

# Modeliranje urbanog vodnog sustava

Željko Rozić, Jure Margeta, Snježana Knezić

## Ključne riječi

urbani vodni sustav, upravljanje, upravljački sustav, dinamički sustav, objektno orijentirano modeliranje, cijena vode

## Key words

municipal water system, management, management system, dynamic system, object-oriented modelling, price of water

## Mots clés

système d'eau municipal, gestion, système de gestion, système dynamique, modélisation par objets, prix d'eau

## Ключевые слова

городская водная система, управление, система управления, динамическая система, объектно ориентированное моделирование, стоимость воды

## Schlüsselworte

urbanes Wassersystem, Leitung, Leitungssystem, dynamisches System, objektorientierte Modellierung, Wasserpreis

Ž. Rozić, J. Margeta, S. Knezić

Pregledni rad

## Modeliranje urbanog vodnog sustava

Polazi se od činjenice da je upravljanje urbanim vodnim sustavom složen zadatak koji se odvija unutar niza ograničenja. Pri donošenju upravljačkih odluka vezanih za taj sustav važno je znati koje su posljedice na sve segmente upravljačkog sustava. U radu se prikazuje metodologija dinamike sustava i objektno orijentiranog modeliranja kojom se uspješno može analizirati urbani vodni sustav i utjecaj upravljačkih odluka. Metodologija je primijenjena na vodni sustav grada Mostara.

Ž. Rozić, J. Margeta, S. Knezić

Subject review

## Municipal water system modelling

The paper starts with the assertion that the urban water system management is a complex activity the realization of which is often burdened with a number of constraints. When making management decisions as related to such systems, it is significant to know what effects these decisions will have on every segment of the management system. The authors present a methodology, based on system-dynamics and object-oriented modelling, that can successfully be used to analyze municipal water supply systems and the effects of management decisions. The methodology was applied on the water supply system for the town of Mostar.

Ž. Rozić, J. Margeta, S. Knezić

Ouvrage de synthèse

## Modélisation d'un système d'eau municipal

L'ouvrage commence par l'affirmation que la gestion de systèmes urbains d'alimentation en eau est une activité complexe qui est souvent accablée par un grand nombre de contraintes. En faisant des décisions de gestion relatives à ces systèmes, il est important de savoir quels effets ces décisions auront sur chaque segment du système de gestion. Les auteurs présentent une méthodologie, basée sur la dynamique de systèmes et la modélisation par objets, qui peut être utilisée avec succès dans l'analyse des systèmes municipaux d'alimentation en eau et dans la détermination des effets des décisions spécifiques de gestion. Cette méthodologie a été appliquée sur le système d'eau pour la ville de Mostar.

Ж. Розич, Љ. Маргета, С. Кнезич

Обзорная работа

## Моделирование городской водной системы

В работе описывается то, что управление городской водной системой является сложным заданием, развивающимся внутри ряда ограничений. При вынесении решений об управлении, связанных с той системой, важно знать, каковыми являются последствия в отношении всех сегментов системы управления. В работе показывается методология динамики системы и объектно ориентированного моделирования, с помощью которой возможно успешное моделирование водной городской системы и влияние решений, относящихся к управлению ней. Методология применена на водную систему города Мостара.

Ž. Rozić, J. Margeta, S. Knezić

Übersichtsarbeit

## Modellierung des urbanen Wassersystems

Man geht von der Tatsache aus dass die Leitung des urbanen Wassersystems eine komplizierte Aufgabe ist die sich innerhalb einer Reihe von Begrenzungen abspielt. Beim Erbringen leitender Entschlüsse im Zusammenhang mit diesem System ist es wichtig zu wissen welche Folgen für alle Segmente des Leitungssystems daraus entspringen. Im Artikel ist die Methodologie der Systemdynamik und der objektorientierten Modellierung dargestellt, mit der man erfolgreich das urbane Wassersystem und den Einfluss der leitenden Entschlüsse analysieren kann. Die Methodologie ist am Wassersystem der Stadt Mostar angewendet.

Autori: Mr. sc. **Željko Rozić**, dipl. ing. građ.; Građevinski fakultet, Mostar; prof. dr. sc. **Jure Margeta**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Snježana Knezić**, dipl. ing. građ.; Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split

## 1 Uvod

Voda je vitalni element gradskog života. Opskrba vodom presudna je za zdravlje i dobrobit ljudi, za gradski krajolik i okoliš. Voda, također, predstavlja važnu ulaznu komponentu/resurs za gospodarski razvoj naselja i društva u cjelini. Međutim, urbano područje svojim hidrološkim/vodnim ciklusom vode najbolje kakvoće transformira u zagađene vode s negativnim utjecajem na okoliš i vodne resurse. Stoga je za održivost naselja i okoliša nužna kontrola urbanoga hidrološkog ciklusa. Kontrola se provodi urbanim-komunalnim vodnim sustavom.

Upravljanje urbanim vodnim sustavom važan je segment razvoja svakoga grada. O stanju i razvijenosti urbanoga vodnog sustava ovisi društveno-ekonomsko stanje urbane sredine, njezina održivost i produktivnost. Međutim, upravljanje i razvoj urbanoga vodnog sustava složen je zadatak koji se rješava unutar više ograničavajućih okvira: financijskih, kadrovskih, infrastrukturnih, zakonskih, okolišnih, kulturnih, civilizacijskih itd. Postojeći model upravljanja koji se uglavnom zasniva na iskustvu pojedinaca stečenog dugogodišnjim radom nije više dovoljan ni produktivan. Sustavi su složeni s cijelim nizom elemenata i procesa koje na dosadašnji način nije moguće djelotvorno pratiti ni kontrolirati. Zbog toga postoji potreba za razvojem novih upravljačkih alata koji mogu u cjelini uzeti u obzir sve elemente sustava, funkcionalnu povezanost različitih dijelova sustava i vodnoga sustava, gradskih područja te vodnoga okoliša-riječnih bazena. Vodeći računa o navedenome, očito je da se iznimna pozornost mora posvetiti pravilnom upravljanju i gospodarenju urbanim vodnim sustavom, respektirajući potrebe i planove rasta i širenja grada te sva ograničenja, a prije svega ona koja se odnose na okoliš. Dva su osnovna principa koja se primjenjuju pri gospodarenju sustavom:

- održivost sustava i
- integralni pristup.

Međutim, pozornost pri rješavanju upravljačkih problema treba posvetiti i drugim čimbenicima, a prije svega: (i) uključivanju javnosti; (ii) politici formiranja cijena vode; (iii) postupku odabira tehnologija prikladnih za kadrove i stupanj razvijenosti sredine i sustava itd.

