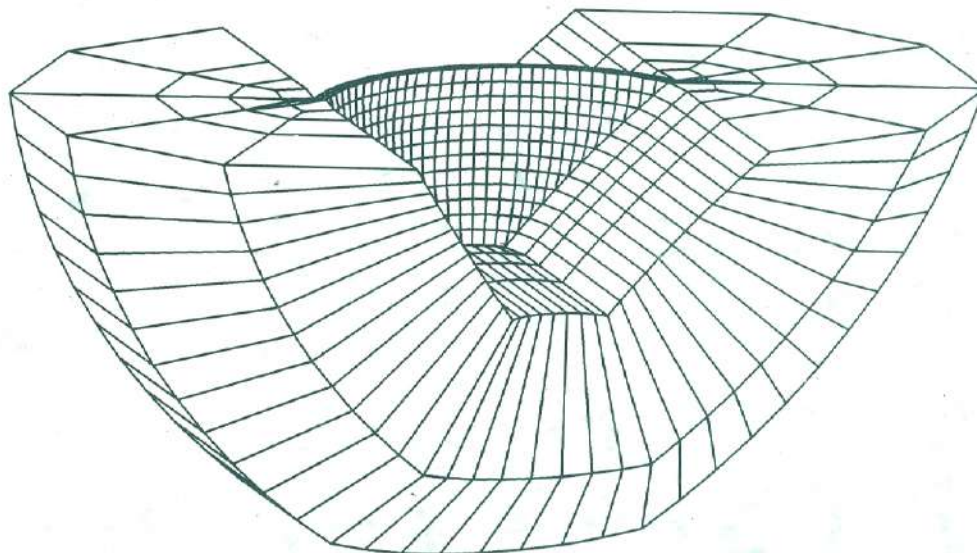
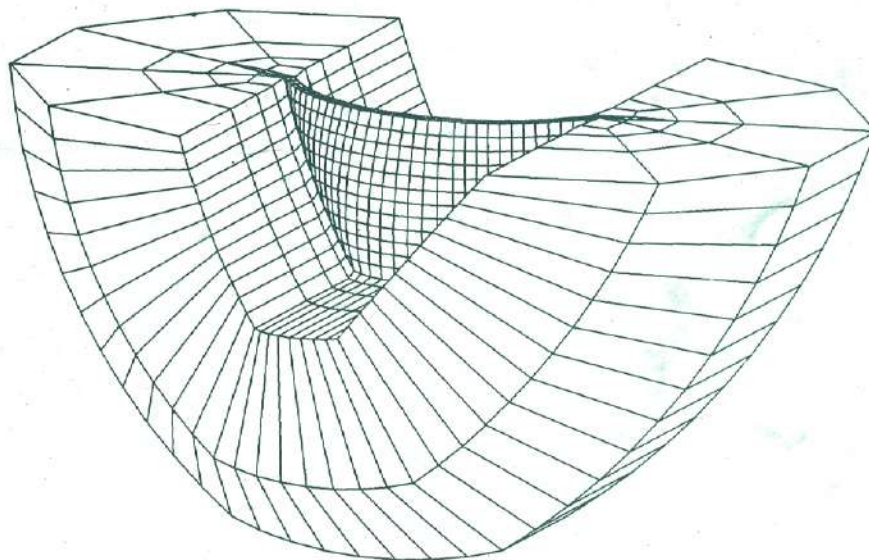


YU ISSN 0350-0519

UDK 626

BROJ 150 - 152
GODINA 26
JULI - DECEMBAR
1994 / 4 - 6

vodoprivreda



SADRŽAJ

RAD UVODNOG KARAKTERA	
Prof. dr Milan STOJŠIĆ: Navodnjavanje i odvodnjavanje u Srbiji	91
NAUČNI PREGLEDNI RAD	
Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ: Primena teorije rasplinutih skupova za rešavanje zadataka upravljanja i odlučivanja u vodoprivredi	95
ORIGINALNI NAUČNI RADOVI	
Prof. dr Miodrag JOVANOVIĆ: O dinamičkoj ravnoteži rečnog korita formiranog u šljunkovitom materijalu	107
Dr Mičo ŠKORIĆ i Mr. Milica BERIĆ: Kvalitet voda prve izdani u Vojvodini	113
Mr Dejan KOMATINA: Hidraulički otpori u brdskim vodotocima	119
Mr. Dušan RADOJEVIĆ: Numeričko rešenje problema ravnog stanja deformacija Hajdinovom metodom integralnih jednačina sa primenom na proračun gravitacionih betonskih brana	127
Prof. dr Svetlana POTKONJAK: Uticaj strukture proizvodnje i veličine sistema na ekonomske efekte ulaganja u sredstva za navodnjavanje	137
Prof. Dr. Živko ŠKOKLEVSKI i Slavčo VELIČKOV: Proces transportovanja lebećeg nanosa i njegova veza sa procesima padavina i oticaja	143
PREGLEDNI RADOVI	
Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ i drugi: Modeliranje kvaliteta vode u jezerima i akumulacijama	149
Dr. Dejan LJUBISAVLJEVIĆ i Aleksandar ĐUKIĆ: Hidraulički aspekti postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda	157
Mr. Atila SALVAI: Savremeni pristup problematici naturalnog uređenja industrijskih područja vodotoka	165
STRUČNI RAD	
Radivoje JONIĆ i Vladan JANIĆJEVIĆ: Uređenje Save za plovidbu na sektoru „Kamičak“ (km 80-86)	173
PRIKAZ SOFIVERA	
Mr Bogdan ORLIĆ: Mogućnosti korišćenja geografskih informacionih sistema u matematičkom modeliranju tečenja podzemnih voda	179
IN MEMORIAM	185

