

MODELIRANJE KVALITETA VODE U ZALIVU PRIMENOM MODELA RAVANSKOG TEČENJA

Budo ZINDOVIĆ, Miodrag JOVANOVIĆ, Radomir KAPOR, Dušan PRODANOVIĆ
Građevinski fakultet u Univerziteta u Beogradu

REZIME

Zagađenje voda stvara tako ozbiljne probleme da primena standardnih inženjerskih metoda u projektima zaštite životne sredine više nije opravdana. Ovakvi projekti zahtevaju primenu novih alata i metoda baziranih na numeričkim modelima. U ovom radu je prikazan rezultat simulacije kvaliteta vode na primeru Čukaričkog zaliva na reci Savi u Beogradu. Primena mera čiji je cilj poboljšanje kvaliteta vode, kao što je ispiranje zaliva, ispitana je pomoću modela ravanskog tečenja baziranog na metodi konačnih elemenata. Sagledavanjem uticaja predloženih mera moguće je dati odgovarajuće preporuke investitorima i izvođačima radova.

Ključne reči: model ravanskog tečenja, model kvaliteta vode, metoda konačnih elemenata

1. UVOD

Ovaj rad je inspirisan konkretnim problemom iz prakse. Kao što je poznato, pregrađivanjem Čukaričkog rukavca 1967. godine, formirano je Savsko jezero površine 86 ha. Nizvodni kraj nekadašnjeg rukavca, Čukarički zaliv, ostao je otvoren prema reci Savi. Ovaj zaliv se koristi u sportsko-rekreativne i komercijalne svrhe i većim delom pripada zoni neposredne zaštite izvorišta Beogradskog vodovoda.

Voda Čukaričkog zaliva je izložena dugogodišnjem zagađenju i spada u vode najnižeg kvaliteta na teritoriji grada Beograda. Kvalitet vode je naročito nepovoljan tokom letnjeg perioda kada se kao produkt raspadanja organske materije, oslobađaju gasovi neprijatnog mirisa. U okolini Zaliva su locirani brojni zagađivači. Najznačajniji zagađivači su Topčiderska reka i kanalizacioni ispušni na ušću ove reke u Zaliv.

U nastavku su nabrojane mere za smanjenje zagađenja, opisan je način rešavanja ovog problema i uticaj predloženih mera na kvalitet vode u Zalivu.

2. MERE ZA POBOLJŠANJE KVALITETA VODE U ZALIVU

Mere, čijom primenom se može poboljšati kvalitet vode u Zalivu su:

- prečišćavanje otpadnih voda koje dospevaju Topčiderskom rekom
- prečišćavanje otpadnih voda koje dospevaju direktno u Zaliv
- čišćenje dna Zaliva i tretiranje zagađenog mulja
- ispiranje Zaliva vodom iz Savskog jezera

Iako bi se primenom svih navedenih mera dobili najbolji rezultati, poslednja mera je najekonomičnija jer se može odmah primeniti. Naime, za potrebe izazivanja veštačke cirkulacije u Savskom jezeru instalirane su dve pumpe ukupnog kapaciteta 1.5 m³/s (1 m³/s + 0.5 m³/s). Pošto do sada nisu korišćene, predloženo je da se one upotrebe za popravljavanje kvaliteta vode u Zalivu.

3. NUMERIČKI MODEL

3.1 Model za proračun hidrodinamičkih veličina

Za potrebe modeliranja kvaliteta vode Čukaričkog zaliva je primenjen model ravanskog tečenja. Jednačine matematičkog modela ravanskog tečenja su prikazane u [7]. Prostorno tečenje se opisuje Rejnoldsovim jednačinama koje čine jednačina održanja mase i jednačine održanja količine kretanja u tri koordinatna pravca. Osrednjavanjem ovih jednačina po dubini, dobija se [4], [7]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial z_d}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial z_d}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (3)$$

gde su:

(x, y, t) - prostorne koordinate i vreme,

(h, u, v) - dubina i komponente brzine po dubini osrednjene,

z_d - kota dna rečnog korita,

E - tenzor turbulentne viskoznosti,

n - koeficijent rapavosti po Maningu,

ρ - gustina vode,

g - gravitaciono ubrzanje.

