

## ORUĐA ZA VODOPRIVREDNE ANALIZE: JEDNO VIĐENJE BUDUĆNOSTI

Slobodan P. SIMONVIĆ  
Građevinski fakultet, Univerzitet Zapadnog Ontarija  
London, Kanada

### REZIME

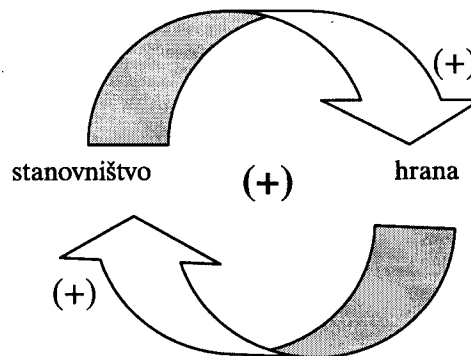
Poplave, suše, nedostatak vode za vodosnabdevanje, zagađenje površinskih i podzemnih voda, su samo neki od primera vodoprivrednih problema kojima se hidrotehnički stručnjaci bave danas i koji će biti od sve većeg značaja u budućnosti. Ujedno, danas je na raspolaganju mnogo simulacionih i optimizacionih tehnika za analize kompleksnih vodoprivrednih sistema koje su od pomoći u procesu donošenja odluka. Kontinualni razvoj informacione tehnologije omogućava efikasan prelaz na nova oruđa. Primena sistemske analize u planiranju i upravljanju vodoprivrednim sistemima se smatra najznačajnijim doprinosom hidrotehničke struke u zadnjih 40 godina. Na bazi ličnog iskustva u ovom članku je prezentirana moja vizija oruđa koja će se koristiti u budućnosti. Rad prezentira dve hipoteze. Prva se odnosi na kompleksni karakter vodoprivrednih problema i kompleksnost oruđa za vodoprivredno modeliranje u sredini koja se odlikuje dinamičnim kontinualnim razvojem tehnologije. Druga se odnosi na raspoloživost vodoprivrednih informacija i prirodnu varijabilnost u prostoru i vremenu koja utiče na neizvesnost u procesu vodoprivrednog odlučivanja.

**Ključne reči:** vodoprivredni sistemi; odlučivanje; kompleksnost; neizvesnost

### 1. UVOD

Početak poljoprivrednih aktivnosti se u istoriji vezuje za početak ljudske preokupacije sa pitanjima voda. Quinn [39] i [40] smatra da je to u isto vreme početak 'propasti civilizacije'. Potpuno suprotno mišljenje iznose Meadows i saradnici [31] koji poljoprivrednu revoluciju smatraju za jedan od najznačajnijih koraka u istoriji civilizacije. Bez obzira na to koje nam je mišljenje bliže, voda i odgovorno gazdovanje sa njom u

oba slučaja ostaju u centru pažnje. Procene Ujedinjenih Nacija su da 1999 negde oko 1.2 biliona ljudi u zemljama u razvoju nije imalo pristup vodi za piće; drugih 2.9 biliona živi u neadekvatnim sanitarnim uslovima. Četiri miliona dece umire svake godine od bolesti koje su vezane za neodstatak, ili se prenose putem vode. Dosadašnja rešenja za vodosnabdevanje stanovništva i zaštitu od poplava u najboljem slučaju se mogu smatrati samo kao prolazna [53]. Voda je osnovni element u centru pozitivne povratne relacije na slici 1 koja povezuje raspoloživu hranu sa rastom populacije.



Slika 1: Povratna relacija između raspoložive hrane i porasta stanovništva

Povećani pritisci na vodne resurse prouzrokovani daljim rastom stanovništva, političkom i ekonomskom nestabilnošću, i klimatskim varijacijama će verovatno biti glavna karakteristika 21og veka. Do danas su razne metode korišćene za rešavanje vodoprivrednih problema od spekulativnih, preko metoda baziranih na osmatranjima do eksperimentalnih i teoretskih [17]. Rešavanje problema u budućnosti će zahtevati korišćenje veoma sofisticiranih tehnologija za manipulisanje informacijama. Neki savremeni trendovi ukazuju na značaj kompjuterskih mreža, lako pristupnih

banki podataka, kompjuterizovanih sistema za podršku odlučivanja, programiranja objektima i dinamičke simulacije.

Sledeće poglavlje opisuje dve hipoteze koje čine osnovu moje vizije budućnosti. Diskusija se nastavlja prezentacijom nekih oruđa koje će se koristiti u budućnosti za rešavanje kompleksnih vodoprivrednih problema. Rad se završava prikazom vizije oruđa za vodoprivredne analize koja će karakterisati sledeće dekadu.

## 2. HIPOTEZE KOJE ĆE DEFINISATI ORUĐA ZA BUDUĆE VODOPRIVREDNE ANALIZE

Lično profesionalno iskustvo akumulirano u periodu od preko 25 godina rada može se sumirati kroz niz sledećih lekcija [50]:

### Lekcije vezane za vodoprivrednu problematiku

- Nagli porast stanovništva stvara uslove za veoma ozbiljne vodoprivredne probleme.
- Poljoprivreda, industrijska proizvodnja, vodosnabdevanje stanovništva, hidroenergetska proizvodnja i vodni saobraćaj su pet socio-ekonomskih sektora koji direktno zavise od raspoloživih vodnih resursa.
- Potrebe za vodom su u stalnom porastu.
- Interdisciplinarni pristup je neophodan za rešavanje savremenih vodoprivrednih problema.
- Direktno učešće šireg stanovništva je neophodno za uspešno rešavanje vodoprivrednih problema.
- Institucionalne promene, obrazovanje, tehnička obuka i kooperacija su neophodni za uspešno rešavanje vodoprivrednih problema 21og veka.

### Lekcije tehničke prirode

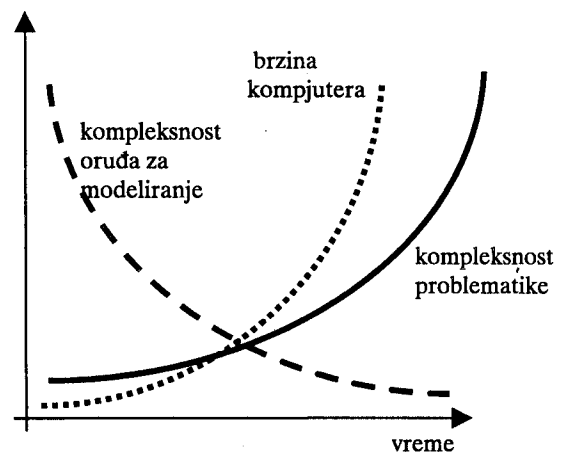
- Integralni pristup planiranju i upravljanju vodama baziran na korišćenju sistemskog pristupa pokazao se kao veoma efikasan u rešavanju kompleksnih vodoprivrednih problema.
- Matematičko modeliranje ima značajnu ulogu u strateškom vodoprivrednom odlučivanju.
- Kompjuterizovani sistemi za podršku odlučivanju i optimizacioni modeli nalaze sve veću primenu u upravljanju vodoprivrednim sistemima.
- Dobro koordinisane banke podataka su od ekvivalentnog značaja za vodoprivredno planiranje i odlučivanje kao i dobri matematički modeli.
- Kompleksan proces vodoprivrednog odlučivanja zahteva tehničku pomoć.

- Tehničko obrazovanje i razvijene insitucije imaju značajnu ulogu u praktičnoj primeni optimalnih strategija za upravljanje vodoprivrednim sistemima.