CONTENTS

INTRODUCTORY PAPER	
Prof. Milan STOJŠIĆ, Ph. D.: IRRIGATION AND DRAINAGE IN SERBIA	94
SCIENTIFIC TEMATIC PAPER	
Prof. Branislav ĐORĐEVIĆ, Ph.D.: APPLICATION OF FUZZY SET THEORY FOR SOLVING GOVERNING AND DECISION MAKING'S ASSIGNMENTS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT	105
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPERS	
Prof. Miodrag JOVANOVIĆ, Ph.D.: ON DYNAMIC EQUILIBRIUM OF GRAVEL BED RIVERS	111
Mičo ŠKORIĆ, Ph.D., Milica BERIĆ M.Sc.: QUALITY OF PHREATIC WATER IN VOJVODINA	118
Dejan KOMATINA, M.Sc.: HYDRAULIC RESISTANCE LAWS IN MOUNTAIN RIVERS	126
Dušan RADOJEVIĆ, M.Sc.: NUMERICAL SOLUTION OF PLANE STRAIN PROBLEMS BY THE HAJDIN'S INTEGRAL EQUATIONS METHOD WITH APPLICATION TO CONCRETE GRAVITY DAMS	136
Svetlana POTKONJAK, D.Sc.: THE INFLUENCE OF PRODUCTION STRUCTURE AND SYSTEMS SIZE ON THE ECONOMIC EFFECTS OF INVESTMENT IN IRRIGATION	141
Živko ŠKOKLEVSKI, Ph.D. and Slavčo VELIČKOV: SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT AND ITS RELATION TO THE RAINFALL-RUNOFF PROCESSES	147
REVIEWS	
Prof. Branislav ĐORĐEVIĆ, Ph.D. et al.: MATHEMATICAL MODELING OF WATER QUALITY IN LAKES AND RESERVOIRES	156
Dejan LJUBISAVLJEVIĆ, Ph.D., Aleksandar ĐUKIĆ: HYDRAULIC ASPECTS OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS	163
Atila SALVAI, M.Sc.: A MODERN APPROACH TO NATURAL RIVER ENGINEERING OF FLOODPLAIN	171
PROFESSIONAL PAPER	
Radivoje JONIĆ and Vladan JANIĆJEVIĆ: TRAINING WATERS OF THE „KAMIČAK“ REACH OF THE SAVA RIVER (km 80-86), UNDERTAKEN TO IMPROVE THE NAVIGATIONAL CONDITIONS	178
APPLICABLE SOFTWARE	
Bogdan ORLIĆ, M.Sc.: THE APPLICATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN GROUNDWATER FLOW MODELLING	184
IN MEMORIAM	185

VODOPRIVREDA

GOD. 26

Godina 1994.

BR. 150 -152

(1994/4 - 6)

UDK 626

YU ISSN 0350 - 0519

IZDAVAČ:

JUGOSLOVENSKO DRUŠTVO ZA
ODVODNJAVANJE I NAVODNJAVANJE
Beograd, Kneza Miloša 9

Ovaj broj je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Srbije

REDAKCIJSKI KOLEGIJUM

(sa oblastima koje se pokrivaju):

Đorđević dr Branislav - Vodoprivredni sistemi i Hidroenergetika; predsednik Redakcionog kolegijuma
Avakumović dr Dimitrije - Hidromelioracioni sistemi
Batinić dr Božidar - Hidraulika
Bogdanović dr Slavko - Vodno pravo
Bruk dr Stevan - Opšta hidrotehnika
Ignjatović dr Lazar - Komunalna hidrotehnika
Jovanović Miodrag - Regulacija reka
Josipović dr Jovan - Hidrogeologija
Likić Budislav - Hidrotehnički objekti
Muškatirović dr Dragutin - Plovidbena infrastruktura
Petrović dr Petar - Brane i građevine
Petković dr Slobodan - Erozija
Piamenac dr Nikola - Odvodnjavanje
Popović dr Mirko - Kvalitet vode
Potkonjak dr Svetlana - Ekonomika vodoprivrede
Radić dr Zoran - Hidrologija
Radinović dr Đura - Meteorologija
Rudić dr Dragan - Održavanje melioracionih sistema
Stojšić dr Milan - Navodnjavanje
Tutundžić dr Vera - Ribarstvo
Živaljević dr Račimir - Hidrometeorološki informacioni sistemi

IZDAVAČKI SAVET

Bajić mr Vladimir
Božinović dr Miodrag
Bošnjak dr Đuro
Varga Arpad
Dragović Dušan
Dutina Nikola
Đukić Milijan
Ilić Živka
Kovačević dr Dejan
Milenković dr Slobodan
Milojević dr Miloje
Pantelić Petar
Stamenković mr Ljubiša

Crteži na naslovnoj strani korica:

Prostorni modeli konačnih elemenata lučne brane, Mr. Dušan Radojević

MODELIRANJE KVALITETA VODE U JEZERIMA I AKUMULACIJAMA

Prof. dr Branislav ĐORĐEVIĆ, dipl.inž.
Aleksandar ĐUKIĆ, dipl.inž.
Tina MILANOVIĆ, dipl.inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Od svih kritičara naših preguća najveći i najnepogrešiviji je – vreme.

(Bjelinski)

SAŽETAK

U radu je obrađena problematika matematičkog modeliranja ekoloških procesa u jezerima i akumulacijama. Prikazani su principi matematičkog modeliranja najbitnijih fizičkih, hemijskih i bioloških procesa koji utiču na kvalitet vode u jezeru. Izvršena je podela modela kvaliteta vode i prikazan je postupak pripreme ulaznih podataka. Programom WASP4 modeliran je kvalitet vode u akumulaciji Vitman. Ispitivani su efekti smanjenja koncentracije zagađenja u reci Mlavi i njenim pritokama na kvalitet vode u akumulaciji.

1. UVOD: RAZVOJ EKOLOGIJE HIDROTEHNIČKIH SISTEMA

Razvoj sve složenijih vodoprivrednih sistema sa akumulacionim basenima raznih stepena regulisanja otvorio je jedan važan istraživački problem – razvoj metoda za predviđanje procesa koji će se odigravati u vodenim ekosistemima tokom vremena. Sastavni deo projekta budućih hidrotehničkih sistema, posebno akumulacija, postao je i ekološki elaborat, od koga se zahteva da sagleda dinamizam promene u vodenim ekosistemima nakon uspostavljanja novih stanja. Cilj tog dela projekta je iznalaženje valjanih rešenja – dispozicionih i upravljačkih – kojima se ekološki procesi u vodoprivrednim sistemima održavaju u nekim željenim stanjima. Time je definitivno odbačen raniji sve opasniji koncept upravljanja 'eksperimentom na realnom sistemu', već se po-

lazi od pozicije da se sva planiranja na vodama, posebno u slučaju značajnih promena vodnih režima, moraju blagovremeno proveriti matematičkom simulacijom. Time je fundirana nova oblast hidrotehnike koja se može definisati kao ekologija hidrotehničkih sistema. To postaje posebna grana **ekološke kibernetike**, koja koristi kibernetičke metode (posebno metode operacionih istraživanja) za matematičku formalizaciju, modeliranje i estimaciju svih bitnih procesa u ekosistemima.

