

XXV JUBILARNI JUGOSLOVENSKI SIMPOZIJUM O OPERACIONIM ISTRAŽIVANJIMA



ZBORNIK RADOVA

EDITORI
R. Petrović
D. Radojević

SYM-OP-IS '98

Herceg Novi, 21-24. septembar 1998.

**Prof. dr Radivoj Petrović
Dr Dragan Radojević
(Editori)**

**Zbornik radova 25. jugoslovenskog simpozijuma o operacionim istraživanjima
SYM-OP-IS '98**

**Izdavač
Institut "Mihajlo Pupin", Beograd**

**Za izdavača
Mr Vladan Batanović, vd generalni direktor**

**Tehnički urednici
Slobodan Guberinić
Sanja Petrović
Slavica Ranković
Gordana Savić
Milan Stanojević
Miomir Šegović**

**Lektura teksta na engleskom
Gordana Marković**

**Korice
Životije Dobrosavljević
Nada Zarić
Slavica Ranković**

**Štampa
SZR za prepis i umnožavanje
Milošević Draginja, Beograd**

**Tiraž
300 primeraka**

**Tekst na srp. i engl. jeziku. -
Bibliografija uz svaki rad.-Rezimej;
Abstracts.-Registar.
ISBN 86-82183-03-x**

ORGANIZACIONI KOMITET

Radojević Dragan, IMP Beograd, predsednik
Ranković Slavica, IMP Beograd, sekretar
Banićević Mirko, EI Beograd
Martić Milan, FON Beograd
Milutinović Dejan, DOPIS Beograd
Petrović Sanja, IMP Beograd
Stamatović Suzana, IMP Beograd
Stevanović Mirjana, SF Beograd
Tošović Radule, RGF Beograd
Vujošević Zorica, EF Beograd

PROGRAMSKI ODBOR

Petrović Radivoj, SF Beograd, predsednik	Obradović Predrag, MI Podgorica
Guberinić Slobodan, SF Beograd, sekretar	Opricović Serafim, GF Beograd
Babić Obrad, SF Beograd	Pap Endre, MI Novi Sad
Backović Marko, EF Beograd	Pešić Milivoje, EF Niš
Bogosavljević Srđan, FON Beograd	Poznanić Vladimir, EF Beograd
Borović Siniša, VJ Beograd	Radenković Božidar, FON Beograd
Cvetković Dragoš, ETF Beograd	Radojević Dragan, IMP Beograd
Cvijanović Janko, EI Beograd	Rakić Milan, IMP Beograd
Čangalović Mirjana, FON Beograd	Stanić Stanko, EF Banja Luka
Čupić Milutin, FON Beograd	Stanković Miomir, FZR Niš
Dugošija Đorđe, MI Beograd	Stanojević Radoslav, EI Beograd
Dutina Jovan, FPM Trebinje	Starčević Dušan, FON Beograd
Đorđević Branislav, GF Beograd	Šaranović Stevan, FP Kotor
Klarin Milivoj, MF Beograd	Tanasković Toma, RGF Beograd
Kovačević-Vučić Vera, FON Beograd	Teodorović Dušan, SF Beograd
Krčevinac Slobodan, FON Beograd	Todorović Jovan, MF Beograd
Kuzmanović Dragoslav, RGF Beograd	<u>Tourki Milka</u> , EF Beograd
Malbaški Dušan, FTN Novi Sad	Vujčić Slobodan, RGF Beograd
Matejić Vlastimir, ICN Beograd	Vujošević Mirko, FON Beograd
Mesaroš Katalin, EF Subotica	Vujošević Zorica, EF Beograd
Milosavljević Milan, IPM Beograd	Vuleta Jovo, EI Beograd
Obradović Danilo, FTN Novi Sad	Zečević Tomislav, EF Beograd

NOSIOCI POVELJE SYM-OP-IS-a za zasluge u razvoju operacionih istraživanja

Kraut Božidar-1983, Vadnal Alojz-1983, Mirković Dragoslav-1983, Ivanović Branislav-1984,
Martić Ljubomir-1984, Petrović Radivoj-1984, Petrić Jovan-1988,
Zlobec Sanjo-1990, Stanojević Radoslav-1991, Vukadinović Svetozar-1983,
Krčevinac Slobodan-1993, Guberinić Slobodan-1993, Vuleta Jovo-1993,
Kovačević-Vučić Vera-1998, Teodorović Dušan-1998



MODELIRANJE ABIOTIČKIH I BIOTIČKIH PROCESA U AKVATORIJAMA VODOPRIVREDNIH SISTEMA

MODELING OF ABIOTIC AND BIOTIC PROCESSES IN WATER STORAGE RESERVOIRS

Prof. dr Branislav Đorđević, dipl.inž.

