

Mr Đurica MARKOVIĆ, dipl.inž.građ.¹
Dr Miloš STANIĆ, dipl.inž.građ.²
Dr Jasna PLAVŠIĆ, dipl.inž.građ.²
Dr Goran SEKULIĆ, dipl.inž.građ.³

UPRAVLJANJE RASPODELOM VODE IZ AKUMULACIJE

0352-2733, 45 (2012),p. 477-535

UDK: 627.81:628.1]:005.51
IZVORNI NAUČNI ČLANAK

Rezime

Ovim radom je učinjen pokušaj da se prikaže sve veća potreba racionalnog i odgovornog upravljanja vodnim resursom. Kako je vode kao resursa sve manje a potražnja za kvalitetnom vodom sve veća, povećava se svest o optimalnom upravljanju raspodelom voda. U tu svrhu, koriste se optimizacione metode koje omogućavaju da se u najboljoj meri ostvare potrebe više korisnika vode iz akumulacije. Jedna od metoda primenjena je prilikom optimizacije raspodele vode iz akumulacije Barje.

¹Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Prištini sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici

²Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

³Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet Podgorica
Rad primljen oktobra 2012.

Ključne reči: Voda kao resurs, hidrološke serije, upravljanje raspodelom vode, metode optimizacije.

MANAGEMENT OF WATER DISTRIBUTIONS FROM RESERVOIRS

Abstract

This paper is an attempt to show the increasing need of rational and responsible management of water resources. In order that increasingly less water as a resource and demand for quality water is increasing, increasing awareness about the optimal management of water distribution. For this purpose, using the optimization methods that make it possible to achieve demands of multiple users of water from the reservoir. One of the methods is applied in the optimal water distribution from the reservoir Barje.

Key words: Water as a resource, hydrologic series, management of water distributions, optimization methods

1 UVOD

Prikaz ukupnih količina vode na Zemlji može na najjednostavniji način naglasiti problem čovečanstva, kada su u pitanju raspoložive kvalitetne količine vode i dat je u Tabeli 1. Mora se napomenuti, da je precizne ocene količina vode veoma teško dati ali se daje jedan od takvih pokušaja AppliedHidrology, V.T.Chow [1].

Iz tabele se vidi da je od ukupnih količina vode, svega 2,5 % predstavljaju slatke vode, od čega su dve trećine u polarnom ledu a većina preostale trećine u podzemnim vodama na dubinama od 200 do 600 m. Ovo ukazuje da je veoma mala količina vode raspoloživa za korišćenje za vodosnabdevanje. Kada se ta količina vode umanjuje za one količine koje su zagađene i one koje nisu prostorno dostupne na mestima gde se potrebe za vodom javljaju (bez velikih hidrotehničkih mera i objekata), dobijamo predstavu o kojim raspoloživim količinama vode se govori. Komparativno se daje podatak da 8 milijardi ljudi na Zemlji, prema nekim normama potrošnje vode od 150 l po stanovniku na dan, ima dnevne potrebe za vodom od $1,2 \text{ km}^3$. Ovom prikazu se može dodati da se, prema nekim prognozama, već 2025. godine skoro dve trećine svetske populacije može suočiti sa nedostatkom vode za piće, što dovodi do zaključka da su problemi vode, kao resursa, sve izraženiji i imaju sve veću težinu.

Svedoci smo, u zadnjem vremenskom periodu, izraženoj trenda više procesa koji direktno utiču na životnu sredinu i raspoložive količine kvalitetne vode, a samim tim i život ljudske vrste. Spomenuti procesi su sledeći:

Tabela 1. Procena količina vode na Zemlji

Mesto	Zapremina (km ³)	Procenat ukupne vode	Procenat ukupne slatke vode
Okeani	1.338.000.000	96,5	
Polarni led	24.023.500	1,7	68,6
Ostali led i sneg	340.600	0,025	1,0
Podzemne vode			
Slatke	10.530.000	0,76	30,1
Slane	12.870.000	0,93	
Jezera			
Slatka	91.000	0,007	0,26
Slana	85.400	0,006	
Močvare	11.470	0,0008	0,03
Zemljišna vlaga	16.500	0,0012	0,05
Reke	2.120	0,0002	0,006
Biološka voda	1.120	0,0001	0,003
Atmosferska voda	12.900	0,001	0,04
Ukupno vode	1.385.984.610	100	
Ukupno slatke vode	35.029.210	2,5	100

1. Nagli razvoj industrije i tehnološki napredak su u prošlom veku veoma uticali na životnu sredinu tako da je kvalitetna voda kao resurs imala trend

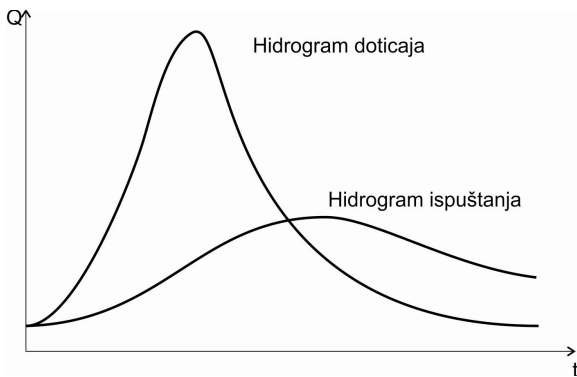
smanjenja kao posledica neprestanog i uvećanog zagađenja;

2. Veliki porast broja stanovništva na Zemlji direktno dovodi do sve većih potreba za kvalitetnom vodom a porast stanovništva prati i veća potreba za hranom, čija proizvodnja takođe, zahteva kvalitetnu vodu, i povećanim zauzećem prostora za život ljudi i pratećom infrastrukturom;
3. Uticaj klimatskih promena dovodi do izrazitog uvećanja prostorne i vremenske neravnomernosti pojave vode kao resursa;

Svi navedeni procesi utiču na raspoložive količine kvalitetne vode pa dolazi do pridavanja sve većeg značaja maksimalnom iskorišćenju vodnog resursa. Maksimalno iskorišćenje vodnog resursa pretpostavlja i postojanje nizova višekorisničkih akumulacija. Na ovaj način se maksimalno iskorišćava raspoloživi hidropotencijal vodotoka (akumulacije u nizu), ostali korisnici kao npr. turizam, vodosnabdevanje, poljoprivreda, pored energetike, uz optimalno upravljanje takvim sistemima akumulacija mogu da dobiju maksimalnu obezbeđenost u odnosu na unapred određene parametre.

2 ZADATAK OPTIMALNOG UPRAVLJANJA AKUMULACIJOM

Osnovni zadatak akumulacije je da vodu iz perioda kada je ima u izobilju sačuva za potrošnju u periodu malih voda. Poznato je i da su potrebe za vodom upravo najveće u periodu malih voda i suša. Iz ovoga proizilazi da je glavni zadatak akumulacije i upravljanja da doticaje koji su veoma promenljivi transformiše u ispust iz akumulacije koji je u najvećoj meri konstantan. Ovo bi moglo da se predstavi i hidrogramima prikazanim na slici 1.



Slika 1. *Hidrogrami doticaja i ispuštanja iz akumulacije*

2.1 Bilans voda u akumulaciji i njegovi elementi

Da bi se ovakva transformacija izvršila na najbolji način, koriste se modeli akumulacije. Modeli se najčešće koriste za potrebe određivanja kapaciteta akumulacije, određivanja politike upravljanja akumulacijom, razvoj operativnih planova, upravljanje u realnom vremenu i sl.

Najjednostavnije predstavljanje transformacije ulaza u izlaz u akumulaciji je korišćenjem bilansne jednačine:

$$V_n = V_{n-1} + q_n - g_{ni} - I_{ni} - P_n \quad (1)$$

gde su: V_n, V_{n-1} - zapremina u akumulaciji u prethodnom i sadašnjem vremenskom koraku; q_n - ukupan neto doticaj u akumulaciju u datom vremenskom koraku; g_{ni} - ukupan zbir svih gubitaka ($i=1,2,\dots$): gubici kroz tela brane, gubitke od isparavanja sa slobodne vodne površine i ispušteni garantovani protok nizvodno od brane; I_{ni} - ukupna količina vode koja se ispušta iz akumulacije za razne korisnike (i), kao što su snabdevanje stanovništva vodom, snabdevanje poljoprivrednih površina vodom za potrebe navodnjavanja i sl.; P_n - ukupna količina vode koja je prepuštena preko preliva brane.

2.1.1 Gubici kroz telo brane

Kako se kroz telo brane, odnosno njeno jezgro, i ispod tela brane vrši proceđivanje vode iz akumulacije u nizvodni deo, ova proceđivanja se svrstavaju u gubitke vode iz akumulacije. Iako su količine vode proceđene na ovaj način iz akumulacije relativno mali, uvršćeni su u bilans voda akumulacije.

2.1.2 Gubici usled isparavanja sa slobodne vodne površine

Pored gubitaka kroz telo brane, kod akumulacija se javlja i gubitak usled isparavanja sa njene slobodne vodne površine. U zavisnosti od površine akumulacije, broja sunčanih dana i intenziteta sunčevog zračenja javlja se isparavanje vode iz akumulacije. Količine vode izgubljene na ovaj način mogu biti značajne, što zavisi od spomenutih parametara, a može da bude i zanemarljivo.

2.1.3 Proračun garantovanog protoka nizvodno od brane

Za proračun garantovanog protoka nizvodno od brane razvijena je metoda GEP (garantovanih ekoloških protoka) koju su B. Đorđević i T. Dašić prikazali u svom radu [2]a koja je rezultat detaljnih hidroloških analiza malih voda na vodotocima Srbije.

