

## EFEKTI PRIMENE PRAVILA UPRAVLJANJA PRI RASPODELI VODE IZ VIŠENAMENSKE AKUMULACIJE

Mr Đurica MARKOVIĆ

Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Prištini sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici

Dr Miloš STANIĆ, Dr Jasna PLAVŠIĆ

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Goran SEKULIĆ

Građevinski fakultet Univerziteta u Podgorici

### REZIME

Stalno rastuće potrebe za vodom i vremenska neravnost dotoka i potrebe za vodom mogu se zadovoljiti jedino otvaranjem novih izvorišta vode i izgradnjom novih akumulacija. Takođe, javlja se i potreba da postojeće akumulacije postanu višenamenske. Sve ovo iziskuje izuzetan stepen racionalnosti u korišćenju vode, što nameće potrebu optimizacije upravljanja isporukom vode kojom će se doći do skupa najboljih pravila upravljanja za dati hidrološki ulaz, stanja u akumulaciji, zahteve korisnika i ostala ograničenja. U ovom radu prikazan je model upravljanja višenamenskom akumulacijom iz koje se voda zahvata za potrebe vodosnabdevanja i navodnjavanja, u kome se raspodela vode prema potrošačima vrši na osnovu pravila upravljanja formiranih pomoću generisanih dugačkih hidroloških nizova.

**Ključne reči:** višenamenske akumulacije, upravljanje isporukom vode, optimizacija, simulacioni model, generisani hidrološki nizovi

### 1. UVODNA RAZMATRANJA

Potrebe za vodom i raspoloživost vode nisu usaglašeni tokom vremena – potrebe za vodom često su najveće kada su doticaji (i padavine) najmanji. Ovo je i razlog što se grade akumulacije za vodosnabdevanje čija je uloga da sačuvaju vodu iz perioda kada je ima u izobilju za periode kada je ima manje. Intenzivna urbanizacija naselja, stalna potreba povećanja poljoprivredne proizvodnje kao i tendencija razvoja privrednih delatnosti iziskuju obezbeđenje rastućih potreba za vodom. Pored

toga, javlja se i potreba da se zadovolje i potrebe novih korisnika za vodom.

U dosadašnjoj praksi u našoj zemlji uglavnom su se gradile jednonamenske akumulacije i to za potrebe hidroenergetike ili vodosnabdevanja. Kako su se prognozirane potrebe za vodom za vodosnabdevanje često pokazale precenjenim, vodni resurs je kod nekih akumulacija ostao neiskorišćen. Sa stalnom tendencijom povećanja potražnje za vodom, moraju se izmeniti i pravila korišćenja akumulacija u smislu višenamenskog korišćenja voda. U situaciji višenamenskog korišćenja akumulacija, gde svaki korisnik teži da iskoristi maksimalne količine vode za svoje potrebe, dolazi do potrebe uvođenja pravila i prioriteta u korišćenju akumulacije kao i optimizacije korišćenja akumulirane vode.

Tako se nameće zadatak optimizacije isporuka vode iz višenamenske akumulacije kojom će se doći do skupa najboljih pravila upravljanja za dati hidrološki ulaz, stanja u akumulaciji, zahteve korisnika i ostala ograničenja. U ovom radu prikazan je model upravljanja višenamenskom akumulacijom iz koje se voda zahvata za potrebe vodosnabdevanja i navodnjavanja, u kome se raspodela vode prema potrošačima vrši na osnovu pravila upravljanja formiranih pomoću generisanih dugačkih hidroloških nizova. Ova metodologija je ilustrovana na primeru akumulacije Barje, uz poređenje sa modelom u kome se raspodela vode vrši prema rangu potrošača. U radu je najpre opisan model za generisanje hidroloških nizova, a potom optimizacioni model, dok su na kraju dati rezultati optimizacije upravljanja za akumulaciju Barje uz diskusiju o mogućnostima razvijenog modela.

## 2. MODEL ZA GENERISANJE HIDROLOŠKIH SERIJA

Za potrebe provere modela za definisanje optimalnih pravila upravljanja na dugačkom nizu hidroloških proticaja napravljen je model za generisanje hidroloških proticaja. Za izradu modela je poslužila metodologija prikazana u radu [7], koja je primenjena uz određene modifikacije neophodne zbog uklapanja sa primenjenim optimizacionim modelom.

Model je formulisan tako da se poštuje princip da generisane hidrološke serije treba da imaju praktično iste statističke osobine kao i osmotrene serije. Hidrološke vremenske serije prikazuju neprekidne prirodne procese i predstavljaju se kao diskretne serije prosečnih vrednosti u odabranom vremenskom koraku (obično mesečni ili nedeljni). Kao takve, one se opisuju preko statistika kao što su srednja vrednost, standardna devijacija, koeficijent varijacije i koeficijent asimetrije i preko funkcija raspodele verovatnoće. Proticaji na jednom profilu su po svojoj prirodi autokorelisani, a kroskorelisani kada se uzima u obzir više mernih mesta. Uspešno generisanje slučajnih hidroloških vremenskih serija je bazirano na sledećim pretpostavkama:

- generisane serije podataka o proticajima moraju predstavljati prirodne (neporemećene) proticaje,
- delovi osmotrene serije koji su prikazani kroz podatke za dati mesec ili nedelju imaju jedinstvenu raspodelu verovatnoće sa kojom treba uskladiti simuliranu seriju; ova funkcija raspodele može biti predstavljena kao jedna od poznatih teorijskih funkcija raspodele koja je dobro prilagođena podacima ili korišćenjem nove generacije empirijskih raspodela (npr. kernel raspodela [8]),
- osmotrena srednja vrednost i standardna devijacija svakog meseca (ili nedelje) treba da bude zadržana u generisanoj seriji,
- osmotrenoj autokorelaciji i kroskorelaciji treba da se podese simulirane korelacije,
- godišnjim statistikama osmotrene serije, kao što su godišnja srednja vrednost, standardna devijacija, autokorelacija i kroskorelacija treba, takođe, da se podese godišnje statistike simulirane serije.

Model koji je razvijen za potrebe ovog rada je stacionaran, tj. ne pokušava da modelira promene (bilo postepene bilo nagle) u statističkim karakteristikama generisane serije. Model je formulisan za generisanje srednjih nedeljnih proticaja na osnovu osnovnih karakteristika srednjih proticaja za svaku od 52 nedelje tokom godine

(srednje vrednosti, standardne devijacije, koeficijenti asimetrije, empirijska funkcija raspodele), kao i na osnovu koeficijena autokorelacije između pojedinih nedelja.

## 3. MODEL ZA DEFINISANJE OPTIMALNIH PRAVILA UPRAVLJANJA VIŠENAMENSKOM AKUMULACIJOM

Model koji će biti prikazan u radu se odnosi na višenamenske akumulacije iz kojih se voda zahvata za potrebe vodosnabdevnja i navodnjavanja.

Pored definisanja pravila upravljanja model treba da pruži odgovor na pitanja koje se površine i sa kakvom obezbeđenošću mogu navodnjavati iz akumulacija koje su prvenstveno namenjene za snabdevanje stanovništva vodom i kakav je uticaj uvođenja još jednog potrošača na vodosnabdevanje kao prioritarnog potrošača.

### 3.1 Isporuka vode prema rangu potrošača

U osnovi ovog modela je rešavanje jednačine kontinuiteta koja je napisana u diskretnom obliku za jednu višenamensku akumulaciju:

$$u_{0t} = v_{t-1} + q_t$$

gde je  $u_{0t}$  ukupna raspoloživa zapremina vode u periodu  $t$  pre raspodele potrošačima,  $v_{t-1}$  zapremina vode u periodu  $t-1$  i  $q_t$  zapremina dotekle vode u akumulaciju u periodu  $t$ .

Kako se radi o višenamenskoj akumulaciji, neophodno je definisati prioritete u potrošnji. Jasno je da je sa vodoprivredne tačke gledišta potrebno prvo definisati ekološki garantovani protok i prioritete potrebe nizvodnih korisnika, zatim potrebe za snabdevanje vodom stanovništva i industrije a potom navodnjavanje.

