



Hidrološki i ekonomski modul softvera za analizu etapnog rasta vodoprivrednih sistema

Bojan Srđević^{a*}, Svetlana Potkonjak^b

^aUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za uređenje voda, Novi Sad, Srbija

^bUniverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za ekonomiku poljoprivrede i sociologiju sela, Novi Sad, Srbija

*Autor za kontakt: bojans@polj.uns.ac.rs

SAŽETAK

Planiranje vodoprivrednih sistema zahteva poštovanje nekoliko važnih elemenata: dugovečnost, višestrukost namena, etapnost rasta, skupa investicija, složeno upravljanje, ograničeno predviđanje budućih promena hidroloških ulaza i ekonomskih parametara i dr. U softveru koji se danas razvija za planiranje takvih sistema centralno mesto zauzimaju hidrološki i ekonomski modul koji se na različite načine integrišu u okvirima sistemskog pristupa planiranju i stvaranju osnova za kompetentno odlučivanje. U radu je dat koncept oba modula sa širom razradom ekonomskog

KLJUČNE REČI:

vodoprivredni sistem, softver, hidrološki modul, ekonomski modul.

Uvod

Model višenamenskog vodoprivrednog sistema u savremenim uslovima čine strukturni i funkcionalni deo koji se na osnovnom nivou najpre integrišu konceptualno i matematički. Strukturni deo predstavlja konfiguracija sistema (akumulacije, reke, kanali, cevovodi, pumpna postrojenja, hidroelektrane, ustave i dr.) koja se odgovarajućim metodima šematizuje (npr. u obliku grafova), a zatim se za sve strukturne komponente definišu kapaciteti, jedinične cene izgradnje, rada i održavanja, konstrukcione krive V-H-P za akumulacije (zapremina-visina brane-površina vodenog ogledala), cene transporta vode itd. Funkcionalni deo čine strategije i operativni postupci upravljanja najčešće predstavljeni kao krive upravljanja na akumulacijama, režim uključenja crpnih postrojenja, prioriteti zahteva za vodom, hidrološka ograničenja u vidu ekološki minimalnih protoka u rekama itd.

Sledeća faza je softverska realizacija modela kao zaokruženog računarskog programa, ili u novije vreme, softvera modularne strukture kao šire postavljene platforme za simulaciju rada sistema i podršku odlučivanju. Generalno posmatrano, softver se izrađuje za mejnfrejm i za PC platforme, izvorni kodovi se pišu na standardnim programskim jezicima (npr. Fortran ili C++), interfejs je vizuelno i funkcionalno transparentan prema korisniku, integracija sa bazama podataka je sve veća, a korišćenje GIS tehnologije i njenih softvera postaje nezamenljivo. Kompletan softver se sve više oslanja na komunikaciono-informacione tehnologije (CIT) i Internet, a korišćenje javnih baza podataka o hidrometeorologiji, demografiji i statističkim informacijama o društvu predstavlja deo normalne operative pri implementaciji i eksploataciji funkcionalnih svojstava modela.

Konačno, model/softver koristi jedan ili više analitičara i planera, a na primeren način uključuju se i političari koji u krajnjoj instanci donose izvršne odluke.

Struktura i funkcionalnost modela vodoprivrednih sistema razlikuju se na mnogo nivoa, od kojih su u konceptualnom smislu karakteristični sledeći:

- (1) obuhvat i integracija površinskih, podzemnih i atmosferskih voda u rečnom slivu (ili povezanim slivovima);
- (2) vremenske i prostorne šeme za prevođenje fizičkih i čovekovim akcijama izazvanih pojava i procesa iz kontinualnog u diskretni domen da bi se omogućio rad brzih, na numerici zasnovanih, računarskih programa i modula;
- (3) simulacija ili optimizacija kao metodologija izučavanja performanse sistema;
- (4) deterministički, stohastički ili kombinovani tretman karakteristika sliva i fizičkih i operativnih svojstava sistema za koji se gradi model (i sa time u vezi način korišćenja postojećih ili generisanih podataka);

- (5) adaptabilnost modela na priliv novih informacija, npr. robustnost u evaluaciji ekonomskih posledica uključenja novih infrastrukturnih komponenti ili promene strategija i operativnih postupaka;
- (6) sposobnost modela da analitičarima pruži kvalitetne podatke o performansi sistema na dugoročnoj osnovi, npr. do planskog horizonta; s tim u vezi su metodologije računanja pouzdanosti, rizika, obnovljivosti i ranjivosti sistema i sposobnost opisa alternativnih scenarija za vrednovanje planskih strategija ili operativnih postupaka pri upravljanju vodama.

