

MREŽNI MODEL ACQUANET U VODOPRIVREDNOJ SISTEMSKOJ ANALIZI

Senka BUBULJ, Bojan SRĐEVIĆ
Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet
Departman za uređenje voda
Grupa za sistemsku analizu i donošenje odluka
Novi Sad

REZIME

Rad daje prikaz mogućeg sistemskog pristupa problemu analize više scenarija upravljanja akumulacijama sa višestrukim namenama, simuliranog jednim od poznatih mrežnih modela za velike vodoprivredne sisteme. Višekriterijumski se ocenjuju scenariji dodele vode korisnicima za različite namene, a kao kriterijumi se koriste savremeni pokazatelji dinamičke performanse sistema. Simulacije preferentnih shema alokacije vode (scenarija upravljanja) vršene su na kompjuterskom modelu ACQUANET. Za usvojene skupove konstruktivnih, hidroloških i drugih podataka i operativne strategije upravljanja vodama (na bazi prioriteta), rezultati modela su izdvojeni iz izlaznih datoteka modela i korišćeni su za proračune indikatora performanse i dalju ocenu strategija upravljanja. U matrici odlučivanja, na koju su primenjena dva jednostavnija višekriterijumska metoda, za kriterijume su usvojeni indikatori, a njihove vrednosti po scenarijima su usvojene kao parametarski skup koji determiniše alternative upravljanja sistemom. Varirane su različite težine indikatora performanse (pouzdanost, obnovljivost i ranjivost) i diskutovane su posledice primene različitih prioriteta shema alokacije vode na akumulacije, poljoprivredne i industrijske zahteve. Izvedeni zaključci ukazuju na metodološku povezanost modela koji simuliraju rad kompleksnih višenamenskih sistema i višekriterijumskog ocenjivanja strategija upravljanja sistemom na bazi simulirane performanse sistema, sve u okvirima savremene vodoprivredne systemske analize.

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

UVOD

Vodoprivreda se ukršta sa mnogo privrednih grana i suočava se sa nizom konfliktnih međuzavisnih interesa korisnika usluga, donosilaca strateških politika i operativnih odluka. Metodi modeliranja i analize rada vodoprivrednih sistema pomoću mrežnih simulacionih, optimizacionih i mešovitih modela nezaobilazni su u svim poslovima planiranja i upravljanja vodoprivrednim sistemima. Suštinski su značajni za korišćenje voda u rečnom slivu [5,25] i pri donošenju planova gazdovanja vodama jer mogu podržati procese donošenja odluka o mogućim scenarijima alokacije voda po vremenu, prostoru i namenama. Planiranje i upravljanje vodoprivrednim sistemima sa akumulacijama je posebno složeno jer treba uvažiti fizičke karakteristike akumulacija kao glavnih regulatora čuvanja i ispuštanja vode, odnosno kontrolisanja dela hidrološkog režima u slivu. Da bi se zadovoljili zahtevi za vodom, pored fizičkih karakteristika akumulacija, u planerskim modelima moraju se poštovati i operativne strategije održavanja nivoa vode po mesecima. Obično su to krive upravljanja ili tzv. šeme zoniranja, a intervalima kao rezultat se mogu izračunati razni pokazatelji dinamičkog ponašanja sistema. Time se može dobiti uvid u posledice primenjenih prioriteta shema isporuke vode, naročito ako interfejs modela obezbeđuje dobar grafički i tabelarni prikaz ulaznih podataka i rezultata.

Sistemski pristup i analiza tokom modeliranja imaju funkciju da pruže informaciju o alternativama razvoja i upravljanja planiranim vodoprivrednim sistemom. Alternative mogu biti šeme upravljanja, prioritizacija korisnika po vremenu i prostoru, promenljivost količina vode na 'ponudi' (raspoloživost) i potražnji (zahtevi), bilansiranja voda po sektorima, podsistemima, lokalitetima itd.

Postoje brojni modeli za simulaciju rada vodoprivrednih sistema na različitim nivoima detaljnosti modeliranja, namene za analize u okvirima metodologija sistemske analize itd. Solidan pregled ovih modela može se naći u [15].

Osnova za ovaj rad bio je kompjuterski mrežni model/softver ACQUANET. Ilustrovano je kako se model može iskoristiti za kombinovanu simulaciju i optimizaciju rada višenamenskog vodoprivrednog sistema za različite preferentne sheme alokacije vode korisnicima. Mešoviti koncept modela je da se u svakom mesecu optimizira alokacija vode linearnim programiranjem, a da se prenosom informacija o bilansu voda iz meseca u mesec zapravo vrši simulacija sa realističnom pretpostavkom da su hidrologija sliva i svi zahtevi za vodom (uključujući i željene nivoe u akumulacijama) poznati samo za mesec dana unapred. Model je strogo deterministički. Koncept modela je realizovan kao kompjuterski program SIMYLD-II [18] napisan početkom sedamdesetih godina 20. veka u saradnji teksaškog Univerziteta u Ostinu (Texas University – Austin) i Fonda za razvoj vodnih resursa Teksasa (Texas Water development Board). Ovaj program je nekoliko godina kasnije instaliran i u Srbiji i uspešno primenjen za potrebe simulacije rada sistema sa 7 akumulacija u slivu Zapadne Morave [8,16,18].

Pristup dugoročnom planiranju alokacije vode na osnovama mrežnog modeliranja vodoprivrednih sistema razvijen je u Departmanu za uređenje voda Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu za hidrosisteme u slivu Nadele [3] i Krivaje [1,4,20] u Vojvodini. Postavljena su dva modela ACQUANET/N i ACQUANET/K kao reprezentivi postojećih hidrosistema, i u skladu sa hidrološkim, meteorološkim i prostornim karakteristikama Vojvodine. Rezultati modeliranja pokazali su ispravnost posmatranog pristupa u menadžmentu voda [3,4,20].