Na bazi ovog ličnog iskustva u ovom radu su razvijene dve hipoteze koje će po mišljenju autora oblikovati oruđa za buduće vodoprivredne analize.

### 2.1 Hipoteza kompleksnosti

Prvi deo hipoteze kompleksnosti je da će budući vodoprivredni problemi biti sve kompleksniji. Vodoprivredna problematika postaje sve komplikovanija (slika 2). Nastavak rasta stanovništva, klimatske promene, i zahtevi za regulisanjem voda direktno utiču na porast kompleksnosti vodoprivrednih problema.



Slika 2: Šematski prikaz hipoteze kompleksnosti

Novi vodoprivredni sistemi i njihova infrastruktura se planiraju za duži period vremena da bi se uzele u obzir potrebe sledećih generacija. Planiranje koje je bazirano na dužim vremenskim periodima proširuje i prostornu razmeru tih problema. Podmirivanje povećanih potreba za vodom u dužem periodu zahteva korišćenje resursa sa veće površine. Zadovoljenje svih potreba za vodom (za održanje života, industrijsku proizvodnju i proizvodnju hrane) zahteva zajedničko korišćenje površinskih i podzemnih voda. Ukoliko vodoprivredni bilans nemože biti zatvoren u okviru jednog sliva, transfer vode iz susednih slivova postaje realna opcija.

Produženje vremenskog horizonta i proširenje prostorne razmere vodi povećanju kompleksnosti procesa donošenja odluka. Kompleksni vodoprivredni

sistemi utiču na veliki broj korisnika. Ekonomski i socijalni uticaji ovih sistema se moraju ozbiljno uzeti u obzir pri donošenju odluka o upravljanju sistemima ili njihovom proširenju. Mnoge agencije regulišu ravnopravnu raspodelu vode i zaštitu kvaliteta vode. Interest šireg stanovništva je najčešće zastupan kroz takozvane ne-državne organizacije.

Druga komponenta hipoteze kompleksnosti je dramatičan porast brzine i moći računara (slika 2). Porast korišćenja računara u vodoprivredi je konstantan od 1950ih. Računari se više ne koriste samo za procesiranje podataka već sve više pomažu procesiranje informacija i znanja. Više nije od značaja da li je računar u obliku personalnog kompjutera ili superkompjutera sa većim brojem procesora. Danas je značajno da je računar nečujan partner u efikasnom donošenju odluka u vodoprivredi [44], [45]. Razlog za uvođenje računara u aktivno donošenje odluka leži u činjenici da se informacije danas tretiraju kao šesti ekonomski resurs (pored ljudi, mašina, novca, materijala, i menadžmenta).

Treći element hipoteze kompleksnosti je redukcija kompleksnosti matematičkih oruđa koja se koriste za planiranje i upravljanje vodoprivrednim sistemima (slika 2). Danas je opšte prihvaćeno da je najveći napredak u vodoprivredi u zadnjem veku učinjen uvođenjem sistemske analize u vodoprivredno planiranje i upravljanje [14], [59], [41], [58]. Ja definišem sistemsku analizu kao pristup rešavanju kompleksnih vodoprivrednih problema korišćenjem niza matematičkih tehnika za planiranje, upravljanje i projektovanje koje se primenjuju korišćenjem računara. U ovom radu sistemska analiza uključuje simulacione i optimizacione tehnike koje se koriste za: analizu kvantiteta i kvaliteta oticaja sa sliva ili proticaja u vodotoku; optimalno upravljanje akumulacijama; razvoj i zaštitu podzemnih voda; analizu distribucionih mreža; korišćenje voda; i opis mnogih drugih hidroloških procesa i upravljačkih aktivnosti. Sistemska analiza je od izuzetnog značaja kada se rešavaju problemi raspodele ograničenih vodnih resursa na veći broj korisnika.

Simulacioni modeli imaju značajnu ulogu u vodoprivrednim analizama. Oni su vrlo dobro prihvaćeni u praksi i najčešće se koriste za predviđanje reakcije sistema na određeni ulazni signal. U ranijem periodu simulacione modele su razvijali posebno obučeni specijalisti. Mnogi generalni i dobro poznati

modeli su bili razvijeni u Fortran-u. Neki primeri u severnoj Americi su SSARR (sinteza oticaja i upravljanje akumulacijama) - US Army Corps of Engineers, RAS (sistem za analizu proticaja) - Hydrologic Engineering Centre, QUAL (model kvaliteta vode u vodotoku) - Environmental Protection Agency; HEC-5 (simulacija akumulacija za zaštitu od poplava i korišćenje vode) - Hydrologic Engineering Centre, SUTRA (model podzemnih voda) - US Geological Survey, i KYPIPE (analiza mreža za vodosnabdevanje) - Univerzitet u Kentakiju. Nažalost ovi modeli su veoma kompleksni i njihove osnovne karakteristike nisu lako dostupne svim korisnicima. Druga im je osobina da su prilično nefleksibilni. Prilagođavanje modela specifičnim uslovima problema za koji nisu pravljani nije trivijalan zadatak. Najveće ograničenje u korišćenju ovih simulacionih oruđa je činjenica da vodoprivredni problemi uvek imaju veliki broj mogućih rešenja koje treba analizirati. I u najboljim uslovima značajni računarski resursi su potrebni za dobijanje rešenja koje može biti veoma daleko od optimalnog.

Razvoj računarskog softvera u toku zadnjih desetak godina omogućava uvođenje kompletno izmenjenog i mnogo jednostavnijeg pristupa za razvoj simulacionih modela [18], [29], [37], [52]. Modeli se korišćenjem ovih softverskih paketa mogu vrlo lako razvijati, modifikovati i prilagođavati specifičnim uslovima problema. Rezultati se takođe mogu veoma lako prikazati korisnicima u različitim formama. Ovi modeli se mogu koristiti za kompleksne nelinearne probleme sa velikim brojem ograničenja.

Brojne optimizacione tehnike su u redovnoj upotrebi u vodoprivrednoj praksi. Problemi raspodele vodnog resursa na veći broj korisnika se veoma efikasno mogu rešavati korišćenjem linearnog programiranja (LP) koje je uveo Dantzig u ranim 1950tim [7]. Linearno programiranje zahteva da su ciljna funkcija i sva ograničenja opisana linearnim funkcijama. Međutim, u mnogim slučajevima u praksi ni ciljna funkcija ni ograničenja nisu linearne funkcije promenljivih. Zbog toga je bilo neophodno koristiti razne modifikacije originalnog linearnog programiranja da bi se rešavali realni vodoprivredni problemi u svakodnevnoj praksi. Te modifikacije su najčešće zahtevale aproksimaciju originalnog nelinearnog problema linearnim. Naprimera, različiti postupci se mogu koristiti za linearizovanje nelinearne funkcije metodom sukcesivnih aproksimacija [28].

Nelinearno programiranje obuhvata set optimizacionih tehnika koje se mogu koristiti za rešavanje vodoprivrednih problema kada su ciljna funkcija i/ili ograničenja predstavljena nelinearnim relacijama. Za sada nepostoji jedna tehnika koja može da reši bilo koji nelinearni optimizacioni problem. Specifični problemi se rešavaju specifičnim tehnikama nelinearnog programiranja. Naprimera, problemi čije ciljne funkcije imaju kvadratni oblik se mogu rešavati kvadratnim programiranjem [19]. Glavni nedostatak za efikasnu primenu nelinearnog programiranja u vodoprivredi je što ove metode nisu u stanju da razlikuju lokalni od globalnog optimuma. U poslednjim godinama veoma intenzivan rad je uložen u razvoj pouzdanih softverskih paketa za nelinearno programiranje visokog kvaliteta kao što je naprimera MINOS [33].