Tina Milanović, dipl.inž.

GRAĐEVINSKI FAKULTET, BEOGRAD, Bul. Revolucije 73, tel. 3370-100, E-mail:

branko@irc.grf.bg.ac.yu

Rezime: Radi praćenja procesa koji se odvijaju u akvatorijama vodoprivrednih sistema (akumulacijama, retenzijama) neophodno je modeliranje abiotičkih i biotičkih procesa kojima se prognoziraju akcije, reakcije i koakcije na relaciji biotop → biocenoza → biotop i predviđa razvoj sukcesija. Postojeći spregnuti modeli uglavnom su obuhvatali sve bitne abiotičke komponente (sadržaj kiseonika, temperaturne režime i termičku separaciju, raspored koncentracija neorganskih i organskih komponenti fizičko - hemiskog stanja vode), dok su se u sferi biotičkih komponenti uglavnom zaustavljali samo na fito- i zooplanktonu. Najinteresantnija komponenta vodenog ekosistema - ihtiofauna, po pravilu nije bila obuhvaćena ovim modelima, zbog čega je u ovom radu posebna pažnja posvećena toj komponenti akvatičkog ekosistema i metodama njenog modeliranja.

KLJUČNE REČI: MATEMATIČKO MODELIRANJE, IHTIOFAUNA, KVALITET VODE, AKUMULACIJE

Abstract: Predicting processes in water storage reservoirs is impossible without complex mathematical models of abiotic and biotic components of aquatic ecosystem. Designed models include all relevant abiotic components (concentration of dissolved oxygen, temperature regimes and temperature stratification, concentration of organic and inorganic components of physical-chemical water conditions), while the biotic components are present only with fito- and zooplankton. The most interesting component of aquatic ecosystem - ihtiofauna, usually is not incorporated in these models. For this reason the analytical approach for mathematical modeling of ihtiofauna is specially emphasized in the paper.

KEY WORDS: MATHEMATICAL MODELING, IHTIOFAUNA, WATER QUALITY, WATER STORAGE RESERVOIRS

1. UVOD

Kvalitet vode u veštačkim jezerima je ključna njihova odlika, i menja se tokom vremena. Zato se često govori o procesu starenja akumulacija, o čemu se mora voditi računa u svim fazama projektovanja i eksploatacije sistema, kako bi se ti procesi držali pod kontrolom. Pored ekološkog i estetskog uticaja na okruženje, koje akvatorija sa najvišim kvalitetom vode oplemenjuje, ili degradira - ukoliko se procesi eutrofikacije otrgnu kontroli, kvalitet vode utiče i na namenu akumulacije. Tako na primer, nekontrolisani razvoj fitoplanktona i algi stvara ozbiljne probleme na postrojenjima za prečišćavanje vode, a nepovoljno deluje i u slučajevima kada se akumulacije koriste za rekreaciju i turizam. Slično, povećane količine gasova, kao što su CH₄, H₂S, NH₃, i dr., koji su posledica anaerobne razgradnje organske materije, menjaju ukus i miris vode, što isključuje mogućnost korišćenja akumulacije u rekreativne i turističke svrhe i degradira okruženje.

Iako veoma značajan, aspekt kvaliteta vode i njegovog modeliranja se tek poslednjih decenija intenzivnije razvija i primenjuje. Osnovni razlog za to je složenost dinamike fizičkih, hemijskih i bioloških procesa u jezerskim ekosistemima, koji se tek na ovom stepenu razvoja nauke i tehnike mogu adekvatno sagledati i matematički modelirati. Drugi, isto tako važan razlog, su ograničene mogućnosti autopurifikacije voda i njihovo, poslednjih decenija sve intenzivnije zagađivanje, što prate sve strožiji zahtevi u pogledu kvaliteta isporučene vode.