ACQUANET je uprošćena verzija američkog modela MODSIM razvijenog u Fort Kolinsu polovinom osamdesetih godina 20. veka na državnom univerzitetu Kolorada (Colorado State University – Fort Collins) [9]; preteča ovog modela je pomenuti model SIMYLD-II. ACQUANET je razvijen u laboratoriji LabSid, na Univerzitetu San Paulo u Brazilu [10]. Grafički korisnički interfejs modela omogućava formiranje topologije sistema, a softver zatim automatski transformiše 'fizičku' topologiju sistema u 'veštačku' mrežu zatvaranjem polazne topologije veštačkim čvorovima i granama. Schematizacija sistema se vrši tako da su elementi sheme (topologije) sve akumulacije,

vodotoci, tačke spajanja vodotokova i čvorovi na kojima se definišu zahtevi za vodom. Shema fizičkog sistema (koju kreira korisnik preko vizuelno efektnog interfejsa), softverski se zatvara i generiše se kapacitivna mreža (koju korisnik ne vidi). Svi elementi veštačke mreže su klasični čvorovi i grane za koje se parametri automatski generišu na bazi podataka o akumulacijama, protočnim kontrolnim tačkama na vodotocima, vodozahvatima i hidrologiji u slivu. Suština modeliranja je da se svi strukturni elementi sistema automatski transformišu u čvorove i grane sa generisanim parametrima (kapaciteti i jedinične cene transporta vode) na osnovu konfiguracije sistema, hidroloških ulaza (dotoka vode), pravila upravljanja na akumulacijama, zahteva za vodom, prioriteta u isporukama vode i dr. Kada se na početku datog meseca konfiguriše veštačka mreža, specijalnim mrežnim algoritmom out-of-kilter rešava se klasični transportni problem minimizacije cene toka vode kroz mrežu. Upravljanje akumulacijama vrši se po stacionarnim pravilima upravljanja koja su fiksirana za ceo simulacioni period. Pravila se, između ostalog, tretiraju kao zahtevi za vodom, a alokacija vode se vrši po unapred zadatoj prioritetoj shemi. Grafički ili tabelarno prikazani rezultati simulacije sadrže informacije o primenjenoj strategiji upravljanja sistemom, odnosno o isporučenim količinama vode korisnicima, pojavama deficita u isporuci vode, kritičnim mesecima u godini, ispunjenosti akumulacija, eventualnim pojavama viška vode u delovima sistema i sl. Matematički model ACQUANET-a (LP deo) je opisan u [8-10,16,20,21]. Softver se sa pratećim uputstvima može besplatno preuzeti sa adrese na internetu <http://www.labsid.eng.br/>. Interfejs modela je alternativno na engleskom i portugalskom jeziku.

ACQUANET I SISTEMSKA ANALIZA DINAMIČKE PERFORMANSE SISTEMA

U ranijim radovima [6-7,11-12,21] predloženi su brojni indikatori performanse višenamenskih sistema. Kasnije je predloženo da se neki od indikatora koriste kao kriterijumi za ocenu održivosti upravljanja sistemima [14,23]. U novijim radovima, npr. [19,22] pokazano je da se indikatori mogu tretirati kao kriterijumi, a vrednosti indikatora performanse kao rejtinzi scenarija alokacije vode, te da se višekriterijumskom analizom iz odgovarajuće matrice odlučivanja mogu generisati rangovi scenarija upravljanja vodama, odnosno vrednovati različite prioritete sheme alokacije vode. Ako se definišu i različite sheme prioriteta indikatora kao kriterijumi, pokazano je da su moguće analize

osetljivosti rešenja primene različitih strategija upravljanja na više nivoa planiranja.

Od ranije su poznate definicije indikatora performanse sistema publikovane u radovima [6,7,12]. Pored indikatora koje je kao moderne uveo u teoriju i praksu systemske analize Hashimoto [6,7], u [22] su uvedena još tri indikatora: (1) skalarizovana vrednost godišnje garantovane vode, (2) stepen obezbeđenja garantovane vode i (3) disperzija nivoa akumulacija od pravila upravljanja. Novija istraživanja kao rezultat dala su koncept održivosti dinamičke performanse iskazane indikatorima kako je to prikazano u radovima [14,23]. Rad [19] prikazao je rezultate višekriterijumskog tretiranja i analize proširene liste indikatora, pri čemu su kao alternative korišćeni rejtnzi scenarija upravljanja simuliranih na modelu ACQUANET.

Nastavljajući ranija istraživanja, u radu je na ilustrativnom nivou opisano kako se ACQUANET može iskoristiti za višekriterijumsku analizu pomoću metoda SAW (Simple Additive Weighting) i SPW (Simple Product Weighting) za ocenu dugoročne performanse višenamenskog vodoprivrednog sistema sa dve akumulacije i tri nizvodna lokaliteta na kojima su različite kategorije zahteva za vodom. Na kraju višestrukih simulacija/optimizacija i računatih indikatora dugoročne performanse sistema za različite scenarije alokacije vode, po navedena dva metoda ocenjivan je kvalitet scenarija i ukazano je na efekte mogućih rangiranja scenarija.

Simulacije su vršene na intervalu od 10 godina za različite prioritetne sheme alokacije vode na akumulacije i korisnike (scenariji upravljanja). Rezultati modela ACQUANET su interpretirani dopunskim proračunima karakterističnim za ciljanu systemsku analizu – određivanjem najbolje prioritetne sheme (scenarija) za raspodelu voda u sistemu. Strukturne i operativne karakteristike sistema obuhvaćene su poštovanjem: (1) fizičkih karakteristika sistema (kapaciteti akumulacija i kapaciteti rečnih tokova), (2) zadatih prioriteta u praćenju pravila upravljanja akumulacijama i zadovoljenja zahteva za vodom i (3) pretpostavljenog početnog stanja ispunjenosti akumulacija. Posle završenih simulacija računati su indikatori performanse (pouzdanost, obnovljivost i ranjivost) na tačkama sa definisanim poljoprivrednim i industrijskim zahtevima za vodom. Indikatori su usvojeni kao kriterijumi za ocenu performanse sistema na odabranim lokacijama zahteva. U matrici odlučivanja indikatori su postavljeni kao kolone, a scenariji kao alternative (vrste). Na vrednosti indikatora po

scenarijima primenjena su oba metoda, SAW i SPW, a zatim su za različite težine kriterijuma rangirani scenariji i diskutovani rezultati.