Ova metoda je veoma operativna i može se upotrebiti imajući u vidu baze hidroloških podataka koji su standardne i uobičajene pri projektovanju brana, akumulacija i vodozahvata na rekama. Vrlo je jednostavna za praktičnu primenu i to se ogleda po tome što su urađene vrlo obimne regionalne hidrološke analize malih voda i morfološke analize, kako bi se sagledao čitav opseg primenljivosti ove metode, svodeći samu metodu na veoma jednostavno pravilo.

Metoda se može primeniti na vodotocima svih hidroloških režima i karakteristika u Srbiji, pri čemu se trebaju razdvojiti dva perioda u toku godine: (1) hladni period godine, kada su aktivnosti biocenoza vrlo usporene, i kada nema kritičnih aktivnosti u razvoju ihtiofaune, (2) topli period godine, kada se vrlo dinamično i živo odvijaju sve vitalne aktivnosti biocenoza, uključujući i njihovu reprodukciju. Očigledno je da je neophodno da se tada i garantovani ekološki protoci prilagode tom razvoju, pa su tada povećani.

Primena GEP metode zasniva se na primeni tri parametra: 1. prosečni višegodišnji protok na profilu brane, odnosno mesta zahvata vode \bar{Q} , 2. mala mesečna voda obezbeđenosti 95% $Q_{95\%}^{\min.mes}$, 3. mala mesečna voda obezbeđenosti 80% $Q_{80\%}^{\min.mes}$. Ukoliko se raspolaze višegodišnjim serijama dnevnih protoka, umesto

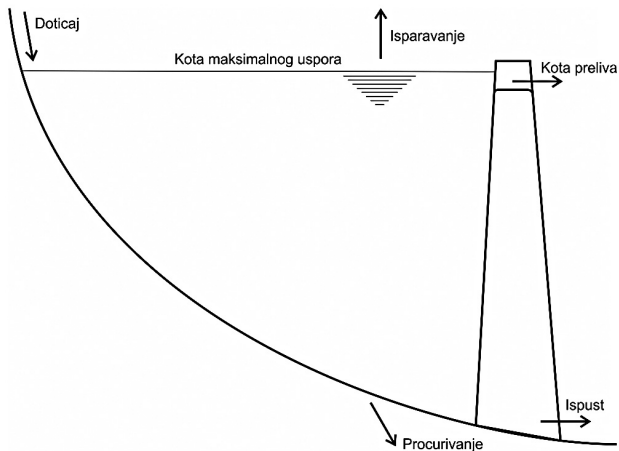
minimalnih mesečnih protoka $Q_{95\%}^{\min.mes}$ i $Q_{80\%}^{\min.mes}$ mogu se koristiti odgovarajuće vrednosti 30-dnevnih protoka malih voda istih verovatnoća $Q_{95\%}^{\min.(30)}$ i $Q_{80\%}^{\min.(30)}$.

2.2 *Jednonamenska akumulacija*

Osnovna svrha akumulacije je da kontroliše određenu količinu vode tokom nekog vremenskog perioda. Količine koje su pod kontrolom zavise od karakteristika sistema kao što su visina brane, zapremina akumulacije, kapacitet preliva, veličina doticaja, veličina upravljanog ispuštanja. Na slici 2 je dat shematski prikaz jednog jednostavnog sistema koji podmiruje potrebe jednog korisnika. Prikazani su gubici koji se javljaju u jednom sistemu, pri čemu se i pojava prelivanja vode preko preliva računa kao gubitak vode i ukoliko je moguće pokušava se da ne dođe do prelivanja nego da se sva voda iskoristi za potrebe korisnika.

Kod ovog zadatka razlikujemo kada je akumulacija na nekoj reci i onda su doticaji prirodni i nekontrolisani (osim u slučaju niza akumulacija kod kojih samo prva akumulacija ima nekontrolisane doticaje) i kada se voda u akumulaciju dovodi nekim kanalom i onda je doticaj u potpunosti kontrolisan. Kada je brana na reci, a doticaj višestruko veći od zahtevanih količina vode od strane korisnika dolazi do porasta nivoa vode u akumulaciji i ako je doticaj veliki i nakon dostizanja kote preliva dolazi

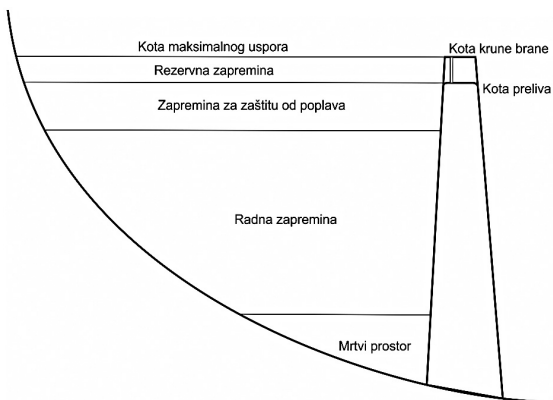
do pojave preliivanja vode, jer se maksimalna zapremina vode zadržala u akumulaciji.



Slika 2. Shematski prikaz jednonamenske akumulacije

2.3 Višenamenska akumulacija

Zbog sve većih potreba za vodom danas se akumulacije najčešće prave kao višekorisničke, a čak se i jednonamenske akumulacije pretvaraju u višenamenske.

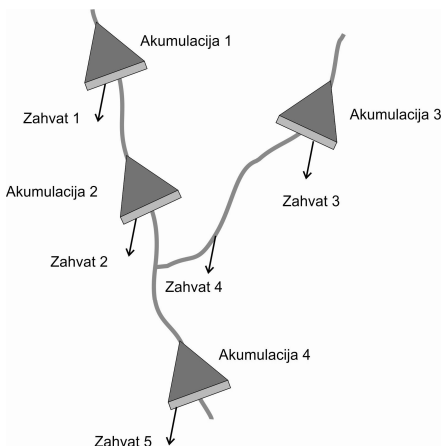


Slika 3. *Shematski prikaz višenamenske akumulacije*

Na slici 3. je dat shematski prikaz jedne višenamenske akumulacije kod koje možemo uočiti zapremine različitih namena. U donjem delu je mrtvi prostor, čija zapremina se koristi za sedimentaciju suspendovanog materijala koji dolazi sa vodotokom. Iznad se nalazi radna zapremina i iz nje se zahvata voda za različite korisnike, kao što su: vodosnabdevanje stanovništva, industrije, hidroenergetika, navodnjavanje, turizam i rečni saobraćaj. Navedeni korisnici imaju različite i često suprotstavljene interese, koji se mogu kompromisno zadovoljiti nekom od metoda optimizacije.

2.4 Sistemi od više akumulacija

Treći tip zadatka kod upravljanja raspodelom vode iz akumulacija je kada imamo sistem akumulacija u nizu.



Slika 4. Shematski prikaz sistema akumulacija u nizu

Ovde razlikujemo tri slučaja: 1. akumulacije u nizu koje se nalaze na istom vodotoku i zajedničkim upravljanjem se svaka pojava preliivanja na uzvodnoj akumulaciji može zadržati u nizvodnim akumulacijama (na slici 4. akumulacije u nizu su akumulacije 1, 2 i 4), 2. Sistem paralelnih akumulacija, koje se javljaju u slučaju kada su

na dva vodotoka izgrađene akumulacije i one se sprežu u jedinstveni sistem u cilju racionalnijeg i sveobuhvatnijeg korišćenja voda datog sliva i pouzdanijeg obezbeđivanja snabdevanja korisnika vodom.

Kod ovakvih kompleksnih vodoprivrednih sistema sa više akumulacija javlja se neophodnost korišćenja raznih optimizacionih metoda prilikom njihovog upravljanja.

3 PRIPREMA ULAZNIH PODATAKA ZA OPTIMIZACIONI MODEL

Akumulacije su hidrotehnički objekti koji omogućavaju regulaciju prirodnog režima oticaja sa nekog slivnog područja, pa prema tome i upravljanje vodnim resursima tog sliva. Ukoliko akumulaciju posmatramo kao sistem, upravljanje vodom kao resursom podrazumeva da se dati ulaz u sistem, uz određene ciljeve i ograničenja, transformiše u najpovoljniji izlaz iz sistema.

Prilikom planiranja regulacije oticaja sa sliva, određuju se potrebe korisnika vode iz akumulacije (energetika, vodosnabdevanje stanovništva, zaštita od štetnog delovanja vode, vodosnabdevanje industrije, potrebe poljoprivredne proizvodnje, turizam), čiji zahtevi često mogu da budu suprotstavljeni (npr. energetika ima potrebu da u akumulaciji u svakom trenutku budu maksimalni nivoi vode, a zaštita od poplava zahteva da određeni prostor u akumulaciji bude prazan u svrhu prihvatanja mogućeg

poplavnog talasa). Zatim se određuje kapacitet akumulacije nekom od metoda iz sledeće tri grupe [9]:

1. Klasične empirijske metode –koje na osnovu osmotrenih nizova doticaja u akumulaciju, za određivanje zapremine koriste određeni kritičan period malih voda. Ove metode se uglavnom koriste u preliminarnim analizama.
2. Analitičke metode – koje su zasnovane na analitičkoj relaciji između zapremine i ispuštanja iz akumulacije, na osnovu čega se može odrediti raspodela parametara kapaciteta akumulacije kao slučajne promenljive.
3. Metode generisanja uzoraka – koje na osnovu osmotrenog uzorka generišu veliki broj ulaznih podataka, na osnovu kojih se vrši simulacija ulaznih i izlaznih podataka i tako određuje zapremina akumulacije.