Zbog jednostavnosti pri definisanju modela uvodi se oznaka  $I_{jt}^*$ , kojom se označavaju zahtevi (želje) potrošača  $j$ -tog prioriteta u periodu  $t$ . Imajući u vidu raspoložive količine vode  $u_{jt}$ , moguće je da zahtevane potrebe  $j$ -tog potrošača  $I_{jt}^*$  ne mogu biti zadovoljene u periodu  $t$  i u tom slučaju se javlja deficit  $D_{jt}$  a zahtevane potrebe  $j$ -tog prioriteta se koriguju na one ( $I_{jt}$ ) koje stvarno mogu biti realizovane u tom periodu:

$$I_{jt} = \min\{u_{j-1,t}, I_{jt}^*\}$$

$$D_{jt} = I_{jt}^* - I_{jt}$$

Nakon podmirivanja potreba potrošača koji je  $j$ -ti po prioritetu, raspoloživa količina  $u_{j-1,t}$  vode se umanjuje za

količinu  $I_{jt}$  koja je isporučena, a zatim se ide na potrošača koji je sledeći po prioritetu:

$$u_{jt} = u_{j-1,t} - I_{jt}$$

Pošto su sve kategorije potrošača iscrpljene, preostalu količinu vode treba uporediti sa korisnom zapreminom  $W_k$  i proveriti da li se u periodu  $t$  javlja prelivanje  $p_t$ , a zatim i definisati zapreminu akumulacije na početku narednog perioda  $v_t$ :

$$u_{jt} = \begin{cases} > W_k, & p_t = u_{jt} - W_k, & v_t = W_k \\ \leq W_k, & p_t = 0, & v_t = u_{jt} \end{cases}$$

Na kraju proračuna određuje se količinska (i vremenska) obezbeđenost snabdevanja vodom svake kategorije potrošača koja se snabdeva vodom iz višenamenske akumulacije:

$$Ob_j = 1 - \frac{\sum_t D_{jt}}{\sum_t I_{jt}^*}$$

Prikazani postupak se naziva *isporuka vode prema rang potrošača*. Očigledno je da su prioriteti odnosno rang potrošača jedino pravilo po kome se vrši isporuka vode iz akumulacije u ovom slučaju.

### 3.2 Isporuka vode primenom pravila upravljanja

Osnovni nedostatak u primeni postupka u kome se isporuka vode iz akumulacije vrši isključivo prema rang potrošača je u tome što se, zbog isporuke maksimalnih količina vode u periodima kada ima vode u akumulaciji, lako ulazi u deficite u sušnim periodima godine. Očigledno je da pravila upravljanja, odnosno odluka da li da se u nekom periodu podmiri maksimalne ili redukovane potrebe za vodom, moraju zavisiti od stanja akumulacije, ali i od perioda godine, čime se implicitno uvode očekivanja (odnosno prognoze) u pogledu dotoka vode u akumulaciju.

Metoda koja će biti prikazana u nastavku rada bazira se na ideji da se za istorijski niz dotoka u akumulaciju prvo pronađe optimalno rešenje, koje bi se iskoristilo za generisanje pravila upravljanja. Rezultat optimalnog rešenja su maksimalne isporuke vode iz akumulacije bez pojave deficita, ali i optimalna trajektorija zapremine akumulacije za posmatrani period. Statističkom analizom optimalnih zapremina akumulacije po periodima mogu se formirati dve zone u akumulaciji: 1) zona neredukovane potrošnje – kada se podmiruju maksimalne potrebe za vodom korisnika i 2) zona koja se nalazi ispod definisane granične vrednosti zapremine akumula-

cije za posmatrani period – kada dolazi do redukcije potrošnje.

#### Primena metode linearanog programiranja (LP)

Matematička formulacija problema maksimalne isporuke vode iz akumulacije odgovara zadatku linearanog programiranja. Osnovna jednačina je jednačina bilansa akumulacije napisana u diskretnom obliku:

$$v_t = v_{t-1} + q_t - I_t - p_t$$

$$t = 1, 2, \dots, n$$

gde je  $v_t$  zapremina akumulacije u vremenskom preseku  $t$ ,  $q_t$  raspoloživi neto dotok u akumulaciju u vremenskom preseku  $t$ ,  $I_t$  isporuka iz akumulacije u vremenskom preseku  $t$ ,  $p_t$  količina vode koja preliva iz akumulacije u vremenskom preseku  $t$  i  $n$  broj diskretnih vremenskih intervala za koje se sprovodi proračun. Pod raspoloživim neto dotokom u akumulaciju se podrazumeva dotok od koga je oduzet ekološki garantovan protok ili vodoprivredne potrebe nizvodnih korisnika kao i gubici vode iz akumulacije.

Određivanje potencijalne „izdašnosti“ akumulacije je određivanje maksimuma ciljne funkcije ( $Z$ ) koja je prosečna isporuka vode iz akumulacije [3]:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n I_t \rightarrow \max$$

U formulaciji zadatka LP ograničenja se mogu napisati u formi sledećih nejednakosti:

$$-v_{t-1} + v_t + I_t \leq q_t$$

$$v_t \leq W_k$$

$$v_t \geq 0$$

$$I_t \geq 0$$

pri čemu je prva nejednakost očigledno posledica bilansne jednačine, a druga ograničava zapreminu akumulacije na vrednost korisne zapremine  $W_k$ . Ograničenja koja proizilaze iz bilansne jednačine se postavljaju za svaki vremenski presek kojih ukupno ima  $n$ . Nepoznate u formulaciji linearanog programiranja su isporuke vode iz akumulacije  $I_t$  i stanja akumulacije u svim vremenskim presecima  $v_t$ .

Da bi se sprečio efekat „pozajmljivanja“ vode (veštačko povećavanje količine vode koja može da se isporuči u nekom periodu), u kome je početno stanje akumulacije  $v_0$  veće od zapremine akumulacije na kraju proračunskog perioda  $v_n$ , uobičajeno je da se u određivanju mak-

simalne isporuke vode iz akumulacije postavi i sledeće ograničenje:  $v_0 \leq v_n$ .

Prethodna formulacija zadatka LP-a daje maksimalnu isporuku vode iz akumulacije zapremine  $W_k$  i mera je „izdašnosti“ akumulacije.

U uslovima vodosnabdevanja i navodnjavanja, potrebe za vodom prate neku unapred poznatu neravnomernost, pa se zadatak optimizacije može formulisati na sledeći način:

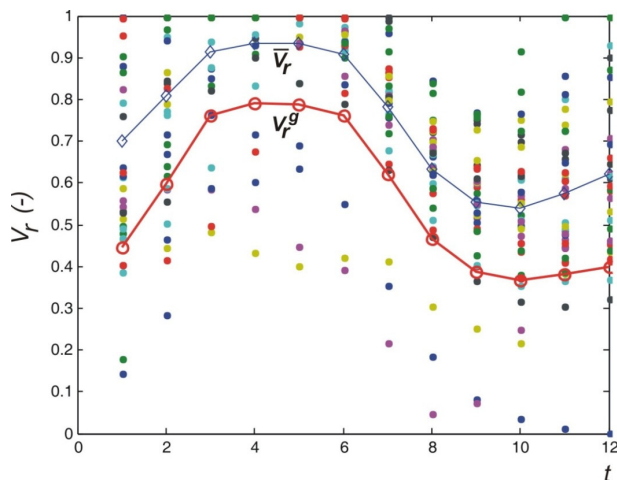
$$\begin{aligned} -v_{t-1} + v_t + P_t^s I^s + P_t^n I^n &\leq q_t \\ v_t &\leq W \\ v_t &\geq 0 \\ x_s, x_n &\geq 0 \end{aligned}$$

gde su  $P^s$  i  $P^n$  neravnomernosti u isporuci vode za potrebe vodosnabdevanja i navodnjavanja, a  $I^s$  i  $I^n$  prosečne isporuke vode iz akumulacije za potrebe vodosnabdevanja i navodnjavanja.

