stanja akumulacija ili na neki drugi pogodan način.

U cilju ilustracije, razmotrimo samo podsistem koji čine akumulacija A1 i njen vodozahvat D1 (u daljem tekstu, A1+D1). Na neki od brojnih načina može se definisati kompozitna vrednost tolerancije po kojoj će se u toku simulacije rada sistema u svakom mesecu odrediti koja su stanja podsistema A1+D1 poželjna (A), a koja ne (F).

Neka je na ulazu modela zadata stacionarna kriva upravljanja za akumulaciju  $\bar{x}_l^{A1}$  ( $l = 1, 2, \dots, 12$ ) i neka su tokom simulacije zabeleženi krajnji mesečni zapreminski nivoi  $x_{l,j}^{A1}$ , gde je  $l$  redni broj meseca, a  $j$  je redni broj godine ( $j = 1, 2, \dots, 10$ ). Srednje vrednosti simuliranih nivoa akumulacije u višegodišnjem periodu po kalendarskim mesecima su

$$\bar{x}_l^{A1} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{l,j}^{A1}, \quad l = 1, 2, \dots, 12, \quad (20)$$

a prosečno višegodišnje relativno odstupanje simuliranih  $\bar{x}_{l,j}^{A1}$  od nivoa sa krive upravljanja  $\bar{x}_l^{A1}$  po mesecima je

$$\tilde{x}_l^{A1} = \frac{|\bar{x}_{l,j}^{A1} - \bar{x}_l^{A1}|}{\bar{x}_l^{A1}}, \quad l = 1, 2, \dots, 12. \quad (21)$$

Prosečno relativno odstupanje nivoa akumulacije od krive upravljanja za ceo period (nezavisno od meseca u godini) iznosi:

$$d_{A1}^a = \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} \tilde{x}_l^{A1}. \quad (22)$$

Razmotrimo sada pitanje tolerantnih deficita u smislu nemogućnosti praćenja krive upravljanja (nivoi akumulacije su ispod krive) i nedovoljne isporuke vode na vodozahvatu. Naime, u svakom mesecu u kome je simulirani nivo akumulacije bio ispod krive upravljanja (po pretpostavci da je nivo iznad krive upravljanja do vrha aktivnog prostora poželjan), relativno odstupanje nivoa od krive upravljanja može se računati kao:

$$\varepsilon_{l,j}^{A1} = \frac{|\bar{x}_l^{A1} - x_{l,j}^{A1}|}{\bar{x}_l^{A1}}, \quad l = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, 10. \quad (23)$$

Takođe, ako je za vodozahvat D1 definisan tolerantni manjak po mesecima  $\varepsilon_l^{D1}$ , formulom

$$\varepsilon_{l,j}^{D1} = \frac{|\hat{z}_l^{D1} - z_{l,j}^{D1}|}{\hat{z}_l^{D1}}, \quad l = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, 10 \quad (24)$$

može se u toku celog perioda simulacije računati za svaki mesec relativni manjak isporučene vode na vodozahvatu. U formuli (24),  $\hat{z}_l^{D1}$  je zahtev za vodom u mesecu  $l$  (isti u svim godinama), a  $z_{l,j}^{D1}$  je isporučena voda u mesecu  $i$  godine  $j$ .

Ako se usvoji kompozitna formula za računanje tolerantnog deficita kao

$$\varepsilon_l^{A1+D1} = w_{A1} \cdot \varepsilon_l^{A1} + w_{D1} \cdot \varepsilon_l^{D1}, \quad l = 1, 2, \dots, 12; (w_{A1} + w_{D1} = 1) \quad (25)$$

tada se u svakom mesecu svake godine stanje podsistema A1+D1 određuje preko relacije:

$$\begin{aligned} \text{Stanje A: } & \varepsilon_{l,j}^{A1+D1} \leq \varepsilon_l^{A1+D1}; \\ \text{Stanje F: } & \varepsilon_{l,j}^{A1+D1} > \varepsilon_l^{A1+D1}, \\ & l = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, 10. \end{aligned} \quad (26)$$

U formuli (25) težine  $w_{A1}$  i  $w_{D1}$  asocirane su deficitima na akumulaciji (disperzija nivoa od krive upravljanja) i vodozahvatu, u zbiru daju 1, a mogu se menjati u zavisnosti čemu se više daje značaj pri određivanju da li je performansa podsistema povoljna ili ne.