U radu se tretiraju dva centralna aspekta matematičko-računarskog modeliranja problema etapnog rasta i upravljanja vodama: hidrološki i ekonomski. U fazi izvršenja na računaru, moduli (hidrološki i ekonomski) kojima se realizuju strukturna i funkcionalna svojstva sistema deo su procesa analize planova etapnog razvoja velikog vodoprivrednog sistema sa akumulacijama kao glavnim regulatorima režima voda u rečnom slivu. Ovi moduli mogu biti softverski povezani ili nezavisni, ali su funkcionalno uvek povezani. Naime, ekonomski model prati etapnost rasta sistema isto kao što se hidrološkim modulom obuhvataju sva uključenja novih objekata u sistem jer sa time dolaze i novi vidovi korišćenja voda i menjaju se prioriteti raspodele voda. Ekonomski proračuni vezuju se za diskontne stope i protok vremena do planskog horizonta koji iznosi 30 i više godina, a iskorišćenja prostora akumulacija koja prozilaze iz hidrološkog modela omogućavaju proračun vrednosti investicije po jedinici zapremine aktivnog prostora svake akumulacije. Neki od vidova integracije hidrološkog i ekonomskog modula biće detaljnije objašnjeni na primeru sistema sa 4 akumulacije i dva kanala.

Hidrološki modul

U Departmanu za uređenje voda tokom devete decenije prošlog veka razvijeni su kompleksni računarski programi za simulacije režima voda i strategija upravljanja podzemnim vodama i transporta nerastvorljivih zagađivača putem podzemnih voda. Korišćen je kvazi-trodimenzionalni koncept modeliranja višeslojnih (jedne do četiri) hidrogeoloških sredina (akvifera), a diskretizacije su vršene po metodama konačnih razlika i konačnih elemenata. Rešavani su problemi snabdevanja pitkom vodom (izvorište Sibnica kod Pančeva), zaštite od voda (gradsko područje Novog Bečeja usled uspora stvorenog izgradnjom brane na Tisi), zaštite od urušavanja podzemnih galerija (rudnik soli kod Tuzle), sanitarne zaštite izvorišta vode (više lokaliteta u BiH) itd. Računarski programi su pisani za mejnfrejm platforme i instalirani u Novom Sadu, Prištini i Sarajevu, a tehnološki skokovi u oblasti računarstva praćeni su implementacijom i raznim prilagođavanjima ovih programa za PC platforme. U navedenim modelima nema površinskih akumulacija niti integracije tokova podzemne i površinskih voda, iako bi svaki model mogao funkcionisati kao hidrološki modul u kompleksnijim softverskim sistemima.

Od početka ovog veka, težište modeliranja u Departmanu preneto je na specijalne matematičke modele vodoprivrednih sistema zasnovane na Teksaškoj školi mrežnog modeliranja vodoprivrednih sistema (npr. TWDB 1971). Nastavljena je primena mrežnih modela započeta u Jugoslaviji početkom sedamdesetih godina prošlog veka (npr. Srđević i dr. 1975, Srđević i Anđelić 1976, IMP 1977). Urađeno je više projekata u AP Vojvodini u kojima su analizirane mogućnosti dugoročnog i održivog korišćenja voda u slivovima vodotokova Nadele i Krivaje (DUV 2010-2012, DUV 2011-2013). Simulacije višegodišnjeg rada sistema u ovim slivovima vršene su za potrebe investitora (JVP Vode Vojvodine iz Novog Sada), a korišćene su verzije mrežnih modela poznate pod nazivima SIMYLD-II (TWDB 1972, IMP 1977), MODSIM (Labadie 1986) i ACQUANET (LabSid 1996). U prvom slučaju, koji predstavlja paradigmu hidrološkog modula koji će dalje biti detaljnije opisan, radi se o klasičnom fortranskom programu sa oko 2.500 instrukcija osnovnog koda koji je uspešno korišćen za planiranje upravljanja vodama u slivu Zapadne Morave u Srbiji, a početkom ovog veka i za planiranje korišćenja voda u slivu reke Paraguasu u Brazilu. U modelima MODSIM i ACQUANET centralno mesto takođe ima isti hidrološki modul; razlike u odnosu na SIMYLD-II su u grafičkom interfejsu i korišćenju baza podataka što u daljim razmatranjima nema poseban značaj. Bitno je da su navedeni modeli mrežni i da spadaju u tzv. kombinovane simulaciono-optimizacione modele.