Vrednosti parametara modela - hrapavosti i turbulentne viskoznosti, određuju se kalibracijom modela. Ako se pretpostavi izotropnost turbulencije, koeficijenti turbulentne viskoznosti imaju istu vrednost u svim koordinatnim pravcima, pa ovaj parametar postaje skalarna veličina (E).

Rešenje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina (1) - (3) definiše strujno polje u horizontalnoj ravni, u nizu tačaka računске mreže koja „pokriva” razmatranu oblast. Rešavanje iziskuje zadavanje početnih uslova (dubina i brzina) po celoj računskog oblasti, kao i uslova na granicama ove oblasti - protoka na uzvodnoj granici i odgovarajuće kote nivoa na nizvodnoj granici.

Numerički model ravanskog strujanja zasniva se na nekoj od metoda konačnih razlika, konačnih zapremina ili konačnih elemenata [4], [7]. U ovom radu je korišćena metoda konačnih elemenata, implementirana u komercijalnom softverskom paketu RMA2 [1]. Primenjeni su trougaoni i četvorougaooni elementi sa kvadratnim interpolacionim funkcijama za brzine, odnosno linearnim funkcijama za dubine.

3. 2 Model transporta zagađenja

Za analizu kvaliteta u zalivu, korišćen je model zasnovan na konvekciono-difuzionoj jednačini:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - kC \quad (4)$$

gde su:

C - koncentracija zagađenja osrednjena po dubini,

(u, v) - komponente brzine u pravcima (x, y) ,

(D_x, D_y) - koeficijenti disperzije u pravcima (x, y) ,

k - koeficijent razgradnje materije (zagađenja).

Jednačina (4) je izvedena pod pretpostavkom da je koncentracija zagađenja ravnomerna po dubini. Za rešavanje ove jednačine može se primeniti metoda konačnih razlika, konačnih zapremina ili konačnih elemenata. U ovom radu je primenjena metoda konačnih elemenata implementirana u komercijalnom modelu RMA 4 [2].

3.3 Ulazni podaci

Da bi sistem jednačina (1) - (4) bio rešiv, potrebno je zadati vrednosti zavisnih promenljivih na granicama i odrediti vrednosti parametara modela.

Granični uslovi. Kod modela ravanskog tečenja je potrebno zadati vrednosti zavisnih promenljivih na granicama računске oblasti: na uzvodnoj se zadaje protok i koncentracija zagađenja, a na nizvodnoj kota nivoa. U Tabelama (1) i (2) su prikazane vrednosti veličina zadatih na granicama za različite hidrološke uslove reke Save i Topčiderske reke.

Tabela 1. Hidrološki podaci za reku Savu.

p [%]	Q_{SAVA} [m ³ /s]	Z_{SAVA} [m n.m.]
1	6469	74.01
50	1568	71.37
99	209	69.50

Tabela 2. Hidrološki podaci za Topčidersku reku

p [%]	Q_{TR} [m ³ /s]
1	102
50	0.4
0.1 Q_{SR}	0.043

Procenjena koncentracija zagađenja koje dotiče Topčiderskom rekom iznosi 1000 mg/L [5]. Za vodu koja dotiče rekom Savom je pretpostavljeno da je nezagađena. Na taj način je analiziran isključivo uticaj Topčiderske reke na zagađenje Čukarčkog zaliva. Izbor koncentracije nije od ključnog značaja, jer se rezultati daju u relativnom obliku - procentualno u odnosu na ulaznu koncentraciju. U nedostatku pouzdanih podataka, početni uslov za proračun kvaliteta je zasnovan na pretpostavci da je voda u Zalivu u početnom trenutku nezagađena.

Pri ispitivanju uticaja ispiranja zaliva, računskim varijantama je obuhvaćen opseg protoka pumpi od 1.5 do 4.0 m³/s. Budući da efekat rada pumpi zavisi od hidrološko-hidrauličkih uslova, ispitana je efikasnost ispiranja pri različitim protocima reke Save.

Parametri modela. Postupak kalibracije numeričkog modela je prikazan u drugom radu autora ovog rada [6].