INDIKATORI PERFORMANSE SISTEMA

Za ocenu kvaliteta simulirane strategije alokacije vode u datom sistemu mogu se koristiti brojni statistički i drugi indikatori. Pomoću njih je moguće tumačiti rezultate primenjene strategije na različitim nivoima (operativno i strateški) i za različite elemente sistema (za izolovane podsysteme i za kompletne sisteme) (videti npr. [5,22]). Ovde su ciljano (kao kontinuitet ranijih radova drugog autora) korišćena tri indikatora: pouzdanost (rizik), obnovljivost (rezilijentnost) i ranjivost (vulnerabilnost) [6,7,22].

Pouzdanost

Jedna od najčešćih definicija pouzdanosti jeste da ona predstavlja verovatnoću nalaženja sistema u tzv. povoljnom stanju. Ideja je da se tretira sledeća situacija: u višegodišnjem periodu sa jediničnim intervalima od mesec dana, na jednom ili više lokaliteta u sistemu (uključujući i akumulacije) na kojima su specificirani zahtevi za vodom, mogući su manjkovi vode. Ako se definiše tolerantni manjak (npr. do 10% od zahteva), za svaki pojedinačni mesec se prema ishodu simulacije trajanja $12N$ meseci (N je broj godina) utvrđuje da li je na datom lokalitetu zahteva performansa sistema bila zadovoljavajuća (manjak manji od 10%). U slučaju akumulacije, zadovoljavajuće stanje zapremine akumulacije moglo bi biti deklarirano ako je odstupanje od pravila upravljanja do 15%. Kada je stanje u bilo kom od navedenih slučajeva zadovoljavajuće (A), odgovarajući brojač meseci sa zadovoljavajućim stanjima n_A uvećava se za 1, proverava se status na celom intervalu simulacije i zbir 'zadovoljavajućih stanja' deli se sa ukupnim brojem meseci:

$$\alpha = \frac{n_A}{12N} \quad (1)$$

Očigledno je da što je veća vrednost α , pouzdanost isporuke vode na datom lokalitetu zahteva je veća. Vrednost indikatora je u intervalu $[0, 1]$ isto kao vrednost indikatora rizika r koji se može smatrati 'suprotnim' pouzdanosti i računati kao:

$$r = 1 - \alpha = 1 - \frac{n_A}{12N} \quad (2)$$

Analogno gore, smanjenjem pouzdanosti povećava se rizik.

Pouzdanost se može formalizovati matematički uvođenjem promenljive Z koja uzima vrednost 1 ili 0 na sledeći način:

$$\begin{aligned} \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \quad (X_i \in A) &\rightarrow Z_i = 1 \\ \varepsilon > \varepsilon_{\max} \quad (X_i \in F) &\rightarrow Z_i = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Ovde su ε i ε_{\max} simulirani i dopustivi (tolerantni) manjak, a X_i je indikacija da li je sistem ili lokalitet zahteva u mesecu i u stanju koje je zadovoljavajuće (A) ili nezadovoljavajuće (F). Pouzdanost i rizik se analogno relacijama (1) i (2) mogu zapisati kao (4) i (5).

$$\alpha = \frac{1}{12N} \sum_{i=1}^{12N} Z_i \quad (4)$$

$$r = 1 - \frac{1}{12N} \sum_{i=1}^{12N} Z_i \quad (5)$$

U ilustrativnom primeru opisanom u sledećem poglavlju, povoljno stanje je u svim slučajevima definisano kao strog uslov – da nema tolerantnog manjka. Drugim rečima, u relaciji (1) n_A je broj meseci kada je zahtev bio u potpunosti zadovoljen, a N je broj godina simulacije. Napomena: Ako se pouzdanost isporuke vode analizira na lokalitetu sa poljoprivrednim zahtevom, tada zbog skraćanja perioda isporuke vode (koji traje samo tokom vegetacionog perioda od aprila do septembra) u imeniocu relacije (1) ukupan broj meseci simuliranog rada sistema iznosi $6N$.

Obnovljivost

Obnovljivost je indikator brzine vraćanja sistema iz nepovoljnog u povoljno stanje. Kao što je naglašeno u [19] 'duže ostajanje sistema u nepovoljnog stanju predstavlja duže nezadovoljenje zahteva za vodom, što može biti ozbiljniji problem nego 'intenzitet' nezadovoljenja'. Računanjem ovog indikatora stiče se neposredniji uvid u dinamičku performansu sistema i omogućava se ocena primenjene strategije alokacije vode u odnosu na trajanje i pojavu malovodnih režima u sistemu ili na datoj lokaciji u sistemu (npr. lokalitetu zahteva za vodom za navodnjavanje u poljoprivredi).

Sporost prelaženja iz nepovoljnog u povoljno stanje može značiti da odabrana strategija upravljanja nije dobra, i obrnuto. Obnovljivost sistema može se

definisati polazeći od matematičkih postavki i izvođenja kao kod određivanja indikatora pouzdanosti [15,19].

Obnovljivost je:

$$\gamma = \frac{\rho}{1 - \alpha} = \frac{P\{X_i \in A, X_{i+1} \in F\}}{P\{X_i \in F\}} = \frac{\sum_{i=1}^{12N} W_i}{12N - \sum_{i=1}^{12N} Z_i} \quad (6)$$

gde je W_i promenljiva koja uzima vrednosti 0 ili 1 tako da omogućava identifikaciju prelaza iz stanja A u stanje F:

$$\begin{aligned} X_i \in A, X_{i+1} \in F &\rightarrow W_i = 1 \\ W_i = 0 &\text{ u svim ostalim slučajevima*} \end{aligned} \quad (7)$$

(* ostali slučajevi su:

$$X_i \in A, X_{i+1} \in A; X_i \in F, X_{i+1} \in A; X_i \in F, X_{i+1} \in F)$$

Veća vrednost ovog indikatora ukazuje da se sistem brže vraća iz nepovoljnog u povoljno stanje.

Ranjivost

Ovaj indikator predstavlja meru koliko je sistem 'duboko' u nepovoljnog stanju (F) jednom kada se već našao u takvom stanju. Ovaj indikator se još naziva ekstremnim deficitom i vezuje se za veličinu manjka vode u sistemu. Definicija indikatora ekstremnog deficita ne iskazuje koliko dugo je sistem bio u nepovoljnog stanju, već koliko ozbiljne posledice mogu biti kada sistem dođe u nepovoljno stanje. Izračunavanje indikatora u ilustrativnom primeru u celini je vršeno na način opisan u radu [19].

