

## JEDNODIMENZIONALNO MODELIRANJE KVALITETA VODE RIJEKE LAŠVE

Emina HADŽIĆ, Hata MILIŠIĆ, Nerma LAZOVIĆ  
Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, B&H

### REZIME

Zagađenje rijeka i okolišne nesreće predstavljaju značajne prijetnje kako prirodnom okolišu, tako i čovjeku. Rizik od mogućeg zagađenja rijeka otpadnim vodama naselja i industrije koje se bez prethodne obrade direktno ispuštaju u vodotoke, zahtijeva ozbiljne planske aktivnosti i mjere kako bi se smanjile negativne posljedice. Pored potrebe sagledavanja kontrolisanog zagađenja, očigledna je potreba sagledavanja obima već nastalog ili predviđanja mogućeg incidentnog zagađenja. Obzirom da su terenska istraživanja često neizvodljiva, bilo zbog ograničenih finansijskih sredstava ili nekih drugih razloga, istraživači često pribjegavaju primjeni numeričkih modela, kao pomoćnom alatu u donošenju konačnih zaključaka.

S tim u vezi, u radu se pokušalo ukazati na značaj očuvanja kvaliteta površinskih voda i mogućnosti primjene numeričkih modela za procjenu sadašnjih i prognozu budućih stanja kvaliteta vode, pogotovo u slučajevima incidentnih zagađenja. Opisani su vidovi transporta zagađenja voda, date su njihove matematičke formulacije, a zatim je na primjeru rijeke Lašve (B&H) korištenjem softverskog paketa HEC - RAS, modeliran kvalitet vode vodotoka. Provedene su numeričke simulacije prostorne i vremenske promjene ključnih parametara kvaliteta vode  $O_2$  i BPK<sub>5</sub>.

Nakon provedene kalibracije i verifikacije modela, simulirano je incidentno zagađenje, te njegov mogući uticaj na kvalitet vode rijeke Lašve. Rezultati numeričkih simulacija pronosa i širenja zagađenja kao i kvaliteta vode primjenom modela HEC-RAS, pokazali su da je njegova primjena itekako opravdana i da se može koristiti kao dobar alat u budućim aktivnostima vezanim za ovu problematiku.

**Ključne riječi:** hidrodinamički model, advekcija i disperzija, incidentno zagađenje, BPK<sub>5</sub>, otopljeni kisik, kvalitet vode, HEC- RAS

### 1. UVOD

Bosna i Hercegovina raspolaže sa značajnim vodnim resursima što predstavlja jedan od bitnih faktora općeg privrednog razvoja. Posebnu vrijednost sa aspekta korištenja voda, imaju izvorišta površinske i podzemne vode. Nažalost, rijeke u Bosni i Hercegovini uglavnom su niskog kvaliteta jer primaju veliki teret zagađenja putem neprečišćenih otpadnih voda naselja i industrije. Samo gornji tokovi svega nekoliko rijeka (Una, Sana, Neretva) imaju uglavnom dobar kvalitet vode. Poražavajući je podatak, da iako je pokrivenost kanalizacionim sistemima u BiH od 30 do 40%, svega 8 općina ima postrojenje za preradu otpadnih voda, koje je u funkciji.

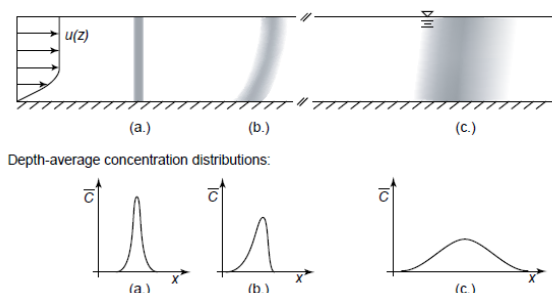
U hidrotehničkoj praksi, vrlo česti su problemi vezani za pouzdano prognoziranje koncentracije zagađenja u rijekama kao posljedice opterećenja rijeka ispuštanjem otpadnih voda industrije i naselja, ali i difuznog zagađenja od poljoprivrednih djelatnosti. Mnogi potencijalni zagađivači direktno ili indirektno ulaze u hidrološki ciklus, pa kvalitet vode zavisi od hidrodinamike transporta, miješanja i hemijsko-biološkog stanja voda u prirodi, te ostalih procesa.