Osnovu hidrološkog modula u softveru SIMYLD-II za dati sliv čine mreža sistema koja se formira kao shema ili graf prema postojećem ili predviđenom stanju infrastrukture na terenu. Zatim, tu je informacija o parametrima mreže (kapaciteti objekata, početna stanja, pravila upravljanja, prioriteti za alokaciju voda i brojni drugi) i hidrologiji sliva (proticaji, padavine, neto-isparavanja sa vodenih ogledala akumulacija,

gubici na cevovodima, povratne vode i dr.). Centralni deo modula čini optimizacioni algoritam out-of-kilter iz klase specijalnih algoritama linearnog programiranja. U svakom mesecu diskretizovanog višegodišnjeg perioda optimizira se alokacija vode na korisnike, utvrđuju manjkovi i viškovi, pune ili prazne akumulacije, računaju i razvrstavaju stanja sistema u skupove željenih i neželjenih i brojne druge operacije koje opisuju performansu sistema. Bilansiranjem voda na kraju svakog meseca i prenosom potrebne informacije u sledeći mesec, modul ponovo vrši optimizaciju. Pošto je suština mesečne optimizacije alokacije vode minimizacija troškova raspodele voda u sistemu, odnosno rešavanje zatvorenog transportnog problema u koji je prototipni fenomen (sistem i sva njegova svojstva) pogodno i automatski transformisan, mesečne optimizacije su međusobno raspregnute i samo ih bilansiranje povezuje. Drugim rečima, SIMYLD-II je (kao i MODSIM i ACQUANET) po karakteru simulaciono-optimizacioni, u smislu da na makro nivou (u višegodišnjem periodu) vrši simulaciju, a na mikro nivou (svakog meseca) vrši optimizaciju.

Suština hidrološkog modula je određivanje minimalnih troškova transfera vode u usmerenoj mreži u koju je transformisan strukturni i funkcionalni deo vodoprivrednog sistema. Centralni deo modula je matematički program (prema Srđević 2003 i Srđević i Srđević 2016):

$$\text{Minimizirati troškove: } Z = \sum_{ij} c_{ij} q_{ij} \text{ za svako } i \text{ i } j \quad (1)$$

uz zadovoljenje ravnotežnih uslova na čvorovima:

$$\sum_i q_{ji} - \sum_i q_{ij} = 0, \text{ za svako } j \quad (2)$$

i ograničenja na granama

$$D_{ij} \leq q_{ij} \leq G_{ij}, \text{ za svako } i \text{ i } j. \quad (3)$$

Program (1)-(3) je u svim delovima linearan, a oznake imaju sledeća značenja:

- i, j - indeksi za čvorove u mreži
- q_{ij} - protok u grani koja povezuje čvorove i i j , sa smerom od i ka j .
- c_{ij} - jedinična cena protoka kroz granu ij
- D_{ij}, G_{ij} - donje i gornje ograničenje protoka u grani ij .

Skupom jednačina (2) predstavljen je bilans voda u svakom čvoru (drugim rečima: 'sve što iz čvora istekne mora u čvor i da se ulije'); skup nejednačina (3) predstavlja ograničenje protoka u granama mreže; Z u relaciji (1) su ukupni troškovi prenosa vode kroz mrežu koje treba minimizirati.

Ovako formulisan optimizacioni problem rešava se u svakom mesecu na intervalu analize primenom algoritma out-of-kilter. Izračunati optimalni protoci u granama mreže sadrže informaciju o protocima u rečnim tokovima i kanalima, kao i informaciju o stanjima svih akumulacija, stepenu zadovoljenja zahteva za vodom, razmeni voda (importu i/ili eksportu) između datog i susednih sistema i dr. Automatskim izdvajanjem potrebnih podataka iz mesečne optimizacije određuje se stanje sistema na kraju posmatranog meseca. Stanje sistema i podaci o hidrološkim ulazima za sledeći mesec koriste se za definisanje svih parametara modela (1)-(3) za sledeći mesec i tako se simulacija nastavlja do kraja višegodišnjeg perioda analize.