#### Definisanje pravila upravljanja

Kako se kod simulacije isporuke vode uz primenu pravila upravljanja podrazumeva da se odluka o isporuci vode ne donosi samo na osnovu iskazanih potreba korisnika i njihovog prethodno definisanog prioriteta, to se eventualna korekcija pravi i zbog stanja (zapremine) akumulacije kao i vremenskog preseka  $t$  (perioda godine) kada se ta odluka donosi.

Za definisanje pravila upravljanja na ovaj način može se iskoristiti prethodno dobijeno optimalno rešenje, čiji je rezultat, kao što je već prethodno objašnjeno, maksimalna isporuka vode iz akumulacije koja se može ostvariti bez pojave deficita i optimalna trajektorija zapremine akumulacije. Elementarnom statističkom analizom optimalne trajektorije zapremine akumulacije, dobija se prosečna (očekivana) zapremina na kraju svakog perioda kao i njena standardna devijacija. Na osnovu toga se mogu definisati i minimalne dopuštene vrednosti zapremine akumulacije u svakom mesecu (slika 1). Kada je stepen ispunjenosti akumulacije (relativna zapremina akumulacije  $V_r$ ) u nekom vremenskom preseku  $t$  manji od granične vrednosti ( $V_r^g$ ), tada se procenjuje da je odstupanje od očekivane optimalne vrednosti veliko i da treba početi sa restriktivnom isporukom vode iz akumulacije, što podrazumeva prvenstveno smanjenu isporuku za potrošača najnižeg prioriteta.



Slika 1. Definisanje granične (minimalne) ispunjenosti akumulacije, nakon koje dolazi do redukcije isporuke vode korisnicima.

Određivanje trajektorije granične vrednosti zapremine akumulacije može biti predmet optimizacije, ali se u prvom koraku do nje može doći elementarnom statistikom:

$$V_r^g = \bar{V}_r - f \cdot \sigma$$

gde je  $\sigma$  standardna devijacija relativnih zapremina na kraju razmatranih perioda, a  $f$  je bezdimenzionalni parametar (faktor frekvencije) kojim se definiše karakter pravila upravljanja. Veće vrednosti parametra  $f$  odgovaraju manjim graničnim vrednostima relativne zapremine akumulacije, što znači da će pravila upravljanja biti rizičnija, i ostvariće se veća isporuka vode, ali se može očekivati i češća pojava deficita, odnosno smanjene obezbeđenosti u isporuci vode, posebno za potrošače višeg prioriteta.

## 4. PRIMENA PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA AKUMULACIJI BARJE

### 4.1 Elementi bilansa

Za jednu akumulaciju opšta jednačina bilansa vode glasi:

$$\begin{aligned} v_t &= v_{t-1} + q_t - I_t - p_t \\ t &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

gde su  $v_t$  i  $v_{t-1}$  zapremine vode u akumulaciji u prethodnom i sadašnjem vremenskom koraku, a  $q_t$  ukupan neto doticaj u akumulaciju u datom vremenskom koraku, pri čemu ukupan neto doticaj predstavlja ukupan doticaj u akumulaciju umanjeno za gubitke iz tela brane i ispušteni garantovani protok nizvodno od brane,  $I_t$  ukupna količi-

na vode koja se ispušta iz akumulacije za razne korisnike, kao što su snabdevanje stanovništva vodom, snabdevanje poljoprivrednih površina vodom za potrebe navodnjavanja i sl., i  $p_t$  ukupna količina vode koja preliva.

#### Gubici kroz telo brane

Proceđivanje vode kroz telo brane, odnosno njeno jezgro, i ispod tela brane u nizvodni deo, spada u gubitke vode iz akumulacije. Iako su količine vode proceđene na ovaj način iz akumulacije relativno male, one ulaze u bilans voda akumulacije. Podaci za ove gubitke su uzeti iz projektne dokumentacije [6] izvođača radova i korišćeni su u istom obliku i za serije osmotrenih podataka i za generisane serije podataka.

#### Proračun garantovanog protoka nizvodno od brane

Za proračun garantovanog protoka nizvodno od brane korišćena je metodologija garantovanih ekoloških protoka (GEP) prema preporukama Đorđevića i Dašić [5]. Primena GEP metode zasniva se na tri parametra: (1) prosečni višegodišnji protok na profilu brane, odnosno mesta zahvata vode ( $\bar{Q}$ ), (2) minimalni mesečni protok obezbeđenosti 95% ( $Q_{95\%}^{\min.mes}$ ), (3) minimalni mesečni protok obezbeđenosti 80% ( $Q_{80\%}^{\min.mes}$ ). Ukoliko se raspolaže višegodišnjim serijama dnevnih protoka, umesto minimalnih mesečnih protoka  $Q_{95\%}^{\min.mes}$  i  $Q_{80\%}^{\min.mes}$  mogu se koristiti odgovarajuće vrednosti 30-dnevnih protoka malih voda istih obezbeđenosti ( $Q_{95\%}^{\min.(30)}$  i  $Q_{80\%}^{\min.(30)}$ ).

U hladnom delu godine, koji obuhvata period oktobar–mart, garantovani ekološki protok  $Q_{ekol.gar.}$  bira se na osnovu relacije:

$$Q_{ekol.gar.} = \begin{cases} 0.1 \bar{Q}, & Q_{95\%}^{\min} \leq 0.1 \bar{Q} \\ Q_{95\%}^{\min}, & 0.1 \bar{Q} < Q_{95\%}^{\min} < 0.15 \bar{Q} \\ 0.15 \bar{Q}, & Q_{95\%}^{\min} \geq 0.15 \bar{Q} \end{cases}$$

gde  $Q_{95\%}^{\min}$  označava  $Q_{95\%}^{\min.mes}$  ili  $Q_{95\%}^{\min.(30)}$ . U toplom delu godine, koji obuhvata period april–septembar,  $Q_{ekol.gar.}$  bira se na osnovu relacije:

$$Q_{ekol.gar.} = \begin{cases} 0.15 \bar{Q}, & Q_{80\%}^{\min} \leq 0.15 \bar{Q} \\ Q_{80\%}^{\min}, & 0.15 \bar{Q} < Q_{80\%}^{\min} < 0.25 \bar{Q} \\ 0.25 \bar{Q}, & Q_{80\%}^{\min} \geq 0.25 \bar{Q} \end{cases}$$

gde  $Q_{80\%}^{\min}$  označava  $Q_{80\%}^{\min.mes}$  ili  $Q_{80\%}^{\min.(30)}$ .

U slučaju da vrednosti garantovanih ekoloških protoka dobijene preko definisanih verovatnoća malih voda izlaze izvan opsega koji su definisani gornjim pravilima i nejednačinama, usvajaju se granične vrednosti.

#### Proračun potreba za vodom za navaodnjavanje

Podaci o specifičnim potrebama za vodom za navodnjavanje su preuzeti iz literature [11] i prilagođeni intervalu diskretizacije po vremenu koja iznosi 7 dana. U tabeli 1 su prikazani podaci.

Tabela 1. Prikaz specifičnih potreba za vodom za navodnjavanje PVN ( $m^3/ha/ned$ ) poljoprivrednih površina po nedeljama.

Ned.	PVN	Ned.	PVN	Ned.	PVN
11	0,00	21	84,21	31	188,84
12	0,00	22	97,65	32	179,58
13	5,22	23	115,57	33	179,58
14	36,51	24	115,57	34	179,58
15	36,51	25	115,57	35	147,65
16	36,51	26	129,34	36	67,80
17	36,51	27	211,99	37	67,80
18	77,40	28	211,99	38	67,80
19	84,21	29	211,99	39	67,80
20	84,21	30	211,99	40	0,00

#### Analiza potrošnje vode za potrebe snabdevanja stanovništva

Osnovna namena akumulacije Barje je snabdevanje stanovništva vodom. Podaci o projekciji potrebe stanovništva i industrije za vodom do 2021. preuzeti su iz literature [11] i prikazani u tabeli 2. Na slici 2 prikazane su potrebe korisnika za vodom, i to potrebe za snabdevanje stanovništva i potrebe za navodnjavanje u zavisnosti od veličine navodnjavanih površina.