Uzimajući u obzir gore pomenuto cilj rada jeste da se primjenom raspoloživih numeričkih modela implementiranih u sofisticirane softverske pakete simulira pronos i disperzija zagađenja u vodotocima, te procijeni sadašnje i prognozira buduće stanje kvaliteta voda. Rezultati modeliranja i simulacije se nadalje mogu iskoristiti za dugoročno i cjelovito rješavanje problematike očuvanja kvalitete voda vodotoka, a samim tim i okoliša u cjelini.

### 2. TEORETSKE OSNOVE TRANSPORTNIH I FIZIČKO – HEMIJSKIH PROCESA U VODOTOKU

Kod prirodnih vodotoka kod kojih je širina korita znatno veća od srednje dubine vodotoka,  $B \gg H$ , relativno brzo dolazi do vertikalnog miješanja. Početni segment

vodotoka neposredno nizvodno od ispusta na kojem je problem miješanja trodimenzionalan (3D) je vrlo kratak i zanemariv u odnosu na nizvodne segmente na kojima je problem dvodimenzionalan (2D), odnosno nakon postizanja potpunog miješanja u rijeci nastavak analize širenja oblaka zagađenja dovoljno je posmatrati jednodimenzionalnim modelom (1D). Razlog tome je što su gradijenti koncentracije zanemarivo mali u oba poprečna smjera i jedino gradijent koncentracije u smjeru tečenja je znatan i doprinosi daljnjem širenju i putovanju oblaka zagađenja (slike 1 i 2)



Slika 1. Uzdužna disperzija – Raspored koncentracije osrednjene po poprečnom presjeku

Kao što je vidljivo na slici 1, u nekom proizvoljno malom periodu vremena dolazi do širenja trake obilježivača usljed nejednolikog rasporeda brzine po poprečnom presjeku. Osim toga, na širenje obilježivača djelovat će i turbulentna difuzija u sva tri pravca. Raspored osrednjene koncentracije po poprečnom presjeku duž kanala biće, kao na slici, nesimetričan.

Nakon dužeg vremena doći će do rasprostiranja obilježivača po cijelom poprečnom presjeku. Varijacije koncentracije osrednjene po poprečnom presjeku biće izrazite u pravcu toka, tj. x-pravcu, dok će u druga dva pravca biti daleko manje izražene. Zbog ovakvog rasporeda koncentracije, moguće je rasprostiranje obilježivača predstaviti jednodimenzionalnom jednačinom, koja se bazira na veličinama osrednjenim po poprečnom presjeku (brzini  $\bar{u}$  = konst. i  $\bar{c}$  koncentraciji).

Jednačina jednodimenzionalne – uzdužne turbulentne disperzije glasi, [1]:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdje je:

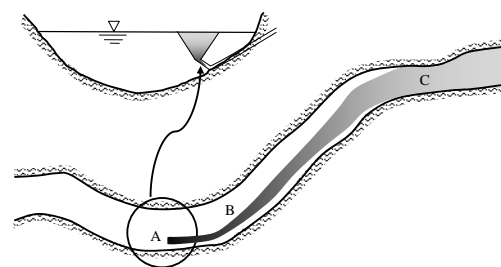
$\bar{c}$  – osrednjena koncentracija po poprečnom presjeku [mg/l];

D – koeficijent uzdužne disperzije [m<sup>2</sup>/sec];

$\bar{u}$  – osrednjena brzina po poprečnom presjeku [m/s];

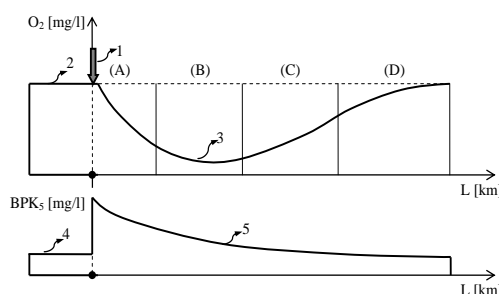
x - udaljenost u pravcu toka, a

t - vrijeme.