Dinamičko programiranje (DP) ima nekih prednosti u odnosu na druge optimizacione tehnike za primenu u vodoprivrednim analizama. Naprimera, DP se može koristiti za optimizaciju ciljnih funkcija bilo kojeg oblika. Ova optimizaciona tehnika zahteva diskretizaciju problema odlučivanja na konačan broj koraka. U svakom koraku se zatim identifikuje broj mogućih stanja sistema (vrednosti promenljivih odlučivanja). Optimalna vrednost promenljivih se bira u svakom koraku uz uslov da postoji jedno optimalno rešenje u sledećem koraku. Veći broj promenljivih odlučivanja i detaljnija diskretizacija promenljivih eksponencijalno povećavaju broj evaluacija ciljne funkcije i time zahtevaju ozbiljne računarske resurse. To je i dan danas jedna od najzanimljivijih prepreka za intenzivnije korišćenje ove tehnike u hidrotehničkoj praksi.

Istraživanja u poslednjim godinama su fokusirana na razvoj novih efikasnih tehnika koje sa sigurnošću mogu garantovati globalna optimalna rešenja. Jedna grupa tehnika poznata pod imenom evolucionari algoritmi ima veoma veliki potencijal za primenu u vodoprivredi. Evolucionari algoritmi simuliraju biološki proces evolucije. Centralni koncept je da se populacija individua, koja čini jedno od mogućih rešenja, izloži kolektivnom procesu poboljšanja iz generacije u generaciju. Populacija se inicijalizuje slobodno i onda izlaže procesu izbora, rekombinacije i mutacije. Koraci kroz koje algoritam prolazi se nazivaju generacije i ideja je da svaka nova generacija evoluiraju ka željenom cilju. Progres u toku traženja novih rešenja se meri vrednošću ciljne funkcije koja se računa za svaku novu populaciju. Populacije koje daju bolju vrednost ciljne funkcije se zadržavaju a loše odbacuju. Kombinovanjem dobrih

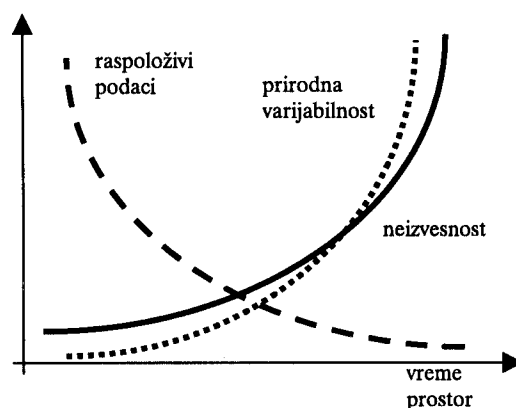
članova populacija formiraju se nove individue koje imaju veću šansu da proizvedu bolju vrednost ciljne funkcije. Ceo proces jako podseća na Darwin-ov princip 'preživljavanja jačeg'. Ovi algoritmi uključuju između ostalih, evolucionu strategiju [1], evoluciono programiranje [12], genetske algoritme [20], idr. [15], [25].

Primeri primene genetskih algoritama u vodoprivrednim analizama mogu se naći u [16], [54], [32], [51], [30], [10], [11], [8], [13], [6], [34], [43], [55], [56], [21], i [22] između ostalih. Najveća prednost genetskih algoritama je (a) da početno rešenje nije potrebno; (b) da se lako mogu primeniti na kompleksne nelinearne vodoprivredne probleme; (c) da daju prihvatljiva rešenja za duži vremenski period; i (d) da daju nekolicinu rešenja koja su u blizini optimalnog.

Prateći evoluciju primene systemske analize u vodoprivredi postaje vrlo vidljivo da komplikovanije matematičke optimizacione tehnike bivaju zamenjene sa jednostavnijim algoritmima za pretraživanje. U isto vreme razvoj računarskog softvera omogućava znatno pojednostavljenje postupka za razvoj simulacionih modela.

## 2.2 Hipoteza neizvesnosti

Prvi deo hipoteze neizvesnosti se odnosi na porast neizvesnosti sa produženjem vremenskog horizonta i proširenjem prostora analize (slika 3). Neizvesnost u vodoprivrednim problemima ima dva izvora:



Slika 3: Šematski prikaz hipoteze neizvesnosti

(i) prirodna hidrološka varijabilnost; i (ii) nedostatak znanja. Da bi smo ispravno razumeli neizvesnost potrebno je veoma precizno razlikovati ova dva izvora. Prvi izvor se najčešće naziva varijabilnost a drugi neizvesnost [27]. Neizvesnost koja potiče od varijabilnosti je proizvod inherentnih fluktuacija hidroloških promenljivih (temperatura, padavine, proticaj, isparavanje, itd.). Tri osnovna izvora varijabilnosti su vremenska, prostorna i individualna. U vodoprivrednim sistemima varijabilnost se najčešće manifestuje kroz prostornu i vremensku fluktuaciju hidroloških promenljivih.

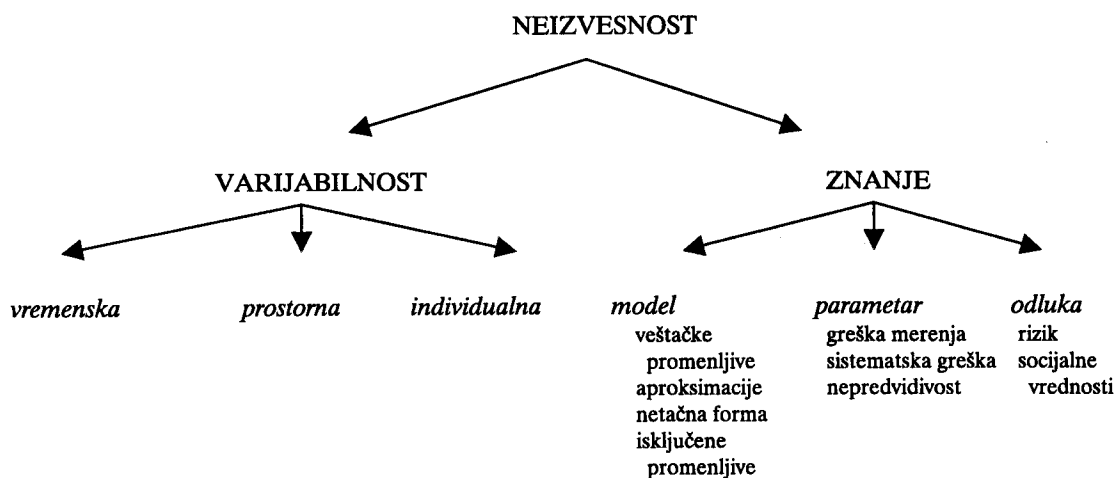
Neizvesnost zbog nedostatka znanja je mnogo teže razumeti. Ona se najčešće javlja kada se određena vrednost od interesa nemože precizno utvrditi usled nedostatka znanja. Glavni izvori neizvesnosti usled nedostatka znanja su prikazani na slici 4.

Neizvesnosti vezane za model su posledica nedovoljnog poznavanja procesa. Modeli su simplificirane predstave realnosti. Neizvesnost u njima lako može nastati ukoliko se neki elementi procesa suviše simplificiraju ili neke važne karakteristike procesa kompletno zanemare. Ova vrsta neizvesnosti se najbolje može rešiti detaljnim studiranjem procesa. U vodoprivrednom planiranju koje je deo održivog razvoja modeli uključuju i veštačke promenljive - promenljive koje zamenjuju one čije se vrednosti teško procenjuju. Drugi izvor neizvesnosti vezane za model može nastati usled isključenja određenih promenljivih koje se smatraju nevažnim.