Pored određivanja potrebne zapremine akumulacije u fazi projektovanja, generisane serije podataka se koriste i za određivanje optimalnog upravljanja raspodelom vode iz akumulacije, što predstavlja sličan zadatak.

Kao osnova za određivanje optimalnih pravila upravljanja, koriste se generisane hidrološke serije proticaja, uz pomoć kojih se pretpostavlja da uz dovoljno dug period generisanih serija mogu da se očekuju i uzastopni nizovi

sušnih i vodnih godina, kao i da se na takve događaje odgovori optimalnim upravljanjem koje će zadovoljiti potrebe svih korisnika sa određenom obezbeđenošću. Optimalno upravljanje raspodelom vode iz akumulacije se određuje nekim od simulacionih modela.

Prvi pokušaji generisanja hidroloških serija su izveli, 60-tih godina prošlog veka [11] i [8]. Od tada su izvršeni brojni primeri da se naprave stohastičkisimulacioni modeli i dobar pregled o tome su dali u svom radu [10], koji kažu da idealni model koji se koristi za stohastičku simulaciju na više mernih mesta i sa višesezonskim nizovima podataka, treba da zadrži ukupne statistike osmotrenog niza, strukturu zavisnosti (linearnu i nelinearnu), marginalne raspodele na različitim nivoima na svakom mernom mestu, uz dodatnu kros korelacije između mernih mesta.

Hidrološki model koji se zasniva na metodologiji prikazanoj u radovima [3] i [4] je formulisan tako da se poštuje princip da generisane hidrološke serije trebaju da imaju praktično iste statističke osobine kao i osmotrene serije, da zadrže korelacione karakteristike osmotrenih nizova. Postavljena je i pretpostavka, obzirom na velike raspone kretanja koeficijenata asimetrije i varijacije, da se metoda bazira na prethodno logaritmovanim podacima o proticajima. 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 [5]. Model generiše logaritamski transformisane hidrološke serije podataka Monte Carlo metodom pri čemu algoritam uslovljava da generisana serija dobije statistike osmotrene serije. Kako su proticaji na jednom profilu po svojoj prirodi autokorelisani, a kroskorelisani kada se uzima u obzir više mernih mesta, dobijene serije se uklapaju da bi dobile osobine i zadržale koeficijente korelacije osmotrenih serija. Na kraju, podešavaju se godišnje statistike generisanih podataka sa godišnjim statistikama osmotrenih serija.

Na opisani način, slučajni proces koji je opisan osmotrenim serijama zadržava se i u generisanim serijama. Ovde treba napomenuti i da je pri generisanju hidroloških serija moguća skoro potpuna automatizacija i to korišćenjem neparametarskih funkcija raspodela čije je korišćenje detaljno opisano u radu [6].

4 METODE OPTIMALNOG UPRAVLJANJA AKUMULACIJOM

Nakon određivanja dugačkih nizova doticaja u akumulaciju, uz poznavanje drugih uslova i ograničenja sistema, može se započeti izvršavanje optimizacije uprav-

ljanja raspodelom vode iz akumulacije. Optimizacione postupke možemo podeliti na više načina: prema vrsti optimizacionog problema, prema metodama optimizacije, na metode lokalne i globalne optimizacije.

Jedna od podela je prema vrsti optimizacionog problema:

1. U odnosu na broj kriterijumskih funkcija (jedno-kriterijumske i višekriterijumske);
2. U odnosu na ograničenja delimo ih na one bez ograničenja i sa ograničenjima (linearna i nelinearna);
3. U odnosu na formu kriterijumske funkcije imamo linearne i nelinearne (kvadratne,...)
4. Prema domenu promenljivih (diskretan, realan, mešoviti)

Prema metodama optimizacije dele se na:

1. Determinističke (linearno programiranje, kvadratno programiranje, kombinatorna optimizacija (grafovi), nelinearno programiranje (metode lokalne optimizacije gde razlikujemo one sa gradijentima i bez gradijenata));
2. Stohastičke (metode globalne optimizacije – heuristike)

Poslednjih godina najčešće opisivane optimizacione metode u radovima su: linearno programiranje, nelinearno programiranje, dinamičko programiranje, stohastičko dinamičko programiranje, heurističko programiranje u koje spadaju genetski algoritmi, evolucioni algoritmi, fuzzy logika, neuronske mreže, razne modifikacije spomenutih metoda kao i njihove kombinacije. U ovom radu će se dati kratki prikaz linearnog i dinamičkog programiranja.

4.1 *Linearno programiranje*

Pri upravljanju akumulacijom, linearno programiranje je jedna od najčešće korišćenih metoda optimizacije. Postoji više razloga zbog kojih je linearno programiranje čest izbor: pre svega jednostavnost korišćenja, ne zahteva nikakvo inicijalno rešenje, primenljiv je na raznovrsne tipove problema, dostupna su efikasna rešenja algoritama i širok spektar gotovih računarskih programa napravljenih za rešavanje problema linearnog programiranja.

Među prvim zabeleženim primenama linearnog programiranja za optimalnu raspodelu vode iz akumulacije je napravio Dorfman 1962. godine [13]. On je napravio tri verzije modela raspodele vode, gde je svaki kompleksniji od prethodnog, a gde je računata maksimizacija ekonomske ciljne funkcije. Nakon toga se može navesti veliki broj istraživanja i primene linearnog programiranja, a neki od značajnijih se mogu naći u radovima [12] i [13].

Linearno programiranje se sastoji od maksimizacije ili minimizacije linearne ciljne funkcije sa skupom linearnih ograničenja. Ciljnu funkciju Z možemo da pišemo na sledeći način:

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

U prethodnim jednačinama x_j je promenljiva po kojoj se vrši optimizacija, a_{ij} , b_i i c_j su konstante, n je broj promenljivih i m broj ograničenja.

4.2 *Dinamičko programiranje*

Dinamičko programiranje nije precizan algoritam kao što je to linearno programiranje, ali je opštiji pristup u rešavanju optimizacionih problema. Dinamičko programiranje je optimizacioni postupak koji omogućava određivanje optimalnog rešenja kod višestepenog procesa odlučivanja. Kod višestepenog procesa odlučivanja u svakom stepenu (ili etapi) može se doneti odluka i sprovesti odgovarajuća akcija. Na taj način se omogućava da se izvrši dekompozicija glavnog problema sa više promen-

ljivih na više jedno-dimenzionalnih problema (sa jednom promenljivom) koji je lakše rešiti.

Kao tvorac dinamičkog programiranja se smatra Belman koji je 1950-tih godina rešavao problem tako što je proučavao hijerarhiju potproblema sadržanih u glavnom problemu.

Među prvim zabeleženim primenama dinamičkog programiranja su Hall i ostali [12] koji su dinamičkim programiranjem optimizovali ispuštanje iz jedne akumulacije uz maksimizaciju dobiti od prodaje vode i energije. Takođe i kod dinamičkog programiranja se mogu navesti dalje primene i mnogi istraživači koji se mogu naći u radovima [12] i [13].

Osnova dinamičkog programiranja je rekurentna relacija koja se razvija za svaki optimizacioni postupak posebno, što upućuje na to da nema jedinstvenog algoritma dinamičkog programiranja. Opšti algoritamski koraci, koji se dalje razrađuju za svaki optimizacioni zadatak, mogu se navesti kao:

1. Analiza strukture optimalnog rešenja, određivanje faza problema i stanja u kojima se sistem može naći.
2. Definisane rekurentne relacije.
3. Određivanje početnih vrednosti.
4. Proračun sledeće faze. Za svaku dozvoljenu vrednost nezavisno promenljive x_j , određuje se

vrednost funkcije f_j^* i odgovarajuća vrednost promenljive. Njihove vrednosti se memorišu.

5. Korak 4. se ponavlja dok se ne izvrši poslednja faza proračuna.
6. Iz memorisanih podataka, prolazom unazad, određuje se optimalna trajektorija.

5 PRIMENA OPTIMALNOG UPRAVLJANJA NA AKUMULACIJU BARJE

5.1 Metodologija primenjena u istraživanju

5.1.1 Modeli upravljanja isporukom vode iz višenamenske akumulacije

U realnim uslovima upravljanja akumulacijom dotoci u akumulaciju su nepoznati, pa se upravljanje akumulacijom svodi na primenu unapred definisanih pravila. Imajući u vidu neizvesnost u pogledu realizacije očekivanih dotoka, kao i zahtevanu obezbeđenost u snabdevanju vodom korisnika, sračunate maksimalne vrednosti isporuke vode nije moguće ostvariti bez pojave deficita u periodima malovođa. Ipak pronalaženje globalno optimalnog rešenja je potrebno zbog procene „izdašnosti“ akumulacije u fazi planiranja, a s obzirom da se kao rezultat optimizacije dobijaju i optimalne trajektorije zapremine akumulacije, ovi podaci se mogu iskoristiti i

za definisanje pravila upravljanja koja će svakako voditi računa o stanju zapremine akumulacije.

Vrednovanje samih pravila upravljanja se može ostvariti kroz simulaciju, koja se bazira na osmotrenom nizu podataka ili se dotoci u akumulaciju mogu generisati u formi sintetičkih serija podataka.