Slika 2. Prikaz brzog vertikalnog i sporijeg poprečnog miješanja ispuštenog zagađenja u vodotok

Imajući u obzir gore izloženo, u slučaju da se analiziraju nestabilni (reaktivni) parametri kvaliteta vode kao što su O<sub>2</sub>, BPK<sub>5</sub>, HPK, NO<sub>3</sub>, P, S i sl., njihove koncentracije svakako ne ostaju konstantne prilikom toka nizvodno. U samim vodotocima postoje organizmi koji za svoj opstanak koriste neke od ovih supstanci, pa ih preuzimaju iz vodotoka i time smanjuju koncentraciju istih. Svakako i izmjena sa okolinom usljed turbulentnih tokova uzima značaja, pa nije nužno da količina supstanci koja je upuštena u vodotok izađe iz njega na nizvodnom profilu. Riječ je o sposobnosti vodotoka za samopročišćavanjem, [1].



Slika 3. Područja samopročišćavanja prijemnika

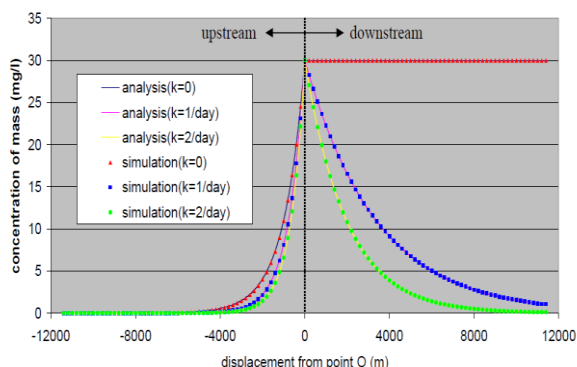
Sve ove pojave opisane su preko „crne kutije“ koeficijenta raspadanja, koji u matematskom smislu može biti i koeficijent proizvodnje određene supstance, ukoliko bi se on tretirao kao ovaj prethodni sa suprotnim predznakom. Prema tome može se zaključiti, da ako je supstanca koja se transportuje podložna biološkoj razgradnji, onda se u jednačini (1) javlja član sa konstantom intenziteta razgradnje prvog reda "K" ,

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -K\bar{c} \quad (2)$$

pa jednačina (1) sada glasi:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} - K\bar{c} \quad (3)$$

gdje je K-koeficijent razgradnje prvog reda, u daljem tekstu označen K<sub>1</sub> [1/T];



Slika 4. Promjena koncentracije duž toka usljed razgradnje

Koeficijent  $K_1$  mijenja se u zavisnosti od temperature, a obično se uzima da je jednak 0,23 pri temperaturi 20°C za organske supstance sadržane u otpadnim vodama naselja. Vrijednost je korektna za prirodni logaritam i jedinicu vremena izraženu u danima, [1].

$$K_1(T) = K_1(20^\circ) \cdot 1,047^{(T-20)} \text{ za } T \text{ u } (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

Tabela 1. Vrijednosti koeficijenta  $K_1$ , dinamike razgradnje za određena opterećenja organskom supstancom

Kvalitet vode	$K_1$ (1/dan)	$L_0$ (mg/l) (BPK - 20°C)
Čiste vode	< 0,1	0 - 1
Površinske vode	0,1 - 0,23	1 - 30
Srednje opterećene komunalne otpadne vode	0,35	150
Vrlo opterećene komunalne otpadne vode	0,40	250
Pročišćene otpadne vode	0,12 - 0,23	10 - 30

Ispitivanja koja su provedena kod nas i u svijetu pokazala su da je vrijednost koeficijenta  $K_1$  ( $\tau$ ), tj. brzina razgradnje u prirodnim uvjetima veća od koeficijenta  $K_1$ , koji se dobiva na osnovu uzoraka vode u laboratorijskim uvjetima, [1]. Određivanje koeficijenta brzine reaeracije  $K_2$  bilo je dugo vremena predmet istraživanja, od teorijskih postavki O'Connor-a i Dobbins-a do empirijskih postavki više autora. Tako se npr. vrijednost  $K_2$  može izraziti preko obrazaca:

$$\text{O'Connor: } K_2 = \frac{12,9u^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

$$\text{Churchill: } K_2 = \frac{11,6u}{H^{1,67}} \quad (6)$$

gdje je :

u - prosječna brzina tečenja u vodnom toku, u (m/s)