Složeni se problemi i sustavi rješavaju postupkom sustavne analize pa tako i urbani vodni sustav. U svojoj metodologiji rješavanja problema primjenjuju se brojne metode i tehnike koje se mogu svrstati u dvije osnovne grupe [10]: (i) optimizacijske tehnike i metode; (ii) simulacijske tehnike i metode. Simulacija je nužna za opisivanje i razumijevanje sustava i procesa u sustavu dok je optimalizacija nužna za usmjeravanje upravljačkih odluka. Uglavnom se rabe obje metode u razvoju i primjeni odgovarajućeg sustava za podršku u odlučivanju.

U radu će se prezentirati noviji alat "objektno orijentirano modeliranje" (OOM) koji se rabi u analizi i rješavanju složenih sustava. To je nov način razmišljanja o problemu uz pomoć skupa modela organiziranih po konceptu stvarnoga svijeta. Prikazat će se primjena OOM-a u upravljanju urbanim vodnim sustavom, odnosno mogućnosti iskorištavanja i značajke ovog alata.

## 2 Urbani vodni sustav

Urbani je vodni sustav dio prirodnoga hidrološkog ciklusa koji uključuje slivno područje grada i izgrađene i neizgrađene dijelove prirodnoga vodnog sustava na području grada:

- zahvaćanje, transport, čišćenje, distribuciju vode
- prikupljanje, odvod i pročišćavanje otpadnih voda
- prikupljanje, odvod i pročišćavanje oborinskih voda, te
- kontrolu režima voda vodnih resursa na području grada.

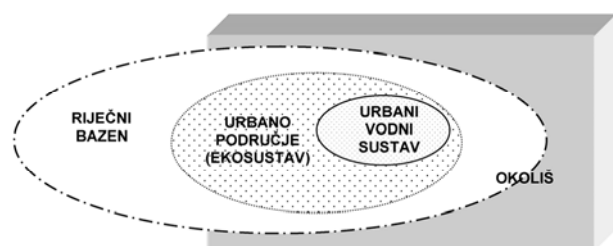
U kontekstu prethodnog može se definirati i urbani vodni sustav kao izgrađeni vodni sustav najvećim dijelom unutar područja grada, a smješten unutar jednoga prirodnoga vodnoga sustava koji je izmijenjen i prilagođen ljudskim potrebama. Drugim riječima, to je prirodni sustav koji je čovjekovim aktivnostima doživio promjene i prilagodbe poradi boljega i djelotvornijega funkcioniranja unutar urbanog područja, a sve radi ostvarenja potreba stanovništva, vodeći računa da se pritom ne poremete prirodni odnosi i ne ugrozi okoliš.

Uobičajeni infrastrukturni i prirodni elementi urbanog vodnog sustava u riječnom bazenu su:

- Izvori pitke vode
- Postrojenje za proizvodnju vode za piće
- Infrastruktura za transport i raspodjelu vode
- Upotreba vode
- Infrastruktura odvodnje oborinske vode
- Uređaji za pročišćavanje otpadne vode
- Kopnene vode i obalno more
- Kanali, ustave, crpne stanice
- Gradske površinske vode i lokalni vodni resursi
- Infrastruktura odvodnje upotrijebljenih voda.

Sustav je u stalnoj interakciji s okruženjem, prirodnim i društveno-ekonomskim, odnosno s riječnim bazenom i urbanim područjem (slika 1.). Odnose između okoliša,

riječnoga bazena i urbanoga vodnog sustava i njihovu međuovisnost čini niz međusobnih veza koje su pak ovisne o fizičkome, političkome, geografskome, klimatskome i drugom položaju regije u kojoj se nalaze. Bitno je napomenuti da uzajamna djelovanja riječnoga bazena i urbanoga sustava vode uključuju sve odnose vezane za iskorištavanje vode, kao i sve ekonomske odnose nastale uporabom zemljišta i urbane vode u riječnim bazenima.



Slika 1. Međuovisnosti između urbanog vodnoga sustava, riječnoga bazena, grada i okoliša

Prema definiciji Houghtona i Huntera [1], jedno urbano područje je skup zgrada i ulica gdje ljudi žive, rade i sudjeluju u njegovu gospodarskom i društvenom razvoju koje obično ima najmanje 10000 stanovnika. To područje formira urbani ekološki sustav koje se sastoji od: (i) prirodnog sustava; (ii) izgrađenoga sustava i (iii) društvenoga sustava.

Društveno-ekonomski odnosi u urbanoj sredini i široj zajednici utječu na ponudu i potražnju vode i usluga vezanih uz vodu. Veći ekonomski rast i standard življenja generira veće potrebe za vodom i vodnim uslugama. Zbog toga značajke urbanoga vodnog sustava uvelike ovise o stanju u urbanom području i njegovim karakteristikama. Društveni okvir generira, također, i prihvatljive standarde za zaštitu od poplava, upravljanje odvodnjom i uslugama otpadnih voda. Isto tako upravljanje urbanim sustavom vode jest potencijalno oruđe urbanoga razvoja. Sve mora biti održivo da bi se podržala održivost urbanoga sustava i time življenja u urbanoj sredini.

Očito je da nije jednostavno ni lako donošenje upravljačkih odluka. Posljedice su različite i na prirodni i na društveni okoliš, a posebno na održivost i stanje samoga vodnoga sustava. Donositelji odluka moraju dobro „odvagnuti“ – procijeniti svoje odluke, odnosno analizirati problem i posljedice. Za ostvarenje održivosti urbanoga vodnog sustava potrebno je spoznati cijeli niz dugoročnih alternativa, njihove utjecaje i posljedice. Uporaba upravljačkih alata u ovome može biti veoma korisna. Takav je alat upravo objektno orijentirano modeliranje (OOM) koje između ostalog može obuhvatiti problematiku i utjecaje iz područja tehničkih/tehnoloških i netehničkih/upravljačkih varijabla (cijena vode i drugo) na stanja i rad infrastrukturnoga sustava i svih njegovih elemenata kao i utjecaj na okoliš.