Često puta isključenje neke od promenljivih može znatno da uveća neizvesnot vezanu za model. Neizvesnost u modelu može isto tako nastati zbog abnormalne situacije na koju se model primenjuje. Takođe, uvođenje većeg broja aproksimacija u matematički model vodoprivrednog sistema može biti izvor dodatne neizvesnosti vezane za model.

Neizvesnost vezana za parametre koji se koriste u modelu je česta i od znatno manjeg značaja nego neizvesnost vezana za model. Ova neizvesnost dolazi od finog podešavanja modela i nemože imati veliku vrednost. Najčešći izvor neizvesnosti u parametrima je slučajna greška u direktnom merenju određenih veličina (često se naziva greška merenja). Drugi i znatno veći izvor neizvesnosti u parametrima dolazi od takozvane sistematske greške koja je posledica subjektivne procene. Treći izvor može biti greška koja nastaje kao posledica izvođenja zaključaka na bazi nedovoljnog osmatranja. Nepredvidivost nekih situacija može takođe biti izvor neizvesnosti u parametrima.

Treća vrsta neizvesnosti je neizvesnost u donošenju odluka. Ona nastaje kao posledica kontroverznih situacija kada treba u proces donošenja odluka uneti socijalne vrednosti. Neizvesnost se javlja kao posledica izbora načina kako da se predstavi rizik. Socijalne posledice rizika, takođe doprinose povećanju ove vrste neizvesnosti. Teškoće u korišćenju monetarne vrednosti za ljudski život u problemima vezanim za zaštitu od poplava mogu poslužiti kao dobra ilustracija.



Slika 4: Izvori neizvesnosti (izvor Simonović [47])

Drugi deo hipoteze neizvesnosti je u smanjenju raspoloživih podataka (slika 3). Ovaj deo hipoteze nije lako objasniti u dobu kada se uz pomoć tehnologije mogućnost za sakupljanjem kvalitetnih podataka na vreme znatno povećava. Hidrološki podaci o nivoima vode, proticaju, nanosu i kvalitetu vode su neophodni za bilo koju vodoprivrednu aktivnost (projektovanje, planiranje i upravljanje). Ukupan broj operativnih hidroloških stanica u svetu je dokumentovan u Svetskoj Hidrometeorološkoj Organizaciji [57]. Ukupan broj od oko 200,000 padavinskih stanica, preko 12,000 stanica koje osmatraju isparavanje, preko 64,000 stanica koje mere proticaj, blizu 38,000 stanica koje osmatraju nivoe voda, 18,500 stanica za osmatranje nanosa, preko 100,000 stanica za merenje kvaliteta voda, i preko 330,000 stanica za osmatranje podzemnih voda deluju imponantno. I pored ovog očigledno velikog ukupnog broja stanica situacije je vrlo različita u različitim regionima sveta.

Finansiska ograničenja mnogih državnih agencija koje su odgovorne za prikupljanje hidroloških podataka se manifestuju u dramatičnim redukcijama programa osmatranja u mnogim zemljama sveta. Opis situacije u Kanadi je dat u [4] i [36]. U mnogim zemljama je program osmatranja jako fragmentiran. Mnogi autori se slažu da je današnji nivo razvijenosti mreža za prikupljanje hidroloških podataka potpuno neadekvatan u poređenju sa potrebama. Promene sistema prikupljanja podataka i načina za distribuciju istih su više nego neophodne. Svetska Meteorološka Organizacija je sa tim ciljem aktivirala specijalan program pod nazivom The Global Runoff Data Centre (GRDC).

Treći element hipoteze neizvesnosti je povećanje prirodne varijabilnosti raspoloživih vodnih resursa (slika 3). Proticaj se karakteriše značajnom vremenskom (godišnjom i sezonskom) i prostornom varijabilnošću. Ova varijabilnost može u bliskoj budućnosti da bude još više povećana usled potencijalnih klimatskih varijacija i promena klime. Jedan od veoma značajnih problema koji zahteva ozbiljnu pažnju hidrotehničke javnosti je problem uticaja klimatskih promena na frekvenciju i distribuciju ekstrema [26]. Analize empiriskih podataka i rezultati primene različitih modela ukazuju sa velikom sigurnošću da trend povišenja prosečne temperature prouzrokuje promene u ekstremnom oticaju, srednjem godišnjem i sezonskom proticaju, posebno za slivove manje i srednje veličine. Na jednoj strani mogu se očekivati povećanja maksimalnih proticaja (poplave) i u

isto vreme mnogo češće i veće suše. Obe pojave će imati značajne ekonomske i ekološke posledice.

### 3. JEDNA VIZIJA BUDUĆNOSTI

Moja vizija budućnosti rešavanja vodoprivrednih problema se bazira na dve hipoteze iznete u prethodnom poglavlju. Viziju čine četiri elementa: (a) simulacije bazirane na programskim objektima; (b) evoluciono programiranje; (c) integracija teorije fazi skupova sa simulacionim i optimizacionim tehnikama; i (d) integracija prostorne analize sa simulacionim i optimizacionim oruđima.

#### 3.1 Simulacije bazirane na programskim objektima

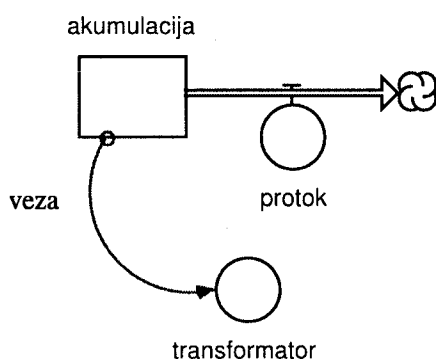
Modeliranje uz pomoć objekata predstavlja novi pristup rešavanju kompleksnih praktičnih problema i korišćenju matematičkih modela [42]. Ovaj pristup je već identifikovan kao značajan doprinos vodoprivrednom planiranju i odlučivanju [35], [46], [48], i [49]. On omogućava da se pitanje podataka odvoji od pitanja strateškog odlučivanja. Na taj način rezultati modelskih analiza postaju funkcionalno transparentni svima koji učestvuju u procesu vodoprivrednog planiranja i odlučivanja.

Danas postoje mnogobrojna oruđa za primenu modeliranja pomoću objekata. Moja vizija se odnosi na jedan pravac koji se zove dinamičko simuliranje i koji je već sa uspehom testiran u vodoprivredi. Korišćenje programskih objekata je prirodan postupak koji podržava sistemsko razmišljanje. Kompleksni vodoprivredni problemi zahtevaju sistemsko razmišljanje. Ono se definiše kao način za razumevanje baziran na procesima mentalnog modeliranja, ravoja, poređenja i razrešavanja problema. Kompjuterska oruđa kao što su STELLA [18], DYNAMO [29], VENSIM [52], POWERSIM [37] i druga omogućavaju primenu sistemskog razmišljanja.