H - prosječna dubina vodnog toka, u (m)

Utjecaj temperature na vrijednost koeficijenta  $K_2$  utvrđena je eksperimentalno i može se izraziti sljedećom jednačinom:

$$K_2(T) = K_2(20^\circ) \cdot 1,024^{(T-20)} \text{ za } T \text{ u } (^\circ\text{C}) \quad (7)$$

Tabela 2. Vrijednosti  $K_2$ , dinamike reaeracije u odnosu na vrstu vodene sredine

Vrsta vodene sredine	$K_2$ (1/dan)
Mala jezera, usporene vode	0,1 - 0,23
Velika jezera, spori vodotoci ( $v < 0,10$ m/s)	0,23 - 0,35
Široke rijeke malih brzina ( $0,1 < v < 0,5$ )	0,35 - 0,46
Široke rijeke, norm. brzine ( $0,5 < v < 1,0$ )	0,46 - 0,69
Brze rijeke ( $1,0 < v < 2,0$ m/s)	0,69 - 1,15
Brzotoci, slapovi ( $v > 2,0$ m/s)	>1,15

### 2.1 Koeficijent uzdužne turbulentne disperzije

Kod primjene numeričkih modela transporta važnu ulogu imaju koeficijenti disperzije. Dijagrami za određivanje koeficijenata disperzije koji se mogu naći u literaturi, ali i vrijednosti koeficijenata koji su određeni iz mjerenja na brojnim rijekama u svijetu i objavljeni u stručnim časopisima, pokazuju da koeficijenti disperzije mogu varirati u relativno širokim granicama. Za određivanje njihovih tačnih vrijednosti trebalo bi provesti odgovarajuća terenska mjerenja (traser test).

Mnoge teorijske i empirijske formulacije su predložene za određivanje uzdužnog koeficijenta disperzije. U nastavku je dat pregled empirijskih izraza za proračun koeficijenta uzdužne turbulentne disperzije razvijenih i predloženih od strane pomenutih autora.

Tabela 3. Pregled empirijskih izraza za određivanje koeficijenta uzdužne disperzije baziranim na hidrauličkim parametrima toka

Fischer et.al. (1975)	$D = 0,011 \frac{B^2 U^2}{u_* H} \quad (8)$
Seo i Cheong (1998)	$D = 5,915 \left(\frac{B}{H}\right)^{0,620} \left(\frac{U}{u_*}\right)^{1,428} (Hu_*) \quad (9)$
Deng (2001)	$D = \frac{0,15}{8\varepsilon_{r0}} \left(\frac{B}{H}\right)^{5/3} \left(\frac{U}{u_*}\right)^2 (Hu_*) \quad (10)$
	$\varepsilon_{r0} = 0,145 + \left(\frac{1}{3520}\right) \left(\frac{B}{H}\right)^{1,38} \left(\frac{U}{u_*}\right)$

Kashefipour i Falconer (2002):	
$D = 10,612 \cdot HU \frac{U}{u_*}$	(11)
Tayfur (2009)	
$D = 0,91Q + 9,94$	(12)
Sahay i Dutta (2009)	
$D = 2 \left( \frac{B}{H} \right)^{0,96} \left( \frac{U}{u_*} \right)^{1,25} Hu_*$	(13)

gdje je: D - koeficijent uzdužne disperpije; B – širina vodnog lica; H– dubina vode; S – pad linije energije; Q- protok; U– srednja brzina u poprečnom presjeku i  $u_*$  - smičuća brzina data izrazom:

$$u_* = \sqrt{RSg} \quad (14)$$

gdje je: R – hidraulički radijus (m)

### 3. NUMERIČKO MODELIRANJE KVALITETA VODE VODOTOKA

Bez obzira o kojoj vrsti nauke se govori, matematički model u obliku jedne ili više diferencijalnih jednačina predstavlja opis nekog stvarnog, realnog i nadasve složenog procesa u prirodi. Većina takvih matematičkih modela nije analitički riješiva pa je potrebno pribjeći numeričkom rješavanju uz pomoć računara. Numerički model je računarski alat koji iterativnim rješavanjem relativno jednostavnih matematičkih jednačina, koje lokalno aproksimiraju diferencijalne jednačine, nastoji opisati posmatrani fizički proces.