#### 4.2 Prikaz i analiza rezultata proračuna

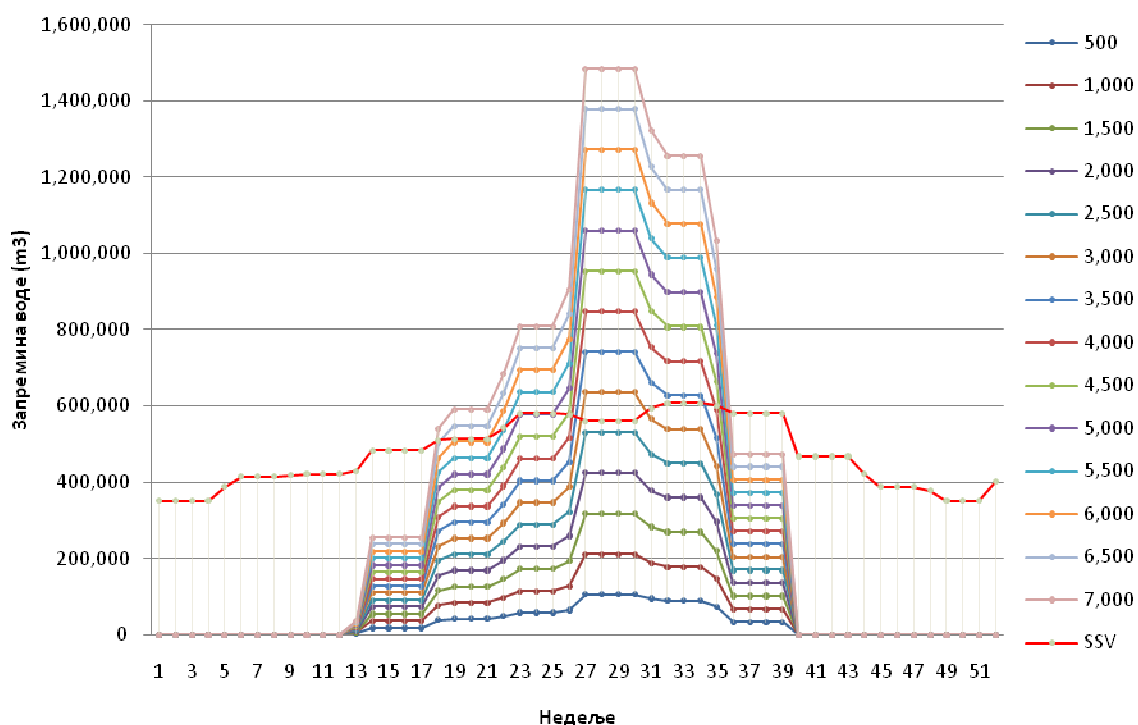
Član  $q_j$  u osnovnoj bilansnoj jednačini predstavlja raspoloživi neto dotok u akumulaciju. To je ukupan dotok u akumulaciju u nekom vremenskom trenutku umanjen za gubitke vode iz akumulacije. Ekološki garantovan protok, odnosno vodoprivredne potrebe nizvodnih korisnika akumulacije, posmatraju se kao prioritetni korisnik prvog reda ( $j = 1$ ). Kako je akumulacija Barje prvenstveno predviđena za snabdevanje grada Leskovca i okoline vodom, u matematičkom modelu koji je primenjen ova

potrošnja je postavljena kao drugi prioritet ( $j = 2$ ). Kao sledeći korisnik vode iz akumulacije se javlja poljoprivreda ( $j = 3$ ) sa zahtevima za navodnjavanje sa specifič-

nim potrebama koje su prethodno sračunate za period 1958-1991. Za prosečnu godinu ove potrebe iznose  $2590 \text{ m}^3/\text{ha}$ .

Tabela 2. Prikaz potrošnje vode za planski period do 2021. godine za potrebe snabdevanja stanovništva vodom.

Mesec	Koeficijent neravnom.	Leskovac ( $\text{Mm}^3/\text{mes}$ )	Bojnik ( $\text{Mm}^3/\text{mes}$ )	Vlasotince ( $\text{Mm}^3/\text{mes}$ )	Lebane ( $\text{Mm}^3/\text{mes}$ )	Medveđa ( $\text{Mm}^3/\text{mes}$ )
I	0,75	2,3590	0,1268	0,3046	0,2284	0,0830
II	0,80	2,5160	0,1352	0,3249	0,2437	0,0885
III	0,90	2,8310	0,1521	0,3656	0,2741	0,0996
IV	1,00	3,1450	0,1690	0,40618	0,3046	0,1107
V	1,10	3,4600	0,1859	0,4468	0,3350	0,1217
VI	1,20	3,7740	0,2028	0,4874	0,3655	0,1328
VII	1,20	3,7740	0,2028	0,4874	0,3655	0,1328
VIII	1,30	4,0890	0,2197	0,5280	0,3959	0,1439
IX	1,20	3,7740	0,2028	0,4874	0,3655	0,1328
X	1,00	3,1450	0,1690	0,4062	0,3046	0,1107
XI	0,80	2,5160	0,1352	0,3249	0,2437	0,0885
XII	0,75	2,3590	0,1268	0,3046	0,2284	0,0830
Sred.	1,00	3,1450	0,1690	0,4060	0,3050	0,1110
Sred. (l/s)		1213	65	157	118	43



Slika 2. Potrebe za vodom korisnika (SSV – snabdevanje stanovništva vodom i navodnjavanje zavisno od površine u hektarima).

### Simulacija isporuke vode iz akumulacije prema rangu potrošača

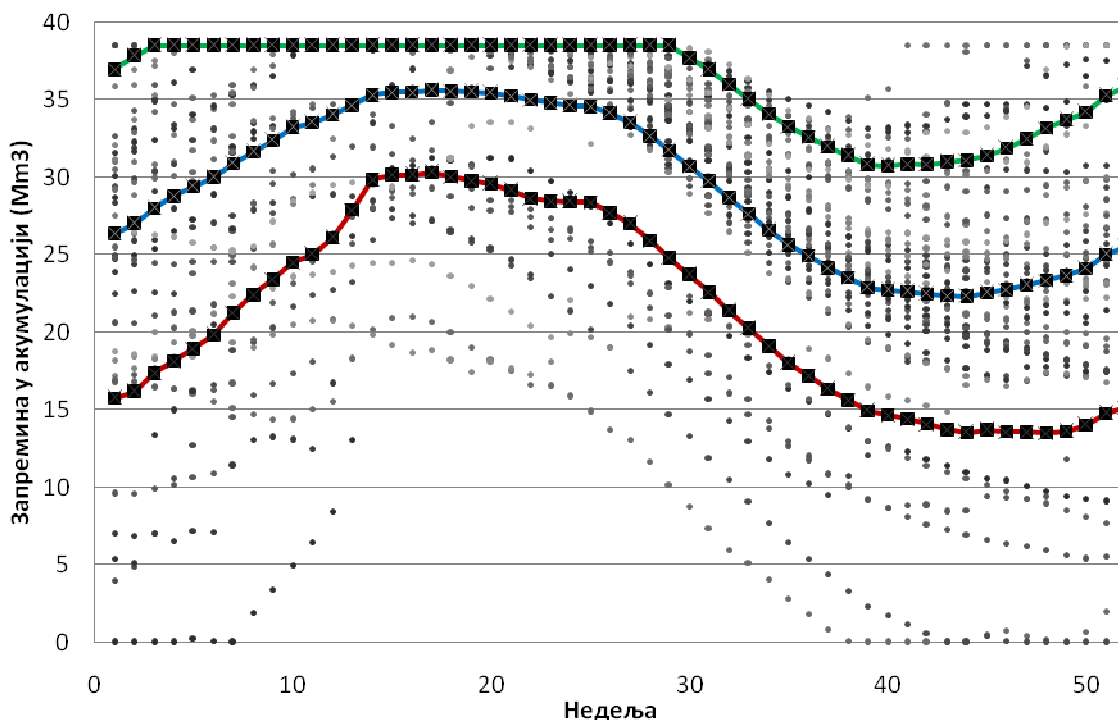
Kao što je prethodno objašnjeno, model je napravljen tako da se iz akumulacije voda isporučuje na sledeći način: prvo se u potpunosti zadovoljavaju prioritetni potrošači a zatim potrošači manjeg prioriteta. U slučaju nedostatka vode u akumulaciji isporučuje se postojeća količina vode prioritetnom potrošaču, a ukoliko nakon podmirjenja prioritetnog potrošača preostane vode ona se isporučuje sledećem potrošaču po prioritetu.