Sistemsko razmišljanje se definiše grugojacije od sistemskog pristupa. Ono obuhvata viđenje sistema (koji su definisani kao skup povezanih elemenata) i veza između elemenata sistema neophodnih za mentalno modeliranje. Simulaciona oruđa bazirana na sistemskoj dinamici su adekvatna za predstavljanje mentalnih modela koji su razvijeni putem sistemskog razmišljanja. Praktično ovi simulacioni modeli se razvijaju kroz progresivno razvijanje strukture sistema. 'Objekti-akumulacije' i 'objekti-protoka' su dva

principijelna objekta za razvijanje strukture sistema (slika 5). 'Objekti-akumulacije' predstavljaju akumulacije u sistemu i služe kao resursi. Moguće ih je koristiti i kao ograničenja. 'Objekti-protoka' su nerazdvojni od 'objekata-akumulacije'. Ukoliko se negde nešto akumulira u sistemu (voda u rezervoaru naprimer), ta akumulacija je rezultat neke aktivnosti koju predstavlja protok nečega (dotok vode u rezervoar). Ova dva objekta čine minimalni skup strukturnih elemenata koji su neophodni da definišu dinamiku sistema. Druga dva objekta čine takozvani 'transformatori' i 'veze'. 'Transformatori' prevode ulaze u izlaze a 'veze' povezuju različite objekte. Svaki objekat sadrži kompleksnu matematičku formulu koja je u ovom programiranju u drugom planu. Korisnik se kompletno posvećuje razvoju šeme sistema dok u isto vreme matematički model biva pisan od strane softverskog paketa koji se koristi.

Osnovni objekti prikazani na slici 5 se mogu koristiti za predstavljanje strukture sistema u velikom broju oblasti. Jedan praktičan primer je prikazan na slici 6 gde je Asuanska brana na Nilu, Egipat prikazana dijagramom programskih objekata [48]. Kada se predstava sistemske strukture kompletira predstoji modeliranje sistema. To se u sistemske dinamici čini specificiranjem vrednosti za 'objekte-protoka'.



Slika 5: Osnvni objekti za opis strukture sistema

Simulacione aplikacije razvijene primenom programskih objekata se nemogu porediti u jednostavnosti sa aplikacijama razvijenim uz pomoć drugih funkcionalnih programskih jezika. Korisnici ovih simulacionih modela mogu u veoma kratkom vremenu da se sa njima upoznaju, da ih koriste i uz njihovu pomoć urade brojne analize sistema. Transparentnost programa i vrlo lako modifikovanje strukture sistema

izmenama sistemske šeme čini ove programe veoma primenljivim. Dodatne prednosti ovog pristupa su u veoma lakim analizama osetljivosti koje je moguće raditi za svaku promenljivu uključenu u opis sistema i za svaku moguću modifikaciju strukture sistema. U klasičnim simulacionim pristupima takve analize bi zahtevale promenu kompjuterskog programa, dok u ovom pristupu zahtevaju jednostavno razmeštanje objekata u šemi sistema. Najznačajnija prednost simulacija baziranih na objektima je u tome što one omogućavaju veoma lako uključivanje socijalnih, ekonomskih i ekoloških elemenata u modeliranje vodoprivrednih sistema.

### 3.2 Evoluciono programiranje

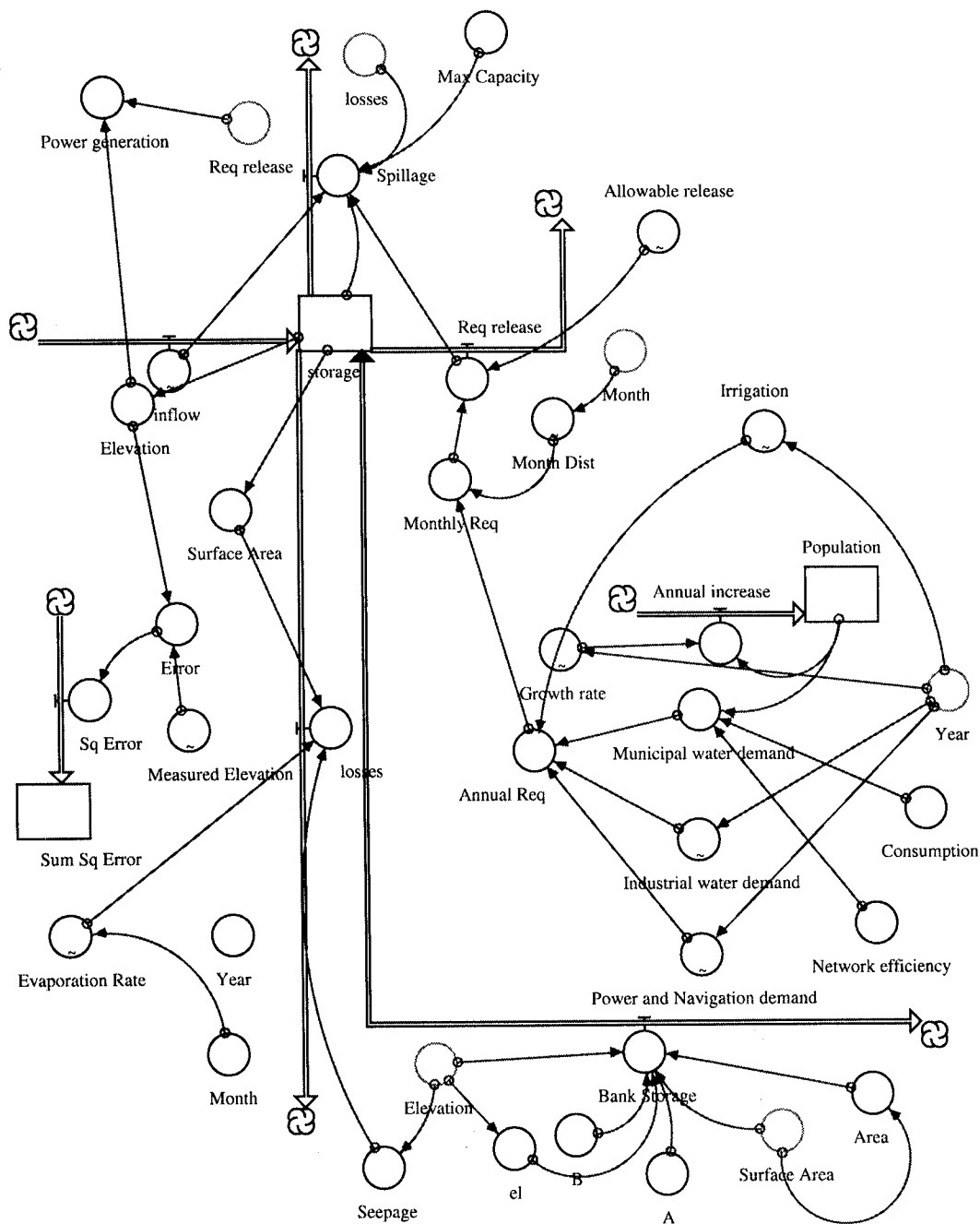
Korišćenje Darwin-ovog principa 'preživljavanja jačeg' za rešavanje teških numeričkih optimizacionih problema je u početku gledano od strane istraživača sa dosta skepticizma. Danas, čak i konzervativni skeptici moraju da prihvate činjenicu da su istraživanja u oblasti genetskih algoritama toliko napredovala da je njihovo mesto u primeni garantovano. Takođe, mora se prihvatiti činjenica da će ova istraživanja imati značajan uticaj na optimizacioni pristup u celini.

Evolucionna optimizacija u generalnom obliku uključuje sledeće korake: (1) definisanje populacije inicijalnih rešenja; (2) evaluaciju inicijalnih rešenja; i (3) primenu rekombinacije i mutacije za generisanje rešenja koja daju bolju vrednost ciljne funkcije. Postupak ima smisla sve dotle dok najbolja rešenja izabrana kao 'roditelji' produkuju bolja rešenja - 'decu'. Postupak se završava onog momenta kada poboljšanje ciljne funkcije postane zanemarljivo (definisano nekim kriterijumom kao što je razlika između zadnje dve vrednosti ciljne funkcije ili sl.).