Od 1925. godine, kada su Streeter i Phelps definisali prve jednačine ravnoteže rastvorenog kiseonika u vodi (što se smatra početkom modeliranja kvaliteta vode) do danas razvijen je veliki broj različitih matematičkih modela. Osnovni cilj tih modela je predviđanje razvoja procesa u ekosistemima tokom vremena, posebno u slučajevima promene nekih biotičkih ili abiotičkih faktora. Čovek je napokon shvatio da u vodenim

ekosistema nije dozvoljeno upravljanje "eksperimentom na realnom sistemu", već da se svi planirani zahvati u prirodi moraju najpre proveriti matematičkom simulacijom.

Ekološki modeli vodenih ekosistema mogu biti: (1) modeli abiotičkih procesa, (2) modeli biotičkih procesa, (3) spregnuti modeli, kojima se, posebno u novije vreme, simultano modeliraju relevantni abiotički i biotički procesi u sistemu.

2. MODELIRANJE ABIOTIČKIH PROCESA

Osnovni abiotički procesi koji se modeliraju matematičkim modelima slični su za većinu akumulacija i relativno dobro ispitani. To su:

- fizički procesi: hidrodinamički režim i temperaturne promene;
- hemijski procesi: promene koncentracija rastvorenog kiseonika i nutrijenata.

Na najvišem nivou opštosti abiotički procesi u vodenim ekosistemima modeliraju se opštim zakonom hidrauličkog transporta, koji sveden na jediničnu zapreminu vode ima sledeći oblik:

$$\partial K / \partial t + \partial(K \cdot u_j) / \partial x_j = R$$

gde prvi član označava lokalnu vremensku, a drugi konveksijsku promenu nekog kvalitativnog pokazatelja (K), dok je R uzročnik tih promena, u koji su uključeni i svi izvori i ponori, x_j - prostorne koordinate ($j = 1, 2, 3$), u_j - komponente brzine u tački. Iz ove opšte relacije izvode se sistemi jednačina kojima se opisuje dinamizam promene pojedinih komponenti kvaliteta, pre svega polja koncentracija pojedinih agenasa u vodi.

Temperatura vode jedan je od najvažnijih parametara kvaliteta, od koga zavise svi hemijski i biološki procesi u vodi (koncentracija rastvorenog kiseonika, biohemijska potrošnja kiseonika, brzine hemijskih reakcija, kinetika fito- i zooplanktona i dr.). Zbog toga je ovaj parametar kvaliteta neophodno što realnije opisati matematičkim modelima.

Temperaturne promene u vodenom sistemu javljaju se pod uticajem sunčeve energije, odnosno razmenom energije na slobodnoj vodenoj površini, koja se definiše preko toplotnog fluksa (Φ_N). Iako postoji veliki broj različitih modela, dva su generalna pristupa računanju ovog parametra:

- preko ravnotežne temperature (T_E):

$$\Phi_N = k_E (T_E - T_S)$$

gde je k_E koeficijent prenosa toplote na površini voda - vazduh, a T_S površinska temperatura vode.

- direktnim računanjem iz meteoroloških podataka:

$$\Phi_N = \Phi_{SN} + \Phi_{AT} - \Phi_{WS} - \Phi_E \pm \Phi_H$$

gde su:

Φ_{SN} - fluks čistog solarnog zračenja

Φ_{AT} - fluks čistog atmosferskog zračenja

Φ_{WS} - fluks zračenja sa vodene površine

Φ_E - toplotni fluks isparavanja sa vodene površine

Φ_H - promenljivi toplotni fluks

Pored temperature vode, kvalitet vode u akumulaciji u velikoj meri zavisi i od koncentracije rastvorenog kiseonika. Generalno, može se reći da je boljeg kvaliteta voda u kojoj je, zbog dovoljnih količina rastvorenog kiseonika, omogućeno odvijanje aerobnih procesa (respiracija, nitrifikacija i dr.). Niske koncentracije rastvorenog kiseonika i anaerobni uslovi uslovljavaju odvijanje procesa redukcije i anaerobne razgradnje, pri kojima se oslobađaju razni gasovi (metan CH_4 , hidrogen sulfid H_2S , amonijak NH_3 , i dr.). Pored toga što menjaju ukus vodi, ovi gasovi mogu biti i toksični (H_2S), tako da se narušava kvalitet celog vodenog ekosistema.