Kada se sračunavaju bilansi za svaku nedelju, na nasleđenu zapreminu vode iz prethodnog perioda se dodaje neto doticaj u akumulaciju a zatim oduzima isporuka vode na napred opisani način. Zatim se proverava koja je raspoloživa zapremina vode na kraju nedelje. Kada je potreba za vodom veća od raspoloživog stanja u akumulaciji onda se javljaju deficiti korisnika vode iz akumulacije. I na kraju, ukoliko je ukupna raspoloživa zapre-

mina veća od ukupne zapremine akumulacije, taj višak predstavlja preliv iz akumulacije.

Model napravljen na ovaj način je ispitivan na osmotrenim podacima, a zatim je testiran na generisanim 1000-godišnjim nizovima. Na osnovu rezultata simulacije za istorijski niz podataka (slika 3) može se uočiti da trajektorije stanja dostižu nulta stanja u tri godine (pri navodnjavanju 3000 ha) i to jednom na početku godine i dva puta posle 38. nedelje. To znači i da se u tim periodima pojavljuju deficiti. Međutim, kako u tim intervalima vremena nema ili su vrlo mali zahtevi za vodom potrošača koji koriste vodu za navodnjavanje, to rezultuje da kod dijagrama količinske i vremenske obezbeđenosti isporuke vode iz akumulacije bude veća obezbeđenost potrošača nižeg prioriteta od potrošača višeg prioriteta.

Pri navodnjavanju 7000 ha javlja se veći broj stanja kada zapremine u akumulaciji dostižu vrednost nula, što je posledica povećanog trošenja vode potrošača nižeg prioriteta.



Slika 3. Stanje zapremine akumulacije po nedeljama za osmotreni hidrološki niz podataka za slučaj navodnjavanja 3000 ha.

Kada se govori o obezbeđenosti snabdevanja potrošača vodom, mora se reći da očigledno postoji uticaj isporučivanja vode za navodnjavanje na isporuku vode za vodosnabdevanje stanovništva. Ukoliko bi postojao samo jedan korisnik vode iz akumulacije – snabdevanje stanovništva vodom, količinska i vremenska obezbeđenost bi bila 100 %. Taj procenat se dostiže i kod isporuke za navodnjavanje 2000 ha površina. Nakon te granice u isporuci vode za oba korisnika dolazi do smanjivanja obezbeđenosti za oba korisnika. Sada se postavlja pitanje koja je to površina pogodna za zalivanje i koji je procenat obezbeđenosti minimalan za potrebe snabdevanja stanovništva vodom i gde se dobija najveća dobit ne ugrožavajući potrebe stanovništva za vodom. Ovdje treba istaći i to da se deficiti za vodosnabdevanje javljaju i u periodima kada nema isporuke vode za navodnjavanje, što se može primetiti kod dijagrama obezbeđenosti gde je dijagram većeg prioriteta „niži“, odnosno ima manju vrednost od obezbeđenosti nižeg prioriteta.

Isti model je primenjen i na generisani niz hidroloških podataka radi kasnijeg poređenja sa rezultatima simulacije koja se zasniva na primeni pravila upravljanja. Dobijeni rezultati pokazuju da su veoma bliske vrednosti karakterističnih trajektorija stanja zapremine u akumulaciji u odnosu na osmotrene vrednosti hidroloških podataka. Kod obezbeđenosti rezultati pokazuju da se dobija bolji rezultat u odnosu na osmotreni niz, pri čemu se količinska obezbeđenost povećava na 98 % i kod vodosnabdevanja i kod navodnjavanja, dok se u smislu vremenske obezbeđenosti za vodosnabdevanje dobija znatno bolji rezultat, a za navodnjavanje takođe postoji poboljšanje u odnosu na osmotreni niz podataka. Kada se posmatraju odgovarajući dijagrami obezbeđenosti, može nas zavarati prvi utisak koji pokazuje poboljšanje. Kako se radi o dugačkom periodu i u njemu ima dosta godina u kojima nema pojave deficita, to se odražava na poboljšanje dijagrama obezbeđenosti. Kada pogledamo maksimalne veličine deficita u nizu u odnosu na ukupnu godišnju potražnju za vodom, dobijamo da taj procenat iznosi 39,32 %. Taj procenat je za oko 5 % veći u odnosu na osmotrenu seriju podataka, što ukazuje na veliko poklapanje rezultata za vrednost deficita za vodosnabdevanje pri navodnjavanju 7000 ha, jer se može očekivati da se u 1000-godišnjoj seriji pojavi i sušnija godina od one koju imamo u osmotrenoj seriji.

#### *Primena pravila upravljanja*

Kod simulacije isporuke vode uz primenu pravila upravljanja podrazumeva da se odluka o isporuci vode ne do-

nosi samo na osnovu iskazanih potreba korisnika i njihovog prethodno definisanog prioriteta, već se eventualna korekcija pravi i zbog stanja (zapremine) akumulacije. Na osnovu prethodno dobijenog rešenja, maksimalne isporuke vode iz akumulacije, elementarnom statističkom analizom trajektorija zapremine akumulacije dobija se prosečna (očekivana) zapremina na kraju svake nedelje  $\bar{V}_r$  i njena standardna devijacija  $\sigma$ . Kao što je prethodno rečeno, trajektorija granične vrednosti zapremine akumulacije  $V_r^g$  se dobija kao  $V_r^g = \bar{V}_r - f \cdot \sigma$ .

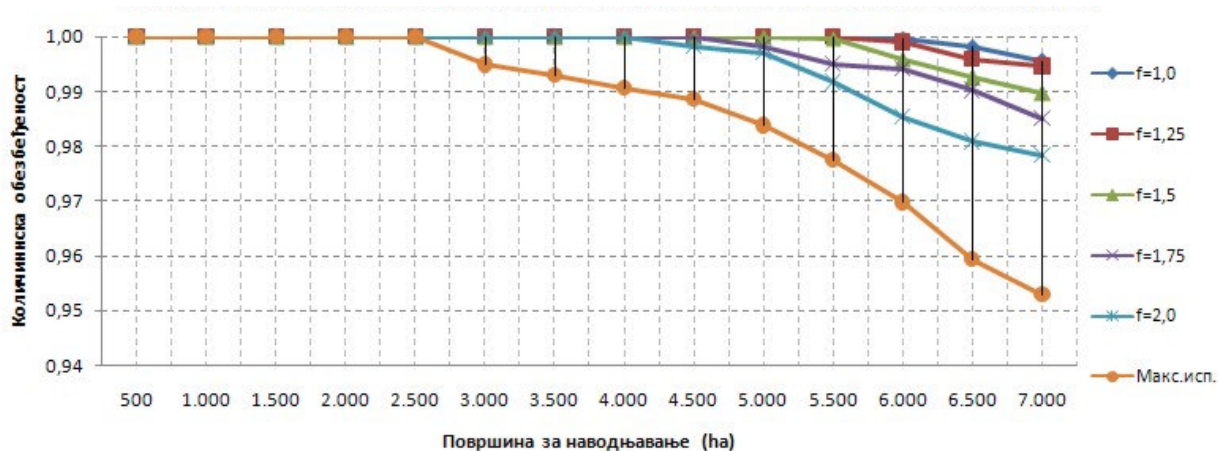
Na primeru akumulacije „Barje“ simulirane su isporuke vode iz akumulacije primenom pravila upravljanja uz variranje površine za navodnjavanje i parametra  $f$ . Za parametar  $f$  su korišćene vrednosti 1,0, 1,25, 1,5, 1,75 i 2,0, pri čemu se smatralo da će se na datoj varijaciji biti primetni svi efekti primene pravila upravljanja. Sa povećanjem parametra  $f$  spušta se trajektorija granične vrednosti zapremine akumulacije, pa se i isporuka do te granice vrši u maksimalnim količinama. Što je agresivnija isporuka, to su manji deficiti napravljeni zbog restriktivnog upravljanja, ali zato počinju deficiti zbog nedostataka vode u akumulaciji.