2. MATEMATIČKO MODELIRANJE PROCESA U JEZERIMA

U sistemskoj ekologiji hidrotehnike došlo je do razvoja niza matematičkih modela za analizu procesa u vodenim ekosistemima nakon uspostavljanja novih vodnih režima. Ti matematički modeli (MM) mogu se sistematizovati u tri grupe: (a) **modeli abiotičkih procesa** (oni MM koji obuhvataju samo razvoj abiotičkih procesa u vodenim sistemima); (b) **modeli biotičkih procesa**, koji uz određene pretpostavke razmatraju promene do kojih će u sistemu doći usled homeotipskih i heterotipskih koakcija bioloških vrsta; (c) **spregnuti modeli**, kao skup abiotičkih, biotičkih i vezanih MM kojima se simultano modeliraju svi relevantni dinamički procesi u zatvorenoj petlji: biotop => biocenoza => biotop. Svrha tih MM je da se sagleda dinamizam svih procesa koji su bitni za sagledavanje fenomena sukcesija u vodenim ekosistemima, zaključno sa dostizanjem stanja klimaksa, kao i da se iznađu mere kojima će se sistemi održati na

poželjnim platoima homeostatske ravnoteže i u nekim zahtevanim stanjima ekološke (faunističke i florističke) raznovrsnosti. Iznalaženje mera kojima će se sistem održati u poželjnoj ravnoteži i sa odgovarajućom raznovrsnošću bioloških vrsta postaje osnovni smisao istraživanja u okviru ekologije hidrotehničkih sistema.

Od pomenutih grupa MM brže se razvijala grupa abiotičkih modela. Postoje dva osnovna razloga za to. Prvi leži u vrlo pragmatičnom cilju koji se postavlja toj grupi modela: traži se prognoza promena kvaliteta vode u jezeru, zavisno od kvaliteta vode na ulazima, kako bi se na osnovu sagledavanja tih procesa mogla da odabere najpogodnija tehnološka linija prečišćavanja voda, ukoliko se akumulacija koristi za snabdevanje vodom stanovništva. Drugi razlog je povezan sa složenošću istraživanja: abiotički modeli su analitički znatno određeniji (spadaju u grupu **dobro struktuiranih zadataka**), jer se zasnivaju na analizi transportnih procesa, dok se biotički modeli svrstavaju u klasu **teško struktuiranih problema** (videti rad prvog autora u ovom broju o rasplnutim skupovima), za koji su neophodna veoma podrobna istraživanja 'in situ' uticaja kooperacionih i kompeticionih odnosa pojedinih komponenti biocenoza unutar biotopa određenih karakteristika.

Na najvišem nivou opštosti abiotički pokazatelji kvaliteta mogu se definisati zakonom održanja kvaliteta, koji sveden na jedinicu zapremine fluida ima sledeći oblik (Đorđević, 1990):

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial(K u_j)}{\partial x_j} = R \quad (1)$$

Prvi član označava lokalnu vremensku, a drugi konvekcijsku promenu nekog kvalitativnog pokazatelja K , dok je R uzročnik tih promena, u koji su uključeni svi izvori i ponori tog elementa kvaliteta usled procesa transformacije; x_j – prostorna koordinata ($j = 1, 2, 3$); u_j – komponente brzine u tački.

U radu će se razmatrati jedan model (**WASP4**) koji je pogodan za modeliranje kvaliteta vode u akumulacijama koje služe za snabdevanje vodom naselja. Model je pretežno abiotički, jer modelira ključne abiotičke procese u jezeru (najvažniji nutrijenti, kiseonik), ali obuhvata i alge, kao početnu kariku biocenoznog lanca.

2.1. Hidraulički transport komponenti kvaliteta

Iz jednačine (1), koja ima karakter osnovne dinamičke jednačine promene stanja u sistemu, izvodi se jednačina hidrauličkog transporta koja u trodimenzionalnom obliku glasi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_L + S_B + S_K \end{aligned} \quad (2)$$

- C – koncentracija komponente kvaliteta vode (masa/dužina³)
- U_x, U_y, U_z – podužna, poprečna i vertikalna advektivna brzina, respektivno (dužina/vreme)
- E_x, E_y, E_z – podužni, poprečni i vertikalni difuzioni koeficijenti, respektivno (dužina²/vreme)
- S_L – tačkasti i rasuti izvori (masa/dužina³ vreme)
- S_B – granična opterećenja: na uzvodnoj, nizvodnoj, bentoskoj i granici sa atmosferom (masa/dužina³ vreme)
- S_K – ukupna kinetička transformacija (masa/dužina³ vreme)

Integracijom jednačine (2) po koordinatnim osama dobijaju se dvodimenzionalni ili jednodimenzionalni oblik jednačine transporta. Advektivne brzine se zadaju na osnovu merenja, ili, što je češći slučaj, numeričkim rešavanjem dinamičke jednačine.

2.2. Bilans rastvorenog kiseonika

Sadržaj rastvorenog kiseonika je jedan od najbitnijih pokazatelja kvaliteta vode. Rastvoreni kiseonik učestvuje u različitim hemijskim i biohemijskim reakcijama oksidacije organskih i neorganskih materija, dok ga živi svet uzima iz vode u procesu respiracije. Osnovni izvori rastvorenog kiseonika u jezerskoj vodi su gasoviti kiseonik iz atmosfere koji se rastvara u vodi procesom aeracije i fotosinteza koju obavljaju alge. Rastvoreni kiseonik se troši u procesima biohemijske razgradnje organske materije i oksidacije azotnih jedinjenja. Koncentracija rastvorenog kiseonika najveća je u površinskim slojevima vode i opada sa dubinom. U određenim slučajevima može se dogoditi da u najdubljim slojevima vode nema rastvorenog kiseonika. Ta voda se nalazi u septičkom stanju i u njoj se odigravaju procesi redukcije i anaerobne razgradnje, čiji produkti (H_2S , rastorni Fe^{++} , Mn^{++}) pogoršavaju kvalitet vode u jezeru. Proces reaeracije i potrošnje rastvorenog kiseonika pri biohemijskoj razgradnji najčešće se modeliraju jednačinom bilansa kiseonika Striter-Felpsa (Stretter – Phelps) (Milojević, 1990):

$$D_t = \frac{k_1 L_0}{k_r - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_r t}) + D_0 e^{-k_r t} \quad (3)$$

gde je k_r koeficijent reaeracije, L_0 predstavlja ugljenični BPK na početku procesa, k_1 je konstanta brzine reakcije, D_t deficit rastvorenog kiseonika (razlika između trenutne koncentracije i koncentracije saturacije) u vremenu t , a D_0 deficit rastvorenog kiseonika u početnom trenutku. Jednačina se može proširiti potrebom za kiseonikom u sedimentu i azotnom komponentnom potrošnje kiseonika.