4. ANALIZA REZULTATA

4.1 Kvalitet vode za postojeće stanje

Na Slici 1 je dat uporedni prikaz koncentracija zagađenja za postojeće stanje. Prikazani rezultati omogućavaju kvalitativnu procenu posledica ispuštanja nekog zagađenja u Čukarički zaliv pri određenim hidrološkim uslovima.

Raspored koncentracije pokazuje da većim protocima reke Save odgovaraju manje koncentracije zagađenja, što je posledica većeg razblaženja. U periodima srednjih i velikih voda Save, koncentracija se kreće između 30% i 40% od zagađenja koje unosi Topčiderska reka. U periodu malih voda Save, u Zalivu se zadrži oko 25% zagađenja. Ovaj rezultat može, na prvi pogled, da zavarava, ali ako se pretpostavi da se u Topčidersku reku ubacuje ista masa zagađenja u jedinici vremena, onda će u malovodnom periodu koncentracija zagađenja u Zalivu biti za oko 80% veća od odgovarajuće koncentracije u periodu srednjih voda.

Ako se pogleda raspored koncentracije po Zalivu, uočava se da je zona ušća Topčiderske reke je najzagađenija sa koncentracijama od oko 60%. Budući da je to zona u kojoj se formira sprud, problem se usložnjava jer se problem zagađenja vezuje za nanos, što komplikuje proces čišćenja.

4.2 Efekti upuštanja vode iz Savskog jezera

U tački 2 su nabrojane mere za poboljšanje kvaliteta vode. Iako bi se primenom svih navedenih mera dobili najbolji rezultati, poslednja mera je najekonomičnija i može se odmah primeniti. Naime, za potrebe izazivanja veštačke cirkulacije u Savskom jezeru instalirane su dve pumpe ukupnog kapaciteta 1.5 m³/s (1 m³/s + 0.5 m³/s). Pošto do sada nisu korišćene, predloženo je da se one upotrebe za popravljavanje kvaliteta vode u Zalivu.

U Tabeli 3 i na Slici 2 je dat uporedni prikaz rezultata ispiranja pri različitim protocima reke Save. Najpovoljniji efekat rada pumpi se uočava u malovodnom periodu, kada koncentracije celom dužinom Zaliva ne prelaze 10%, osim u zoni ušća Topčiderske reke gde se povećavaju do 20%. To znači da se u periodu malih voda Save ispiranjem Zaliva pomoću postojećih pumpi, koncentracija zagađenja može svesti na samo 10% koncentracije ukupnog zagađenja koje dospeva Topčiderskom rekom.

Povoljni efekti su u izvesnoj meri prisutni i u periodu srednjih i velikih voda. Tada se koncentracije kreću između 20% i 30%, dok samo u zoni ušća Topčiderske reke pelaze 35%.

Tabela 3. Najveća i najmanja koncentracija zagađenja u zoni Zaliva za različite hidrološke periode reke Save

Q_{SAVA} [m ³ /s]	C_{MIN} [mg/L]	C_{MAX} [mg/L]
209	3	32
1568	14	48
6469	16	51

Iz ovih rezultata se može zaključiti da se ispiranjem Zaliva najbolji efekat postiže u periodu malih protoka reke Save.

4.3 Uticaj kapaciteta pumpi na kvalitet vode u Zalivu

Sadašnji kapacitet pumpi od 1.5 m³/s je poslužio kao osnova za sprovedenu analizu. Pri ispitivanju uticaja rada pumpi, analiziran je kapacitet pumpne stanice u opsegu od 1.5 m³/s do 4 m³/s. Sve varijante su ispitivane pri prosečnim protocima reke Save i Topčiderske reke.

Na Slici 3 i u Tabeli 4 je dat uporedni prikaz rezultata numeričkih simulacija. U svim slučajevima, najveća koncentracija se javlja u oblasti između kraja Zaliva (prevlaka Savskog jezera) i ušća Topčiderske reke. Sa

povećanjem kapaciteta pumpne stanice, koncentracije zagađenja se osetno smanjuju, što se moglo i očekivati. To smanjenje se najbolje može uočiti po smanjenju zone uticaja Topčiderske reke. Najveće promene su u neposrednoj okolini ispusta, a najmanje u zoni ušća Topčiderske reke. Već pri protoku pumpi od 3.5 m³/s ova zona je znatno manja od one koja odgovara postojećem kapacitetu pumpne stanice.