Suština bilansiranja voda u hidrološkom modulu data je jednačinom vodnog bilansa za čvor sa zapreminom u originalnoj mreži (akumulaciji) koja glasi:

$$\hat{S}_{k+1} = S_k + \Delta t_k \cdot (U_k \pm E_k - D_k) - \Delta t_k \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

gde su:

S_k - količina vode u akumulaciji na početku k -tog meseca

\hat{S}_k - količina vode u akumulaciji na kraju k-tog meseca

Δt_k - dužina jediničnog vremenskog intervala (npr. prosečna dužin meseca od 30,4 dana)

U_k - srednja vrednost prirodnih dotoka u akumulaciju u toku meseca k

E_k - prihod (padavine) ili rashod (isparavanje) sa vodenog ogledala akumulacije u toku meseca k

D_k - srednja vrednost zahteva za vodom na akumulaciji u mesecu k

$\sum_{i=1}^n Q_i$ - algebarski zbir prosečnih protoka svih reka i kanala neposredno povezanih sa akumulacijom.

Krajnja mesečna količina vode u akumulaciji (S_t) za svaki mesec mora biti u okviru fizičkih ograničenja aktivnog prostora akumulacije:

$$\begin{aligned} S_t &= \hat{S}, & \text{ako je } S_{\min} \leq \hat{S} \leq S_{\max} \\ S_t &= S_{\min}, & \text{ako je } S_{\min} > \hat{S} \\ S_t &= S_{\max}, & \text{ako je } \hat{S} > S_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

gde su S_{\min} i S_{\max} minimalni i maksimalni dozvoljeni kapacitet akumulacije.

Bilansna jednačina (4) je opšta i važi i za čvorove koji odgovaraju protočnim kontrolnim tačkama. Pošto oni služe samo za prenos vode i nemaju zapreminu (kao akumulacije), u jednačini bilansa veličine S_k , \hat{S}_k i E_k imaju vrednost 0; pošto su i S_{\min} i S_{\max} takođe jednaki 0, u relaciji (5) i S_t postaje 0. Opštost relacije (4), odnosno činjenica da važi i za zapreminske i nezapreminske čvorove omogućava globalno modeliranje svih tokova u mreži u kojoj svi čvorovi u stvari imaju kapacitet nula a elementi jednačine (4) se pogodno modeliraju uvođenjem dopunskih grana u osnovnu fizičku mrežu sistema na kojim se putem donjih i gornjih ograničenja na kapacitet toka iskazuju kapacitivne osobine čvorova koji zaista imaju kapacite (a to su akumulacije).

Svi članovi bilansne jednačine (4), osim poslednjeg na desnoj strani, opisuju se ograničenjima protoka u odgovarajućim veštačkim granama mreže koje modeliraju: raspoložive količine vode [$S_k + (U_k - E_k) \cdot \Delta t_k$], zahteve za vodom [$D_k \cdot \Delta t_k$], željene količine vode u akumulacijama na kraju meseca (pravila upravljanja) i stvarne količine vode u akumulacijama na kraju meseca (\hat{S}). Poslednji član desne strane jednačine (4) predstavlja ukupni protok u fizičkim granama mreže povezanim sa datim čvorom. Ovaj član se može koristiti i da opiše veštačke grane preliivanja čijim se protocima obezbeđuje ravnoteža čvorova u slučajevima ekstremno velikih voda (npr. poplavni režimi).

Ekonomski modul

Hidrološki modul mogao bi se izvršavati po konsektivnim periodima u kojima postoje strukturno izmenjeni uslovi rada sistema. Drugim rečima, dodavanje novih infrastrukturnih komponenti sistema zahteva restrukturiranje postojeće mreže, a simulacija rada izmenjenog sistema vršila bi se sa upamćenim krajnjim stanjima akumulacija iz prethodne simulacije. Hidrološki ulazi sistema uzimali bi se iz baze podataka u kojoj su podaci za ceo period analize (npr. 30 i više godina – do usvojenog planskog horizonta).

Polazna premisa za implementaciju ekonomskog modula je da se sistem gradi etapno u višegodišnjem periodu i da se objekti uključuju u rad sistema sa protokom vremena. Da bi se dobila predstava o troškovioma izgradnje i funkcionisanja sistema do planskog horizonta (npr. 30 godina), investicije u 'budućim trenucima' imaju različitu vrednost ako se preslikavaju na 'sadašnji trenutak' u kome se proračunava vrednost izgradnje i rada sistema.

Napomenimo da bi se u softver SIMYLD-II, MODSIM ili ACQUANET ekonomski modul mogao ugraditi tako što bi, se delimično i na osnovu rezultata iz hidrološkog modula, izračunavali ekonomski pokazatelji opisani u sledećim sekcijama. Druga mogućnost je da se za sve inkrementalne periode do planskog horizonta (u kojima je struktura sistema ista) rezultati simuliranih krajnjih stanja akumulacija i deficiti voda

pamte i prenose na početak sledećih perioda simulacije, poštujući protok vremena. Na taj način sačuvala bi se kompletna informacija o korišćenju aktivnih proistora akumulacija i praćenju zahteva za vodom na osnovu kojih bi se vršili ekonomski proračuni u ekonomskom modelu po jednačinama koje će biti date u daljem tekstu.