Modeliranje rastvorenog kiseonika zavisi od složenosti spregnutog modela, odnosno od parametara kvaliteta obuhvaćenih modelom. U najopširijem slučaju, koncentracija rastvorenog kiseonika se određuje kao razlika između proizvedenog kiseonika i kiseonika utrošenog za obavljanje različitih procesa (respiracija, nitrifikacija, dekompozicija, i dr.) u određenoj zapremini vode. Osnovni izvori rastvorenog kiseonika su razmena kiseonika između atmosfere i vodene mase na kontaktu voda - vazduh (reaeracija) i proizvodnja kiseonika u procesu fotosinteze. Rastvoreni kiseonik iz vode troši se u procesu respiracije (alge, zooplankton, ribe, bentoski organizmi, i dr.), nitrifikacije amonijaka do nitrata i dekompozicije organske materije.

Primarna produkcija (razvoj fitoplanktona i algi) zavisi od količine nutrijenata u vodi. Pošto su fitoplankton i alge početna karika u lancu ishrane u jednom vodenom ekosistemu, od raspoloživih nutrijenata zavisi i dinamika celog živog sveta jezera (akumulacije). Zbog toga je pri proučavanju trofičkih procesa u jezerima, neophodno razmatrati i dinamiku nutrijenata.

Postoji veliki broj nutrijenata, a najvažnija su jedinjenja azota, fosfora, kalijuma i silicijuma. Ostali, mikronutrijenti u koje spadaju jedinjenja gvožđa, mangana, bakra, cinka, molibdena, i dr., potrebni su živom svetu u malim količinama i obično ih u vodenom sistemu ima dovoljno. U modele kvaliteta vode najčešće se uključuju samo dinamika promene ključnih makronutrijenata, obavezno azota i fosfora.

3. MODELIRANJE BIOTIČKIH PROCESA

Pregrađivanjem vodotoka stvara se novi ekosistem, koji se po svojim fizičkim i hemijskim karakteristikama razlikuje od ekosistema vodotoka na kome je formirana akumulacija. Novonastali abiotički uslovi utiču i na izmenu živog sveta, koji im se kroz sukcesivne promene prilagođava, određene vrste se adaptiraju, neke migriraju, a neke nestaju (izumiru). Ove promene (evolucija akvatičkog ekosistema) traju dok se ne postigne ravnotežno stanje između abiotičkih i biotičkih komponenti - klimaksno stanje.

Modeliranje biotičkih procesa (kinetike fitoplanktona, zooplanktona i riba) je težak i složen problem koji zavisi od velikog broja abiotičkih i biotičkih faktora. Osnovni abiotički uticaji opisani su u delu 2. ovog rada, a kao najvažniji biotički faktori razmatraju se i modeliraju homeotipske i heterotipske koakcije.

Dosadašnji spregnuti matematički modeli, pored simuliranja najrelevantnijih abiotičkih faktora, obuhvatali su i razvoj fitoplanktona, a tek u novije vreme i zooplanktona. Po pravilu, izostajalo je modeliranje razvoja najinteresantnije komponente biocenozna - ihtiofaune. Zbog toga će se u nastavku rada posebna pažnja usmeriti modeliranju te komponente vodenog ekosistema.

Za modeliranje populacije fito- i zooplanktona postoje dva osnovna pristupa: 1) modeliranje uticaja svih vrsta fito- (zooplanktona) preko jednog pokazatelja (obično suve biomase) i 2) modeliranje uticaja više različitih vrsta fito- (zooplanktona). Drugi pristup, naravno, realnije opisuje procese u jezeru, jer obuhvata sezonsku dinamiku raznih vrsta fito- i zooplanktona, različite zahteve i uticaje na kvalitet vode svake vrste, ali zahteva poznavanje velikog broja različitih koeficijenata za različite vrste. Analize su pokazale da se te prve karike u trofičkom lancu jednog vodenog ekosistema mogu vrlo uspešno modelirati primenom jednostavnijeg - prvog pristupa, prema kome se dinamika promene populacija opisuju preko koeficijenta rasta, respiracije, predatorske i nepredatorske smrtnosti.