Globalno optimalno rešenje podrazumeva idealnu situaciju u kojoj se, na bazi osmotrenog niza podataka, maksimalna isporuka vode ostvaruje bez deficita, odnosno sa maksimalnom obezbeđenošću koja iznosi 1,0. Upravljanje u realnom vremenu na osnovu operativnih pravila upravljanja, koje uključuje neizvesnost u pogledu budućih doticaja u akumulaciju će biti nepovoljnije, ali se pravila upravljanja mogu vrednovati na osnovu odstupanja od globalno optimalnog rešenja.

Obezbeđenost u isporuci vode se računa na osnovu nepodmirenih zahteva korisnika odnosno deficita u isporuci vode i rezultat je simulacije, koji se može analizirati na više načina:

- sumarni deficit u odnosu na sumarnu potrebu za vodom je parametar koji se definiše kao količinska obezbeđenost (O_b).
- vremenska obezbeđenost je odnos broja vremenskih perioda u kojima se pojavljuje deficit u odnosu na ukupan broj vremenskih perioda u kojima postoji poteba za vodom

- trajanje deficita je takođe podatak koji je važan za većinu potrošača i definiše se kao broj uzastopnih vremenskih perioda u kojima se javio deficit. Za pojedine korisnike su od značaja samo defцитi koji su veći od neke unapred zadate vrednosti (recimo za navodnjavanje je važan deficit koji je 10-15% veći od potrebe za vodom u tom periodu) ili su od posebne važnosti defцитi koji se javljaju u periodima koji su najznačajniji za razvoj kulture. Svi navedeni slučajevi se mogu analizirati na osnovu rezultata simulacije.

Simulacioni model treba da obuhvati problem višenamenskog korišćenja vode iz akumulacija i u ovoj fazi se razmatra samo slučaj akumulacije koja se koristi prvenstveno za vodosnabdevanje, a potom se preostale raspoložive količine mogu koristiti i za navodnjavanje.

5.1.2 *Model isporuke vode prema rangu potrošača*

Najjednostavnija pravila upravljanja bi bila ona u kojima se u isporuci vode ne vodi računa o stanju akumulacije i periodu godine, već se voda isporučuje prema prioritetima. Pri tome se isporučuju maksimalne količine koje korisnici zahtevaju, a deficit se pravi samo ako u tom trenutku nema dovoljno raspoloživih količina vode u akumulaciji. Raspoloživa količina vode u akumulaciji je

zbir trenutne zapremine akumulacije i dotoka u akumulaciju.

U slučaju operativnog upravljanja akumulacijom, podatak o dotoku bi trebalo dobiti na osnovu nekog modela za prognozu doticaja. Međutim, operativna pravila upravljanja, pa i sami simulacioni modeli se primenjuju na dnevnom nivou, pa u slučaju velikih akumulacija koje imaju zapreminu za godišnje izravnaje dotoka i kada su pravila upravljanja definisana na način da nas interesuje samo sadašnji trenutak, ovaj podatak nema veliki značaj.

Kako se radi o višenamenskoj akumulaciji, neophodno je definisati prioritete u potrošnji. Jasno je da je sa vodoprivredne tečke gledišta potrebno prvo podmiriti potrebe ekološki garantovanog protoka, zatim za snabdevanje vodom stanovništva i industrije, onda i prioritete potrebe nizvodnih korisnika i na kraju navodnjavanje.

Imajući ovo u vidu uvodi se sledeća oznaka: (I_{jt}^*) , kojom se označavaju zahtevi (želje) za isporukom vode potrošača j -tog prioriteta u periodu t .

Imajući u vidu raspoložive količine vode, moguće je da zahtevane potrebe j -tog potrošača ne mogu biti zadovoljene pa se u tom slučaju javlja deficit (D_{jt}) a zahtevane potrebe j -tog prioriteta se koriguju na one koje su stvarno mogle biti realizovane u i -tom periodu (I_{jt}) .

$$I_{jt} = \min\{u_t + q_t, I_{jt}^*\}$$

$$D_{jt} = I_{jt}^* - I_{jt} \quad (5)$$

Nakon podmirivanja potreba potrošača koji je j -ti po prioritetu, raspoloživa količina vode r_{jt} se umanjuje za količinu koja je isporučena, a zatim se ide na potrošača koji je sledeći po prioritetu.

$$r_{jt} = r_{j-1,t} - I_{jt} \quad (6)$$

Pošto su sve kategorije potrošača iscrpljene preostalu količinu vode treba uporediti sa korisnom zapreminom (W) i proveriti da li se javlja prelivanje u periodu t , a zatim i sračunati zapreminu akumulacije u_t na početku narednog perioda ($t+1$):

$$r_{jt} = \begin{cases} > W, y_t = r_{jt} - W, u_t = W \\ \leq W, y_t = 0, & u_t = r_{jt} \end{cases} \quad (7)$$

Na kraju proračuna određuje se obezbeđenost snabdevanja vodom svake kategorije potrošača:

$$Ob_j = 1 - \frac{\sum_t D_{jt}}{\sum_t I_{jt}^*} \quad (8)$$

5.1.3 Model isporuke vode prema pravilima upravljanja

Pod pravilima upravljanja se najčešće podrazumeva da se odluka o isporuci vode ne donosi samo na osnovu iskazanih potreba korisnika i njihovog prethodno defini-

sanog prioriteta, već se eventualna korekcija pravi i zbog stanja (zapremine) akumulacije kao 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, 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 meseca, ali se mogu definisati i minimalne dopuštene vrednosti zapremine akumulacije u svakom mesecu. Kada je stepen ispunjenosti akumulacije (relativna zapremina akumulacije - V_r) u nekom vremenskom preseku t manja od ove granične vrednosti (V_r^g) tada se procenjuje da je odstupanje od očekivane vrednosti veliko i da treba početi sa restriktivnom isporukom vode iz akumulacije, što obično podrazumeva prvenstveno smanjenu isporuku za potrošača najnižeg prioriteta.

Određivanje trajektorije granične vrednosti zapremine akumulacije može biti predmet optimizacije, ali se u prvom koraku do nje može doći elementarnom statističkom analizom. To podrazumeva da se iz optimalne trajektorije zapremine akumulacije, sračunaju srednje vrednosti i standardne devijacije relativne zapremine akumulacije po mesecima i da se usvoji parametar f .

$$V_r^g = \bar{V}_r - f \cdot \sigma \quad (9)$$

Usvojeni bezdimenzionalni parametar f 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 za potrebe navodnjavanja, ali se može očekivati i češća pojava deficita, odnosno smanjene obezbeđenosti u isporuci vode za potrošače višeg prioriteta.

5.1.4 Model isporuke vode prema operativnim zonama

Kao što je već rečeno pod pravilima upravljanja se najčešće podrazumeva da se odluka o isporuci vode ne donosi samo na osnovu iskazanih potreba i prethodno definisanog prioriteta, već se korekcija pravi i zbog stanja akumulacije kao i vremenskog preseka t (perioda godine) kada se ta odluka donosi.

U zavisnosti od pravila upravljanja pražnjenje akumulacije može biti agresivnije, pri čemu se vrši maksimalna isporuka vode iz akumulacije – što uglavnom dovodi do brzog pražnjenja akumulacije, ali može biti i opreznije, kada se veoma vodi računa o rezervi vode u akumulaciji. Naravno, najbolje je rešenje negde između ove dve varijante upravljanja vodom. Ovo je posledica neizvesnosti prognoze dotoka u akumulaciju.

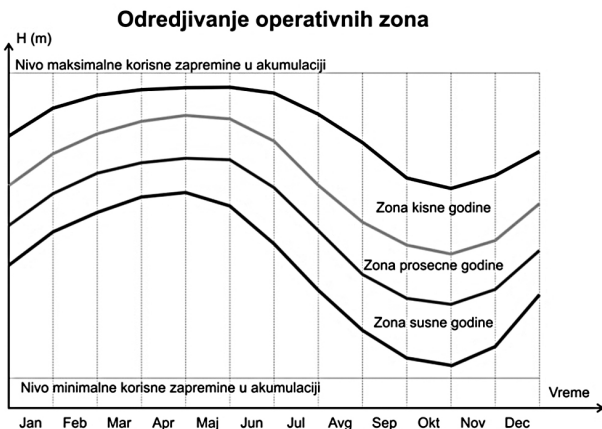
Ideja za upravljanje isporukom vode iz akumulacije na osnovu stanja u akumulaciji prema operativnim zonama je da se definišu stanja u akumulaciji koja su promenljiva tokom godine, pri čemu se unapred određenim operativnim zonama definišu jasne granice stanja u akumulaciji. Operativne zone se određuju na osnovu prethodnih osmotrenih stanja u akumulaciji.

Da bi se odredila optimalna trajektorija zapremine akumulacije određuje se veliki broj mogućih trajektorija, pri određenim pravilima upravljanja i prioritetima, za šta se koriste generisane serije hidroloških podataka. Na osnovu velikog broja trajektorija, za određeni vremenski trenutak (nedelju, mesec) se odrede statistike i utvrde karakteristične tačke (20%, 40%, 60% i 80% tačke osmotrenih raspodela datog niza) za svaki vremenski korak u godini.

Kada se ovaj postupak završi za sve vremenske korake u godini dobijaju se granične linije koje opisuju operativne zone datog upravljanja (slika 5). Na slici se može videti da se zonama utvrđuje i da li je godina kišna, prosečna ili sušna. Znači kod određenih operativnih zona samim položajem trajektorije moguće je uočiti u kakvom se hidrološkom periodu nalazi.

Kod operativnih zona važi i da se one vremenom mogu menjati. Sam način određivanja operativnih zona kazuje da se one vremenom mogu menjati i to usled hidroloških promena – kada se statistički koriguju

određene granice između zona i usled promena u upravljanju raspodelom vode iz akumulacije. Promene u upravljanju mogu nastati u smislu iskazanih uvećanih potreba za vodom, promeni prioriteta pri isporuci vode i sl.