Neka su 0.08 i 0.20 redom tolerantna odstupanja simuliranih nivoa akumulacije A1 od krive upravljanja van sezone navodnjavanja i u toku sezone navodnjavanja. Prema relaciji (23), ako je  $\varepsilon_{l,j}^{A1} \leq 0.08$  za mesece van sezone navodnjavanja i  $\varepsilon_{l,j}^{A1} \leq 0.20$  za mesece u sezoni navodnjavanja, smatra se da je akumulacija u željenom režimu A. U svim ostalim slučajevima akumulacija je u neželjenom režimu F. Kada se u računanje uključe i simulirane isporuke vode na vodozahvatu i tolerantni manjak na njemu, preko relacija (25) i (26) mogu se identifikovati stanja

podсистema A1+D1 po svim mesecima u toku celog perioda simulacije, na primer kao što je prikazano u Tabeli 1. U srednjem delu tabele su korespodentne vrednosti 0-1 promenljive Z za računanje pouzdanosti podсистema, a u donjem su vrednosti 0-1 promenljive W potrebne (zajedno sa vrednostima za Z) za računanje obnovljivosti prema radovima [2,3,8-10].

Primitimo da promenljiva W uzima vrednost 1 u mesecu kada je podsystem bio u stanju A, a u sledećem mesecu je u stanju F.

Tabela 1. Simulirana poželjna-nepoželjna stanja podсистema A1+D1 i vrednosti 0-1 promenljivih Z i W

Godina (j)	Mesec (l) / Stanje (A,F)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	A	A	F	A	A	A	A	F	A	A	A
2	F	A	A	A	A	A	F	F	A	F	A	A
3	A	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
4	A	F	A	F	A	A	F	A	A	A	A	A
5	F	A	A	A	A	A	F	A	A	A	F	A
6	A	A	A	A	A	F	F	A	A	A	F	F
7	F	A	A	A	A	A	A	A	A	F	A	A
8	A	A	F	A	A	F	A	A	A	A	A	A
9	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
10	A	F	F	A	A	A	F	F	A	A	A	A
(Z)												
1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
2	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
6	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
8	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
Zbir Z	7	8	7	8	10	8	5	8	9	8	8	9
(W)												
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Zbir W	2	2	2	0	2	4	0	1	2	2	0	2

Na osnovu zbirnih vrednosti za promenljive Z i W:

$$\sum_{i=1}^{120} Z_i = 95, \quad \sum_{i=1}^{120} W_i = 19$$

Iako se računaju pouzdanost i obnovljivost podsistema A1+D1:

$$\alpha_{A1+D1} = \frac{\sum_{i=1}^{120} Z_i}{120} = \frac{95}{120} = 0.79,$$

$$\gamma_{A1+D1} = \frac{\sum_{i=1}^{120} W_i}{120 - \sum_{i=1}^{120} Z_i} = \frac{19}{120 - 95} = 0.76.$$

Ako je prema (20)- (22) disperzija nivoa akumulacije A1 na celom intervalu iznosila 0.16, tada indeks održivosti lokalne strategije korišćenja akumulacije A1 (zato što se akumulacija i njen vodozahvat tretiraju kao podsistem celog sistema) dobija vrednost:

$$IO_{A1+D1} = \left[ \alpha_{A1+D1} \cdot \gamma_{A1+D1} \cdot (1 - d_{A1}^a) \right]^{1/3} =$$

$$= [0.79 \cdot 0.76 \cdot 0.84]^{1/3} = [0.50434]^{1/3} = 0.79599$$

Vrednost od približno 80% može se smatrati visokom obnovljivošću strategije upravljanja akumulacijom I vodozahvatom.