Efekti primene pravila upravljanja na snabdevanje stanovništva vodom mogu se videti poređenjem rezultata primene prethodno opisana dva modela isporuke vode iz akumulacije za slučaj kada se navodnjava 7000 ha (slike 4 i 5). Ukupni godišnji deficiti u snabdevanju stanovništva vodom su oko 8,5 Mm<sup>3</sup> kada se voda isporučuje prema rangu potrošača, a primenom pravila upravljanja deficiti su oko 3,2 Mm<sup>3</sup> vode. Rezultati se odnose na odabranu sušnu godinu. Deficiti u isporuci vode za navodnjavanje kod navodnjavanja 7000 ha su iznosili 12,58 Mm<sup>3</sup> vode kod primene prvog modela, dok su primenom pravila upravljanja i ovi deficiti smanjeni, pa za istu, odabranu sušnu godinu, istu površinu navodnjavanja i pri upravljanju sa koeficijentom  $f = 2,0$  dobijamo ukupne godišnje deficite od oko 8,08 Mm<sup>3</sup> vode.

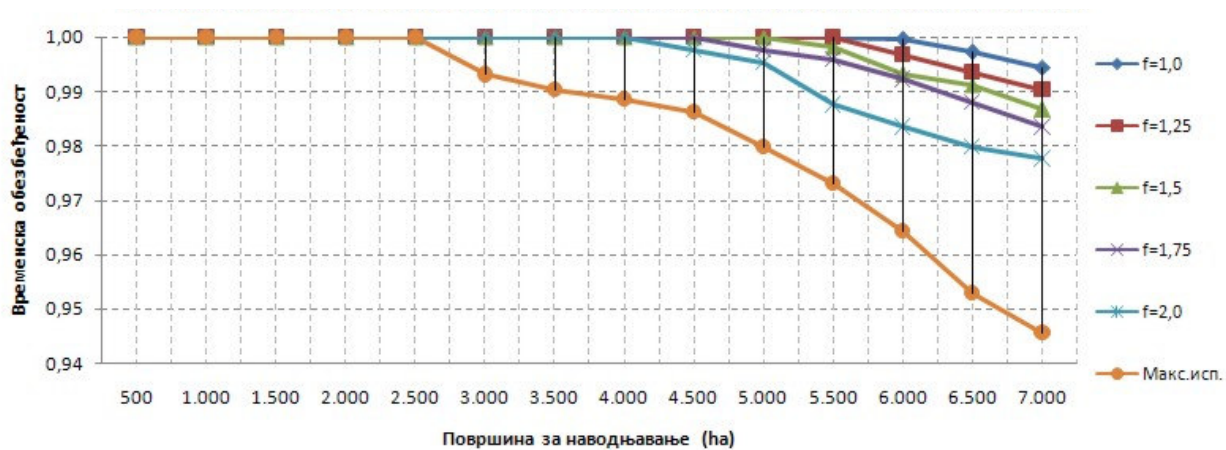
Dakle, upravljanje isporukom vode primenom pravila upravljanja donosi primetne efekte za sve potrošače vode iz akumulacije. Ovo je još uočljivije kada se posmatraju uporedni dijagrami obezbeđenosti, količinske i vremenske, koji su dati na slikama 4-7.

Kada posmatramo dijagrame obezbeđenosti vode za navodnjavanje (slike 6 i 7) imamo sasvim drugačiju sliku. Linije obezbeđenosti imaju drugačiji oblik, skoro da prelaze u pravu liniju, što je direktna posledica primene pravila upravljanja.

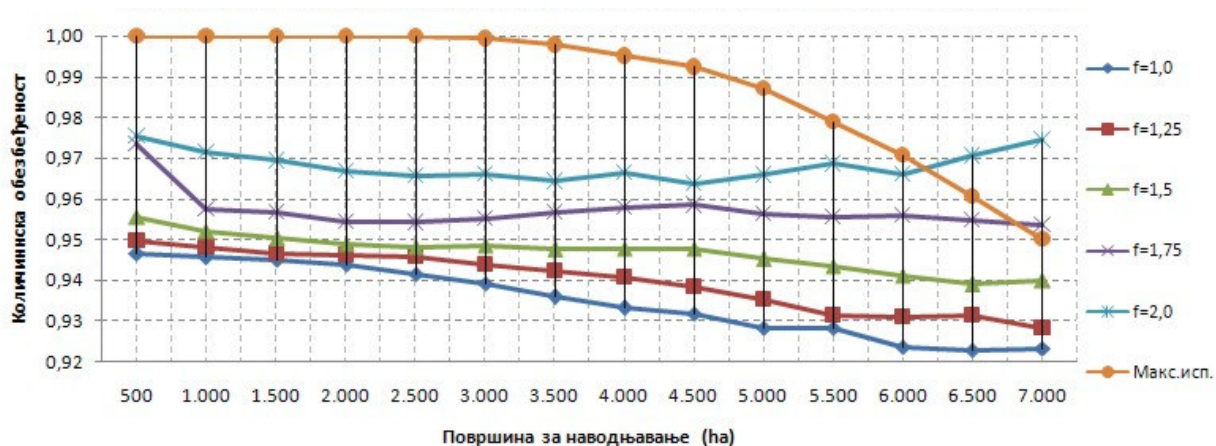




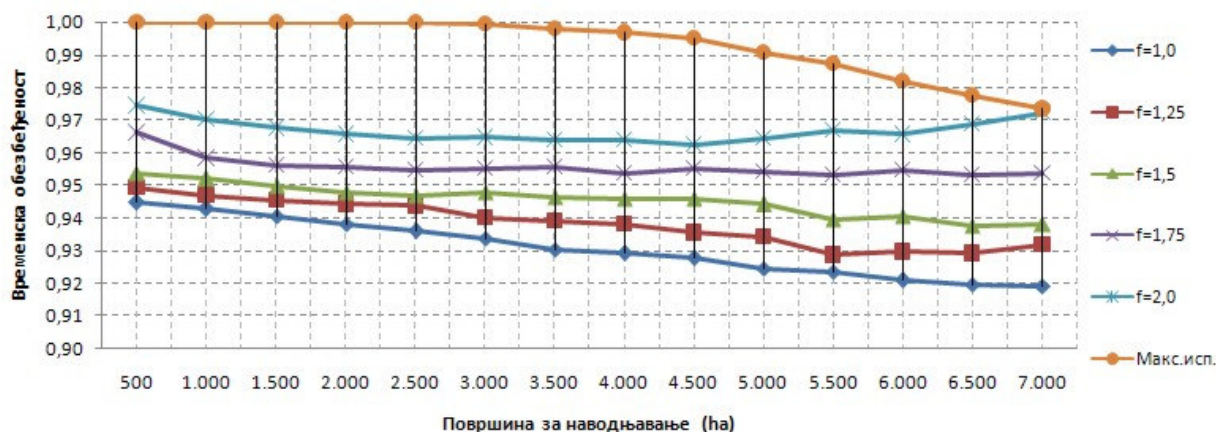
Slika 4. Uporedna količinska obezbeđenost vode za vodosnabdevanje.



Slika 5. Uporedna vremenska obezbeđenost vode за vodosnabdevanje.



Slika 6. Uporedna količinska obezbeđenost vode за navodnjavanje.



Slika 7. Uporedna vremenska obezbeđenost vode za navodnjavanje.

Sa dijagrama na slikama 6 i 7 se može videti da je za navodnjavanje, kao potrošača nižeg prioriteta, povoljnije što agresivnije upravljanje, odnosno sa većim vrednostima koeficijenta  $f$ . Ovde se vidi uticaj dve vrste deficita: deficiti usled restriktivnog upravljanja i deficiti usled nedostatka vode u akumulaciji, što i predstavlja razlog da linije obezbeđenosti pri većoj vrednosti imaju veće vrednosti, odnosno manje deficite.