Konstantni, diskontovani i prosečni godišnji troškovi izgradnje akumulacija

Kumulativni troškovi izgradnje akumulacija u sistemu do kraja i -te godine omogućavaju praćenje porasta ukupnih troškova sistema iz godine u godinu, a mogu se odrediti pomoću relacije:

$$C_a(i) = C_a(i-1) + \sum_{j=1}^{N_a} (A_{j,i} - A_{j,i-1}) \quad (6)$$

gde su:

$C_a(i)$ - kumulativni troškovi izgradnje svih akumulacija do kraja i -te godine

$A_{j,i}$ - investicija u j -tu akumulaciju u i -toj godini

N_a - broj akumulacija u sistemu.

Kumulativni zbir (6) identifikuje promene u visini investicija u akumulacije, uključujući i interventne radove, dogradnju i sl. Ako se za akumulaciju A_j u i -toj godini ($A_{j,i}$) ne vrše nikakve investicije, tada je korespondentni član ($A_{j,i} - A_{j,i-1}$) jednak nuli; u ostalim slučajevima inkrementi investicija u bilo kojoj godini i bilo kojoj akumulaciji se obračunavaju prema relaciji (5) i kumulativni zbir inkrementalno raste. Ista napomena će važiti i za sledeće relacije po kojima se obračunavaju kumulativne vrednosti.

Diskontovani kumulativni troškovi izgradnje akumulacija iskazuju se redukovanjem vrednosti investicija koje će se vršiti u kasnijim fazama izgradnje pojedinih objekata na 'sadašnji trenutak'. Preračunati ukupni iznos investicija je:

$$DC_a(i) = DC_a(i-1) + \frac{1}{(1+r)^i} \cdot \sum_{j=1}^{N_a} (A_{j,i} - A_{j,i-1}) \quad (7)$$

gde su:

$DC_a(i)$ - kumulativni diskontovani troškovi izgradnje svih akumulacija do kraja i -te godine

r - konstantna diskontna stopa za ceo period simulacije (do planskog horizonta).

Korišćenjem relacije (7) mogla bi se u i -toj godini računati prosečna diskontovana investicija u izgradnju svih akumulacija kao:

$$DC_a^p(i) = \frac{r}{1 - (1+r)^{-m}} \cdot DC_a(i) \quad (8)$$

gde je m ekonomski vek akumulacija.

U jednačinama (7) i (8) pretpostavka je da sve akumulacije imaju jednak ekonomski vek (npr., $m=50$ godina), kao i da je diskontna stopa na celom periodu analize konstantna (npr. 8%). Promenljive veličine ove vrste podrazumevale bi dobro predviđanje budućnosti na veoma dugim intervalima što nije verovatna i opravdana opcija.

Troškovi investicije po jedinici zapremine aktivnog prostora akumulacije

Ova veličina se može definisati količnikom investirane sume novca u izgradnju akumulacije i ukupne količine vode koja bi se u periodu eksploatacije obuhvaćenom simulacijom mogla u svakom mesecu akumulirati u akumulaciji (maksimalno iskorišćenje aktivnog prostora):

$$V_j = \frac{A_{j,g_j}}{(S_{\max}^j - S_{\min}^j) \cdot (T_s - g_j + 1)}, \quad \text{za svako } j=1,2,\dots,N_a. \quad (9)$$

U relaciji (9) veličine su:

- A_{j,g_j} - investicija u izgradnju akumulacije j u godini g_j (redni broj godine u kojoj je investirano u akumulaciju j)
 T_s - dužina intervala simulacije u godinama
 S_{\max}^j, S_{\min}^j - maksimalan i minimalan kapacitet akumulacije.

Troškovi investicije po jedinici zapremine iskorišćenog aktivnog prostora akumulacije

Ova veličina se može definisati količnikom investirane sume novca u izgradnju akumulacije i ukupne količine vode koja je stvarno akumulirana u svim mesecima u periodu rada akumulacije:

$$V_j^* = \frac{A_{j,g_j}}{\sum_{i=g_j}^{T_s} \bar{S}_j(i)}, \quad \text{za svako } j=1,2,\dots,N_a \quad (10)$$

gde je $\bar{S}_j(i)$ prosečna količina vode u akumulaciji j tokom i -te godine.