### 3 Metodologija

#### 3.1 Dinamika sustava

Modeliranje složenih sustava, kao što su sustavi vodnih resursa i komunalni vodni sustavi, zahtijeva poseban pristup zbog toga što se procesi u kojima se definiraju politike upravljanja moraju oslanjati na potpuno razumijevanje posljedica predloženoga rješenja i mogućega reagiranja sustava. Modeliranje urbanoga sustava općenito se može podijeliti u dvije glavne skupine: (1) matematičko modeliranje pojedinoga tehničkog podsustava poput cjevovoda, mreže, spremnika itd. i (2) modeliranje sustava u širem smislu što predstavlja proširenje klasičnoga tehničkog pogleda na ostale netehničke elemente sustava (ekonomske, organizacijske, itd.). Pristup koji pomaže procesu stvaranja politika dinamičko je modeliranje sustava [15]. Princip dinamičkoga modeliranja sustava primjenjuje se na sve vrste sustava koji se mogu opisati kao sustavi s povratnom vezom [4], a pomaže razumijevanju sustava ne samo u kontekstu tehničko-tehnoloških rješenja, već i u kontekstu društvenih, političkih i ekonomskih prilika [12].

Začetak paradigme „dinamika sustava“ u Forresterovu je radu [6] na sustavnom pristupu kao intelektualnom alatu za modeliranje složenih sustava, a odnosi se na postupak prepoznavanja objekata i njihovih veza u sustavu, kako bi se simulirao njegov rad. Forrester [7] ističe da se složeni sustavi ponašaju suprotno jednostavnima iz kojih, redovito, crpimo iskustva kojima se služimo pri rješavanju problema. Mnoga se intuitivna rješenja razvijaju, tehnički gledano, u kontekstu tzv. negativnih povratnih petlja prvoga reda, koje traže rješenje unutar jednoga cilja, i na temelju jedne varijabli stanja sustava. Forrester [7] primjenjuje sustavni pristup na probleme „dinamike urbanih sustava“ gdje razvija strukturu urbanoga modela koja uključuje sve komponente koje su u međudjelovanju u procesima urbanoga rasta ili stagnacije. Pri modeliranju dinamičkoga ponašanja sustava četiri se temeljne strukture moraju prepoznati: (1) granica sustava, (2) povratne veze koje su temeljni strukturni element unutar granica, (3) varijable stanja sustava koje predstavljaju akumulaciju unutar povratnih veza, (4) varijable koje predstavljaju tijekomove predočavaju aktivnosti unutar povratnih veza.

U području upravljanja vodnim resursima paradigma „dinamike sustava“ primijenjena je u mnogim područjima [5, 15, 8, 9, 16, 11]. Primjena „dinamike sustava“ u području upravljanja vodnim resursima pokazala se učinkovitom. Intelektualni alat koji podržava sustavni pristup, odnosno metodologiju „dinamike sustava“ objektno je orijentirano modeliranje. Namjera je ovoga rada primijeniti taj pristup „dinamike sustava“ uz objektno orijentirano modeliranje u upravljanje urbanim vodnim sustavom.

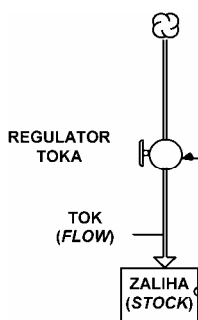
### 3.2 Objektно orijentirano modeliranje

Objektно orijentirano modeliranje najpogodniji je alat za modeliranje sustava u skladu sa sustavskim pristupom i paradigmom „dinamike sustava“. Objektно orijentirane tehnike su široko primijenjene u području inženjerstva programske podrške, a uvedene su kako bi udovoljile zahtjevima složenih sustava. Prednosti su objektно orijentiranoga modeliranja u njegovoj jednostavnosti [14], jer se vrlo lako mogu konstruirati „što kao“ scenariji i tako dobiti uvid u ponašanje sustava. S druge strane, principi „dinamike sustava“ jednoliko se primjenjuju na društvene, prirodne i fizikalne sustave čime se pridonosi proširenju modela upravljanja vodnim resursima.

U ovome je radu metodologija „dinamike sustava“ primijenjena na proces upravljanja urbanim vodnim sustavom grada Mostara, kako bi se složeni sustav učinio razumljivijim upravljačima i donositeljima odluka. Do sada se u području planiranja vodoopskrbnog sustava već primjenjivao ovaj pristup. Tako se sustavska analiza rabi pri modeliranju gradske opskrbe vodom [8], „dinamika sustava“ za modeliranje upravljanja vodnim sustavom na strateškoj razini [15], dok se objektно orijentirano programiranje primjenjuje na planiranje vodnih resursa [13] i upravljanje vodoopskrbom za gradsko područje [9].

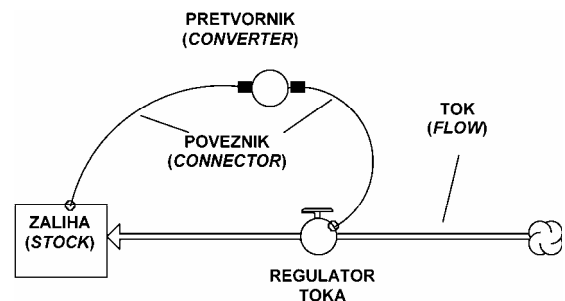
Pri izradi modela upravljanja urbanim vodnim sustavom u ovome se radu započelo od višeciljnosti problema, odnosno uzeo se u obzir hijerarhijski model ciljeva koje treba kontrolirati i zadovoljiti polazeći s viših razina. Polazište simulacijskoga postupka jest izrada modela stanja sustava. Ulaz u sustav može biti kontroliran ili nekontroliran, dok je izlaz uglavnom kontroliran, odnosno djelomično kontroliran ili nekontroliran, posebice ako se radi o prirodnom sustavu. U rješavanju praktičnih problema izlazi se kontroliraju uvođenjem ograničenja, koja u sustavu upravljanja urbanim vodnim sustavom mogu biti: ekonomska, tehnološka, fizikalna, zakonska (standardi), ekološka, društvena, politička, itd.

Za primjenu objektно orijentiranoga modela u radu je odabran proceduralni programski jezik "Stella", koji je prilagođen modeliranju složenih sustava uporabom paradigme sustavskog pristupa, a dinamičko se ponašanje sustava generira unutar povratnih petlja [2, 3, 14]. Povratna je petlja sastavljena od zalihe – varijable stanja sustava i tijeka koji predstavlja pritecanja informacija i materije.