Ako se događaj Ω , kada je sistem bio u nepovoljnog stanju, posmatra kao složeni događaj koji je formiran od k uzastopnih elementarnih događaja ω_r , gde je ω_r pojava deficita vode u r -tom mesecu u celom sistemu ili, npr., na lokalitetu poljoprivrednog ili industrijskog zahteva, tada je:

$$\Omega = \{\omega_l, \omega_{l+1}, \dots, \omega_r, \dots, \omega_{l+k}\} \quad (8)$$

gde svaki deficit ω_r izražen u m^3/s može biti preračunat na nivou meseca u zapreminu $V(\omega_r)$. Za događaj Ω 'zapreminska' relacija glasi:

$$V(\Omega) = V(\omega_l) + V(\omega_{l+1}) + \dots + V(\omega_r) + \dots + V(\omega_{l+k}) \quad (9)$$

Tokom N godina, odnosno u periodu od $12N$ meseci (npr. za lokaciju industrijskog zahteva) i $6N$ meseci (za lokaciju poljoprivrednog zahteva), može se desiti L

događaja kada je sistem bio u nepovoljnim stanjima tipa Ω .

Ako se za svaki pojedinačni događaj iz skupa od L događaja identifikuje vrednost:

$$V_l^{max} = \max V(\omega_r) \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

gde V_l^{max} označava maksimalni pojedinačni mesečni manjak vode u nizu od k uzastopnih manjaka koji čine događaj Ω , tada se indikator ekstremnog deficita ν može se izračunati kao srednja vrednost:

$$\nu = \left(\frac{1}{L} \sum V_l^{max} \right) / D \quad (11)$$

U relaciji (11) D predstavlja maksimalni mesečni zahtev u toku ukupnog perioda simulacije. Vrednost indikatora ranjivosti je u opsegu od 0 do 1, kao i u slučaju dva prethodno navedena indikatora. Veća vrednost ν ukazuje na ranjiviji sistem.

VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA

Višekriterijumski metodi, realizovani kao softverski programi ili moduli sistema za simulacije, optimizacije i analize, čine sastavni deo savremene systemske analize kao bitna podrška procesa odlučivanja. Zajedničko svim metodima u ovom domenu jeste da se najčešće moraju rešavati situacije kada ima mnogo kriterijuma i/ili alternativa, kada su različite metrike uglavnom međusobno nekomparabilnih kriterijuma, kada su konteksi odlučivanja individualni i grupni i dr. [2,15]. Na primer, česta je situacija da postoje delimično ili potpuno konfliktni kriterijumi, ili da su njihove jedinice mera neuporedive. Mere su često kvalitativne (npr. skale), kvantitativne (npr. protoci u m^3/s) ili 'sive' (deo informacija poznat, a deo nije) i tada je izbor metoda sam po sebi predmet odlučivanja.

Višekriterijumska analiza u svom središtu ima vrednovanje alternativa u odnosu na odabran skup kriterijuma, poštujući pri tom principe nadređenosti ili ravnopravnosti elemenata hijerarhijske strukture problema. Težine kriterijuma i težine alternativa kada se određuju kao kardinalne vrednosti, nose kvalitetnu informaciju o važnosti ('dobroti') tih elemenata odlučivanja. Kada se višekriterijumskom metodom analiza usmerava na ordinalne vrednosti (rangove), informacija je selektivna, npr. u smislu da se ne mogu direktno izvoditi zaključci o kvantitativnoj alokaciji resursa na osnovu rangova. Poznata su i ograničenja šta se i kako može računati sa kardinalnim, a šta sa ordinalnim vrednostima u višekriterijumskim analizama

ili optimizaciji. Npr., rangovi se mogu sabirati ali se ne mogu množiti, a kardinalne vrednosti mogu i jedno i drugo. Neke od podela višekriterijumskih metoda zasnivaju se na dobijanju rangova ili težina elemenata odlučivanja; primer za prvu klasu je CP (Compromise Programming) [26], a za drugu je AHP (Analytic Hierarchy Process) [13].

Kada se nekim od metoda odrede konačni rangovi alternativa u odnosu na dati cilj (putem kriterijuma), oni se mogu koristiti pojedinačno ili zajedno (u zavisnosti od vrste problema). U slučajevima kada se analizira 'dobrota' različitih scenarija upravljanja vodama, često je dovoljno da se analizira lista rangova scenarija.

Iz skupa od nekoliko desetina poznatijih metoda višekriterijumske analize, ovde su izdvojena dva popularna metoda koji su u mnogim primenama u vodoprivredi davali dobre rezultate. Karakteriše ih jednostavnost, a daju pouzdane rezultate kao i mnogi komplikovaniji metodi.

Aditivni i produktni metod

Aditivni i produktni metod (engl. Simple Additive Weighting – SAW; Simple Product Weighting – SPW) su višekriterijumski metodi koji se primenjuju direktno na matricu odlučivanja. Kada problem ima m kriterijuma i n alternativa, prvo se formira matrica odlučivanja dimenzije $n \times m$. Vrste su alternative i kriterijumi su kolone, poznate su sve težine kriterijuma (koje u zbiru daju 1), a rejtinzi alternativa po kriterijumima su realni brojevi istih ili različitih metrika. Oba metoda se realizuju u tri koraka. Prvo se normalizuju rejtinzi alternativa u svakoj koloni. Zatim se normalizovane vrednosti u svakoj koloni množe težinom za kriterijum kome je asociirana ta kolona. U poslednjem koraku se po vrstama sabiraju dobijene vrednosti i posle finalne normalizacije dobijenih suma po vrstama, po obrascu (12) izračunava se vrednost S za svaku alternativu [17]. Najbolja alternativa je alternativa sa najvećom vrednošću S .