Troškovi izgradnje i održavanja kanala u periodu eksploatacije

Za svaki kanal u sistemu kumulativni troškovi izgradnje i održavanja mogu se modelirati kao

$$CK_j = (K_{j,i} + L_{j,i}) \Big|_{i=g_j} \cdot \frac{rm}{1 - (1+r)^{-m}} \cdot \frac{1}{(1+r)^i} \Big|_{i=g_j} + \sum_{i \in \pi_j} (L_{j,i} - L_{j,i-1}) \cdot F + \sum_{i=g_j+t_d}^{T_s+t_d} K_{j,i} \cdot O_k \quad (11)$$

gde su:

- $K_{j,i}$ - troškovi izgradnje kanala j u i -toj godini
 $T_{j,i}$ - troškovi izgradnje pumpnih postrojenja na kanalu j u i -toj godini
 t_d - vremenski razmak u godinama između završetka izgradnje i trenutka uključenja kanala u rad sistema
 g_j+t_d - godina uključenja j -tog kanala u redovan rad
 T_s+t_d - kraj perioda eksploatacije kanala
 O_k - konstantni decimalni iznos uložene investicije u izgradnju kanala potreban za rad i održavanje tokom godine
 F - faktor proširenja pumpnih kapaciteta (konstantan za sve kanale).

U relaciji (11) faktor F zadržava zadatu vrednost ako i -ta godina pripada skupu π_j opisanom relacijom:

$$\pi_j = \{i \mid 1 \leq i \leq T_s, Q_{\max,j,i} > Q_f + Q_{\max,j,i-1}\} \quad (12)$$

Q_f je zadato potrebno povećanje kapaciteta kanala da bi se izvršila proširenja pumpnih kapaciteta, a $Q_{\max,j,i}$ je 'instalirani' kapacitet j -tog kanala u i -toj godini. Ako i -ta godina ne pripada tom skupu, F postaje nula i drugi član relacije (11) se anulira, bez obzira da li se u toj godini vrši proširenje kanala ili ne.

Troškovi izgradnje i eksploatacije po jedinici kapaciteta kanala i troškovi izgradnje i eksploatacije po jedinici iskorišćenog kapaciteta kanala određuju se na sličan način kao za akumulacije (relacije 9 i 10).

Konstantne, diskontovane i prosečne godišnje štete pri deficitima vode u sistemu

Godišnje štete usled deficita vode obuhvataju štete na svim lokacijama zahteva u sistemu. Dozvoljavaju se različite jedinične štete u svakom mesecu i na svakom čvoru zahteva. Ukupne štete određuju se kao kumulativni zbir da bi se omogućilo praćenje porasta ukupnih troškova sistema i smanjenje šteta iz godine u godinu korišćenjem relacije:

$$C_p(i) = C_p(i-1) + \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^{N_z} P_{k,j,i} \cdot D_{k,j,i} \quad (13)$$

gde su:

$C_p(i)$ - kumulativne štete do kraja i-te godine

$P_{k,j,i}$ - jedinična šteta u k-tom mesecu na j-tom čvoru zahteva u i-toj godini

$D_{k,j,i}$ - deficit vode u k-tom mesecu na j-tom čvoru zahteva u i-toj godini

N_z - broj čvorova zahteva

Diskontovane štete se određuju pomoću relacije:

$$DC_p(i) = DC_p(i-1) + \frac{1}{(1+r)^i} \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^{N_z} P_{k,j,i} \cdot D_{k,j,i} \quad (14)$$

gde je $DC_p(i)$ diskontovani zbir šteta do kraja i-te godine.

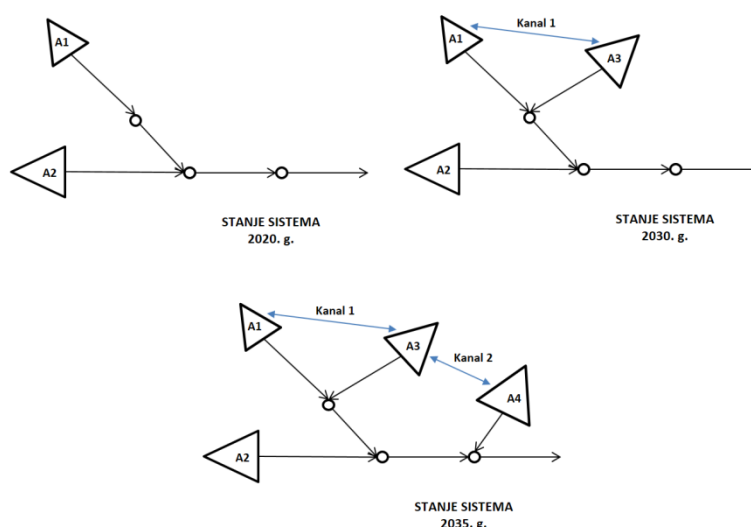
Za određivanje prosečnih godišnjih diskontovanih šteta u sistemu mogla bi se koristiti relacija:

$$DC_p^p(i) = \frac{r}{1 - (1+r)^{-m}} \cdot DC_p(i) \quad (15)$$

Postupak određivanja troškova pumpanja vode u kanalima, troškova uvoza vode, troškova proizvodnje energije na hidrelektaranama i drugo, računali bi se ako takve potrebe postoje. Ovde se dalja razrada ekonomskog modela završava jer se ista može širiti u mnogo drugih pravaca.

Primer

Treba izgraditi vodoprivredni sistem sa 4 akumulacije od kojih će dve biti povezane kanalima za prepumpavanje vode po potrebi. Neka je planski horizont 30 godina, a period u kome treba analizirati rad etapno građenog sistema 2020-2050. god. Konačna struktura sistema formiraće se posle 15 godina od puštanja u rad sistema sa najpre samo dve akumulacije, Slika 1. Prvih pet godina postoje samo akumulacije A1 i A2 (Slika 1, shema gore levo). Posle 10 godina u rad se puštaju i akumulacija A3 i izgrađeni Kanal 1 kojim se omogućava prepumpavanje vode između akumulacija A1 i A3 (Slika 1, shema gore desno). Konačno, 15 godina od početka rada sistema, od 2035. god., sistem se kompletira puštanjem u rad akumulacije A4 i izgrađenog Kanala 2 za prepumpavanje između stare akumulacije A3 i nove akumulacije A4.



Slika 1. Etapni razvoj vodoprivrednog sistema (Planski horizont 2050. g.)
Figure 1. Staging the water resources system (Planning horizon 2050 year)

Hidrološki modul bi simulirao rad sistema sa dve akumulacije, prvo na intervalu od 10 godina (2021-2030), zatim bi se simulirao rad sa tri akumulacije i jednim kanalom na intervalu od 5 godina (2031-2035), i konačno bi se simulirao potpuno konfigurisani sistem sa četiri akumulacije i dva kanala na intervalu od 15 godina (2036-2050).

Na osnovu izlaza ovog modula iz tri simulacije, u ekonomskom modulu bi se računale samo veličine cena i troškova po relacijama (10) i (13)-(15). Za proračune po relacijama (6)-(9), (11) i (12) nije potrebno koristiti podatke o proračunima izvršenim u hidrološkom modulu. Dovoljno je poznavati inkremente (godine uključanja u rad novih objekata) razvoja sistema, ovde posle 10 i narednih 5 godina, kao i moguće dopunske investicije u pojedinim godinama unutar intervala. Kumulativni zbrovi upravno i imaju tu svrhu – da omoguće praćenje rasta investicija iz godine u godinu.

Zaključak

Planiranje velikih vodoprivrednih sistema višestrukih namena ne može se vršiti bez primene sistemskog pristupa, sistemskih tehnika, računara i računarskih programa i sistema. Kombinovanje tehnologija analize planova razvoja sistema je neophodnost jer su sve više izraženi disbalansi ponude i potražnje vode, intersektorska i međusektorska borba za vodu, konflikti lokalnih i globalnih namena i korisnika u ekonomskom i političkom okruženju i brojne druge okolnosti koje nameću participativnost, poštovanje direktiva i kontrolu delovanja svih učesnika u gazdovanju vodama i sa njima povezanim resursima.

Sistemski pristup znači korišćenje matematike i računara, kreativnost analitičara i dobro razumevanje onih koji modeliraju vodoprivredne planove i vrše analize sa onima koji će koristiti rezultate iz modela kada ovi jednom budu instalirani i operacionalizovani. Sistemski pristup i analiza imaju funkciju da pripreme dovoljno kvalitetnu informaciju o alternativama razvoja planiranog sistema na osnovu koje će se donositi izvršne odluke tipa, npr., usvajanje plana i obezbeđenje finansija za investicije, održavanje i upravljanje na dugoročnoj osnovi. Planske varijante se moraju modelirati i simulirati poštujući elemente svih značajnih atributa sistema kao što su, npr.: etapnost rasta, redizajniranje (doprojektovanje) i upravljanje (menadžment).