Kada posmatramo ukupne godišnje deficite, dobijene primenom pravila upravljanja, imamo sledeću situaciju: kod isporuke za snabdevanje stanovništva vodom uočavaju se smanjenja u odnosu na maksimalnu isporuku. Kod isporuke vode za navodnjavanje možemo da uočimo deficite koji se ponavljaju pri navodnjavanju 3000 ha, nezavisno od koeficijenta  $f$ . Slično je i kod navodnjavanja 7000 ha, gde se deficiti povećavaju tek kada je koeficijent 1,75. Ovo ukazuje na deficite usled restriktivnog upravljanja i njihovu veličinu.

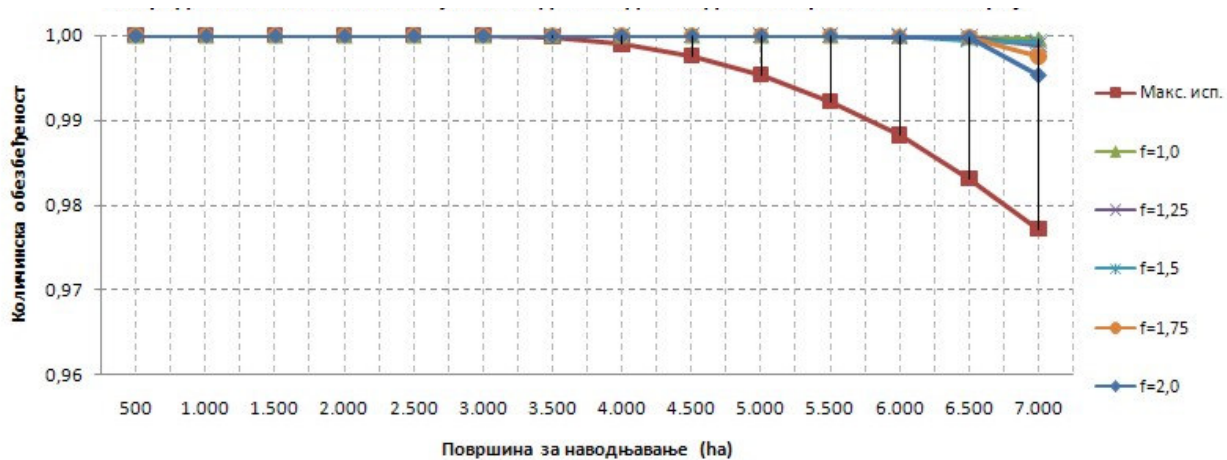
Takođe, treba sagledati i „kvalitet“ isporuke vode za navodnjavanje, odnosno kakva je isporuka u sušnom periodu. Pri navodnjavanju 3000 ha i  $f = 2,0$  deficit u posmatranom periodu iznosi u najsušnijoj godini, za navodnjavanje,  $2,991 \text{ Mm}^3$ , za  $f = 1,0$  je  $2,991 \text{ Mm}^3$ , dok je kod maksimalne isporuke bio  $0,203 \text{ Mm}^3$ . Pri navodnjavanju 5000 ha i  $f = 2,0$  deficit za navodnjavanje u periodu od 27-39 nedelje, u najsušnijoj godini, iznosi  $4,198 \text{ Mm}^3$ , za  $f = 1,0$  je  $4,986 \text{ Mm}^3$ , dok je kod maksimalne isporuke bio  $5,409 \text{ Mm}^3$ . Pri navodnjavanju 7000 ha i  $f = 2,0$  deficit za navodnjavanje za izabrani period u godini, u najsušnijoj godini, iznosi  $5,145 \text{ Mm}^3$ , za  $f = 1,0$  je  $6,925 \text{ Mm}^3$  dok je kod maksimalne isporuke bio  $12,576 \text{ Mm}^3$ .

Efekti upravljanja raspodelom vode iz akumulacije mogu se uočiti i poređenjem podataka o stanju zapremine u akumulaciji tokom celog osmotrenog perioda gde ne dolazi do spuštanja nivoa akumulacije ispod  $5 \text{ Mm}^3$  vode, dok je zaremna akumulacije pri maksimalnom korišćenju više puta dostizala nulu.

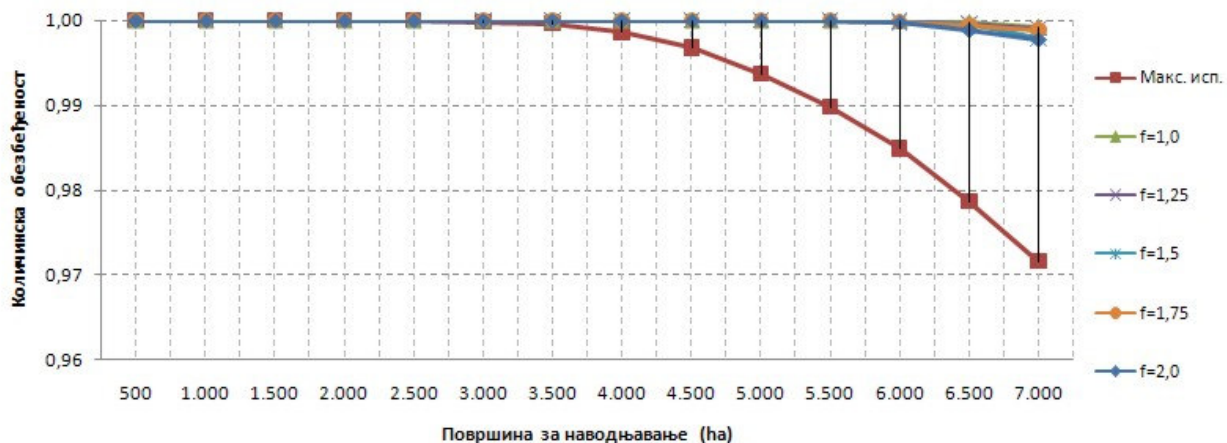
Na osnovu svega, može se reći da je kod isporuke vode primenom pravila upravljanja dobijena velika obezbeđenost isporuke vode prioritetnim potrošačima, a da je povoljnije za potrošača krajnjeg prioriteta korišćenje što većih količina vode, u ovom primeru navodnjavanje većih površina. Za proveru pravila upravljanja, model je primenjen na generisani niz hidroloških proticaja, a dobijeni rezultati su prikazani na slikama 8-11.

Na slikama 8 i 9 može se videti da se primenom pravila upravljanja i generisanih hidroloških nizova dobijaju bolji rezultati nego sa osmotrenim nizom. Sa dijagrama se vidi da se navodnjavanje 7000 ha može vršiti praktično bez ikakvog uticaja na vodosnabdevanje. Kod navodnjavanja se, takođe, primećuju bolji rezultati u odnosu na osmotrene podatke o proticajima. Sve krive su povećale svoje vrednosti i približile se krivoj dobijenoj pri maksimalnoj isporuci vode.