Tabela 4. Koncentracije zagađenja u Zalivu u zavisnosti od kapaciteta pumpi

Q_p [m ³ /s]	C_{min} [mg/L]	C_{max} [mg/L]	C_{TR} [mg/L]
1.5	14.2	48.2	58.1
2.0	12.8	48.0	58.0
2.5	10.3	47.2	57.3
3.0	8.0	45.4	55.7
3.5	6.5	45.1	55.5
4.0	4.1	43.0	53.9

5. ZAKLJUČCI

Simulacija transporta zagađenja pomoću numeričkog modela omogućava detaljniju analizu mera se koje mogu primeniti za poboljšanje kvaliteta vode. Navedeni primer, koji se odnosi na ispiranje zaliva, ilustruje mogućnosti numeričkih modela. Primenom ovakvih modela, dobijaju se korisne informacije koje mogu poslužiti kao osnova za naredne faze projektovanja. Budući da se u narednom periodu očekuje sve veći broj projekata koji se bave problemima kvaliteta voda prirodnih vodotoka, autori su mišljenja da se primenom ovakvih modela može poboljšati kvalitet projekata vezanih za očuvanje i obnavljanje životne sredine.

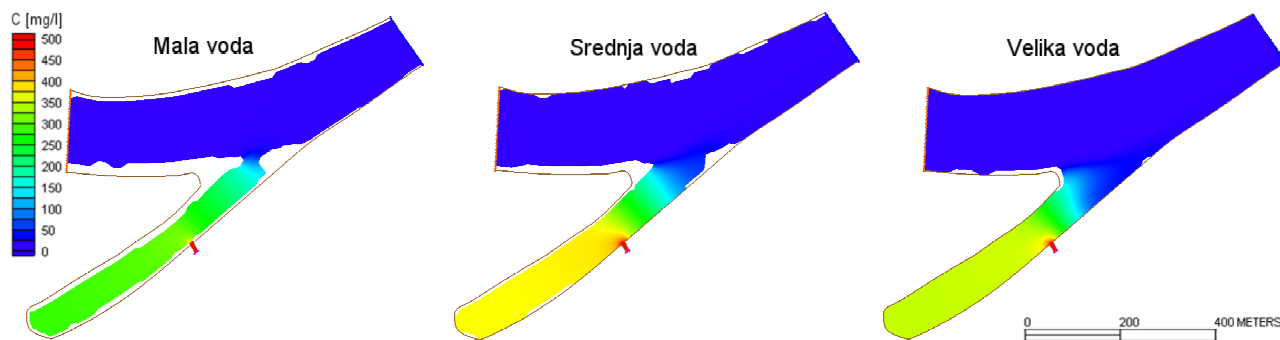
* * *

Rezultati objavljeni u ovom radu su plod istraživanja izvršenih tokom realizacije projekta Nacionalnog

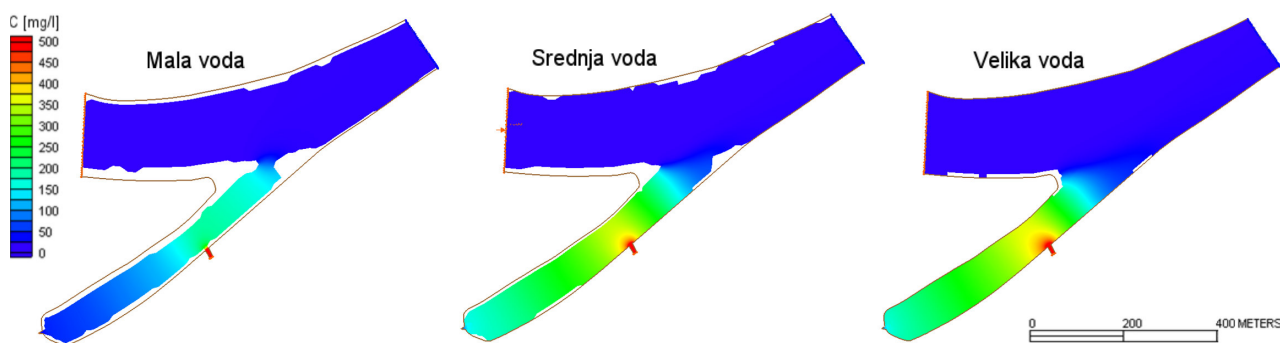
programa za uređenje, zaštitu i korišćenje voda u Srbiji: "Unapređenje metodologije za efikasno praćenje i upravljanje kvalitetom voda u vodotocima", koje je finansijski podržalo Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.