Slika 2. Najjednostavnija petlja povratne sprege

Tijekovima su preko regulatora pridružene jednačbe koje iskazuju politike sustava te eksplicitno ili implicitno sadrže ciljeve. Jednačba regulatora tijekom predstavlja odmak od cilja te formulira djelovanje koje je rezultat tog odmaka. Zaliha (akumulacija resursa), tijekom (akcija), odnosno regulatori tijekom, osnovni su dijelovi strukture sustava. Razine služe kao izvori, a mogu služiti i kao ograničenja i neodvojivi od tijekom. Druga dva osnovna elementa su pretvornik i poveznik (slika 3.). Pretvornik pretvara ulazne podatke u izlazne, a može predstavljati informaciju ili materijalne količine. Poveznik spaja zalihe i pretvornike, zalihe i regulatore tijekom, te pretvornike međusobno, a prenosi numeričke vrijednosti, tj. informacije. Simboli "oblak" izvori su ili određišta tijekomova koji idu iz vanjskoga okruženja, ili k njemu, a upravljani su samo uvjetima unutar sustava.



Slika 3. Složenija petlja s jednim pretvaračem

Međuodnosi i veze pojedinih prethodno opisanih objekata prikazanih objektноorijentiranim modelom odraz su funkcijskih ovisnosti i unutar sustava i ovisnosti s vanjskim interakcijskim sustavima i okolišem. Općenito, objektно orijentirano modeliranje sadrži četiri faze [13,14]:

- analizu sustava (utvrđivanje problema i određivanje funkcija sustava)
- kreiranje sustava koji se simulira (razvoj ukupne arhitekture sustava)
- kreiranje objekata sustava (razvoj utemeljen na analizi potreba) i
- implementacija – programiranje (prijenos objektnih skupina i veza u program).

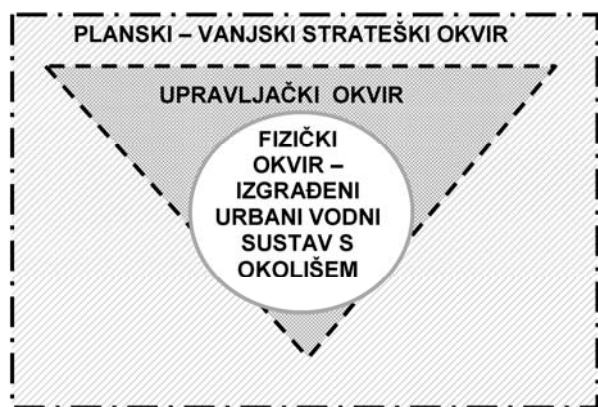
Rezultat procesa modeliranja su tri modela

- objektnim modelom (koji opisuje statičku strukturu sustava)
- dinamičkim modelom (koji opisuje laičke veze u sustavu) i
- funkcijskim modelom (koji opisuje funkcijske veze među varijablama procesa koji se simulira).

#### 4 Model upravljanja urbanim vodnim sustavom

Opisana metodologija, za razliku od drugih metoda i tehnika, polazi od jedinstvenog pristupa modeliranju svih segmenata (elemenata) sustava, kako bi se njihova integracija odvijala na istoj razini apstrakcije, te time olakšalo i unaprijedilo taj dio u izgradnji i analizi sustava. Primjenom paradigme „dinamike sustava“ i implementacije objektno orijentiranim modeliranjem omogućava se provedba procesa planiranja i upravljanja urbanim vodnim sustavom, na način jedinstvenoga tretiranja entiteta kao objekata, bilo da entiteti predstavljaju korisnike, koncepte, modele ili druge dijelove korisničkoga sučelja, te povezivanja svih tih objekata (elemenata sustava) u jedinstveni integralni sustav.

Pri izradi modela upravljanja urbanim vodnim sustavom prije svega treba početi od analize komponenata sustava te provesti raščlanjivanje svih elemenata - od operativne - fizičke razine preko upravljačke i strateške razine (slika 4.). Zatim, treba uspostaviti tijek informacijskog sustava veza i utjecaja, odnosno međuovisnosti pojedinih sustava i podsustava, te definiranje njihove funkcijske ovisnosti preko niza relacijskih veza i odnosa koji uglavnom predstavljaju jednostavne algebarske funkcije u kombinaciji s logičnim i posebnim – prilagođenim namjenskim funkcijama. Sustav se modelira u tri razine ili tri uzastopna koraka. U tom kontekstu prvo se izrađuje najjednostavniji ali temeljni model količina vode urbanoga vodnog sustava kojim se simuliraju stanje i promjene količina vode u sustavu, odnosno vodoopskrbni sustav (vode koje ulaze u grad, razvode se i upotrebljavaju), te zatim sustav prikupljanja/kanalizacije kojim se voda odvodi kao upotrijebljena i otpadna voda do uređaja za pročišćavanje, a zatim ispušta u prijamnik.



Slika 4. Opći koncept integralnoga upravljanja urbanim vodnim sustavom

U sljedećem se koraku model količina vode proširuje u uvodi nova komponenta kakvoće vode. Potom se izrađuje još složeniji model, proširenjem modela količina i kakvoće s ekonomskim i upravljačkim čimbenicima,

odnosno društveno-ekonomskim čimbenicima. Na taj se način dobije cjeloviti model za upravljanje i analizu rada urbanoga vodnog sustava koji sadržava sve infrastrukturne elemente sustava (konfiguraciju), opisuje glavne promjene količina i kakvoće vode u sustavu te društveno-ekonomske procese. Model može biti više ili manje složen, shodno potrebama i značajkama sustava.

#### Model količine vode (K-UVS)

Model količine vode koji ulazi u urbani vodni sustav (uključujući samo vodoopskrbu i sustav otpadnih upotrijebljenih voda) sastoji se od glavnih strukturnih elemenata sustava:

- a) Sustav glavnih razina modela s tijekom i stopama utjecaja sastoji se od sljedećih elemenata: (i) vodni resursi – zahvat vode, (ii) stanovništvo i drugi korisnici sustava, (iii) prijamnik.
- b) Sustav glavnih elemenata pretvarača s konektorima i određenim smjerovima konektora sastoje se od sljedećega:
  - zahvata vode
  - vodoopskrbnoga sustava (kapacitet, stanje sustava, gubici)
  - potreba za vodom – potražnja vode
  - postrojenja za preradu vode za piće
  - potrošnje industrije
  - javne potrošnje
  - ukupne potrošnje vode
  - količine otpadnih voda
  - tuđe vode
  - kanalizacijskoga sustava (kapacitet, stanje sustava, gubici)
  - postrojenja za pročišćavanje otpadne vode.