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

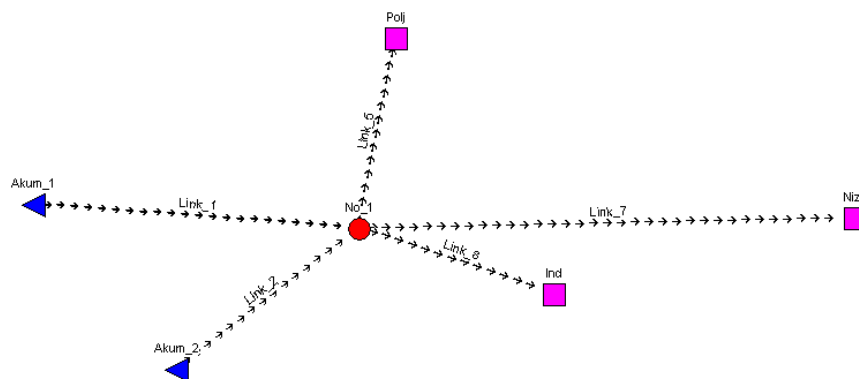
Kod produktnog metoda normalizacija nije neophodna i koristi se relacija (13).

$$S_i = \prod_{j=1}^m (r_{ij})^{w_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Najbolje rangirana alternativa jeste alternativa sa najvećom vrednošću S .

PRIMER

Sistem prikazan na Slici 1 čine dve paralelne akumulacije i tri lokaliteta na kojima postoji zahtev za vodom.



Slika 1. Sistem sa dve akumulacije i tri tačke zahteva modeliran u ACQUANET-u

Sistem ima sledeće konfiguracijske, kapacitivne i druge karakteristike:

AKUMULACIJE

Zapremine

Akum_1: Max = 100 Mm³; Min = 10 Mm³;
Initial (početna) = 50 Mm³.

Akum_2: Max = 120 Mm³; Min = 10 Mm³;
Initial (početna) = 60 Mm³.

Dotoci

Mesečni (koncentrisani) dotoci vode postoje samo na akumulacijama i kreću se od 0,5 do 5,0 m³/s za akumulaciju Akum_1, odnosno 1,5 do 6,0 m³/s za akumulaciju Akum_2. Distribucije mesečnih dotoka su zadate prema procenjenim uslovima hidrologije u Srbiji.

Pravila upravljanja akumulacijama

U svim mesecima i svim godinama 1.0 (100% pune akumulacije).

Neto-isparavanje sa površina akumulacija

Zanemareno.

ZAHTEVI ZA VODOM

POLJ: Zahtev je poljoprivredni, sa stalnom unutargodišnjom mesečnom distribucijom (april-septembar: 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 20%). Godišnji zahtevi u 10-godišnjem periodu su: 30, 40, 60, 60, 70, 70, 80, 90, 90 i 100 Mm³.

Korišćenjem mrežnog kompjuterskog modela ACQUANET simulira se rad sistema u periodu od 10 godina sa mesečnom diskretizacijom vremena.

IND: Zahtev za vodom je industrijski, po godinama jednak i iznosi 50 Mm³ sa stalnom unutargodišnjom distribucijom (oktobar-januar po 4%; februar-maj po 6%; jun-septembar po 15%).

NIZV: Zahtev za vodom je zahtev nizvodnih korisnika od 1 m³/s. Konstantan je tokom celog perioda.

LINKOVI

Neograničen maksimalni kapacitet (1000 m³/s) i minimalni kapacitet (0 m³/s) linkova koji povezuju elemente sistema.

SCENARIJI

Simulacije su izvršene za pet prioriternih shema alokacije vode po opadajućim i jednakim prioritetima:

S1: Akum_1 > Akum_2 > Polj > Ind > Nizv

S2: Akum_1 = Akum_2 > Ind > Polj > Nizv

S3: Akum_2 > Akum_1 > Nizv > Polj > Ind

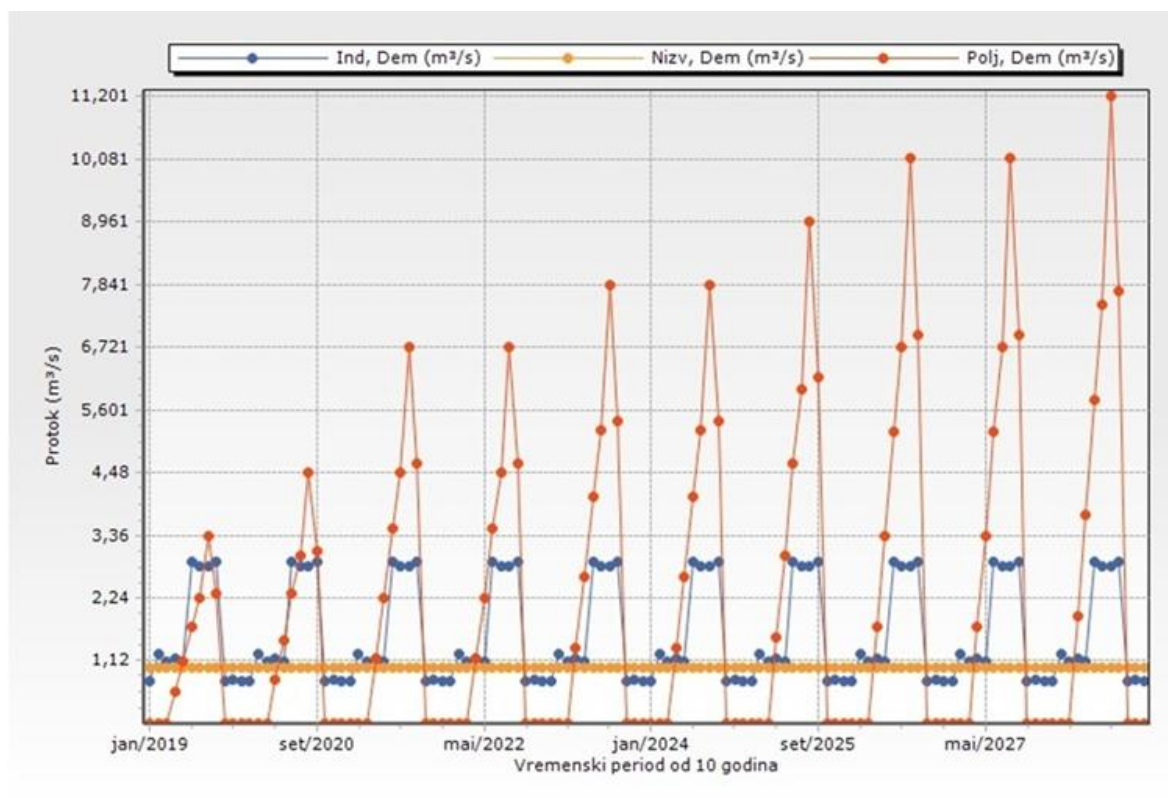
S4: Akum_1 = Akum_2 > Polj = Ind = Nizv

S5: Akum_1 = Akum_2 > Polj > Ind > Nizv

Zahtevi na lokacijama zahteva za vodom nisu jednako raspoređeni na mesečnim i godišnjim nivoima (Slika 2). Poljoprivredni zahtev treba ispuniti samo tokom vegetacionog perioda koji traje od aprila do septembra. Poljoprivredni godišnji zahtev za vodom raste iz godine u godinu, od 30 do 100 miliona m³. Industrijski zahtev za vodom je u svakoj godini simulacije jednak i iznosi 50 miliona m³. Isporuka vode na tačku industrijskog zahteva je sa stalnom unutargodišnjom