Produkcija kiseonika fotosintezom i njegova potrošnja respiracijom ima velikog uticaja na koncentraciju rastvorenog kiseonika u mezo i eutrofnim jezerima. Promena koncentracije rastvorenog kiseonika usled fotosinteze i respiracije se može izraziti:

$$\frac{\partial Co}{\partial t} = (a_1 m_a - a_2 r) A \quad (4)$$

gde su m_a brzina rasta algi (1/vreme), r specifična respiracija algi i zooplanktona (1/vreme), A koncentracija algi (masa/dužina³), i a_1, a_2 su empirijski koeficijenti (mg O₂/mg suve materije algi) koji zavise od vrste algi i karakteristika biohemijskih procesa u njima.

2.3. Nutrijenti

Hemijski elementi koji su od posebne važnosti za postojanje i razvoj živog sveta u vodi nazivaju se nutrijenti. Najvažniji nutrijenti su ugljenik, azot, fosfor i kalijum. Silicijum je važan samo za vrstu algi dijatome. Pri modeliranju trofičkih procesa u jezeru mora se razmatrati i dinamika nutrijenata, jer prirast algi direktno zavisi od količine raspoloživih nutrijenata u vodi. Kako alge predstavljaju početnu kariku u lancu ishrane, samim tim od količine raspoloživih nutrijenata zavisi i dinamika čitavog živog sveta u jezeru.

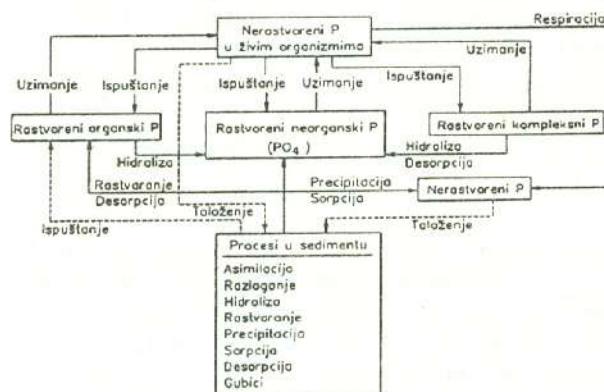
U površinskim vodama ugljenika ima u dovoljnim količinama, tako da on vrlo retko predstavlja ograničavajući faktor rasta algi. Isto važi i za takozvane mikronutrijente, kao što su gvožđe, mangan, bakar, molibden, cink, ... koji su potrebni živom svetu u izuzetno malim koncentracijama. Zbog toga dinamika ugljenika i mikronutrijenta se obično ne razmatra u modelima kvaliteta vode. Uobičajena je situacija da je rast algi u jezeru limitiran količinom raspoloživih neorganskih azotnih ili fosfornih jedinjenja, pa se u modelima kvaliteta obično razmatra dinamika samo ova dva nutrijenta. Prilikom rasta alge koriste rastvorene neorganske nutrijente iz vode. To su ugljendioksid, amonijak, nitrati, molekularni azot, ortofosfati i rastvoreni silicijum (samo dijatome). Modeliranje dinamike azota i azotnih jedinjenja u vodi je bitno kako za trofičke procese u jezeru, tako i za količinu rastvorenog kiseonika.

Nutrijenti u vodi se javljaju u nekoliko različitih formi: rastvoreni neorganski nutrijenti, nerastvoreni organski nutrijenti, nerastvoreni organski nutrijenti, nutrijenti u sedimentu i biotički nutrijenti (vezani u živim organizmima). Svači nutrijent tokom vremena prelazi iz jedne forme u drugu. Kruženje nutrijenata je izuzetno složen proces koji zavisi od fizičkih, hemijskih i biotičkih faktora. U nastavku se daje šematski prikaz kruženja fosfora (slika 1) i azota (slika 2) u površinskim vodama prema Baca i Arnett-u (Bowie G.L. et al. 1985).

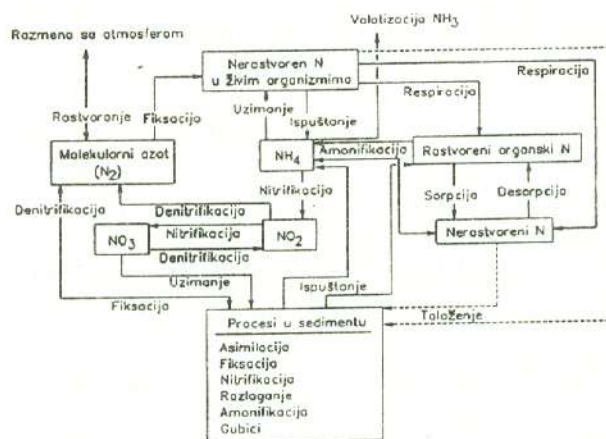
2.4. Alge

Prilikom modeliranja kvaliteta vode u jezerima razmatranje dinamike procesa u kojima učestvuju alge je veoma bitno iz više razloga:

- Brojnost algi pokazuje sezonske varijacije, pri čemu maksimalan broj alge dostižu u toku leta. One mogu biti uzrok saturacije (ili čak supersaturacije) rastvorenim kiseonikom u površinskim slojevima vode, dok taloženje uginulih algi je glavni uzrok



SI. 1 – Kruženje fosfora u jezeru prema Baca i Arnett-u
Phosphorus cycle in surface water after Baca and Arnett



SI. 2 – Kruženje azota u jezeru prema Baca i Arnett-u
Nitrogen cycle in surface water after Baca and Arnett

povećanja BPK i smanjenja koncentracije rastvorenog kiseonika u hipolimnionu.