Zadavanjem tolerantnih procenata deficita pri ispunjenju zahteva za vodom, odnosno dozvoljenih odstupanja nivoa akumulacija od nivoa sa krivih upravljanja, a zatim kombinovanjem ovih vrednosti na željeni način, mogu se za razne delove sistema i sistem u celini određivati željena i neželjena stanja (A i F), računati svi opisani indikatori performanse sistema i konačno indeksi održivosti prema datim formulama. Ako se posmatraju lokalni, podsistemski i sistemski interesi, na osnovu tabela analognih Tabeli 1 i datih formula mogu se, slično kao gore, izračunati vrednosti indeksa održivosti prikazane u Tabeli 2.

Tabela 2. Indeksi održivosti strategije upravljanja za lokalne tačke, podsisteme i ceo sistem

	$\alpha$	$\gamma$	$d^a$	$\rho^{GGV}$	$\sigma$	$D^{\max}$	$IO$
A1+D1*	0.79	0.76	0.16	-	-	-	0.79599
A2+D2*	0.71	0.68	0.18	-	-	-	0.73428
A1	0.88	0.81	0.16	-	-	-	0.84285
A2	0.78	0.76	0.18	-	-	-	0.78628
D1	-	0.78	-	0.74	0.12	0.25	0.78563
D2	-	0.72	-	-	0.18	0.22	0.77223
D3	-	0.60	-	0.70	0.24	0.34	0.67749
A1+A2+D1+D2+D3**	0.77	0.72	0.24	0.73	0.20	0.30	0.74592

Legenda: \*Oznaka za podsisteme akumulacija i njihovih vodozahvata; \*\*Oznaka za ceo sistem

Ako su prema rezultatima simulacije za sva tri vodozahvata određene standardne devijacije isporučene vode i maksimalni manjkovi, a za vodozahvate D1 i D3 i garantovane vode i stepen njihovog obezbeđenja, tada je indeks održivosti strategije upravljanja sistemom određen kao:

$$IO_s = \left[ \alpha_s \cdot \gamma_s \cdot (1 - d_s^a) \cdot \rho_s^{GGV} \cdot (1 - \sigma_s) \cdot (1 - D_s^{\max}) \right]^{1/6}$$

$$IO_s = [0.77 \cdot 0.72 \cdot 0.76 \cdot 0.73 \cdot 0.80 \cdot 0.70]^{1/6} =$$

$$= 0.74592$$

Napomenimo da su sve numeričke vrednosti u Tabeli 2 samo ilustrativne. Sistemске vrednosti u poslednjoj vrsti Tabele 2 određivale bi se u realnim aplikacijama kao kompozitne, sa odgovarajućim težinama tolerantnih nivoa odstupanja, slično kao u relaciji (25).

## ZAKLJUČAK

Pojam 'održivost' više od dve decenije zauzima značajno mesto u svim sektorima ljudske delatnosti, uključujući i vodoprivredu. Polazeći od analiza dinamičke performanse sistema iskazane indikatorima kao što su pouzdanost, sposobnost obnavljanja i ranjivost, u nekim radovima američkih autora dati su predlozi definisanja održivosti u oblasti planiranja i menadžmenta u vodoprivredi pomoću tih indikatora i eventualno dodatih statističkog indikatora standardne devijacije i maksimalnog deficita kao alternative za ranjivost. Najpre direktnim multiplikovanjem indikatora [6], a kasnije njihovim geometrijskim osrednjanjem [7], uvedena je veličina nazvana indeks održivosti (*sustainability index*). Prema inoviranoj definiciji [7], posle odgovarajućih skalarizacija, vrednost ovog



indeksa se može kretati samo u rasponu od 0 do 1. Donja granična vrednost je realnost, jer ako bi bilo koji indikator bio jednak nuli, indeks održivosti bi takođe bio nula. Gornja granična vrednost je samo teorijska, a razlozi su očigledni.