distribucijom, različita na mesečnim nivoima. Zahtev nizvodnih korisnika se tretira kao ekološki minimum od $1 \text{ m}^3/\text{s}$, konstantan je tokom celog perioda simulacije; ovaj zahtev je volumetrijski manji od poljoprivrednog i industrijskog zahteva. Dotoci u obe akumulacije zadati su proizvoljno, na osnovu realnih inženjerskih procena stanja hidrologije u Srbiji.

Pravilo upravljanja je pojednostavljeno u smislu da akumulacije treba puniti do maksimalnog kapaciteta kada god ima dovoljno vode, a poštujući prioritete kako su gore dati za svaki od pet scenarija upravljanja; princip raspodele je da se svakom korisniku (i akumulaciji) dodeljuje voda do maksimalne tražnje u skladu sa prioritetsnom shemom.



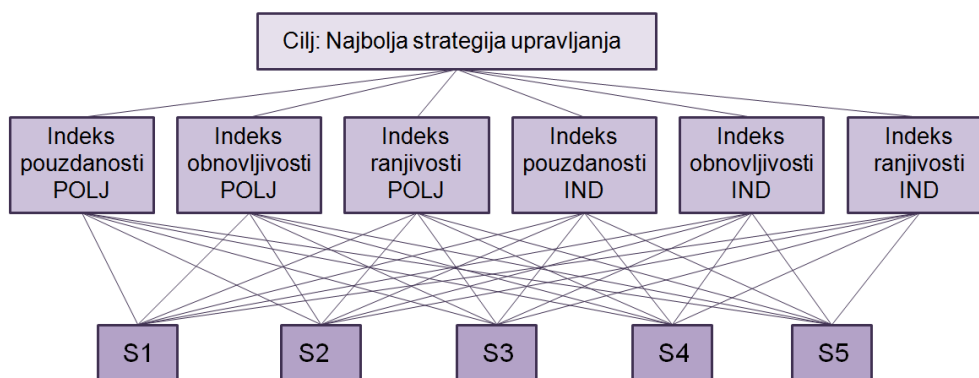
Slika 2. Unutargodišnja distribucija vode korisnicima vode iz akumulacija u periodu od 10 godina

U Tabeli 1 su za svaki scenario upravljanja na uobičajen način prikazani prioritete raspodele voda; manji broj znači viši prioritet.

Ako se za ocenu scenarija upravljanja sistemom usvoje tri dinamička indikatora performanse na lokalitetima poljoprivrednog i industrijskog zahteva, tada se može postaviti hijerarhijska struktura problema vrednovanja scenarija (strategija upravljanja sistemom) kao što je prikazano na Slici 3.

Tabela 1. Prioritetne sheme raspodele voda prema različitim scenarijima upravljanja sistemom

Scenario	Prioriteti				
	Akumulacije		Zahtevi za vodom		
	Akum_1	Akum_2	POLJ	IND	NIZV
S1	1	2	3	4	5
S2	1-2	1-2	4	3	5
S3	2	1	5	4	3
S4	1-2	1-2	3-4-5	3-4-5	3-4-5
S5	1-2	1-2	3	4	5



Slika 3. Hijerarhija problema vrednovanja scenarija upravljanja

U Tabeli 2 date su sračunate vrednosti indikatora performanse za svaki scenario, a najbolje vrednosti po svakom indikatoru su osenčene.

Poslednja vrsta Tabele 2 daje indikaciju vrste kriterijuma u fazi vrednovanja scenarija. Osencene vrednosti su date saglasno vrsti kriterijuma.

Vrednosti indikatora pouzdanosti na mestu poljoprivrednog zahteva manje su u poređenju sa vrednostima istog indikatora na mestu industrijskog zahteva za svih pet simuliranih scenarija. Vrednosti indikatora obnovljivosti (čije vrednosti treba da teže ka 1) relativno su nepovoljne, s obzirom da se kreću u opsegu od 0,16 do 0,34.

Tabela 2. Rejtinzi pet scenarija upravljanja za poljoprivredni i industrijski zahtev za vodom

Scenario	Poljoprivredni zahtev			Industrijski zahtev		
	Pouzdanost α	Obnovljivost γ	Ranjivost ν	Pouzdanost α	Obnovljivost γ	Ranjivost ν
S1	0,52	0,34	0,45	0,65	0,21	1,00
S2	0,35	0,23	0,69	0,78	0,33	0,20
S3	0,48	0,33	0,52	0,63	0,20	1,00
S4	0,17	0,16	0,45	0,63	0,20	1,00
S5	0,52	0,34	0,45	0,65	0,21	1,00
	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX	MIN

Vrednosti indikatora ranjivosti relativno su visoke i najnepovoljnije (osim u scenariju S2), što znači da je pojava ekstremnog deficita značajna na mestima poljoprivrednog i industrijskog zahteva.

Pošto su, kao kriterijumi, indikatori pouzdanosti i obnovljivosti maksimizacioni, a indikator ranjivosti je minimizacioni za pravilnu primenu SAW i SPW metoda potrebno je rejtinge za ranjivost zameniti recipročnim vrednostima i tako postići da su svi kriterijumi maksimizacioni.

Da bi se scenariji vrednovali, potrebno je definisati težine kriterijuma – ovde indikatore performanse.