- U procesu rasta alge uklanjaju rastvorene neorganske nutrijente iz vode, a respiracija, ekskrecija i raspadanje uginulih algi su glavne komponente u kruženju nutrijenata.
- Primarna produkcija algi predstavlja najveću komponentu ukupne primarne produkcije u jezeru, i one su početna karika u lancu ishrane.
- Alge doprinose povećanju mutnoće površinskih slojeva vode.
- Velika koncentracija algi može ugroziti ostali živi svet u jezeru.
- Alge pogoršavaju ukus i miris vode, i povećanjem njihove brojnosti poskupljuje se proces prečišćavanja takve vode do kvaliteta vode za piće. Takođe, mogu da utiču na izbor tehnologije prečišćavanja.
- Velika brojnost algi ugrožava mogućnost korišćenja jezera u svrhe rekreacije.

Prilikom matematičkog modeliranja alge se izražavaju ili preko ukupne biomase, ili, što je češći slučaj, preko koncentracije suve biomase ili jednog od konstituenata žive ćelije kao što su: hlorofil a, ugljenik, azot ili fosfor. Prirast algi opisuje se jednačinom:

$$\frac{dA}{dt} = (m_a - r - e_x - s - m) A - G \quad (5)$$

gde su A – ukupna biomasa algi ili koncentracija (suve biomase, hlorofila a, ugljenika ...), m_a – brzina rasta algi, r – koeficijent respiracije, e_x – koeficijent ekskrecije, s – brzina taloženja, m – nepredatorska smrtnost, i G – gubici u biomasi ili koncentraciji usled predatorske smrtnosti. Jednačina (5) se primenjuje za fitoplankton. Za alge pričvršćene za dno (bentos) u jednačini (5) član 's' predstavlja smrtnost usled spiranja sa dna. Brzina rasta algi je funkcija temperature, intenziteta svetlosti i koncentracije raspoloživih nutrijenata. Brzina rasta predstavlja se kao proizvod (Bowie, G.L. et al. 1985):

$$m_a = m_{a(\max)(T_{ref})} f(T) f(I) \min(f(C), f(N), f(P), f(Si)) \quad (6)$$

gde je $m_{a(\max)(T_{ref})}$ maksimalna brzina rasta pri nekoj referentnoj temperaturi, $f(T)$ limitirajući faktor brzine rasta usled temperature ($0 < f(T) < 1$); $f(I)$ limitirajući faktor brzine rasta usled intenziteta svetlosti ($0 < f(I) < 1$); $f(C)$, $f(N)$, $f(P)$, $f(Si)$ limitirajući faktor usled koncentracije raspoloživih nutrijenata. Faktori $f(T)$ i $f(I)$ opisuju se eksponencijalnim funkcijama ili krivama optimuma (lit. 1, 2, 7). Faktori $f(C)$, $f(N)$, $f(P)$, $f(Si)$ opisuju se Monodovim jednačinama gde C_{NUT} predstavlja koncentraciju nutrijenta NUT, i to one njegove forme koje koriste alge pri rastu, a K_s je polusaturaciona konstanta:

$$f(NUT) = \frac{C_{NUT}}{K_s + C_{NUT}} \quad (7)$$

Iz strukture izraza (6) vidi se da uvek jedan nutrijent predstavlja ograničavajući faktor rasta algi, i to onaj sa

najnižom vrednošću limitirajućeg faktora (zakon minimuma, detaljnije Đorđević, 1990).

3. IZBOR MODELA KVALITETA VODE U JEZERU I PRIPREMA ULAZNIH PODATAKA

Modeli kvaliteta vode u jezerima predstavljaju matematičke modele koji simuliraju hidrodinamičke, fizičko-hemijske, hemijske, biološke i druge procese u jezeru koji imaju uticaja na kvalitet vode u njemu. Svaki model kvaliteta se bazira na usvojenom modelu strujanja i transporta koji može biti prostorni, ravanski i linijski. Na osnovu usvojenog modela transporta modeli kvaliteta mogu se podeliti na nultodimenzionalne, jednodimenzionalne, pseudodvodimenzionalne, dvodimenzionalne (osrednjene u vertikalnom pravcu), dvodimenzionalne (osrednjene u bočnom pravcu) i trodimenzionalne.

Nultodimenzionalni modeli predstavljaju jezero kao jedan rezervoar sa uniformnim karakteristikama vode u njemu. U modelu ne postoji transportna jednačina (2) i podrazumeva se potpuno mešanje vode u jezeru i osrednjavanje po čitavoj zapremini pokazatelja kvaliteta vode u svakom vremenskom trenutku. Ovi modeli se obično koriste za preliminarne proračune kvaliteta ili kod vrlo malih i plitkih jezera.

Jezeru sa velikim vremenom zadržavanja vode i pojavom termičke stratifikacije uspešno se modeliraju **jednodimenzionalnim modelom** u vertikalnom pravcu. Za određivanje mogućnosti pojave termičke stratifikacije u konkretnom jezeru treba ispitati veličinu parametra PS (Đorđević, 1990):

$$PS = 320 \frac{QL}{VH} \quad (8)$$

gde su Q , L , V , H , srednji protok kroz jezero, dužina, zapremina i srednja dubina jezera. Ako je $PS < 0.1$ u jezeru dolazi do stratifikacije u toplom periodu, ako je $0.1 < PS < 1.0$ stratifikacija će biti slabo izražena. Ako je $PS > 1.0$ u tom jezeru ne dolazi do stratifikacije. Ovoj grupi modela pripada najveći deo komercijalnog softvera iz oblasti kvaliteta vode (programi LAKECO, WQRRS, MS CLEANER, ...)

Pseudodvodimenzionalni modeli šematizuju jezero skupom rezervoara (segmenata) koji su povezani kanalima. U segmentima se podrazumeva da dolazi do potpunog mešanja vode. Advektivni transport između segmenata je određen karakteristikama kanala koji ih povezuju. Disperzivni transport između segmenata se specificira koeficijentim difuzije i veličinom dodirnih površina. Ovi modeli imaju veliku fleksibilnost u zadanju različitih geometrija jezera i graničnih uslova. Ovoj grupi modela pripada model kvaliteta WASP4.

Višedimenzionalni modeli (dvodimenzionalni i trodimenzionalni) ubrzano se razvijaju poslednjih godina. Primenjuju se u detaljnim analizama kvaliteta vode, tamo gde je od značaja detaljna hidrodinamika. Zatevaju veliki broj merenih podataka za kalibraciju.