LITERATURA

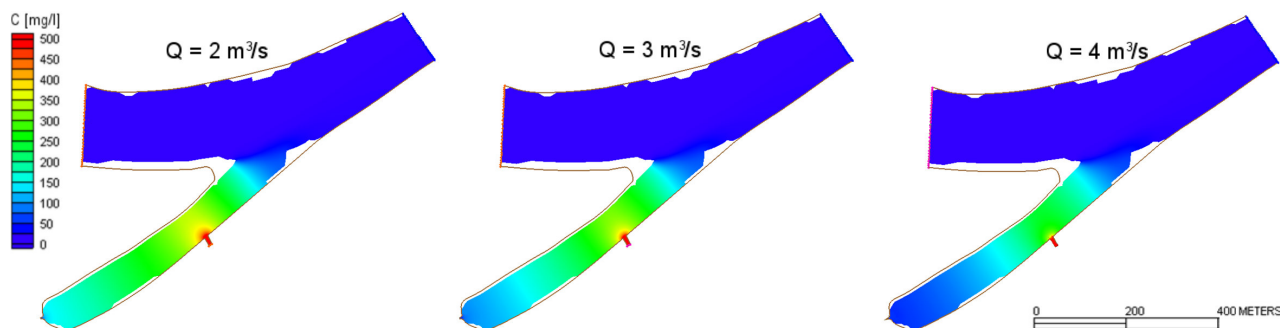
- [1] Donnel, B.P., et al.: *RMA2 WES Version 4.5 Users Guide*, US Army Corps of Engineers, WexTech Systems, Valhalla, New York, 2003.
- [2] Donnel, B.P., et al.: *RMA4 WES Version 4.5 Users Guide*, US Army Corps of Engineers, WexTech Systems, Valhalla, New York, 2003.
- [3] Ferziger, J. H., Perić, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlin, 1996.
- [4] Hajdin, G.: *Mehanika fluida – Osnove*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [5] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B.: *Hidraulička studija Čukaričkog zaliva i njegovog spoja sa rekom Savom*, Izveštaj br. 43336, Građevinski fakultet, Beograd, 2005.
- [6] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B.: *Numerička simulacija koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog nanosa u maticu reke*, 14. Save-tovanje SDHI, 2006.
- [7] Jovanović, M.: *Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova*, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [8] Jovanović, M.: *Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.



Slika 1. Kvalitet vode za prirodno stanje



Slika 2. Efikasnost rada pumpi u različitim hidrološkim uslovima reke Save



Slika 3. Uticaj kapaciteta pumpi na kvalitet vode u Čukaričkom zalivu (srednje vode reke Save)

2D MODELLING OF WATER QUALITY IN BAYS

by

Budo ZINDOVIĆ, Miodrag JOVANOVIĆ, Radomir KAPOR, Dušan PRODANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

Contamination of river waters in terms of scale, intensity, and duration, cause such severe problems that application of conventional engineering methods for environmental remediation projects is no longer adequate, and much more thorough hydraulic analysis, based on Computational Hydraulics, is required. Possibilities of such an approach are illustrated by a case study - remediation of the Cukarica Bay on the Sava River in Belgrade. Measures, such as flushing of

the Bay, have been studied by numerical simulations, using two-dimensional finite-element model. By studying physical processes in detail, it was possible to draw many useful conclusions, and to make appropriate recommendations to investors and working operative.

Key words: 2D numerical model, water quality model, finite-element method

Redigovano 14.05.2007.