Većina evolucionih algoritama konvergira ka globalnom optimumu bez razlike da li se pretraživanje obavlja iz oblasti mogućih rešenja ili ne. To je ujedno i jedna od slabosti ovih algoritama. Sasvim je moguće da pretraživanje uključi i do 90% rešenja koja nezadovoljavaju postavljena ograničenja. Time se vreme računanja znatno produžuje. Poboljšanje ovih algoritama u skorij budućnosti mora da se pozabavi ovim pitanjem i nade rešenje kako pretraživanje ograničiti samo na rešenja koja zadovoljavaju ograničenja. Prve ideje se polako pojavljuju u literaturi [21]. Genetski algoritmi ne zavise od oblika ciljne funkcije niti zahtevaju poznavanje prvog izvoda funkcije. To im daje prednost u nalaženju globalnog

optimuma. Isto tako neke slabosti algoritama su uočene pri primeni realnih promenljivih u poređenju sa celobrojnim. U skoroj budućnosti očekuju se praktični

postupci za primenu realnih promenljivih. Prvi koraci u vodoprivredi su prezentirani od strane Ilića i Simonovića [21].



Slika 6: Struktura sistema Asuanske brane na Nilu predstavljena programskim objektima [48]



### 3.3. Integracija teorije fazi skupova sa simulacionim i optimizacionim tehnikama

Standardna definicija skupa uključuje univerzalni skup  $X$  i njegove karakteristike  $p$ . Podskup  $S$  se definiše kao skup svih elemenata unutar  $X$  koji imaju karakteristiku  $p$ . Ukoliko je karakteristika  $p$  takva da jasno razdvaja sve elemente unutar  $X$  na one koji imaju  $p$  i one koji nemaju  $p$  onda možemo reći da  $p$  jasno (crisp) definiše podskup  $S$  unutar  $X$ . Ukoliko separacija nije potpuno jasna kažemo da karakteristika  $p$  ne definiše jasno (ill-defined) podskup  $S$  unutar  $X$ .

Za adekvatnu matematičku definiciju podskupa  $S$  koji nije jasno definisan karakteristikom  $p$  potrebno je uvesti nivo pripadnosti u  $S$  koji se pripisuje svakom elementu  $x$  unutar  $X$ . Nivo pripadnosti  $x$  u  $S$  se numerički definiše kao  $\mu_S(x)$  u intervalu  $[0,1]$ . Nivo pripadnosti  $\mu_S(x)$  predstavlja meru koliko karakteristika  $p$  karakteriše promeljivu  $x$ . Znači, nedovoljno jasno definisan skup  $S$  je kompletno određen funkcijom  $\mu_S: X \rightarrow [0,1]$ . Jednom kada je funkcija  $\mu_S$  definisana, skup  $S$  se naziva fazi skup. Fazi skup se nemože definisati kao konkretan skup elemenata unutar  $X$ . Ako uzmemo u obzir Kartezijanski proizvod  $X = X * [0,1]$  i dopustimo da:

$$S = \{ (x, \mu_S(x)) : x \in X \} \quad (1)$$

Skup  $S$  je podskup proizvoda  $X$ , koji se može prirodno identifikovati kroz naše razumevanje nedovoljno jasno definisanog skupa  $S$ . Ukoliko možemo pokazati da član  $(x, \mu_S(x))$  iz  $X$  pripada skupu  $S$  jedino ako element  $x$  pripada skupu  $X$  sa nivoom pripadnosti  $\mu_S(x)$  u  $S$  onda je skup  $S$  adekvatno definisan fazi skup.

Različite vrste neizvesnosti koje se mogu sresti u vodoprivredi i koje su prikazane na slici 4 se mogu kvantifikovati na razne načine: deterministički; probablistički ili primenom teorije fazi skupova.

U radu [47], Simonović ukazuje da vrsta neizvesnosti nije glavni faktor pri izboru metode za kvantifikaciju neizvesnosti. Nedostatak podataka ustvari mnogo češće određuje koji se postupak može koristiti. Ukoliko se raspolaze sa dovoljno podataka da je moguće naći funkciju gustine raspodele, probablistički pristup je najbolji način za opis neizvesnosti. Na drugoj strani ako pokušavamo da kvantifikujemo održivi razvoj u vodoprivredi kroz, na primer, potrebe budućih generacija onda je mnogo teže doći do potrebnih

podataka. U tom slučaju sasvim je opravdano koirišćenje teorije fazi skupova. Proces kvantifikacije kvalitativnih ciljeva je drugi primer gde teorija fazi supova dominira drugim pristupima za opis neizvesnosti. Pojmovi kao kvalitet vode, zaštita od poplava, rekreacija i mnogi drugi nemaju veoma precizno značenje. Intuitivne lingvističke formulacije ovih termina zaslužuju našu pažnju jer teorija fazi skupova pruža adekvatan način za manipulisanje takvim pojmovima kroz takozvanu lingvističku algebru. Mnogi kvalitativni kriterijumi u vodoprivredi su suviše kompleksni da bi se mogli intuitivo razumeti. Ta kompleksnost je prirodna karakteristika vodoprivrednih sistema i ujedno posledica tehničkih, ekonomskih, političkih, ekoloških, socijalnih, i institucionalnih karakteristika procesa donošenja odluka u vodoprivredi [41]. Jedan od načina za razumevanje kompleksnosti je dekompozicija ovih kriterijuma. Kroz postupak dekompozicije kompleksnih kriterijuma može se evaluirati svaka komponenta pojedinačno. Dodatno, model za dekompoziciju, jednom kada je razvijen, se može koristiti u različitim situacijama [9]. Kada se fazi skupovi koriste za modeliranje manje kompleksnih parametara, neke od metoda za definisanje funkcija nivoa pripadanja (prikazane u radu Despića i Simonovića [9]) se mogu direktno primeniti.

### 3.4. Integracija prostorne analize sa simulacionim i optimizacionim tehnikama

Većina simulacionih i optimizacionih modela u vodoprivredi nije u mogućnosti da eksplicitno uključi prostorne karakteristike vodoprivrednih sistema. U većini slučajeva jedna ili dve agregatne relacije se koriste da sumiraju prostorne karakteristike vodoprivrednih sistema. Na primer, u slučaju akumulacija prostorne karakteristike se najčešće sumiraju kroz nelinearnu funkciju koja povezuje promenu površine akumulacije sa nivoom vode u njoj. Isto tako je postalo jasno da je naše razumevanje vodoprivrednog problema direktno zavisno od naše sposobnosti da eksplicitno definišemo prostornu dimenziju tog problema.

Prostorno modeliranje se može primeniti kroz integraciju simulacionih dinamičkih modela sa geografskim informacionim sistemima (GIS). Dinamički simulacioni model može koristiti prostorne informacije eksplicitno kroz primenu fundamentalnih relacija u svakoj tački u prostoru (na nivou piksela). Na taj način GIS pored prostorne analize dobija i dinamički karakter (tj. može prikazati promenu

promenljivih u prostoru i vremenu). Prvi pokušaji primene gornje ideje u vodoprivredi se mogu naći u literaturi [5], [38] i [23].