Pri modeliranju kvaliteta potrebno je dobro poznavanje karakteristika razmatranog problema. Najpopularniji način modeliranja kvaliteta je primena jednodimenzionalnog modela, koji uspešno modelira kvalitet kod stratifikovanih jezera (što je i najčešći slučaj sa akumulacijama kod nas). Ukoliko je vrednost parametra PS bliska ili veća od jedinice, ili ako je potrebno izvršiti detaljnu analizu hidrodinamike i kvaliteta vode, treba koristiti višedimenzionalne modele.

Priprema ulaznih podataka za model kvaliteta zahteva analizu velikog broja podataka koji se mogu grupisati:

- meteorološki podaci (intenzitet sunčeve svetlosti, oblačnost, temperatura vazduha, pravac i brzina vetra, ...),
- hidrološki podaci (veličine doticaja/otocaja u jezero i iz njega, padavine, ...),
- morfološki podaci (oblik jezera, krive površine i zapremine),
- podaci o izvorima i količinama zagađenja,
- hidraulički podaci (koeficijenti difuzije, ...),
- biološki podaci (vrste algi karakteristike biohemijjskih procesa),
- geološki (sastav tla u bokovima i na dnu akumulacije, ...).

Pre upotrebe modela potrebno je izvršiti i njegovu kalibraciju na osnovu izmerenih veličina. Naročitu pažnju treba posvetiti kalibraciji koeficijenta difuzije, jer njihove vrednosti variraju u širokim granicama. Iz navedenog se vidi da upotreba modela kvaliteta vode zahteva prikupljanje velikog broja podataka. Problem postaje još složeniji sa potrebom da se proračuni kvaliteta vode izvrše za neke merodavne uslove u budućnosti. To zahteva da se pri pripremi ulaznih podataka obuhvate i rezultati modela zasipanja akumulacije, prostorni raspored i karakteristike budućih potrošača i zagađivača, i drugo.

4. PRIMER – MODELIRANJE KVALITETA VODE AKUMULACIJE VITMAN

Predmet ispitivanja je akumulacija Vitman koja je predviđena u sastavu budućeg vodoprivrednog sistema Mlava – Gornjak. Osnovne karakteristike akumulacije su: kota normalnog uspora 205.0 nm, kota dna akumulacije na mestu brane 173.5 nm, prosečna dubina akumulacije 10.5 m, zapremina akumulacije $12.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, srednji godišnji protok Mlave $7.474 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kvalitet vode u akumulaciji modeliran je programskim paketom WASP4 koji je razvila Američka agencija za zaštitu čovekove okoline (U.S. EPA). Model pripada grupi pseudodimenzionalnih modela i razvijen je za potrebe modeliranja kvaliteta vode u velikim rekama, estuarijama i jezerima. Model razmatra osam pokazatelja kvaliteta vode: amonijak (NH_4), nitrati (NO_3), ortofosfat (PO_4), ugljenični deo ukupne biohemijjske potrošnje kiseonika (BPK), rastvoreni kiseonik (O_2), ukupni fitoplankton (izražen preko ugljenika), organski

azot (ON) i organski fosfor (OP). Kinetika navedenih osam pokazatelja razmatra se kroz bilansiranje četiri ciklusa: ciklus fitoplanktona, ciklus rastvorenog kiseonika, ciklus azota i ciklus fosfata.

4.1. Priprema ulaznih podataka

Komponente kvaliteta vode: amonijak, nitrati, ortofosfat, BPK_5 i rastvoreni kiseonik merene su na reci Mlavi samo dvanaest puta tokom 1989. godine (u periodu malih i srednjih voda, tj. u periodu spore vodozamene). Za komponente koje nisu merene usvojeni su, prema podacima iz literature, sledeći odnosi:

$$\text{OP} = 2.5 \text{ PO}_4$$

$$\text{ON} = \text{NO}_3/3.5$$

$$\text{BPK} = 0.85 \text{ BPK}_5$$

Modeliranje kvaliteta vode u akumulaciji Vitman sprovedeno je sa hidrološkim i meteorološkim podacima za 1992. godinu. Kako merenja kvaliteta reke Mlave nisu vršena 1992. godine za definisanje koncentracija komponenti kvaliteta u reci Mlavi u toj godini ispitivane su korelacione zavisnosti između protoka i koncentracije komponenti kvaliteta vode na osnovu merenih podataka iz 1989. godine. Amonijak, BPK_5 , i rastvoreni kiseonik se dobro korelišu sa protocima i usvojene korelacione zavisnosti su date u tabeli 1. Za ostale komponente usvojene su prosečne vrednosti, jer se na osnovu postojećih merenja pokazalo da ne zavise od protoka (Tabela 1). Koncentracije komponenti kvaliteta vode u reci Mlavi modelirane su kao granični uslov (koncentracije na uzvodnoj granici).

U akumulaciono jezero se pored Mlave ulivaju još dve reke: Krepoljinska i Krupajska reka. Podaci o protocima i koncentracijama komponenti kvaliteta vode mereni su u istim periodima kada su mereni i na reci Mlavi. Pošto za ove dve reke ne postoje podaci o protocima za 1992. godinu, na osnovu podataka o merenim protocajima 1989. godine uspostavljene su korelacione zavisnosti između protoka na Mlavi i protoka na ovim rekama.

Na ove dve reke merene su, takođe, samo koncentracije NH_3 , NO_3 , PO_4 , BPK_5 i O_2 . Uspostavljene su korelacione zavisnosti između protoka na ovim rekama i koncentracije komponenti kvaliteta vode (tabela 1). Krepoljinska i Krupajska reka su modelirane kao tačkasti izvori navedenih osam komponenti kvaliteta vode.