#### Model količine i kakvoće vode (KK-UVS)

Nadogradnja modela količine vode jest model kakvoće vode urbanoga sustava. U ovome je primjeru obuhvaćena kakvoća vode kanalizacije otpadnih voda. Na isti se način može obuhvatiti i problematika kakvoće vode u vodoopskrbnom sustavu ili oborinskoj kanalizaciji.

Svi pokazatelji stanja kvalitete otpadne vode mogu se uglavnom izraziti sljedećim veličinama:

- prosječna količina organske tvari u otpadnoj vodi (kg/dan) i
- koncentracije pojedinih parametara – indikatora zagađenja (mg/l ili kg/m<sup>3</sup>).

Također, treba napomenuti da je zbog jednostavnosti i preglednosti modela uzet samo jedan pokazatelj – indi-

kator kakvoće vode  $BPK_5$ . Naravno da se model može proširiti drugim pokazateljima (ukupne suspenzije, KPK,  $NH_3$ , N – nitrati, P – fosfor, itd). Na osnovi analize otpadnih voda, stanja prijamnika i odabira stupnja i načina pročišćavanja otpadnih voda, mogu se analizirati sve komponente i međusobni utjecaji, kao i stanje prijamnika.

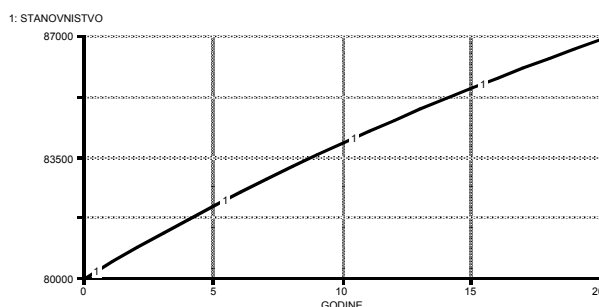
Daljnja nadogradnja modela količine i kakvoće vode (KK-UVS) može obuhvatiti i netehničke upravljačke varijable; prije svega se misli na ekonomski sustav, odnosno ekonomske čimbenike koji su glavni pokretač razvoja i održivosti sustava.

### 5 Primjeri uporabe modela - grad Mostar

#### Osnovni ulazni podaci

- stanovništvo: 80000 - 87000 (trend prirasta 0,55 – 0,30 %) (slika 5.)
- specifična potrošnja: 250 l/st/dan u ovisnosti od faktora civilizacije koji se kreće u granici od 1,0 – 1,7 za vremensko razdoblje od 20 godina
- potrošnja vode za industriju: 100 l/s (s godišnjim povećanjem potrošnje od 0,5 %);
- javna potrošnja vode: 80 l/s (s godišnjim povećanjem potrošnje od 0,5 %)
- gubici vodoopskrbnoga sustava: 60 %
- stupanj izgrađenosti vodoopskrbnog sustava: 95 %
- količina otpadne vode: 80 % specifične potrošnje
- stupanj izgrađenosti kanalizacijskoga sustava: 85 %
- gubici u kanalizacijskom sustavu: 30 %
- vodni resursi: prosječno otjecanje u slivu rijeke Neretve 150 m<sup>3</sup>/s i prosječna izdašnost podzemne vode rijeke Neretve za mostarsko područje: 0,4 m<sup>3</sup>/s
- ukupan broj ES (ekvivalentnih stanovnika)
- protok prijamnika (rijeka Neretva – kritično sušno razdoblje - min. protok): 50 m<sup>3</sup>/s
- količina ispuštene otpadne vode: dobivena kao izlazni parametar modela količine vode u sustavu;
- koncentracija  $BPK_5$  prijamnika na uzvodnom profilu: 2,0 mg/l
- jedinično opterećenje  $BPK_5$ : 60 gr/ES/dan (sadašnje stanje se povećava do 65 gr/ES/dan za planirano razdoblje)
- koeficijent miješanja otpadne vode u prijamniku: Y (kreće se od 0 do 1,0), koji ovisi o hidrauličkim parametrima i udaljenosti mjernoga profila od mjesta ispusta
- opterećenje prijamnika: 9 600 kg/dan – mjereno na uzvodnom profilu
- dozvoljena koncentracija za II. kategoriju rijeke Neretve: 4,0 mg/l

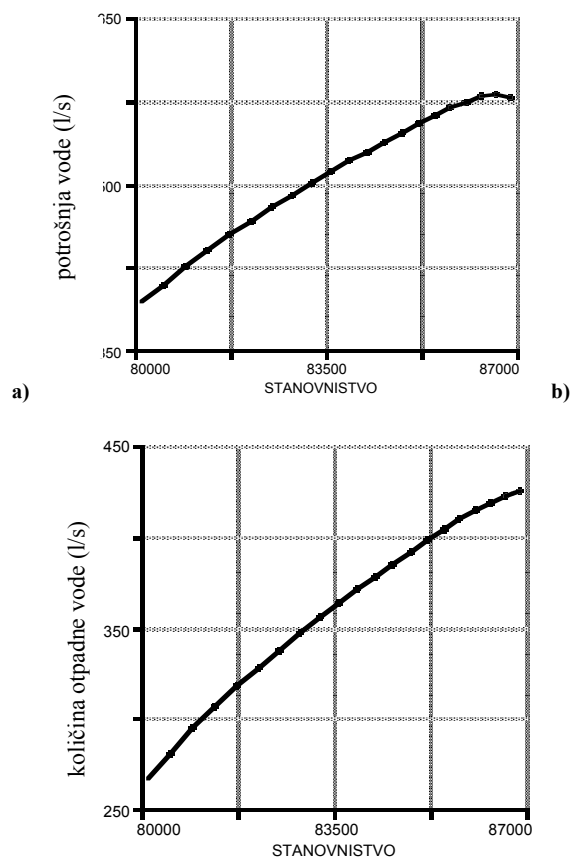
- vremenski interval je 20 godina, a vremenski korak je 1 godina.