U ovom radu se istražuje i opisuje numerički model strujanja kroz korito prirodnog vodotoka. Proces izrade od prirodnog sistema do odgovarajućeg modela sadrži različite korake, gdje svaki korak zavisi od prethodno izvršenog koraka. Prvi korak kod izrade je postavljanje konceptualnog modela, gdje se matematskim izrazima opisuje fizikalna pojava koja se želi modelirati. Slijedeći korak je formulacija konceptualnog modela sa matematičkim izrazima, odnosno izrada matematičkog modela (jednačine toka, pronosa, početni i granični uslovi).

U slučaju kada jednostavnije, analitičke metode ne odgovaraju uslovima u prirodi, odnosno ukoliko je za neki složeni sistem nemoguće izvesti analitički izraz, koriste se numeričke metode pa govorimo o numeričkom modelu. Nakon uspostave i razrade modela slijedi kalibracija i verifikacija modela.

U svijetu postoji bogato iskustvo u matematičkom modeliranju pojava nestacionarnog tečenja, te transporta

zagađenja i kvalitete vode u otvorenim vodotocima. Osnovu za spomenuta modeliranja čine komercijalni programski paketi, koji su svoju primjenu našli širom svijeta. Zadnjih godina razvijeni su dosta pouzdani numerički modeli koji daju dosta kvalitetne procjene procesa miješanja i širenja zagađenja te kvalitete vode. Riječ je o Danskom modelu MIKE 11, te o američkim modelima WASP5, QUAL2E, SIMCAT, SOBEK, TOMCAT, TELEMAC, HEC 5Q, HEC RAS, QUASAR, AQUASIM, DESERT, ISIS, idr. (Cox, B.A. 2003), [3].

U ovom radu je za modeliranje hidrodinamičkih i transportnih procesa te kvaliteta vode rijeke Lašve korišten 1D numerički model HEC – RAS. Ovaj model propagira oblak zagađenja uzimajući u obzir osim advekcije i disperzije i koeficijent odumiranja supstance koja se transportira uslijed hemijskih ili fizičkih procesa transfera mase u rijeci.

#### 3.1 HEC – RAS

HEC –RAS je softverski paket koji se koristi pri proračunu jednodimenzionalnog tečenja u otvorenim tokovima. Proračunom može da se obuhvati sistem otvorenih tokova (prirodnih vodotoka i vještačkih kanala) sa objektima na njima (mostovski stubovi, brane, propusti, odvodni kanali idr.).

Razvijen je u Hidrološkom Razvojnem Centru (Hidrologic Engineering Centar – HEC), koji je dio Instituta za Vodne Resurse (Institute for Water Resources).

HEC-RAS programski paket sadrži četiri komponente jednodimenzionalne riječne analize, koje koriste iste geometrijske podatke za proračun. Te komponente su:

- analiza stacionarnog stanja
- analiza nestacionarnog stanja
- analiza transporta riječnog nanosa
- ispitivanja kvaliteta voda

Model transporta zagađenja (WQ-Water Quality model) koristi QUICKEST-ULTIMATE (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms, Leonard, 1979, Leonard, 1991) eksplicitnu numeričku shemu za rješavanje jednodimenzionalne advektivno dispresne jednačine očuvanja mase rastvorenih ili suspendovanih materija. Ulazni podaci za WQ model su izlazni podaci HD modela kao i podaci o količini i kvalitetu otpadnih voda koje se ispuštaju, ali i riječnih voda [2].