Vodena masa u akumulacionom jezeru podeljena je na pet segmenata: tri segmenta epilimniona i dva segmenta hipolimniona (slika 1). Disperzivni transport postoji u horizontalnom i vertikalnom pravcu i usvojeno je da je konstantan po vremenu. Koeficijenti difuzije usvojeni su prema podacima iz literature, i za vertikalni pravac iznose $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a za horizontalni pravac između slojeva epilimniona su $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, a između slojeva hipolimniona $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pošto program WASP4 nema mogućnost simulacije određenih parametara: temperature vode, providnosti

T a b . 1. - Ulazni podaci modela kvaliteta - koncentracije komponentni kvaliteta u rekama koje se ulivaju u akumulaciju Vitman

Komponenta kvaliteta	REKA MLAVA ¹⁾	KREPOLJINSKA REKA ²⁾	KRUPAJSKA REKA ³⁾
NH ₄ (mg/l)	0.096 + 0.00138 Q	0.0773 + 0.01477 Q _{K1}	0.0617
NO ₃ (mg/l)	1.574	1.1085 + 1.075 Q _{K1}	1.358 + 0.421 Q _{K2}
PO ₄ (mg/l)	0.0471	0.0185	0.0171 + 0.0021 Q _{K2}
BPK (mg/l)	2.41 + 0.1545 Q	2.4517	1.5483
O ₂ (mg/l)	11.0	9.5167	9.575 + 0.1376 Q _{K2}
ON (mg/l)	0.45	0.3167 + 0.3071 Q _{K1}	0.388 + 0.1203 Q _{K2}
OP (mg/l)	0.11775	0.04625	0.04275 + 0.00525 Q _{K2}

¹⁾ Q - protok reke Mlave

²⁾ Q_{K1} - protok Krepoljinske reke

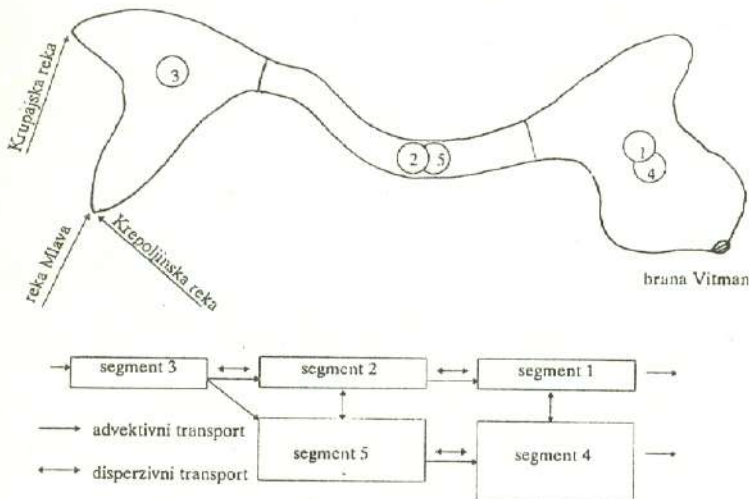
³⁾ Q_{K2} - protok Krupajske reke

vode, solarne radijacije, frakcije dnevne svetlosti, brzine vetra i temperature vazduha, oni se moraju zadati kao vremenske funkcije.

Funkcije temperature vode zadaju se za svaki segment. Na osnovu veličine pokazatelja stratifikacije $PS = 0.18 > 0.1$ zaključuje se da je stratifikacija u ovoj akumulaciji slabo izražena. Sličan pokazatelj stratifikacije ima i akumulacija Čelije, pa su temperaturne funkcije date prema merenjima iz ovoj akumulaciji. Kako je dotok u akumulaciju u toku razmatrane godine uvek veći od potrošnje, to je akumulacija puna tokom celog razmatranog vremenskog perioda.

Solarna radijacija zavisi samo od geografske širine, pa je ona preuzeta iz literature za geografsku širinu 45°. Frakcija dnevne svetlosti, brzine vetra i temperature vazduha uzete su iz hidrološkog godišnjaka za 1992. godinu.

Usvojena je brzina taloženja fitoplanktona od 0.15 m/dan.



S l . 3 - Podela akumulacije Vitman na segmente
Segmentation of Vitman reservoir

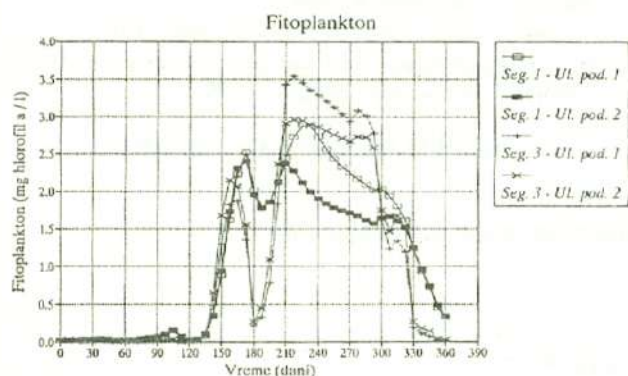
Modeliranje kvaliteta izvršeno je za vremenski period od godinu dana, za hidrološke podatke iz 1992. godine. Izvršeno je modeliranje sa dve grupe ulaznih podataka:

- Ulazni podaci 1: ulazni podaci za koncentracije komponenti kvaliteta u rekama koje se ulivaju u akumulaciju Vitman zadate su iz Tabele 1.
- Ulazni podaci 2: koncentracije amonijaka, nitrata, ortofosfata, BPK, organskog azota i fosfora su smanjene za 30% u odnosu na vrednosti date u Tabeli 1. Procenjeno je da se ovi efekti mogu dobiti sanitacijom uzvodnih naselja i ograničenjem primene veštačkih đubriva. Tačna procena smanjenja koncentracija navedenih materija u Mlavi i pritokama može se dobiti analizom tačkastih i rasutih izvora zagađenja na slivu.

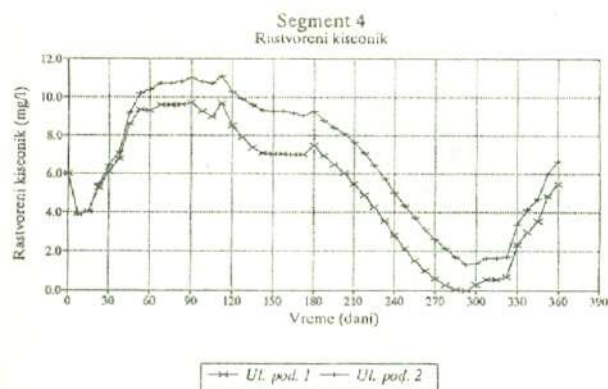
4.2. Rezultati modela kvaliteta vode

U nastavku je dat grafički prikaz nekih rezultata modeliranja kvaliteta vode za ulazne podatke 1 i ulazne podatke 2. Rezultati su prikazani u obliku dijagrama promene koncentracija tokom vremenskog perioda proračuna (godinu dana) i to: koncentracija fitoplanktona (izraženog preko hlorofila a) u segmentima 3 i 1 (slika 4), koncentracija rastvorenog kiseonika u segmentu 4 (slika 5), i koncentracije amonijaka u segmentu 4 (slika 6). Treba naglasiti da se pri modeliranju kvaliteta u akumulaciji Vitman nije uzimao u proračun uticaj dna (sedimenta), tako da rezultate modela treba smatrati nešto povoljnijom prognozom budućeg kvaliteta vode u njemu. Za detaljnije analize kvaliteta vode potrebno je raspolagati većim fondom rezultata merenja.