Slika 5. Korisna zapremina akumulacije izdvojena prema operativnim zonama

5.2 Rezultati

U skladu sa usvojenom metodologijom da bi se izvršila procena raspodele vode iz akumulacije potrebno je odrediti pravila po kojima bi se ta raspodela vršila. Polazna jednačina je jednačina bilansa

$$u_t = u_{t-1} + q_t - I_t - p_t, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Član q_t u jednačini predstavlja raspoloživi neto dotok u akumulaciju. On predstavlja ukupan dotok u akumulaciju u nekom vremenskom trenutku umanjen za gubitke vode iz akumulacije i garantovani ekološki protok, odnosno vodoprivredne potrebe nizvodnih korisnika akumulacije. Znači garantovani ekološki protok posmatramo kao prioritnog korisnika 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 sledeći prioritet ($j = 2$).

Kao sledeći korisnik vode iz akumulacije se javlja poljoprivreda ($j = 3$) sa zahtevima za navodnjavanje sa specifičnim potrebama koje su prethodno sračunate za osmotreni period 1958-1991. Za prosečnu godinu ove potrebe iznose $2590 \text{ m}^3/\text{ha}$ ili $0,259 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Naravno, osnovni problem je izrazito velika neravnomernost sa kojom se voda troši u sistemima za navodnjavanje.

U procesu rešavanja zadataka optimizacije raspodele potrošnje iz akumulacije polazilo se od toga da treba maksimalno koristiti vodu iz akumulacije. Postavljanje agresivnije potrošnje vode iz akumulacije znači i da će sa jedne strane maksimalni zahtevi potrošača biti zadovoljeni a sa druge strane i da će se češće javljati deficiti u potrošnji. Ceo zadatak optimizacije se svodi na to da se

dođe do optimuma pri maksimizaciji potrošnje tj. minimizaciji deficita uz najveću obezbeđenost u isporuci vode. Ovaj način upravljanja ne donosi najveću dobit ali daje razumnu obezbeđenost u isporuci vode.

Da bi se do tog optimuma došlo postavljaju se dodatna pravila prilikom raspodele vode. U jednom razmatranju se vodilo računa o dotoku i zapremini vode u akumulaciji, pri čemu se u zavisnosti od dotoka i stanja u akumulaciji uvode redukcije u isporuci vode. Razmatranje ovakvih ograničenja pri upravljanju vodom iz akumulacije je neophodno imajući u vidu hidrološke prilike u slivu reke Veternice. Na osmotrenom nizu podataka je primećeno povremeno javljanje višegodišnjih sušnih perioda kod kojih je srednja potrošnja veća od srednjeg dotoka. Kao posledica toga javlja se kontinualno smanjenje nivoa vode u akumulaciji.

Imajući u vidu spomenuto ovim primerom su razmatrana tri slučaja upravljanja vodom iz akumulacije:

1. U prvom slučaju pravila upravljanja su se odnosila na stanje zapremine vode u akumulaciji, pri čemu se vršene redukcije u isporuci vode kada se zapremina vode spusti ispod unapred određenih granica;
2. U ovom slučaju je pored zapremine vode u akumulaciji vođeno računa i o trenutnom dotoku, odnosno, vršeno je poređenje dotoka u

akumulaciju za poslednje 4 nedelje sa potrošnjom vode u te 4 nedelje. U zavisnosti od trenutnog dotoka i stanja zapremine u akumulaciji primenjene su određene redukcije u isporuci vode;

3. Primena koncepta operativnih zona. Na osnovu određene zahtevane potrošnje vode iz akumulacije određene su zone potrošnje i u zavisnosti od trenutnog položaja stanja u akumulaciji u odnosu na zone potrošnje vrše se restriktivna upravljanja vodom iz akumulacije.

5.2.1 *Model isporuke vode iz akumulacije prema rangu potrošača*

Kao što je već rečeno, ovaj način upravljanja isporukom vode iz akumulacije podrazumeva da se prvo odrede prioriteti u isporuci vode. U slučaju akumulacije „Barje“ prioritetni korisnici su određeni na već navedeni način: garantovani ekološki protok je posmatran kao prioritet prvog reda, kao prioritet drugog reda je snabdevanje vodom stanovništva i kao poslednji korisnik u nizu je potrebe vode za navodnjavanje poljoprivrednih dobara.

Pošlo se od date jednačine bilansa:

$$u_t = u_{t-1} + q_t - I_t - p_t, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

odnosno:

$$u_t = u_{t-1} + q_t - I_s - I_n - p_t, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

gde su: I_s – isporuka vode za potrebe stanovništva i I_n – isporuka vode za potrebe navodnjavanja.

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 podmirenja prioritetnog potrošača preostane vode ona se isporučuje sledećem potrošaču po prioritetu.

Kada se sračunavaju bilansi za svaku nedelju, na nasledenu 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 zapremina veća od ukupne zapremine akumulacije, taj višak predstavlja preliv iz akumulacije.

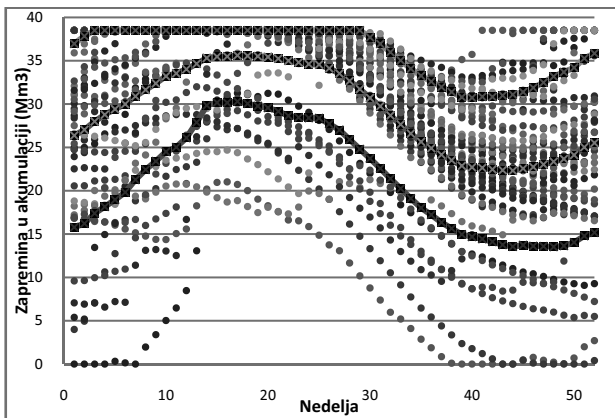
Model napravljen na ovaj način je ispitivan na osmotrenim podacima a zatim je testiran na generisanim 1000-godišnjim nizovima.

Kao rezultati koji su zanimljivi u smislu primene upravljanja isporukom vode iz akumulacije prema rangu potrošača nameću se ukupni deficiti u isporuci vode, deficiti u periodu kada je navodnjavanje najznačajnije,

prelivi, obezbeđenost u isporuci vode i to količinska i vremenska i sl.

Na grafikonu kojim su predstavljene trajektorije stanja zapremine u akumulaciji prikazane su i tri karakteristične zapremine. Jedna (srednja) predstavlja srednju vrednost zapremina za datu nedelju. Gornja predstavlja srednju vrednost uvećanu za jednu standardnu devijaciju, dok donja predstavlja srednju vrednost umanjenu za jednu standardnu devijaciju. Može se videti sa dijagrama kakve su promene stanja u akumulaciji pri isporuci vode za navodnjavanje 3000 ha i 7000 ha površina.

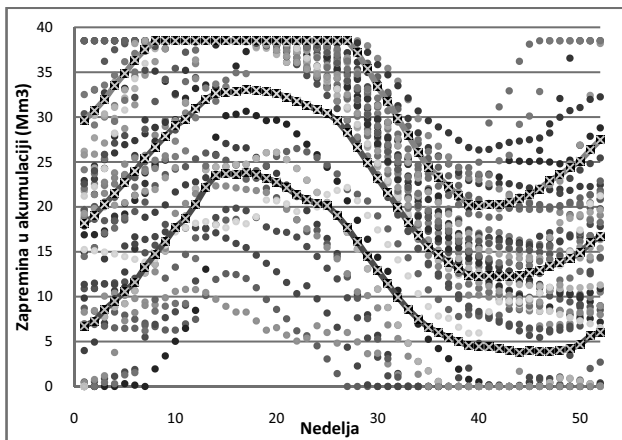
Na osnovu dijagrama na slici 6. i 7. može se uočiti kretanje trajektorija stanja zapremine tokom godine. Na slici 6. je zanimljivo uočiti da trajektorije stanja dostižu nulta stanja u tri godine i to jednom na početku godine i dvaput posle 38. nedelje. To znači i da se u tim periodima pojavljuju deficiti. 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. Takođe, vidi se da su trajektorije srednje vrednosti i donje granice u višem delu dijagrama što pokazuje da se iz akumulacije „Barje“ bez problema mogu navodnjavati površine od 3000 ha zemlje.