U modelima kvaliteta vode, u koje se uključuju ribe kao najviša karika u lancu ishrane, koriste se jednostavniji tipovi biotičkih modela, npr. modeli koji se zasnivaju na odnosima između jedinki unutar iste vrste i odnosima jedinki različitih vrsta - homeotipskim i heterotipskim koakcijama. Ovi odnosi opisuju se jednačinama, koje imaju sledeći opšti oblik:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - \alpha_{11} N_1 - \sum_{i=2}^m \alpha_{ji} N_i}{K_1} \right)$$

.....

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j N_j \left(\frac{K_j - \sum_{i=1}^{j-1} \alpha_{ji} N_i - \alpha_{jj} N_j - \sum_{i=j+1}^m \alpha_{ji} N_i}{K_j} \right)$$

.....

$$\frac{dN_m}{dt} = r_m N_m \left(\frac{K_m - \sum_{i=1}^{m-1} \alpha_{mi} N_i - \alpha_{mm} N_m}{K_m} \right)$$

gde je:

N - veličina (brojnost) određene populacije

r - specifična brzina rasta

K - granica rasta populacije

α_{ji} - koeficijent konkurencije između vrsta, koji mogu biti pozitivni i negativni. U slučaju kompetitivnog odnosa, koeficijent α_{ji} je pozitivan, tako da u jednačini učestvuje sa negativnim predznakom, a označava usporavajući uticaj druge vrste (i) u odnosu na prvu vrstu (j). U slučaju kooperativnog odnosa, koeficijent α_{ji} je negativan, pa u jednačini učestvuje sa pozitivnim predznakom, što označava doprinos vrste i u porastu populacije (brojnosti) vrste j

m - broj vrsta koje se razmatraju modelom.

Opisane jednačine promene brojnosti populacije, poznate pod nazivom Lotka - Volterra-ove jednačine, sastoje se od tri grupe članova. Prva grupa ($r_j N_j$) definiše slobodan rast (povećanje brojnosti) populacije. Drugom grupom ($r_j N_j \sum \alpha_{ji} N_i / K_j$), koja uvek ima negativan predznak, modeliraju se homeotipske koakcije, odnosno smanjenje brzine rasta populacije usled efekta samoograničavanja rasta. Trećom grupom ($r_j N_j \sum \alpha_{ji} N_i / K_j$) opisuju se heterotipske koakcije, odnosno uticaji između jedinki različitih vrsta, koji mogu i pozitivno i negativno uticati na rast određene populacije.

Efekte homeotipskih i heterotipskih koakcija obično se predstavljaju matricom koeficijenata uticaja A, a elementi ove matrice određuju se na osnovu rezultata empirijskih istraživanja.

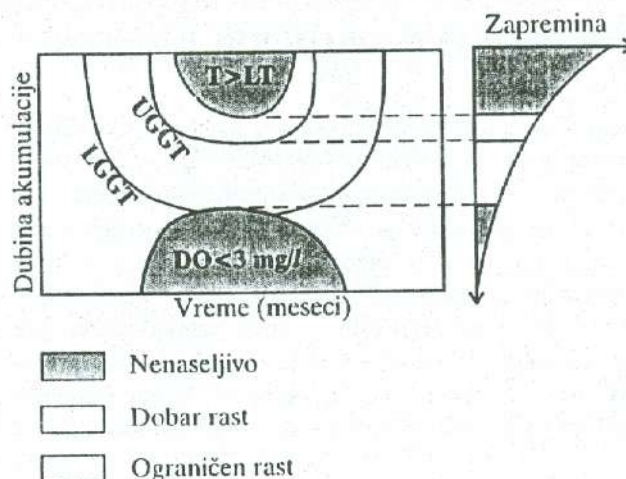
$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1j} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & 1 & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2m} & \dots & \alpha_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{j1} & \alpha_{j2} & \alpha_{j3} & \dots & 1 & \dots & \alpha_{jm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \alpha_{m3} & \dots & \alpha_{mj} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Jednačine Lotka - Volterra, uz odgovarajuća istraživanja, kojima bi se definisala matrica koeficijenta A, kojom se egzaktno opisuju interakcije između pojedinih vrsta ihtiofaune, pružaju mogućnost da se apriornim modeliranjem iznadu poželjna stanja na kojima se može stabilizovati jezerski ekosistem nakon određenih sukcesija. Takođe, time se omogućava planiranje inicijalnih poribljavanja i korekcija istih tokom vremena, kao i plansko usmeravanje sukcesija u skladu sa postavljenim zahtevima da se u veštačkim akumulacijama ostvare dovoljno stabilni ekosistemi, sa zahtevanim pokazateljima raznovrsnosti.