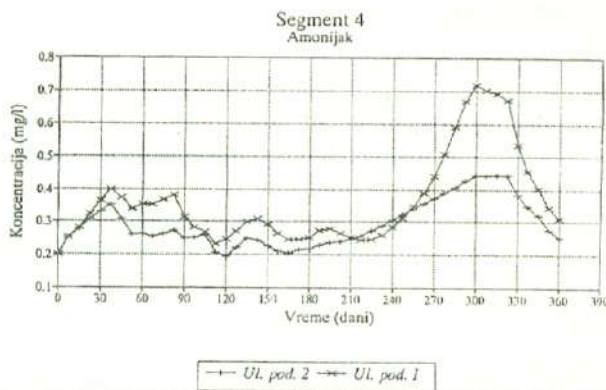
Rezultati modela sa ulaznim podacima 1. Rezultati pokazuju da se akumulaciono jezero, tokom ispitivane godine, nalazi u eutrofnom statusu. Fitoplankton dostiže maksimalnu koncentraciju početkom avgusta (slika 4). Naročito nepovoljna situacija je u najuzvodnijem segmentu (3) koji je najplići i sa najvećom temperaturom vode, tako da dolazi do izuzetnog porasta količine fitoplanktona, koji se dalje prenosi u nizvodne delove jezera. Limitirajući faktor za rast fitoplanktona je raspoloživi ortofosfat (PO₄). U segmentima epilimniona fitoplankton je uzrok supersaturacije kiseonikom i porastom BPK u toku toplog perioda godine. U segmentima hipolimniona dolazi do pada sadržaja rastvorenog kiseonika u toku leta, što je naročito izraženo u segmentu 4 (hipolimnion u okolini brane), gde krajem leta i početkom jeseni rastvoreni kiseonik pada na nulu



Sl. 4 – Promena koncentracije fitoplanktona
Variation of phytoplankton concentration



Sl. 5 – Promena koncentracije rastvorenog kiseonika
Variation of dissolved oxygen concentration



Sl. 6 – Promena koncentracije amonijaka
Variation of ammonia nitrogen concentration
(slika 5). Kao posledica toga, u tom periodu godine dolazi do porasta BPK₅ i amonijaka (slika 6).

Rezultati modela sa ulaznim podacima 2. Maksimalna koncentracija fitoplanktona je oko 20% manja nego kod rezultata sa ulaznim podacima 1 (slika 4). Limitirajući faktor rasta fitoplanktona je ortofosfat. U segmentima hipolimniona ne dolazi do pojave anaerobnih uslova i maksimalna koncentracija amonijaka je niža za 35% u odnosu na rezultate sa ulaznim podacima 1 (slike 5 i 6). Akumulacija se i dalje nalazi u eutrofnom statusu, ali sa nižim stepenom primarne produkcije i približava se mezotrofnom stanju. Prečišćavanjem otpadnih voda uzvodnih naselja i oštrijim ograničavanjem dospevanja ortofosfata moglo bi se jezero prevesti u mezotrofno stanje.

5. ZAKLJUČAK

Modelima kvaliteta vode može se uspešno modelirati kvalitet vode u jezerima i akumulacijama, pri čemu je potrebno poznavanje procesa koji utiču na kvalitet vode. U radu su prikazana polja primene različitih postojećih modela kvaliteta vode. Prilikom modeliranja, naročitu pažnju potrebno je posvetiti pripremi ulaznih podataka.

Izvršeno je modeliranje kvaliteta vode u budućoj akumulaciji Vitman i analiziran uticaj smanjenja koncentracije zagađenja u reci Mlavi i njenim pritokama na kvalitet vode u akumulaciji. Smanjenjem koncentracija

azotnih i fosfornih jedinjenja, i BPK za 30% u pritokama akumulacije Vitman postigli su se povoljni efekti: smanjena je koncentracija fitoplanktona u epilimnionu, u hipolimnionu ne dolazi do pojave anaerobnih uslova, a jezero se približava mezotrofnom stanju.

Dalja neophodna poboljšanja se mogu postići potpunijom sanitacijom i prečišćavanjem otpadnih voda uzvodnih naselja, nakon čega bi se jezero moglo održavati u mezotrofnom stanju, pa i boljem, uz dodatne mere ograničavanja upotrebe fosfata i uklanjanjem fosfora iz otpadnih voda.

LITERATURA

- [1] Ambrose, R.B., Wool, T., Conolly, J., Schanz, R.: WASP4, Hydrodynamic and Water Quality model - Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide. U.S.EPA, GA. 1990.
- [2] Bowie, G., Mills, W., Porcella, D., Campbell, C., Pagenkopf, J., Rupp, G., Johnson, K., Chan, P., Gherini, S.: 1985. Rates, Konstants and Kinetic Formulation in Surface Water Quality Modeling (second edition), US Environmental Protection Agency, Athens, GA. EPA/600/3-85/040.
- [3] Đorđević, B.: Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [4] Društvo za zaštitu voda SR Srbije i RO „Vodovod“ Kruševac: Zaštita akumulacija u funkciji regionalnog snabdevanja vodom na području Srbije. Zbornik referata, Kruševac, 1989.
- [5] Milojević, M.: Snabdevanje vodom i kanalisanje naselja, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [6] Henderson Sellers: Engineering Limnology, Pitman, 1986.
- [7] Idejni projekat Regionalnog vodoprivrednog sistema Mlava - Gornjak. Energoprojekt, Beograd, 1990.

MATHEMATICAL MODELLING OF WATER QUALITY IN LAKES AND RESERVOIRES

by

Prof. Branislav ĐORĐEVIĆ, Ph. D.
Aleksandar ĐUKIĆ
Tina MILANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

Mathematical modelling of water quality in lakes and reservoirs is considered. The principles of mathematical modelling of main physical, chemical and biological processes that affect water quality are presented. The classification of water quality models,

and process of preparing input data are given. Water quality in reservoir Vitman is simulated by WASP4 modelling program. The effects of reducing pollution concentration in river Mlava and tributaries on water quality in reservoir are examined.

Redigovano 12. 02. 1995.