U ovom radu je tretirano pitanje održivosti upravljačke strategije za višenamenski vodoprivredni sistem sa akumulacijama i predloženo je proširenje ranije definisanih oblika indeksa održivosti [6,7] uvođenjem tri nova indikatora: (1) skalarizovane vrednosti godišnje garantovane vode, (2) stepena obezbeđenja garantovane vode i (3) disperzije nivoa akumulacija od njihovih krivih upravljanja. Prva dva indeksa opisuju kapacitivnu vrednost sistema, a treći pokazuje koliko je realno očekivati da će akumulacije, kao najvažniji upravljački i regulatorni deo sistema, omogućiti realizaciju zadate strategije upravljanja i ukupnog menadžmenta voda.

Kontekst tretiranja pitanja održivosti u ovom radu je planiranje. Izložen sistemski pristup i razvijeni matematički instrumentarij podrazumevaju da se mora koristiti kompjuterski simulacioni model vodoprivrednog sistema, da njegove ulaze moraju činiti krive upravljanja, hidrologija, zahtevi za vodom i preferentne sheme za distribuciju i alokaciju voda na dugim vremenskim intervalima sa mesečnom diskretizacijom.

Prikazani ilustrativni primer služi da približi čitaocu opšte definicije prikazane u radu i pokaže da se opšte postavke mogu lako prilagoditi konkretnim uslovima da bi se ocenila održivost upravljanja vodama u lokalnoj tački, u podsistemu ili u celom sistemu.

Autori veruju da će dalja istraživanja pokazati koliko indikatora je optimalno uključiti u praćune indeksa održivosti jer sa povećanjem broja multiplikatora, objektivna održivost realno opada. Takođe, istražiće se koje mogućnost nudi fazi teorija i sistemi sa svojim merama i logičkim operatorima maxmax, maxmin itd.

## 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] Cai X., McKinney D.C., Lasdon L.S. (2002): A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya basin. *Water Resources Research* 38(6): 1085–1098.
- [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] Hirsch, R. M. (1979): *Synthetic hydrology and water supply reliability*. *Water Resources Research* 15(6): 1603–1615.
- [5] Moy W.S., Cohon J.L., Revelle 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.
- [6] Loucks D.P. (1997): *Quantifying trends in system sustainability*. *Hydrologic Science Journal* 42(4): 513–530.
- [7] Sandoval-Solis S., McKinney D.C., Loucks D.P. (2011): *Sustainability Index for Water Resources Planning and Management*. *Water Resources Planning and Management* 2011: 381-390.
- [8] Srđević B., Srđević Z. (2016): *Vodoprivredna sistemka analiza - sa primenama u menadžmentu vodnih resursa*, str. 321. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [9] Srđević B., Srđević Z. (2016): *Višekriterijumska analiza indikatora dugoročne performanse vodoprivrednih Sistema*. Prijavljeno za časopis *Vodoprivreda*.
- [10] 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.

## NEW INDICATORS IN COMPUTING SUSTAINABILITY INDEX FOR WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT

by

Zorica SRĐEVIĆ, Bojan SRĐEVIĆ  
University of Novi Sad, Faculty of Agriculture  
Dept. of Water Management, Group for Systems Analysis and Decision Making  
E-mails: {srdjevicz, bojans}@polj.uns.ac.rs

### Summary

Sandoval-Solis, McKinney and Loucks proposed in [7] general definition of sustainability index (SI) as a measure of how efficient is the water management on a long-term basis. Focus has been put on consequences of dis-balance of available and required waters, and SI is defined as geometric mean of performance indicators known as reliability, resiliency and vulnerability. As an extension of originally proposed SI, in this paper we propose to introduce two more indicators of system's

performance, namely: reliability of annual firm yield and dispersion of reservoirs' levels from corresponding rule curves. The second indicator is of particular importance if there are reservoirs in the system, because reservoirs are the most important and the most sensitive regulators of the water regime within the system.

**Keywords:** sustainability index, reliability, resiliency, vulnerability, firm water, dispersion of reservoir levels.

Redigovano 08.11.2016.