U Tabeli 3 prikazane su težine indikatora za pet slučajeva. U varijanti A1 težine svih indikatora su jednake. U varijanti A2 težine indikatora pouzdanosti su povećane tako da budu trostruko veće od težina ostala dva indikatora. U varijanti A3 težine indikatora pouzdanosti i obnovljivosti su dvostruko veće od težine indikatora ranjivosti. Težina indikatora pouzdanosti dvostruko je manja od ostala dva indikatora u varijanti A4, a u varijanti A5 težine indikatora obnovljivosti i ranjivosti na mestu industrijskog zahteva trostruko su veće od težina ostalih indikatora.

Tabela 3. Težine indikatora performanse u različitim varijantama

	Pouzdanost		Obnovljivost		Ranjivost	
	POLJ	IND	POLJ	IND	POLJ	IND
A1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
A2	0,30	0,30	0,10	0,10	0,10	0,10
A3	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10
A4	0,10	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20
A5	0,10	0,30	0,10	0,30	0,10	0,10

Simulirani scenariji upravljanja vodama u sistemu sa Slike 1 rangirani su primenom metoda SAW i SPW i rezultati su dati u Tabeli 4.

Scenario S1 koji ima najpovoljnije vrednosti indikatora performanse (videti Tabelu 2) najbolje je rangiran pri

Tabela 4. Rangiranje scenarija upravljanja po metodima SAW i SPW

	A1		A2		A3		A4		A5	
	SAW	SPW	SAW	SPW	SAW	SPW	SAW	SPW	SAW	SPW
S1	1	1	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	2-3	1-2
S2	4	5	4	4	4	4	4	5	1	4
S3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
S4	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5
S5	2	2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	2-3	1-2

S4, sa najnižim vrednostima indikatora pouzdanosti i obnovljivosti na tački poljoprivrednog zahteva, najlošije je rangiran scenario prema SAW metodu za pet ispitanih varijanti, dok SPW metod pokazuje da je u dva slučaja scenario S2 lošije rangiran od njega.

Duže ostajanje sistema u nepovoljnom stanju predstavlja i duže nezadovoljenje zahteva za vodom, dok velika ranjivost sistema znači ozbiljnije i trajnije posledice kada sistem dospe u nepovoljno stanje. Ova vrsta razmatranja rezultata simulacije za različite prioritete zahteva, varijante definisanja kritičnog statusa performanse (kao ovde bez dopuštenog manjka) i na kraju ocene performanse po različitim varijantama značajnosti indikatora performanse pokazuje da se već na osnovu preliminarnih rezultata može ići na detaljisanje scenarija, finije podešavanje preferenci raspodele voda, ili preorijentaciju u pogledu zahteva da se na akumulacijama prate maksimalistički zahtevi za punjenjem jezera i dr. Konačno, na osnovu višestrukih analiza može se odabrati samo jedan od dva ponuđena metoda (SAW ili SPW) za vrednovanje scenarija da ne bi došlo do zabuna konačnih donosilaca odluka koji scenario upravljanja bi bilo najbolje prihvatiti za dalje detaljne simulacije na mrežnom modelu.

svim varijantama primenjenih težina indikatora na obe lokacije zahteva za vodom (videti Tabelu 4).

Scenariji u kojima su zahtevi ispunjeni u najdužem (simulacionom) periodu, bez tolerantnog manjka, i koji pokazuju najveću pouzdanost, obnovljivost i najmanju ranjivost na tački poljoprivrednog zahteva su S1 i S5. U 9 od 10 slučajeva navedeni scenariji su prvorangirane, odnosno drugorangirane alternative.

Prema vrednostima indikatora iz Tabele 2, najniže rangirani scenariji S2 i S3 imaju nepovoljne vrednosti indikatora, tačnije relativno visoku pouzdanost ali nisku obnovljivost i ranjivost na mestu industrijskog zahteva.

ZAKLJUČAK

Vodoprivredni sistemi su po pravilu višenamenski, sa većim brojem akumulacija i nizvodnih zahteva, tako da je upravljanje takvim sistemima u dugim vremenskim periodima važno dobro sagledati i koliko je moguće definisati dobre dugoročne strategije za alociranje vode na postojeće i buduće korisnike. Količine, prioritete, vremenske i prostorne raspodele voda su izazov za planere, a sistemska analiza je instrument da se planovi dovoljno dobro kreiraju sa varijantnim rešenjima i procenama efekata rada sistema. Strateško upravljanje vodama se u kompleksnim sistemima simulira na kompjuterskim modelima uz zadata pravila upravljanja akumulacijama i prioritete sheme raspodele vode, često do planskog horizonta od 30 ili više godina. Na tako dugim vremenskim intervalima mogući su konflikti interesa u distribuciji voda, tako da se u poslove sistemske analize uključuju i višekriterijumske analitičke metodologije sa brojnim metodima za individualna i grupna odlučivanja, provere konzistentnosti i koherentnosti parametara odlučivanja itd.

U proteklim decenijama razvijeni su moćni kompjuterski modeli za višegodišnje simulacije rada vodoprivrednih sistema. Jedan od njih je mrežni model ACQUANET, verzija modela MODSIM i, ranije, modela SIMYLD-II iz sedamdesetih godina 20. veka. U ovom radu je opisano kako je simuliran rad sistema sa dve površinske akumulacije i pokazano da se dopunskom analizom njegovih rezultata može izučiti i oceniti performansa sistema u višekriterijumskom okruženju. Za ocenu kvaliteta nekoliko strategija upravljanja izračunavani su indikatori performanse sistema vezani za pouzdanost, obnovljivost i ranjivost sistema na važnim lokalitetima sa zahtevima za vodom (ovde poljoprivredni i industrijski).

Na osnovu obrade i interpretacije rezultata prikazanih u ilustrativnom primeru, može se predložiti čitav niz dopunskih akcija i analize, npr.: (1) promena prioritizacije u punjenju akumulacija i korisnika voda; (2) adaptabilno upravljanje akumulacijama u zavisnosti od perioda godine; (3) vrednovanje zahteva za vodom pomoću više metoda kako bi se dobijeni rangovi mogli sintetizovati u jednu vrednost i jednu odluku.