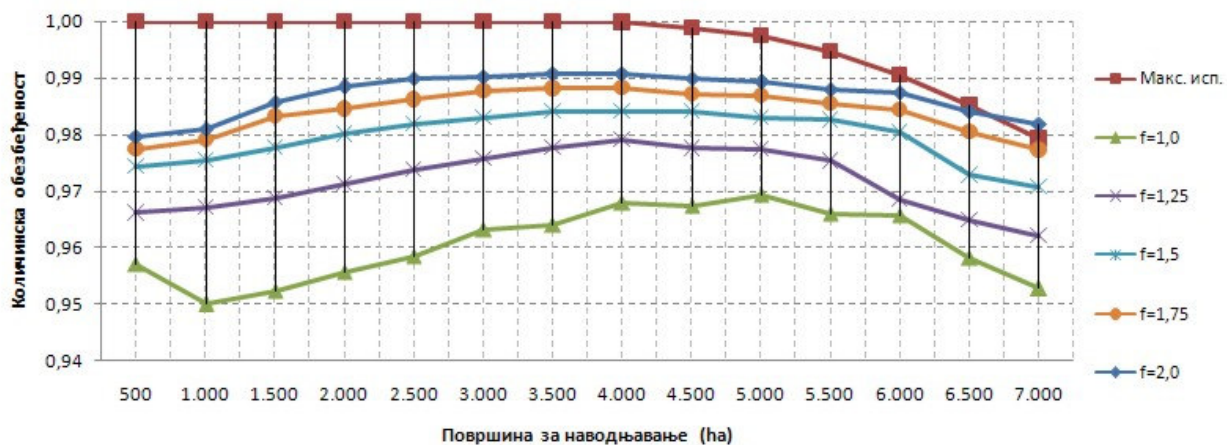
Treba još reći da se primenom pravila upravljanja u isporuci vode iz akumulacije dobijaju značajna poboljšanja u odnosu na maksimalnu isporuku iz akumulacije. Deficiti koji se dobijaju primenom ovog modela se smanjuju i daju mogućnost da se isporuka vrši agresivnije, što znači da se može vršiti isporuka vode za navodnjavanje i 7000 ha bez nekih većih posledica po isporuku za snabdevanje stanovništva vodom.



Slika 8. Uporedna količinska obezbeđenost vode za vodosnabdevanje primenom generisanih serija.

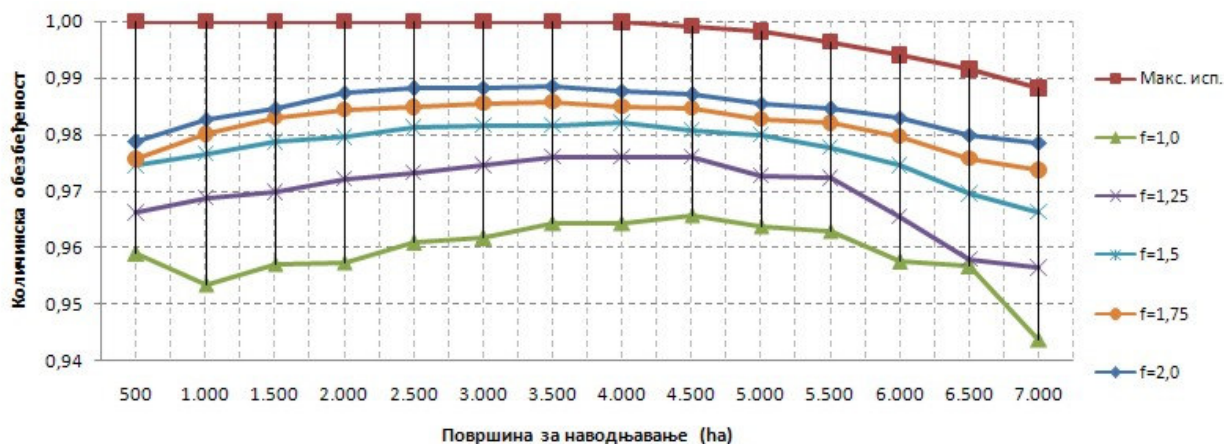


Slika 9. Uporedna vremenska obezbeđenost vode za vodosnabdevanje primenom generisanih serija.



Slika 10. Uporedna količinska obezbeđenost vode za navodnjavanje primenom generisanih serija.





Slika 11. Usporedna vremenska obezbeđenost vode za navodnjavanje primenom generisanih serija.

## 5. ZAKLJUČAK

Model za upravljanje raspodelom vode iz akumulacije je značajan pri analizi mogućnosti realizacije proticaja i zapremina u akumulaciji (odnosno nivoa u akumulaciji) u okviru dužih vremenskih perioda primenom generisanih hidroloških serija. Ovako dobijene realizacije proticaja i nivoa u akumulaciji u dužim vremenskim periodima se mogu analizirati statistički za potrebe raznih kriterijuma koji su od značaja pri dugoročnom planiranju upravljanjem raspodele vode iz akumulacije. Rezultati modela se takođe mogu analizirati u smislu procene učestalosti i intenziteta pojave deficita u raspodeli vode, odnosno procene obezbeđenosti isporuke vodom.

Radom su obrađena dva simulaciona modela za upravljanje raspodelom vode iz akumulacije: model koji vrši maksimalno zahtevanu raspodelu prema rangu potrošača i model kojim se voda isporučuje prema pravilima upravljanja. Model kojim se raspodela vode vrši prema maksimalnim zahtevima i rangu potrošača više služi kao referentni model u odnosu na koji se ocenjuje efikasnost ostalih modela.

Korišćenjem simulacionog modela za raspodelu vode prema pravilima upravljanja je ukazano na postojanje dve vrste deficita: restriktivne i deficite usled nedostatka vode. Sama pojava velikih restriktivnih deficita nije poželjna ni sa aspekta potrošnje, ni sa aspekta ostvarivanja ekonomskih parametara u raspodeli vode iz akumulacije. Model doprinosi određivanju optimalne veličine koeficijenta kojim se daje karakter upravljanja raspodelom vode pri čemu se možemo upravljati time da obezbe-

nost za navodnjavanje treba da bude u prihvatljivim granicama od oko 90%, a da obezbeđenost za vodosnabdevanje ne bude manja od 97%.

## LITERATURA

- [1] Avakumović, D. (2005) *Navodnjavanje*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [2] Bender, M., Stanic, M., Luketina, D., Hranisavljević, D. (2002) Optimisation meets the manager: a case study of the La Paz reservoir system, IWA World Water Congress, Melbourne.
- [3] Dorfman, R. (1965) Formal Models in the Design of Water Resource Systems, *Water Resources Research*, 1(3): 329-336.
- [4] Đorđević, B. (1990) *Vodoprivredni sistemi*. Građevinski fakultet, Beograd.
- [5] Đorđević, B., Dašić, T. (1995) Garantovani protoci nizvodno od brana kao mera zaštite biocenozna. Građevinski fakultet, Beograd, 1995.
- [6] Energoprojekt (1981) Akumulacija Barje, Glavni projekat, Knjiga 2 – Podloge, Sveska 2 – Hidrologija, Energoprojekt, Beograd.
- [7] Ilich, N., Despotovic, J. (2006) Use of recent advances in statistical science for multi-site generation of stochastic hydrologic time series. XXIII Conf. of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Beograd.
- [8] Lall, U., Moon, Y.-I. (1993) Kernel Flood Frequency Estimators: Bandwidth Selection and Kernel Choice, *Water Resources Research*, 29(4): 1003-1015.

- [9] Opricović, S. (1996) *Višekriterijumska optimizacija*. Naučna knjiga, Beograd.
- [10] Revelle, C. (1999) *Optimizing Reservoir Resources Including a New Model for Reservoir Reliability*, John Wiley & Sons.
- [11] Stanić, M., Plavšić, J. (2001) Studija navodnjavanja površina u Leskovačkoj opštini, Građevinski fakultet, Beograd.

## OPTIMIZATION OF WATER ALLOCATION FROM A MULTIPURPOSE RESERVOIR

by

Mr Djurica MARKOVIC

Faculty of Technical Sciences, University of Priština at Kosovska Mitrovica

Dr Milos STANIC, Dr Jasna PLAVSIC

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Dr Goran SEKULIC

Faculty of Civil Engineering, University of Podgorica, Montenegro

### Summary

The ever increasing water demand in conditions of divergent variability of both natural flows and water requirements can only be met by finding new water sources, combined with the building of new water storage reservoirs. It should be noted that existing reservoirs need often to be adapted for multiple water uses. The achievement of such goals requires an increased rationality of water uses, including the optimization of water allocation by developing a set of optimal operational decisions, taking into account the variability of hydrologic inputs, water requirements,

operational objectives and other constraints. The paper presents a simulation and optimization model for the operation of a multipurpose reservoir aimed for water supply and irrigation, in which water is allocated to the users on the ground of optimal-rule curves obtained from simulated long hydrologic series.

Key words: multipurpose reservoirs, water allocation, optimization, simulation model, simulated hydrologic series

Redigovano 18.12.2008.