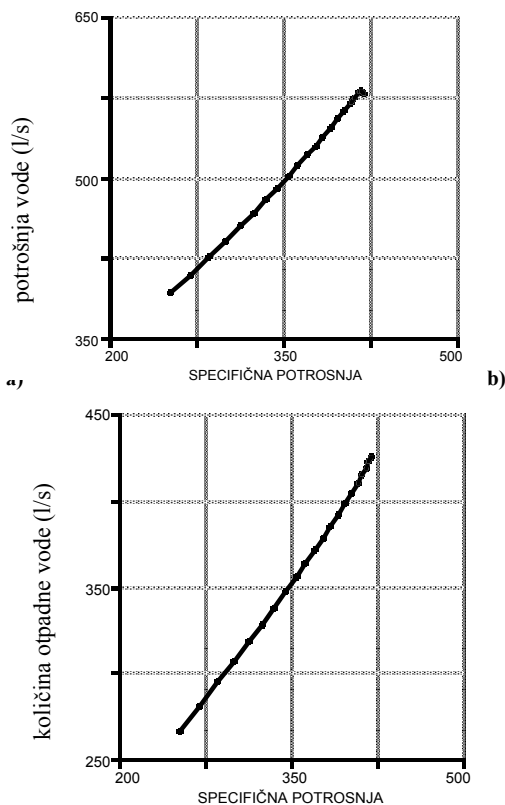
Slika 5. Porast broja stanovnika u planskom razdoblju

#### Primjeri primjene OOM - jednostavnije analize

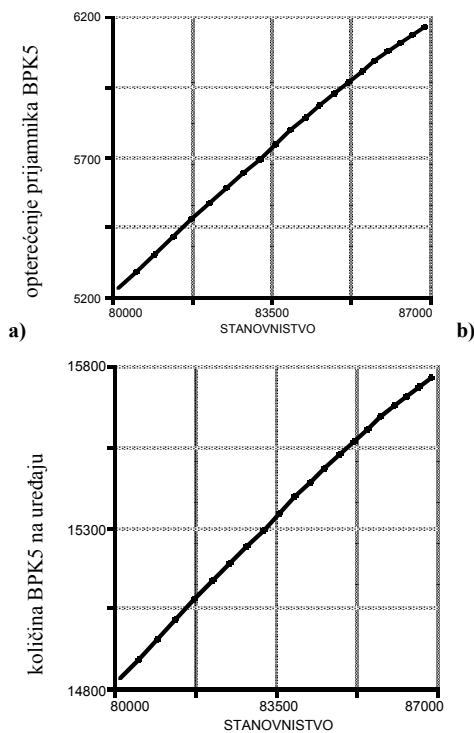
Analize uz primjenu OOM-a mogu biti jednostavnije i složenije. Jednostavnijim analizama pripada analiza potreba za vodom u idućem planskom razdoblju, analiza količina otpadnih voda (slika 6.), procjena utjecaja specifične potrošnje vode na potrebe za vodom i količine otpadnih voda (slika 7.) i slično. Nešto su složenije analize procjene utjecaja sustava na kakvoću vode i količine otpadnih tvari koje dotječu na uređaj za pročišćavanje i u prijamnik (slika 8.).



Slika 6. Utjecaj povećanja stanovništva na: a) potrošnju vode (l/s); b) količinu otpadnih voda (l/s) za plansko razdoblje od 20 god.

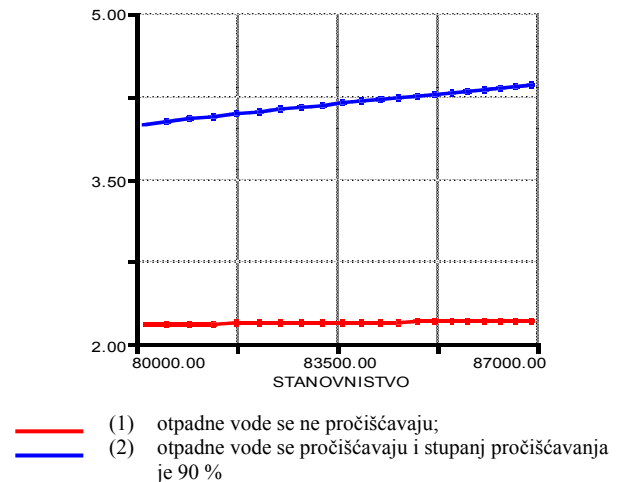


Slika 7. Utjecaj specifične potrošnje u planskom razdoblju (20 godina) na: a) potrošnju vode (l/s); b) količinu otpadnih voda (l/s)



Slika 8. Utjecaj stanovništva na: a) količinu BPK5 u otpadnoj vodi na uređaju (kg/dan) i b) opterećenje prijemnika BPK5 (kg/dan), slučaj bez pročišćavanja otpadnih voda

Model omogućava direktnu analizu utjecaja stanovništva na koncentraciju BPK<sub>5</sub> prijemnika (mg/l). Na slici 9. prikazana su dva slučaja: (i) otpadna se voda ne pročišćava i (ii) otpadna voda se pročišćava sa stupnjem pročišćavanja od 90%, (koef. miješanja otpadne vode u prijemniku je  $Y = 0,6$ ).

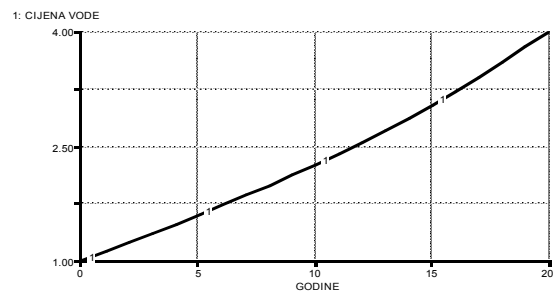


Slika 9. Grafikoni utjecaja porasta stanovništva na koncentraciju BPK<sub>5</sub> u prijemniku za slučaj nepročišćavanja (1) i pročišćavanja (2) otpadnih voda

Jednostavna i zorna grafička prezentacija rezultata i trendova promjene stanja u sustavu bitno pomaže boljem razumijevanju problema i donošenju održivih odluka. Naime, banka podataka i informacija znatno se povećava, što omogućava cjelovitije spoznavanje problema.

### Složenije analize primjenom OOM-a

Analize utjecaja ekonomskih i finansijskih čimbenika na stanje i ponašanje sustava pripada složenijim analizama. Ove su analize vrlo važne jer se njima dobije cjelovitija slika odnosa korisnik-upravljač. U radu ćemo prikazati nekoliko primjera mogućih analiza. Strukturu ekonomskoga sustava čine sljedeće komponente: cijena vode (slika 10.), naplata vode, općinski prihod, općinski prihod po glavi stanovnika, troškovi rada i održavanja sustava, opći standard stanovništva, itd.