Izložena metodologija predstavlja jednu od mogućih primena sistemske analize i data je na ilustrativnom primeru sistema, funkcionalno adaptiranog hidrološkim i drugim uslovima u Srbiji i regionu. Pristup problemu alokacije vode je dovoljno generalan da može da se koristi u poslovima preliminarne vodoprivrednog planiranja, ali i kao priprema za izradu detaljnijih modela, sistemske analize mogućih rešenja (od konfiguracije preko etapnosti uključivanja delova sistema, do detaljnih operativnih i strateških pravila upravljanja) i, konačno, kao instrument podrške donosiocima odluka u vezi usvajanja tzv. izvršnih odluka koje će biti usklađene sa konfliktnim ciljevima, prioritetima i realnom moći zainteresovanih strana, normativima iz domaće i strane legislative i dr.

ZAHVALNOST

Rad predstavlja rezultat istraživanja na naučnom projektu OI 174003: Teorija i primena Analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) za višekriterijumsko odlučivanje u uslovima rizika i neizvesnosti (individualni i grupni kontekst) (2011-2019). Projekat finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Bajčetić R., Srđević B., Srđević Z., Blagojević B., Zoranović T. (2015) Participativno odlučivanje o prioritetima raspodele voda u slivu reke Krivaje u Vojvodini. *Vodoprivreda* 47, 287-293.
- [2] Blagojević B., Srđević B. (2013) Grupno odlučivanje u vodoprivredi po različitim preferentnim metodima. *Vodoprivreda* 45, 139-146.
- [3] DUV (2012) Unapređenje regionalnog hidrosistema Nadela prema evropskim standardima sa participativnim modelom odlučivanja o višenamenskoj eksploataciji sistema (I-III faza), Studija, Departman za uređenje voda, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2010-2012.
- [4] DUV (2013) Izrada simulaciono-optimizacionog modela za alokaciju vode i participativnog modela odlučivanja o višekorisničkoj eksploataciji vodnih resursa slivnog područja reke Krivaja (I-III faza), Studija. Departman za uređenje voda, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2011-2013.
- [5] Đorđević B. (1990) *Vodoprivredni sistemi*. Naučna knjiga, Beograd.
- [6] Hashimoto T. (1980) *Robustness, Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water resources planning*. Ph. D. dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
- [7] 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.
- [8] IMP (1977) *SIMYLD-II(P) – Program za planiranje sistema akumulacija*. Institut Mihajlo Pupin, Beograd.
- [9] Labadie J.W. (1995) *MODSIM – River Basin Network Model for Water Rights Planning, Documentation and User Manual*. Colorado State University, USA.
- [10] LabSid (2014) *AcquaNet – Modelo integrado para análise de sistemas complexos em recursos hídricos*. Universidade de Sao Paulo, Brasil.

- [11] Loucks D.P. (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrologic Science Journal* 42(4): 513-530.
- [12] 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.
- [13] Saaty T.L. (1980) *The Analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York.
- [14] 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.
- [15] Srđević B., Srđević Z. (2016a) Vodoprivredna sistemaska analiza sa primenama u menadžmentu vodnih resursa. Knjiga 321 str., Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [16] 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.
- [17] Srđević B. (2005) Diskretni modeli odlučivanja u optimizaciji korišćenja kanalske mreže u Vojvodini. *Letopis naučnih radova*, 29(1): 19-30.
- [18] Srđević B., Anđelić M., Feldman A. (1975) Primena programa HEC-3(P) i SIMYLD-II(P) u simulaciji rada sistema akumulacija u delu sliva Zapadne Morave, Studija, Projekat UNDP Upravljanje slivom Morava pomoću računara. Institut Mihajlo Pupin i Environmental Dynamics Inc. L.A., Beograd.
- [19] Srđević B., Srđević Z. (2016b) Višekriterijumska analiza indikatora dugoročne performanse vodoprivrednih sistema. *Vodoprivreda*, 48 (282-284): 155-165.
- [20] Srđević B., Srđević Z., Blagojević B., Bajčetić R. (2015) Mrežni model regionalnog hidrosistema Krivaja u Vojvodini. *Vodoprivreda*, 47 (273-278): 101-109.
- [21] Srđević Z., Blagojević B., Suvočarev K., Srđević B. (2010) ACQUANET i mogućnosti sinergije sa GIS aplikacijama i višekriterijumskom optimizacijom. *Letopis naučnih radova Poljoprivrednog fakulteta* 34(1): 99-107.
- [22] Srđević Z., Srđević B. (2016c) Novi indikatori za računanje indeksa održivosti u planiranju i upravljanju vodnim resursima. *Vodoprivreda*, 48 (279-281): 115-124.
- [23] Srđević Z., Srđević B. (2017) An extension of the sustainability index definition in water resources planning and management. *Water Resources Management* 31, 1695–1712, Springer.
- [24] TWDB (1972): SIMYLD-II – River Basin Simulation Model. Texas Water Development Board, Austin, USA
- [25] Wurbs R. A. (2005) Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. *Journal of Hydrology* 300(1-4): 100-113.
- [26] Zeleny, M. (1982) *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw Hill, New York.

NETWORK MODEL ACQUANET IN WATER MANAGEMENT SYSTEMS ANALYSIS

by

Senka BUBULJ, Bojan SRĐEVIĆ
University of Novi Sad, Faculty of Agriculture
Department of Water Management
System Analysis and Decision Making Group
Novi Sad, Serbia

Summary

This paper presents a possible systematic approach to the problem of analyzing multiple scenarios for managing multiple reservoirs, simulated by one of the well-known network models for large-scale water management systems. Multi-criteria methods are used to evaluate water allocation scenarios based on computed system performance indices (used as criteria). Simulations of preferential water allocation schemes (management scenarios) are performed with the computer model ACQUANET. For the selected sets of structural, hydrological and other data, as well as for operational water management strategies (based on priorities), the model results were extracted from the model output files and used to calculate performance indicators (reliability, resiliency and vulnerability) and for further evaluation of preference schemes. Two multi-criteria methods were applied on the decision

matrix where indicators are set as the criteria and their values for simulated scenarios are used as a parameter set, i.e. ratings of scenarios. Different weights of performance indicators are varied and the consequences of applying different priority water allocation schemes to reservoirs, agricultural and industrial requirements have been discussed. The conclusions drawn indicate the methodological linkage of models simulating the operation of complex multifunctional systems and multi-criteria evaluation of system management strategies based on simulated system performance, all within the framework of modern water management system analysis.

Key words: water resources system, network model ACQUANET, performance indicator, management scenario, multi-criteria analysis

Redigovano 18.10.2019.