Jedan od karakterističnih problema za koje se koriste GIS je problem identifikovanja adekvatne lokacije (naprimer postrojenja, dalekovodne mreže, cevovoda, isl.) koja zadovoljava veći broj kriterijuma (naprimer ravan teren, blizina puta, površina veća od 70,000 m<sup>2</sup>, isl.). Značajan trud je investiran u razvoj softvera za prostorne analize koji može rešiti ovaj optimizacioni problem. Modeli za optimalni izbor lokacije su deo mnogih novijih GIS paketa [2]. Najpoznatiji je takozvani 'p-median problem' koji se matematički može prikazati kao:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q X_k h_{jk} c_{jk} \quad (2)$$

$\{S_j\}$

pod uslovom da:

$$\sum_j h_{jk} = 1 \quad (3)$$

$$h_{jk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

gde:  $S_j = (x_j, y_j)$  predstavlja lokaciju izvora;  $X_k$  potrebu u  $k$ ; i  $c_{jk}$  je rastojanje od  $j$  do  $k$ . Problem koji treba rešiti je da se nađe optimalna lokacija za  $p$  izvora koja će podmiriti potrebe na  $q$  lokacija. Ovaj problem opisuje prostornu optimizaciju transportnog problema.

Analički optimizacioni postupci još uvek imaju veliku prednost u poređenju sa GIS paketima. Zbog toga mogućnost inverznog pristupa, uključivanje prostornih interakcija u optimizacione postupke, izgleda veoma atraktivno. U svakom slučaju u ne tako dalekoj budućnosti bićemo svedoci mnogo moćnijih GIS paketa koji će biti u mogućnosti da se koriste za optimizaciju mnogih vodoprivrednih problema.

#### 4. ZAKLJUČCI

U prošlosti, i u određenoj meri i danas, mnogi korisnici modela za vodoprivredne analize nisu imali i nemaju veliko poverenje u rezultate koji su njima dobijeni. Mogućnosti računara rastu i njihova cena pada. To dopušta mnogim korisnicima modela da se uključe u postupak njihovog razvoja i primene od samog početka.

Tehnologija je danas jedna od sila koja usmerava politički proces donošenja odluka. U budućnosti se očekuje da će ta uloga biti još izraženija. Prostorni sistemi za podršku odlučivanju koji se razvijaju korišćenjem programskih objekata uključuju transparentna oruđa koja se lako mogu razumeti i koristiti.

Nacionalne i internacionalne statičke i dinamičke baze podataka danas omogućavaju pristup neophodim informacijama u digitalnom obliku. U razvijenim zemljama je vidljiv trend omogućavanja neograničenog pristupa podacima o vodama u formatu koji je jednostavan za korišćenje.

Brzina kojom se podaci mogu razmenjivati i ideje deliti sa drugima su u istoriji bili kontrolni mehanizmi naučnog progresa. Internet je na početku (1968) povezivao četiri korisnika. U 1997, više od 15 miliona korisnika je bilo povezano u razne kompjuterske mreže [24]. Virtualne biblioteke, virtualne baze podataka, virtualni forumi i oglasne table, programi razvijeni za egzekuciju preko interneta i korišćenje novih programskih jezika (kao što je Java) otvaraju nove mogućnosti za vodoprivredne stručnjake.

Vodoprivredna problematika razvijenih zemalja i zemalja u razvoju će u budućnosti biti veoma kompleksna. Moja nada je da će neka od oruđa koja su diskutovana u ovom radu, pomognuta kvalitetnim podacima koji će se razmenjivati kroz kompjuterske mreže, dati moć ljudima da donose razumne odluke o tome kako da najracionalnije i ravnopravno koriste vodne resurse koji su im na raspolaganju.

#### ZAHVALNOST

Veći deo ovog rada je preuzet iz Simonović, S.P. 'Tools for Water Management: One View of the Future', *Water International*, 25(1):76-89, March 2000. Autor je zhvalan svim svojim studentima na znanju koje je od njih dobio. Finansiska pomoć NSERC-a je od velikog značaja za rad na problemima opisanim u radu. Takođe bih želeo da se zahvalim kolegi Profesoru Đorđeviću za inicijativu da se ovaj rad napiše.

#### LITERATURA

- [1] Back, T., F. Hoffmeister, and H.P. Schewel. 1991. A Survey of Evolution Strategies. *Proceedings of the Fourth International*

- Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA.
- [2] Birkin, M., G. Clarke, M. Clarke, and A. Wilson. 1996. *Intelligent GIS: Location Decisions and Strategic Planning*. GeoInformation International, Cambridge, United Kingdom.
- [3] Brooke, A., D. Kendrik, and A. Meeraus. 1996. *GAMS: A User's Guide*, The Scientific Press, Redwood City, California, USA.
- [4] Burn, D.H. 1997. Hydrologic Information for Sustainable Development, *Hydrologic Sciences Journal* 42, No.4, 481-492.
- [5] Costanza, R., F. Sklar, and M. White. 1990. Modeling Coastal Landscape Dynamics, *BioScience* 40, 91-107.
- [6] Dandy, G.C., A.R. Simpson, and L.J. Murphy. 1996. An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization, *Water Resources Research*, 32, No.2, 449-458.
- [7] Dantzig, G.B. 1963. *Linear Programming and Extension*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- [8] Davidson, J.W., and I.C. Goulter. 1995. Evolution Program for the Design of Rectilinear Branched Distribution Systems. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* 9, No.2, 112-121.
- [9] Despic, O. and S.P. Simonovic. 2000. Aggregation Operators for Soft Decision Making in Water Resources, *Fuzzy Sets and Systems*, 115, No.1, 11-33.
- [10] Esat, V., and M.J. Hall. 1994. Water Resources System Optimization Using Genetic Algorithms, *Hydroinformatics 94*, Proceedings, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 225-231.
- [11] Fahmy, H.S., J.P. King, M.W. Wentzel, and J.A. Seton. 1994. Economic Optimization of River Management Using Genetic Algorithms. *Paper No. 943034*, ASAE 1994 International Summer Meeting. St. Joseph, Michigan, USA.
- [12] Fogel, L.J., A.J. Owens, and M.J., Walsh. 1966. *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*, John Wiley, Chichester, United Kingdom.
- [13] Franchini, M. 1996. Use of Genetic Algorithm Combined with a Local Search Method for the Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Hydrological Sciences Journal*.41, No.1, 21-40.
- [14] Friedman, R., C. Ansell, S. Diamond, and Y.Y. Haimes. 1984. The Use of Models for Water Resources Management, Planning and Policy, *Water Resources Research* 20, No.7, 793-802.
- [15] Glover, F. 1999. Scatter Search and Path Relinking, in *New Methods in Optimization*, D.Corne, M.Dorigo and F.Glover, eds. McGraw-Hill, New York, New York, USA.
- [16] Goldberg, D.E., and C.H. Kuo. 1987. Genetic Algorithms in Pipeline Optimization, *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* 1, No.2, 128-141.
- [17] Helweg, O. 1985. *Water Resources Planning and Management*, John Wiley & Sons, New York, New York, USA.
- [18] High Performance Systems. 1992. *Stella II: An Introduction to Systems Thinking*. High Performance Systems, Inc., Hanover, New Hampshire, USA.
- [19] Hillier, F.S., and G.J. Lieberman. 1990. *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, New York, USA.
- [20] Holland, J.H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA.
- [21] Ilich, N., and S.P. Simonovic. 1998. An Evolution Program for Pipeline Optimization, *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* 12, No.4, 232-240.
- [22] Ilich, N., and S.P. Simonovic. 2001. An Evolution Program for Non-Linear Transportation Problem, *Journal of Heuristics*, 7, No.2, 145-168.
- [23] Jordao, L., P. Antunes, R. Santos, N. Videira, and S. Martinho. 1997. Hydrological and Ecological Economic Simulation to Support Watershed Management: Linking SD and GIS, in *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International System Dynamics Conference*.
- [24] Kristula, D. 1997. *The History of the Internet*. <http://www.davesite.com/webstation/>.
- [25] Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt, Jr., and M.P. Vecchi. 1983. Optimization by Simulated Annealing, *Science* 220, No. 4598, 671-680.
- [26] Kundzewicz, Z.W., and A.W. Kaczmarek. 2000. Coping with Hydrological Extremes, *Water International*, 25, No.1, 66-76..