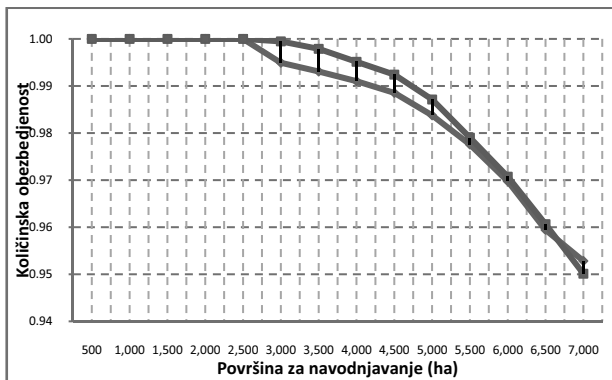
Slika 6. *Dijagram stanja zapremina u akumulaciji pri navodnjavanju 3000 ha*

Kada pogledamo sliku 7. primećuje se da su karakteristične trajektorije stanja spuštenije i da se može primetiti veći broj godišnjih trajektorija stanja zapremine u akumulaciji koje dostižu nulta stanja. To je posledica agresivnijeg trošenja vode jer se navodnjava 7000 ha zemlje. Iz dijagrama obezbeđenosti se može primetiti da je količinska obezbeđenost potrošača pri navodnjavanju 7000 ha oko 95 % a pri navodnjavanju 5000 ha više od 98 % pri čemu je vrednost obezbeđenosti isporuke vode za navodnjavanje nešto veći od vodosnabdevanja. Kod vremenske obezbeđenosti vodosnabdevanje ima nešto

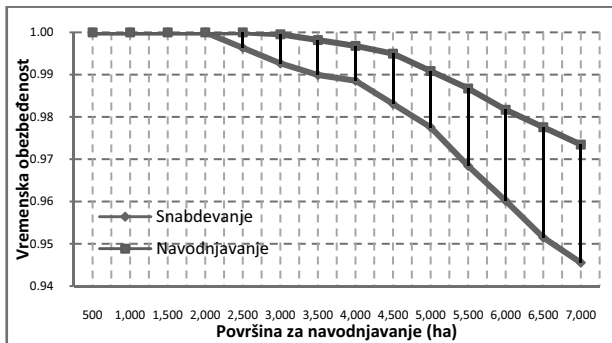
manju vrednost od 98% a kod navodnjavanja nešto više od 99%, pri navodnjavanju 5000 ha.



Slika 7. Dijagram stanja zapremine u akumulaciji pri navodnjavanju 7000 ha



Slika 8. Količinska obezbeđenost vode pri maksimalnoj isporuci

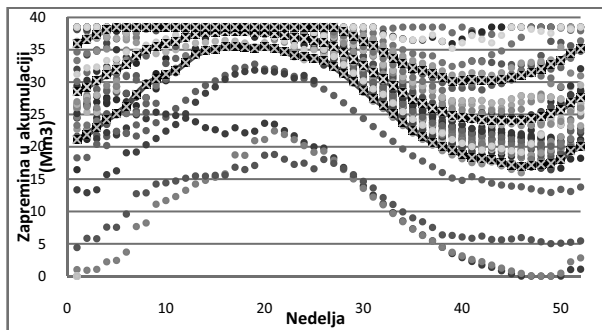


Slika 9. Vremenska obezbeđenost vode pri maksimalnoj isporuci

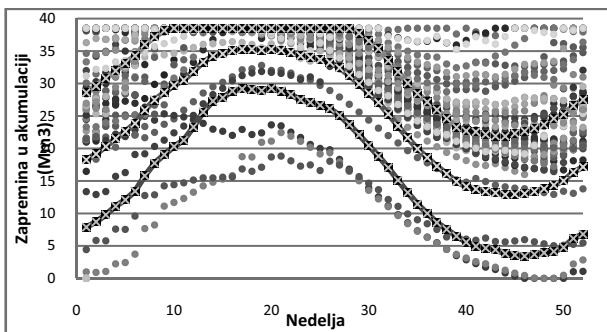
Kada se već govori o obezbeđenosti snabdevanja potrošača vodom, mora se reći da očigledno postoji uticaj isporučivanja vode za navodnjavanje na isporuku vode za vodosnabdevanje stanovništva. Ukoliko bi postojao samo jedan korisnik vode iz akumulacije - snabdevanje stanovništva vodom, količinska i vremenska 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 potrebna za zalivanje i koji je to procenat obezbeđenosti minimalan za potrebe snabdevanja stanovništva vodom i gde se dobija najveća dobit ne ugrožavajući potrebe stanovništva za vodom.

Gledajući po količinama 5 % obezbeđenosti se čini uslovno prihvatljivim, pa zato treba pogledati koji su to redovi veličine, jer se ti deficiti javljaju upravo u periodima godine kada su i potrebe za vodom najveće.

Da bi se izvršila provera primene pravila upravljanja i simulacionog modela, model će se primeniti na generisani niz hidroloških podataka. Kako je model sa isporukom maksimalnih potraživanih količina vode korisnicima (kada je to moguće) kao neki referentni model, primena datih pravila će se izvršiti i na ovaj slučaj isporuke vode iz akumulacije.

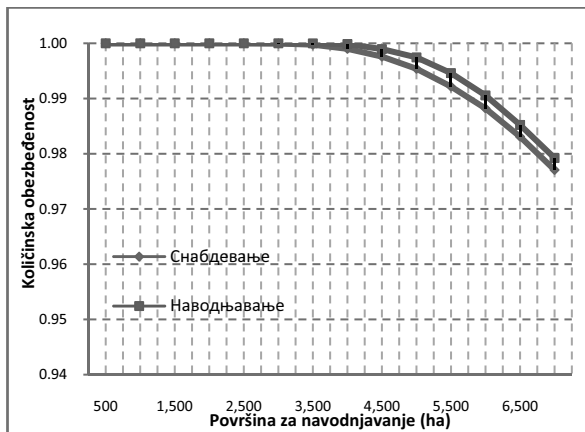


Slika 10. Dijagram stanja zapremina u akumulaciji pri navodnjavanju 3000 ha primenom generisanih nizova



Slika 11. Dijagram stanja zapremina u akumulaciji pri navodnjavanju 3000 ha primenom generisanih nizova

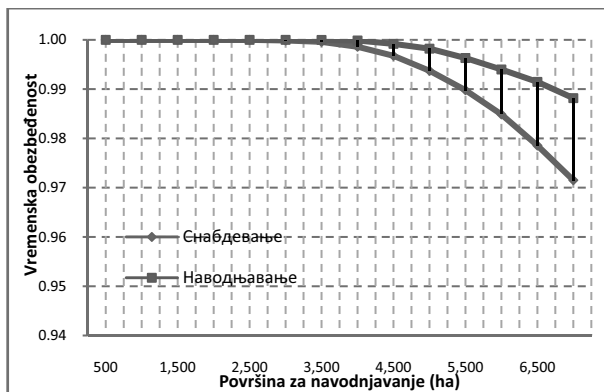
Prvo će se prikazati dijagrami stanja zapremine akumulacije pri isporuci za navodnjavanje 3000 ha i 7000 ha površina (slike 10 i 11). Sa dijagrama se može primetiti da su veoma bliske vrednosti karakterističnih tarjektorija stanja zapremina u akumulaciji u odnosu na osmotrene vrednosti hidroloških podataka.



Slika 12. Količinska obezbeđenost vode pri maksimalnoj isporuci primenom generisanih nizova

Kod obezbeđenosti se može primetiti da se dobija bolji rezultat u odnosu na osmotreni niz pri čemu se količinska obezbeđenost povećala na 98 % i kod vodosnabdevanja i kod navodnjavanja, dok se kod vremenske obez-

beđenosti za vodosnabdevanje dobija dosta bolji rezultat a obezbeđenost isporuke za navodnjavanje je takođe pokazala poboljšanje u odnosu na osmotreni niz podataka.



Slika 13. *Vremenska obezbeđenost vode pri maksimalnoj isporuci primenom generisanih nizova*

Kada se posmatraju 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 pojavljenih u nizu u odnosu na ukupnu godišnju potražnju za vodom dobijamo da je taj pro-

cenat 39,32 %. Taj procenat je 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.

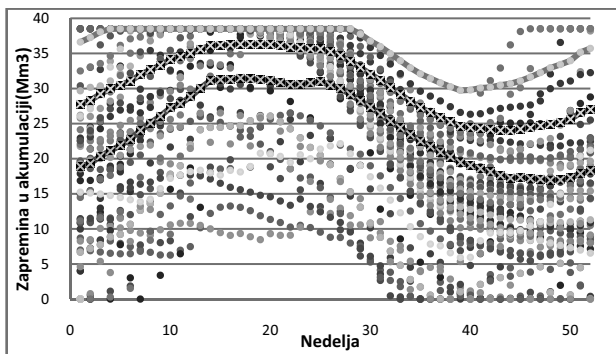
5.2.2 *Primena pravila upravljanja*

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, već se eventualna korekcija pravi i zbog stanja (zapremine) akumulacije kao vremenskog preseka t (perioda godine) kada se ta odluka donosi, potrebno je definisati pravila upravljanja.

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, ali se definišu i minimalne dopuštene vrednosti zapremine akumulacije u svakom mesecu. Kada je stepen ispunjenosti akumulacije (V_r) u nekom vremenskom preseku t manja od ove granične vrednosti (V_r^g) tada se počinje sa restriktivnom isporukom vode iz akumulacije za potrošača najnižeg prioriteta - navodnjavanje.

Trajektoriju granične vrednosti zapremine akumulacije dobijamo na osnovu srednje vrednosti i standardne devijacije relativne zapremine akumulacije po nedeljama, a onda uz variranje parametra f pratimo efekte pravila upravljanja.

$$V_r^g = \bar{V}_r - f \cdot \sigma \quad (13)$$

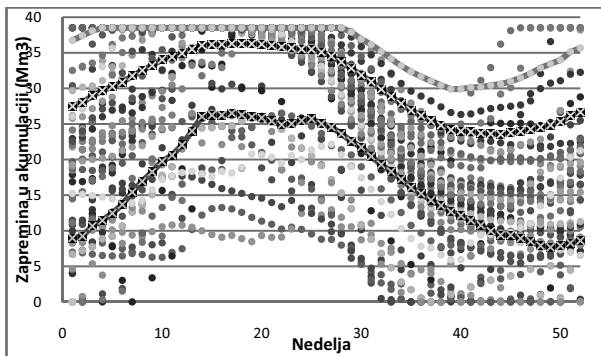


Slika 14. Dijagram stanja zapremine u akumulaciji pri navodnjavanju 3000 ha i koeficijent $f=1,0$

Na primeru akumulacije „Barje“ vršena je simulacija 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

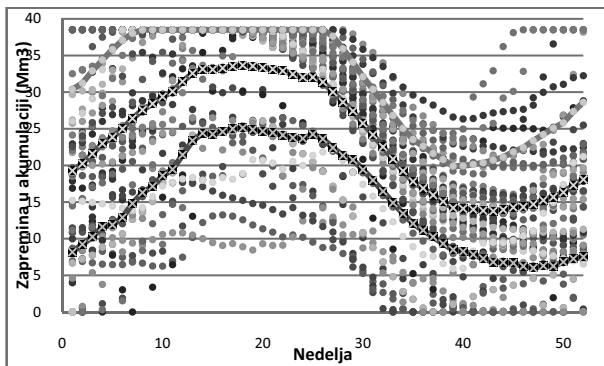
biti приметni svi efekti primene pravila upravljanja isporukom vode iz akumulacije.