Slika 10. Prognoza rasta cijene vode za planirano vremensko razdoblje, KM/m<sup>3</sup>

Osnovna pokretačka jedinica ekonomskoga sustava jest *cijena vode*. Stvaranje normalnih tržišnih i ekonomskih odnosa u urbanome vodnom sustavu iziskuje formiranje određene cijene vode, u koju ulaze i drugi troškovi sustava (kanalizacija, uređaj za pročišćavanje, razne takse za vodoprivredu itd.). Promjenom cijene vode stvaraju se nove okolnosti i što se tiče stvaranja organizacijske i institucionalno ustrojene upravljačke jedinice i u procesima potražnje, tj. potrošnje vode. Povećanjem cijene vode do određene granice (koja ovisi o nizu socijalnih i društvenih okolnosti), stvara se dovoljan i potreban uvjet za održivi razvoj urbanoga vodnog sustava. Interesantne informacije za donosioce odluka vezane uz promjenu cijene vode jesu:

- smanjivanje gubitaka u vodovodnoj mreži
- smanjivanje specifične potrošnje vode, odnosno ukupnog vodozahvata vode
- povećanje općinskog prihoda (ako je općina vlasnik)
- ukupna količina otpadnih voda
- opterećenje BPK<sub>5</sub> otpadnih voda
- koncentracija BPK<sub>5</sub> otpadnih voda; itd.

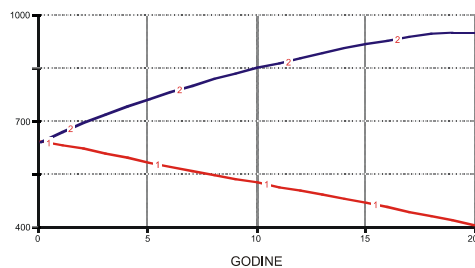
Osnovne su pretpostavke koje ugrađene u model:

- više novca, bolje održavanje i pogon sustava i s tim u svezi manji gubici vode i istjecanje otpadnih voda;
- više novca, veća priključenost stanovništva na vodoopskrbni i kanalizacijski sustav
- veća cijena, veća štednja i smanjenje specifične potrošnje vode.

Relacije koje opisuju ove međuovisnosti određene su na temelju iskustva i literaturnih podataka. U svakom konkretnom slučaju potrebno je provesti istraživanja i odrediti funkcijske veze između ovih čimbenika.

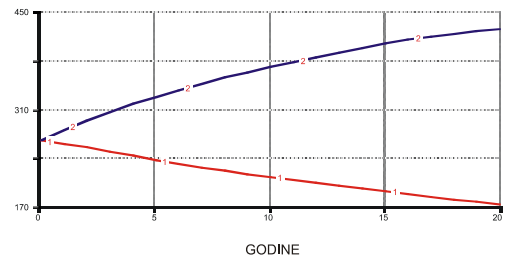
Sve se ove informacije mogu dobiti modelom. Primjer utjecaja promjene cijene vode na ukupnu potrošnju vode prikazan je na slici 11. Uočljiva je razlika u ukupnoj potrošnji vode, odnosno utjecaj ekonomskog čimbenika "cijene vode" kao glavnoga ekonomskog parametra. Ekonomski su čimbenici utjecali na smanjivanje:

- specifične potrošnje vode i
- gubitaka u vodovodnoj mreži.



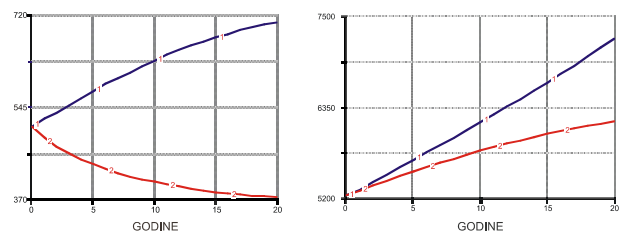
Slika 11. Prikaz potrošnje vode (l/s) u naselju: 1. rast cijene od 1 – 4 KM/m<sup>3</sup>; 2. cijena vode nepromijenjena, 1 KM/m<sup>3</sup>

Na osnovi samo tog parametra (cijena vode), može se provesti detaljna analiza za određivanje cjelokupnoga platnog sustava gdje bi se odredila najpovoljnija cijena vode za takav sustav, odnosno odredili bi se rentabilnost, ekonomičnost, produktivnost itd. Slične bi se analize mogle provesti i za neke druge parametre te vidjeti njegova osjetljivost i utjecaj na cjelokupni sustav (slika 12.).



Slika 12. Količine otpadnih voda u planskom razdoblju (l/s): 1. rast cijene od 1 – 4 KM/m<sup>3</sup>, 2. cijena vode nepromijenjena, 1 KM/m<sup>3</sup>

Vrlo je zanimljiva analiza utjecaja ekonomskih čimbenika na količine i jakost otpadne vode koja dolazi na uređaj i prijamnik, odnosno na uvjete ispuštanja otpadnih voda (slika 13.).

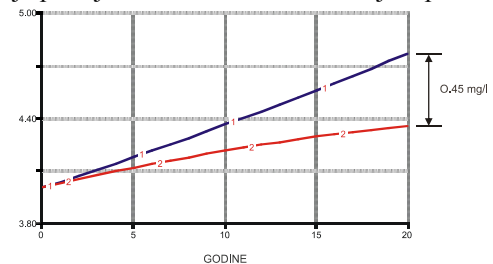


a) Koncentracija BPK5 u na otpadnoj vodi uređaju

b) Količina BPK5

Slika 13. Koncentracije (mg/l) i količina BPK<sub>5</sub> (kg/dan) u otpadnoj vodi koja dolaze na uređaj za pročišćavanje: (1) rast cijene vode; (2) cijena nepromijenjena

Sada se može, u kontekstu prethodne analize, vidjeti utjecaj ekonomskih čimbenika, odnosno "cijene vode" na opterećenje i koncentraciju BPK<sub>5</sub> prijamnika (slika 14.). Početno stanje koncentracija BPK<sub>5</sub> prijamnika za oba modela jest 4,0 mg/l, dok je na kraju planskoga razdoblja veći rast koncentracije BPK<sub>5</sub> prijamnika - prvi slučaj (4,8 mg/l), nego za drugi slučaj (4,35 mg/l) kao rezultat utjecaja promjene količine i koncentracije otpadne vode.