- [27] Ling, C. W. 1993. *Characterising Uncertainty: A Taxonomy and an Analysis of Extreme Events*. MSc Thesis, School of Engineering and Applied Science, University of Virginia, USA.
- [28] Loucks, D.P., J.R. Stedinger, and D.A. Haith. 1981. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [29] Lyneis, J., R. Kimberly, and S. Todd. 1994. Professional Dynamo: Simulation Software to Facilitate Management Learning and Decision Making, in *Modelling for Learning Organizations*, Morecroft, J., and J. Sterman, eds. Pegasus Communications. Waltham, Massachusetts, USA.
- [30] McKinney, D.C., and M.D. Lin. 1994. Genetic Algorithm Solution of Groundwater Management Models. *Water Resources Research* 30, No.6, 1897-1906.
- [31] Meadows, D.H., D.L., Meadows, and J. Randers. 1992. *Beyond the Limits*. McClelland and Stewart Inc., Toronto, Canada.
- [32] Murphy, L.J., A.R. Simpson and G.C. Dandy. 1993. Design of a Network Using Genetic Algorithms, *Water* 20, 40-42.
- [33] Murtagh, B.A., and M.A. Saunders. 1995. *MINOS 5.4 Users Guide*, Technical report SOL 83-20R, Systems Optimization Laboratory, Department of Operations Research, Stanford University, Stanford, California, USA.
- [34] Oliveira, R., and D.P. Loucks. 1997. Operating Rules for Multireservoir Systems, *Water Resources Research* 33, No.4, 839-852.
- [35] Palmer, R.N., A.M. Keyes, and S. Fisher. 1993. Empowering Stakeholders Through Simulation in Water Resources Planning, in *Water Management for the '90s*. K. Hon, ed. ASCE, 451-454.
- [36] Pilon, P.J., T.J. Day, T.R., Yuzyk, and R.A. Hale. 1996. Challenges Facing Surface Water Monitoring in Canada, *Canadian Water Resources Journal* 21, 157-164.
- [37] Powersim Corporation. 1996. *Powersim 2.5 Reference Manual*, Powersim Corporation Inc., Herndon, Virginia, USA.
- [38] Ruth, M., and F. Pieper. 1994. Modeling Spatial Dynamics of Sea Level Rise in a Coastal Area, *System Dynamics Review* 10, No.4, 375-389.
- [39] Quinn, D. 1992. *Ishmael*, A Bantam/Turner Book. New York, New York, USA.
- [40] Quinn, D. 1996. *The Story of B*, Bantam Books. New York, New York, USA.
- [41] Rogers, P.P., and M.B., Fiering. 1986. Use of Systems Analysis in Water Management, *Water Resources Research* 22, No. 9, 146-158.
- [42] Rumbaugh, J., M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy, and W. Lorensen. 1991. *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [43] Savic, D.A., and G.A. Walters. 1997. Genetic Algorithm for Least-Cost Design of Water Distribution Networks, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management* 123, No.2, 67-77.
- [44] Simonovic, S.P. 1996. Decision Support Systems for Sustainable Management of Water Resources 1. General Principles, *Water International* 21, No.4, 223-232.
- [45] Simonovic, S.P. 1996a. Decision Support Systems for Sustainable Management of Water Resources 2. Case Studies, *Water International* 21, No.4, 233-244.
- [46] Simonovic, S.P., and M.J. Bender. 1996. Collaborative Planning Support System: An Approach for Determining Evaluation Criteria, *Journal of Hydrology* 177, No.3-4, 237-251.
- [47] Simonovic, S.P. 1997. Risk in Sustainable Water Resources, in *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty*, Rosbjerg, D., et al, ed. IAHS Publication No.240, 1-17.
- [48] Simonovic, S.P., H. Fahmy, and A. El-Shorbagy. 1997. The Use of Object-Oriented Modeling for Water Resources Planning in Egypt, *Water Resources Management* 11, 243-261.
- [49] Simonovic, S.P., and H. Fahmy. 1999. A New Modeling Approach for Water Resources Policy Analysis, *Water Resources Research* 35, No.1, 295-304.
- [50] Simonovic, S.P. 1999. Learning from the Past, Developing Ideas for the Future: IWRA 21, *Water International* 24, No. 2, 81-85.
- [51] Simpson, A.R., G.C. Dandy, and L.J. Murphy. 1994. Genetic Algorithms Compared with other Techniques for Pipe Optimization, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management* 120, No.4, 423-443.

- [52] Ventana Systems. 1995. *Vensim User's Guide*, Ventana Systems Inc., Belmont, Massachusetts, USA.
- [53] Wallis, J.R. 1993. Water Resources Approaching the Millennium, in *Proceeding of the Sixth South African National Hydrological Symposium*. S.A. Lorentz, S.W. Kienzle and M.C. Dent, eds. Department of Agricultural Engineering, University of Natal, Pietermaritzburg I, 1-7.
- [54] Wang, Q.J. 1991. The Genetic Algorithm and its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Water Resources Research* 27, No.9, 2467-2471.
- [55] Wang, M., and C., Zheng. 1998. Groundwater Management Optimization Using Genetic Algorithms and Simulated Annealing: Formulation and Comparison, *Journal of American Water Resources Association* 23, No.3, 519-530.
- [56] Wardlaw, R., and M. Sharif. 1999. Evaluation of Genetic Algorithms for Optimal Reservoir System Operation, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management* 125, No.1, 25-33.
- [57] WMO. 1995. *INFOHYDRO Manual, Hydrological Information Referral Service, Operational Hydrology Report No. 28, WMO-No. 683, Geneva, Switzerland.*
- [58] Wurbs, R.A. 1998. Dissemination of Generalized Water Resources Models in the United States, *Water International* 23, No.3, 190-198.
- [59] Yeh, W.W-G. 1985. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, *Water Resources Research* 21, No.12, 1797-1818.

## TOOLS FOR WATER MANAGEMENT: ONE VIEW OF THE FUTURE

by

Slobodan P. SIMONOVIĆ  
 Department of Civil and Environmental Engineering  
 The University of Western Ontario, London, Canada

### Summary

Floods, droughts, water scarcity, and water contamination are some among many water problems that are present today and will be even more noticeable in the future. In the past, many different tools have been used for simulation and optimization of complex water resources systems in order to provide an improved basis for decision making. The continuing evolution of information technology (hardware and software) at the same time creates a good environment for the transition to new tools. Application of the systems approach to water resources planning, management, and operations has been established as one of the most important advances made in the field of water resources engineering. Based on the

lessons learned, this contribution provides my personal view on the tools to be used in the future. Two paradigm shifts are discussed. The first one is focusing on the complexity of the water resources domain and the complexity of the modelling tools in an environment characterised by continuous rapid technological development. The second one deals with water-related data availability and natural variability of domain variables in time and space affecting the uncertainty of water resources decision making.

**Key words:** Systems analysis, water resources, simulation, fuzziness, optimization

Redigovano 26.05.2003.