U radu je ukazano na važnu komponentu planiranja vodoprivrednog sistema: modeliranje hidrološke i ekonomske performanse sistema koji se kroz vreme dograđuje i to sa sobom donosi i različito upravljanje vodama, investicijama, procenama šteta od manjaka vode, promene cena proizvodnje električne energije (kada je ima) itd. Opisane su prvo bazične komponente koje mora obuhvatiti hidrološki model vodoprivrednog sistema. Neke od tih komponenata se koriste u ekonomskom modelu kojim se utvrđuju cene izgradnje sistema i promene koje nastupaju u troškovniku rasta sistema sa primenom diskontnih

stopa. Diskontne stope omogućavaju revalorizacije kasnijih ulaganja na sadašnji trenutak u kome se, npr. donosi odluka da li da se i kako kreće u razvoj sistema.

Hidrološki i ekonomski modul opisani su samo na bazičnom (opštem) nivou i mogu se prilagođavati konkretnim zahtevima analize. Oba modula se mogu tehnološki realizovati kao nezavisni ili spregnuti softver, a integracija se može dalje širiti na sisteme za obradu podataka (baze i okruženja za njihovo projektovanje), primenu evolutivnih algoritama za stohastičko pretraživanje velikih prostora mogućih rešenja itd.

Literatura

- DUV 2010-2012. Unapređenje regionalnog hidrosistema Nadela prema evropskim standardima sa participativnim modelom odlučivanja o višenamenskoj eksploataciji sistema (I-III faza), Studija, Departman za uređenje voda, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- DUV 2011-2013. Izrada simulaciono-optimizacionog modela za alokaciju vode i participativnog modela odlučivanja o višekorisničkoj eksploataciji vodnih resursa slivnog područja reke Krivaja (I-III faza), Studija, Departman za uređenje voda, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- IMP 1977. SIMYLD-II(P) – Program za planiranje sistema akumulacija, Institut Mihajlo Pupin, Beograd.
- Labadie, J.W. 1986. MODSIM – River Basin Network Model for Water Rights Planning, Documentation and User Manual, Colorado State University, USA.
- LabSid 1996. AquaNet – Modelo integrado para análise de sistemas complexos em recursos hídricos', Universidade de Sao Paulo, Brasil.
- Srđević, B., Anđelić, M., Feldman, A. 1975. Primena programa HEC-3(P) i SIMYLD-II(P) u simulaciji rada sistema akumulacija u delu sliva Zapadne Morave, Studija, Projekat UNDP Upravljanje slivom Morava pomoću računara, Institut Mihajlo Pupin i Environmental Dynamics Inc. L.A., Beograd.
- Srđević, B., Anđelić, M. 1976. Primena programa SIM-IV(P) u simulaciji rada sistema akumulacija, Studija za Republički fond voda Srbije, Institut Mihajlo Pupin, Beograd.
- Srdjevic, B. 2003. Systems Analysis Methods in Engineering with Extensions in Environmental Engineering, p. 136, Federal University of Bahia, Salvador, Brazil.
- Srdjevic, B., Srdjevic, Z. 2016. Vodoprivredna sistemska analiza- sa primenama u menadžmentu vodnih resursa, str. 321, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- TWDB 1972. SIMYLD-II – River Basin Simulation Model, Texas Water Development Board, Austin, USA.
- TWDB 1971. Stochastic Optimization and Simulation Techniques for Management of Regional Water Resources Systems, Texas Water Development Board, Austin, USA.

Hydrologic and Economic Module in Software for Analysis of Water Resources Systems Staging

Bojan Srđević ^{a*}, Svetlana Potkonjak ^b

^aUniversity of Novi sad, Faculty of Agriculture, Department of Water Management, Novi Sad, Serbia

^bUniversity of Novi sad, Faculty of Agriculture, Department for Agricultural Economics and Rural Sociology, Novi Sad, Serbia

*Corresponding Author: bojans@polj.uns.ac.rs

ABSTRACT

Planning of the water resources systems requires to respect important elements such as: long-lasting, multiple purposes, staging of infrastructure over time, high investment costs, complex control and operational strategies, limited forecast of future hydrology and demands, unknown economic parameters, etc. Central part in software developed for ensuring proper treatment of aforementioned components usually consists of hydrologic and economic module aimed at enabling complete systems analysis and support to related decision-making processes. The paper present conceptual framework of both modules with detail description of most important parts of the economic module.

KEY WORDS

Water resources system, software, hydrologic module, economic module

Primljen: 17.11.2016.

Prihvaćen: 12.12.2016.