Slika 14. Prikaz promjene koncentracije BPK<sub>5</sub> (mg/l) prijamnika uz stupanj pročišćavanja od nula posto i Y = 0,6 za slučajeve: (1) porast cijene; (2) cijena nepromijenjena



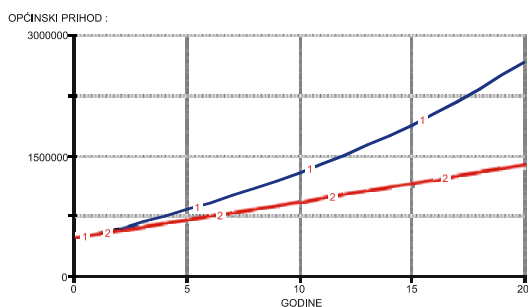
Modelom je moguće simulirati i promjene općinskog prihoda od naplate usluga (slika 15.). Prihod raste u oba slučaja, a razlika na kraju planskoga razdoblja je  $1,3 \times 10^6$  konvertibilnih maraka na mjesec; što je također znatno povećanje općinskog proračuna. Ovim se stvaraju povoljniji uvjeti i veća mogućnost sanacije urbane infrastrukture (vodovod i kanalizacija) te izgradnja nove infrastrukture.

Ovime nisu iscrpljene sve moguće analize koje se primenom opisanog modela mogu provesti. Svaki problem ima svoje ciljeve i time potrebu za različitim analizama. Ovdje su izneseni primjeri samo nekih mogućih analiza koje zorno pokazuju korisnost i jednostavnost modela. Normalno, rezultati su dobri koliko su dobri ulazni podaci.

## 6 Zaključak

Na osnovi provedene analize utjecaja pojedinih komponenata na sam sustav i okolinu može se doći do sljedećih konstatacija:

- Stvaranje prihoda od naplate vodnih usluga, uz određivanja cijene vode kao i njezino povećanje do kraja planiranoga razdoblja, što pak dovodi do povećanja općinskog prihoda, s jedne strane, te smanjenja potrošnje vode, s druge strane, jedino je moguć i održiv način spoznavanja uporabe vode (slika 15.).



Slika 15. Prikaz povećanja općinskog prihoda (KM/mj) od naplate vodnih usluga za dva slučaja: (1) – cijena vode raste od  $1,0 \text{ KM/m}^3$  do  $4,0 \text{ KM/m}^3$  (model MU-UVS); (2) – cijena vode je konstantna i iznosi  $1,0 \text{ KM/m}^3$  za cijelo planirano razdoblje

## LITERATURA

- [1] Aughton, G.; Hunter, C.: *Sustainable Cities, Regional Policy and Development Series 7*, Jessica Kingsley, London (1994).
- [2] Costanza, R.; Duplisea, D.; Kautsky, U.: *Ecological Modelling on modelling ecological and economic systems with STELLA*, Ecological Modelling 110 (1998) 1–4
- [3] Costanza, R.; Voinov, A.: *Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part III EDITORIAL*, Ecological Modelling, Volume 143, Issues 1-2, 15 October 2001, Pages 1-7
- [4] Dyson, B.; Chang, N.-B.: *Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modelling*, Waste Management 25 (2005) 669–679
- [5] Elshorbagy, A.; Ormsbee, L.: *Object-oriented modelling approach to surface water quality management*, Environmental Modelling & Software - (2005) in press
- [6] Forrester, J. W.: *Urban Dynamics*, 1971, Massachusetts Institute of Technology Cambridge

- Uvođenjem ekonomske kategorije u model upravljanja urbanim vodnim sustavom nastaju sasvim drugi odnosi i unutar sustava i u gospodarskim odnosima odnosno u društvu u cjelini.
- Općinski prihod (ili prihod tvrtke koja upravlja urbanim vodnim sustavom) znatno se povećava, omogućuje poduzimanje brojnih aktivnosti i radnja vezanih za organizaciju i funkcioniranje, te poduzimanje mjera za sanaciju postojeće infrastrukture i mjera za izgradnju i proširenje nove vodovodne i kanalizacijske mreže.
- Sve promjene veličina pojedinih parametara unutar sustava bile su posljedica rasta "cijene vode" te je ona glavni upravljački element za održivosti sustava.

Moguće su dakako i druge brojne analize kojima se uvelike poboljšava informiranost donositelja odluke i upravljača, čime se pouzdanost u upravljanju znatno poboljšava. Objektno orijentirani model dinamičan je i fleksibilan i vrlo se jednostavno može prilagoditi stanju sustava, s cijelim skupom međusobno povezanih i ovisnih parametara i elemenata. Stoga se može zaključiti da primjena objektno orijentiranoga modeliranja za upravljanje urbanim vodnim sustavom ima sljedeće prednosti:

- jednostavni pristup pri izradi cjelovitoga i sveobuhvatnoga (integralnog) modela upravljanja
- brže i jednostavnije formiranje novih alternativa
- laku i jednostavnu transformaciju sustava i prilagodbu drugim uvjetima i stanjima sustava
- mogućnost planiranja i prognoze stanja vodnoga sustava za određeno međuvrijeme.

Na temelju navedenog može se zaključiti da je objektno orijentirano modeliranje pogodan, prihvatljiv i poželjan alat (tehnika) za upravljanje i planiranje rada urbanim vodnim sustavom te bi se stoga njime trebalo više koristiti. To posebno vrijedi u slučajevima kada se lokalni vlasnik zadužuje i kada je potrebno cjelovitije analizirati utjecaj zaduženja i investicije na održivost komunalnog sustava.

- [7] Forrester, J. W.: *Industrial Dynamics*, 1961, Massachusetts Institute of Technology Cambridge
- [8] Grigg, S.: *Systemic Analysis of Urban Water Supply and Growth Management*, ASCE, 1997;
- [9] Jun–ying, C., Ji–ning, C.; Ji, Z.: *Perspectives on Urban Water Infrastructures For China in The 21<sup>st</sup> Century* : Sdm – Uweiiic Model, 2002.
- [10] Margeta, J.: *Osnove gospodarenja vodama*, Split, 1992.
- [11] Mayo, A.,W.; Bigambo, T.: *Nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands I: Model development*, Physics and Chemistry of the Earth 30 (2005) 658–667
- [12] Odanaka, T.: *Environment system and dynamic management decision*, Applied Mathematics and Computation, 120 (2001), 255-263
- [13] Simonović, S. P.: *The Use of Object – Oriented Programming for Water Resources Planning in Egipt*, 1997., Kluwer;
- [14] Simonović, S. P.: *Tools for Water Management One View of the Future*, Water International, Volume 25, Number 1, Pages 76.88, March 2000, 76
- [15] Stave, K. A.: *A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada*, Journal of Environmental Management 67 (2003) 303–313
- [16] Zhang, L. ; Mitsch W. J.; *Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach*, Environmental Modelling & Software Volume 20, Issue 7 , July 2005, Pages 935-946