Prilikom isporuke vode iz akumulacije pravilima su uvedene restrikcije u isporuci za potrošača najnižeg prioriteta, kada nivo zapremine u akumulaciji padne ispod sračunate granične vrednosti i to za 50 %.



Slika 15. Dijagram stanja zapremine u akumulaciji pri navodnjavanju 3000 ha i koeficijent $f=2,0$

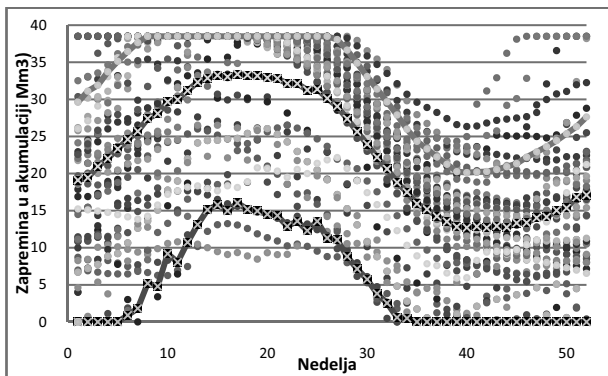
Na slikama 14 - 17. se daju dijagrami stanja zapremine u akumulaciji pri isporuci vode za navodnjavanje 3000 ha i 7000 ha i to za vrednost koeficijenta f od 1,0 i 2,0, da bi mogle da se primete razlike i karakter koeficijenta f .



Slika 16. Dijagram stanja zapremine u akumulaciji pri navodnjavanju 7000 ha i koeficijent $f=1,0$

Na dijagramima se jasno može uočiti da je trajektorija granične vrednosti niža kada je koeficijent 2,0 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 nedostatka vode.

U najsušnijoj godini kada se upravljanjem sa maksimalnom isporukom i isporukom za navodnjavanje 7000 ha dobijaju ukupni godišnji deficiti u snabdevanju stanovništva vodom oko $8,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ primenom pravila upravljanja ovi deficiti su oko $3,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ vode i direktni su efekti pravila upravljanja.



Slika 17. Dijagram stanja zapremina u akumulaciji pri navodnjavanju 7000 ha i koeficijent $f=2,0$

Kod isporuke potrošačima za navodnjavanje zemljišta u najsušnijoj godini kod navodnjavanja 7000 ha kod maksimalne isporuke ukupni godišnji deficiti su iznosili $12,58 \cdot 10^6 \text{m}^3$ vode. Primenom pravila upravljanja i ovi deficiti su smanjeni pa za istu godinu, istu površinu navodnjavanja i pri upravljanju sa koeficijentom $f=2,0$ dobijamo ukupne godišnje deficite oko $8,08 \cdot 10^6 \text{m}^3$ vode.

Dakle, upravljanje isporukom vode primenom pravila upravljanja donosi primetne efekte za sve potrošače vode iz akumulacije.

Promena oblika linije obezbeđenosti kod obezbeđenosti primenom pravila upravljanja za isporuku vode za

navodnjavanje je posledica pravila upravljanja. Sa dijagrama se može videti da je najpovoljnije upravljanje za navodnjavanje što agresivnije, 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.

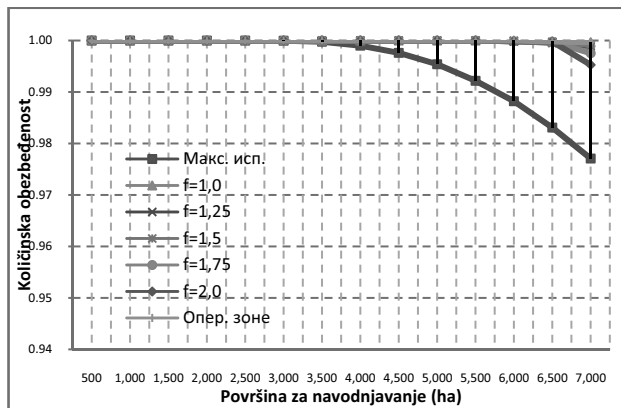
Kada posmatramo ukupne godišnje deficite, dobijene primenom pravila upravljanja, imamo sledeću situaciju: kod isporuke za snabdevanje stanovništva vodom uočavaju se smanjenja u odnosu na maksimalnu isporuku. Kod isporuke vode za navodnjavanje možemo da uočimo deficite koji se ponavljaju pri navodnjavanju 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.

Sada treba sagledati i „kvalitet“ isporuke vode za navodnjavanje, odnosno kakva je isporuka u periodu kada je mala vlažnost zemljišta.

Pri navodnjavanju 3000 ha i $f=2,0$ deficit u posmatranom periodu iznosi u najsušnijoj godini, za navodnjavanje, $2,991 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, za $f=1,0$ je $2,991 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dok je kod maksimalne isporuke bio $0,203 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Pri navodnjavanju 5000 ha i $f=2,0$ deficit za navodnjavanje u periodu od 27-39 nedelje, u najsušnijoj godini,

iznosi $4,198 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, za $f=1,0$ je $4,986 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dok je kod maksimalne isporuke bio $5,409 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

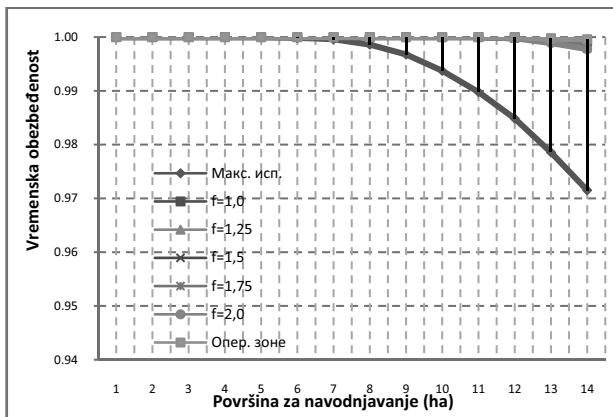


Slika 18. Uporedna količinska obezbeđenost vode za vodosnabdevanje primenom generisanih serija

Pri navodnjavanju 7000 ha i $f=2,0$ deficit za navodnjavanje za izabrani period u godini, u najsušnjoj godini, iznosi $5,145 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, za $f=1,0$ je $6,925 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dok je kod maksimalne isporuke bio $12,576 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Na slici 18. može se uočiti da su stanja zapremine u akumulaciji mnogo bolja nego pri maksimalnoj isporuci vode iz akumulacije uz navodnjavanje 3000 ha. U ovom slučaju ne dolazi do spuštavanja nivoa akumulacije ispod 5

10^6 m^3 vode dok je pri maksimalnom korišćenju više puta dostizalo 0.



Slika 19. *Uporedna vremenska obezbeđenost vode za vodosnabdevanje primenom generisanih serija*

Na osnovu svega, može se reći da je kod isporuke vode primenom pravila upravljanja dobijena velika obezbeđenost isporuke vode prioriternim potrošačima, a da je povoljnije za potrošača krajnjeg prioriteta korišćenje što većih količina vode, u ovom primeru navodnjavanje većih površina.

Na slikama 18 i 19. može se videti da se korišćenjem generisanih proticaja pokazalo da se primenom pravila

upravljanja za raspodelu vode iz akumulacije dobijaju bolji podaci nego osmotrenim nizom. Sa dijagrama se vidi da se navodnjavanje 7000 ha može vršiti praktično bez ikakvog uticaja na vodosnabdevanje.

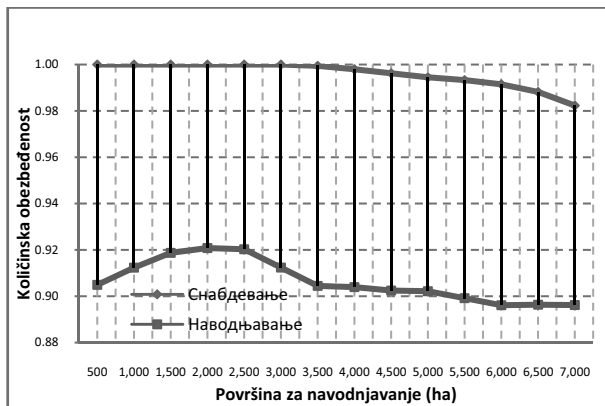
Kod navodnjavanja se, takođe, primećuju bolji rezultati u odnosu na osmotrene podatke o proticajima. Sve krive su povećale svoje vrednosti i približile se krivoj dobijenoj pri maksimalnoj isporuci vode.

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.