Drugi način modeliranja riblje populacije je preko najvažnijih abiotičkih faktora koji utiču na opstanak i rast riblje populacije. Jedan od modela, razvijen od strane članova ASCE udruženja (Hondzo and Heinz, 1996), za određivanje najpogodnijeg staništa za određene riblje vrste koristi osnovna dva abiotička parametra: temperaturu vode i koncentraciju rastvorenog kiseonika.

Prema ovom modelu ribe su podeljene u tri osnovne kategorije: ribe jako hladnih voda (salmonidne vrste i sitna bela planinska riba), ribe hladnih voda (crni i beli krap, severna štuka, mrena i dr.) i ribe toplih voda (plavoškrgaš, šaran i druge ciprinidne vrste). Urađena su obimna terenska laboratorijska ispitivanja, u okviru kojih je analizirano preko 141.000 odnosa riblja vrsta - temperatura, da bi se došlo do temperaturnih kriterijuma za riblja staništa. Za sve tri riblje kategorije definisane su: smrtonosna temperaturna granica (LT), donja granice "temperature dobrog rasta" (LGGT) i gornja granica "temperature dobrog rasta" (UGGT). Ograničenja u pogledu koncentracije rastvorenog kiseonika (DO) usvojena su na osnovu dokumenta USEPA (1986) Water Kriterija document, i to 2,5 mg/l za toplovodne ribe i 3 mg/l za ribe hladnih i jako hladnih voda. Na osnovu opisanih kriterijuma traže se zone u akumulaciji koje odgovaraju određenim ribljim kategorijama (slika 1).

I pored postojanja određenih matematičkih modela, riblja populacija se u najvećem broju modela kvaliteta vode smatra konstantnom ili promenljivom vrednošću dobijenom na osnovu statistike ulova.



Slika 1: Određivanje kvaliteta staništa

4. ZAKLJUČCI

Dosadašnja iskustva sa matematičkim modelima za praćenje razvoja kvaliteta vode u veštačkim akvatorijama pokazuju da se uz odgovarajuće istražne radove, koji treba da obezbede merenja parametara kvaliteta za početne i granične uslove, može obezbediti uspešna prognoza razvoja abiotičkih faktora u akumulacijama, kao i dinamizam razvoja fito- i zooplanktona. Tim modelima nije bio razmatran razvoj ihtiofaune. U radu se pokazuje da se primenom odgovarajućih modela (baziranih na biotičkim i abiotičkim parametrima vodenog ekosistema) mogu obuhvatiti i komponente ihtiofaune, čime bi se modeli dinamizma promene kvaliteta jezera zaokružili u jedinstvenu sistemsku celinu.

LITERATURA

- [1] Đorđević, B., *Vodoprivredni sistemi*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [2] Djordjević, B., *Cybernetics in Water Resources Management*, WRP, Fort Collins, 1993.
- [3] Hondzo, M. and Heinz S., "Dependence of Water Quality and Fish Habitat on Lake Morphometry and Meteorology", *Journal of Water Planning and Management*, Vol. 122, No 5, 1996.
- [4] Milanović, T., *Informatička i modelska podrška upravljanju sistemom brana - akumulacija*, magistarska teza, Građevinski fakultet u Beogradu, 1998.