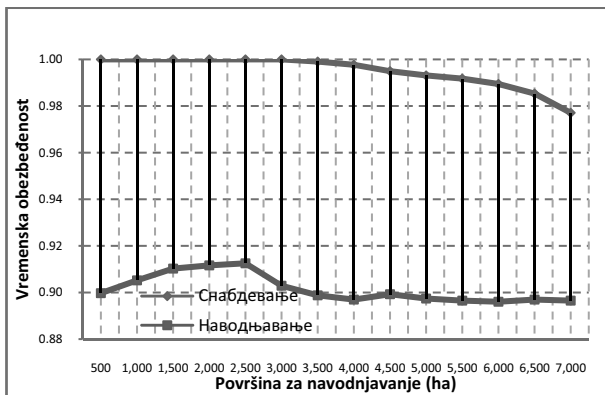
5.2.3 *Primena koncepta operativnih zona*

Kod simulacije isporuke vode uz primenu koncepta operativnih zona takođe važi da se odluka o isporuci vode ne donosi samo na osnovu iskazanih potreba korisnika i njihovog prethodno definisanog prioriteta, već se eventualna korekcija pravi i zbog stanja (zapremine) akumulacije kao vremenskog preseka t (perioda godine) kada se ta odluka donosi. Zato je na početku potrebno definisati pravila upravljanja.

Ideja podele zapremine akumulacije na operative zone se sastoji u sledećem: tokom godine se stanje u akumulaciji menja pa prema tome treba prilagoditi i pravila upravljanja, odnosno odrediti linije operativnih zona koje predstavljaju i granične linije kada se ulazi u restriktivnu isporuku potrošačima najmanjeg prioriteta.



Slika 20. Količinska obezbeđenost vode korišćenjem operativnih zona kao modelom za upravljanje isporukom vode

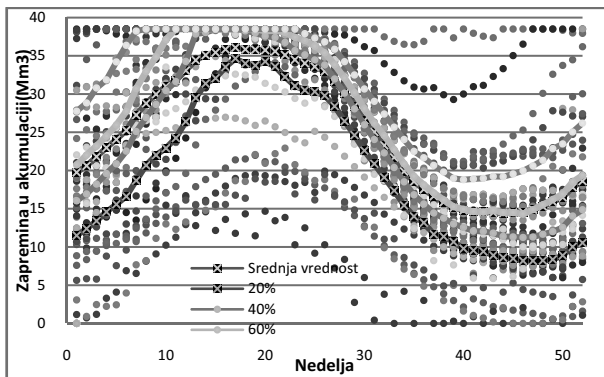


Slika 21. Uporedna vremenska obezbeđenost vode za navodnjavanje korišćenjem operativnih zona

Na osnovu velikog broja trajektorija, za usvojeni vremenski trenutak od nedelju dana odrede se statistike i utvrde karakteristične tačke (20%, 40%, 60% i 80% tačke osmotrenih raspodela datog niza) za svaki vremenski korak u godini. Na taj način se dobijaju granične trajektorije koje predstavljaju operativne zone.

U primeru za akumulaciju „Barje“ uvedena su sledeća pravila upravljanja: isporuka vode svim potrošačima se vrši prema zahtevanim količinama dok nivo u akumulaciji ne bude manji od 20% operativne zone. Nakon toga se uvode restrikcije korisniku najnižeg prioriteta sa koeficijentom 0,5.

Na slikama 20 i 21. su dati dijagrami količinske i vremenske obezbeđenosti isporuke vode primenom modela sa pravilima operativnih zona. Sa dijagrama se odmah može uočiti da je obezbeđenost isporuke vode za vodosnabdevanje stanovništva i količinski i vremenski odlična, bolja od modela upravljanja maksimalne isporuke, ali je lošija od modela upravljanja sa pravilima upravljanja.



Slika 22. Dijagram stanja zapremina u akumulaciji pri navodnjavanju 7000 ha korišćenjem generisanih serija

Kod isporuke vode za navodnjavanje uočava se niska vrednost obezbeđenosti. Ovo je posledica pravila upravljanja gde se pojava restriktivnog upravljanja uvodi kada

stanje u akumulaciji padne ispod granične linije 20%. Na taj način se restriktivna isporuka vode uvodi i u slučajevima kada to baš i nije najneophodnije. Na taj način dolazi do pojave velikih restriktivnih deficita.

Međutim, ovo bi važno u slučaju da potrošač najmanjeg prioriteta zahteva veće obezbeđenosti i u tom smislu se i komentariše. Ali, kako se u slučaju akumulacije „Barje“ o potrošaču najmanjeg prioriteta radi o navodnjavanju poljoprivrednih površina onda ima smisla da obezbeđenost za navodnjavanje bude negde između vrednosti 0,9 i 0,95.

Kod ukupnih nedeljnih deficita za navodnjavanje postoji „šarenilo“ po pitanju modela i rezultata ali je uočljivo najbolji rezultat model primene pravila upravljanja pri vrednosti koeficijenta upravljanja $f = 2,0$. Ovaj prikaz je zanimljiv zbog reda veličine pojave ukupnih nedeljnih deficita.

Na kraju, treba izvršiti i proveru modela na generisanim hidrološkim serijama.

Na dijagramu stanja zapremina u akumulaciji pri navodnjavanju 7000 ha se vidi da su dijagrami dosta bliski, s tim što granična trajektorija 20%, a samim time i ostale granične trajektorije, imaju nešto više vrednosti od dijagrama stanja osmotrene serije.

Treba spomenuti i da model operativnih zona sigurno može dati bolje rezultate iznalaženjem načina za umanjene restriktivnih deficita. Kada se restriktivni deficiti

smanje, da se značajno poveća obezbeđenost i približi rezultatima modela sa primenom pravila upravljanja i koeficijentom $f = 2,0$, i ovaj model bi bio verovatno prihvatljiviji od modela sa maksimalnom isporukom vode.

6 ZAKLJUČAK

Model za upravljanje raspodelom vode iz akumulacije ima svoj značaj što pruža uvid u moguće 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 omogućavaju da 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 tri simulaciona modela za upravljanje raspodelom vode iz akumulacije: model koji vrši maksimalno zahtevanu raspodelu prema rangu potrošača, model koji vrši raspodelu prema pravilima upravljanja i model koji vrši raspodelu prema operativnim zonama.

Model kojim se raspodela vode vrši prema maksimalnim zahtevima i rangu potrošača više služi kao referentni iprema kojem se ocenjuje efiksnost drugih modela.

Simulacionim modelom za raspodelu vode prema pravilima upravljanja je ukazano na postojanje dve vrste deficita: restriktivne deficite 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. Sam model doprinosi određivanju optimalne veličine koeficijenta kojim se daje karakter upravljanja raspodelom vode.

Treći model je model upravljanja raspodelom vode pomoću operativnih zona. Ovaj model je pokazao da isuviše restriktivna raspodela vode ne doprinosi i većoj obezbeđenosti potrošača u snabdevanju vodom. U tom smislu ovaj model treba unapređivati i rezultate koje sada daje približiti rezultatima prethodnog modela. Ovo bi moglo da ide u pravcu uslovljavanja obezbeđenosti, da obezbeđenost za navodnjavanje bude u prihvatljivim granicama od 0,9-0,95 a da obezbeđenost za vodosnabdevanje ne bude manja od 0,97%.

7 LITERATURA

- [1] CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W.: *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Education, (1988)
- [2] ĐORĐEVIĆ, B, DAŠIĆ, T.: Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, *Vodoprivreda* 43, 252-254, str. 151-164, (2011)
- [3] ILICH, N., DESPOTOVIC, J.: *A simple method for effective multi-site generation of stochastic hydrologic time series*, *Stochastic Env. Research and Risk Assesment* 22, no. 2, 265-279, (2008)
- [4] ILICH, N.: *A matching algorithm for generation of statistically dependent random variables with arbitrary marginals*. *European Journal of Operational Research* 192, 468-478, (2009)
- [5] MARKOVIĆ, Đ., PLAVŠIĆ, J., STANIĆ, M., SEKULIĆ, G.: *Efekti primene upravljanja pri raspodeli vode iz višenamenske akumulacije*, *Vodoprivreda* (Vodoprivreda) 40, no. 234-236, 201-213, (2008)
- [6] MARKOVIĆ, Đ., PLAVŠIĆ, J., STANIĆ, M., SEKULIĆ, G.: *Neparametarske funkcije raspodele u hidrologiji*, *Vodoprivreda* (Vodoprivreda) 43, 249-259, (2011)
- [7] MARKOVIĆ, Đ.: *Optimalno upravljanje raspodelom vode iz akumulacije pomoću generisanih*

hidroloških nizova, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, (2008)

- [8] MATALAS, M.C.: *Mathematical assessment of synthetic hydrology*, Water Resources Research, Vol. 3, no.4, p. 937, (1967)
- [9] RUBINIĆ, J., MARGETA, J.: *Dimenzioniranje akumulacija primjenom generiranih protoka*, Građevinar 53, 17-23, (2001)
- [10] SRINIVAS, V, SRINIVASAN, K.: *Hybrid moving block bootstrap for stochastic simulation of multi-site multi-season streamflows*, Journal of Hydrology, Vol.32, issues 1-4, p. 307-330, (2005)
- [11] THOMAS, H.A., FIERING, M.B.: *Mathematical synthesis of streamflow sequences for analyses of river basins by simulation*, Design of Water Resources Systems, Chapter 12. Harvard University Press, Cambridge, (1962)
- [12] WURBS, R.A.: *Optimization of Multiple-Purpose Reservoir System Operations: A Review of Modeling and Analysis Approaches*, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, (1991)
- [13] YEH, W.: *Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review*, Water Resources Research, vol. 21, no.12, p.1797 (1985)