## 4. PRIMJENA MODELA NA RIJEKU LAŠVU

### 4.1 Opis područja

Lašva je rijeka u srednjoj Bosni (BiH) i lijeva je pritoka Bosne. Lašva nastaje od dvije "Lašvice", Karaulske i Komarske, koje se spajaju u Turbetu. Izviru na Radalj-planini i Komar-planini. Lašva dalje protječe kroz Travnik, od zapada prema istoku, a zatim i kroz Vitez, a nakon ukupno 49,4 km, Lašva se južno od Zenice kraj sela Lašve ulijeva u rijeku Bosnu. Ima porječje površine 949,7 km<sup>2</sup>. Dolina rijeke Lašve (uobičajen je naziv: Lašvanska dolina) se proteže od jugoistočnih padina planine Vlašić (iznad Travnika) do Busovače. Ova se dolina formirala na 390 – 480 m nadmorske visine. Od Sutjeske Lašve poslije Travnika, pa do Sutjeske prije Kaonika, Lašvansko polje dugo je oko 17 km, a širina mu je različita i iznosi prosječno 3 km.

Zbog važnog geografskog položaja, dolina Lašve je uvijek bila frekventna prometnica, koja prirodno spaja dolinu Bosne na istoku, sa Vrbaskom dolinom na zapadu. Tako je i danas, iako kvaliteta prometnica danas ne odražava u potpunosti važnost ovog prometnog pravca.

### 4.2 Ulazni podaci i postavka modela

Računsku oblast modela predstavlja rijeka Lašva nizvodno od naselja Kaonik, odnosno oko 6,0 km uzvodno od ušća u rijeku Bosnu (slika 5). Proračunska dionica sadrži jedan segment vodotoka sa 20 poprečnih profila. Za formiranje računске oblasti strujanja korištene su sljedeće podloge i podaci:

- Digitalizirane geodetske podloge (orto-foto snimci) u inundacijama u razmjeri 1:1000 i snimljeni poprečni profili duž toka rijeke Lašve na potezu od 0+000 do 5+295 m.
- Osmotreni hidrološki podaci (proticaji i vodostaji), kao i podaci o kvalitetu vode na vodomjernoj stanici Merdani, koja se nalazi na udaljenosti 2,2 km od ušća rijeke Lašve, odnosno između profila P9 i profila P 10 (slika 5).

Pri analizi pronosa zagađenja i kvaliteta vode u rijeci Lašvi primijenjen je metodološki pristup koji uključuje kalibraciju i verifikaciju modela vezanih za procjene postojećih stanja i simulaciju budućih stanja - incidentno zagađenje (hipotetski primjer). Metodologija modeliranja koja se primijenila u ovome istraživanju može se podijeliti u tri (3) dijela kako slijedi:

1. Modeliranje hidrodinamičkih procesa (kalibracija i verifikacija hidrodinamičkog modela);

2. Modeliranje transportnih procesa i kvaliteta vode (kalibracija i verifikacija transportno-kvalitativnog modela);
3. Simulacija incidentnog zagađenja vode rijeke Lašve opasnim supstancama ispuštenim u vodotok u periodu malih voda.

Za primjenu modela HEC-RAS, definirane su geometrijske, hidrauličke, hidrološke i kvalitativne karakteristike analiziranog segmenta vodotoka, kao i količine te dinamika ispuštanja zagađivača. Za modeliranje kvaliteta vode odabrani su nestabilni parametri (podložni procesima razgradnje) BPK<sub>5</sub> i O<sub>2</sub> kao ključni parametri kvaliteta.



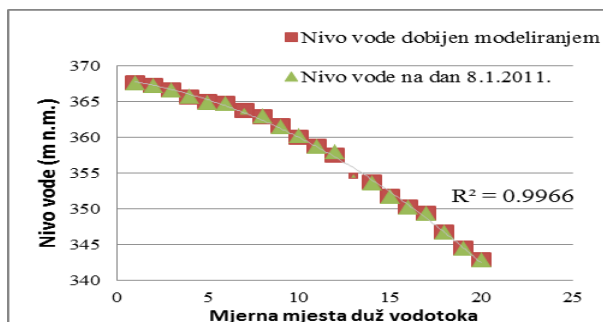
Slika 5. Shematski prikaz razmatrane dionice rijeke Lašve, sa naznačenim profilima, lokacijom VS, te lokacijom buduće fabrike i izvorišta

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

### 5.1 Kalibracija i verifikacija modela

Kalibracija modela obuhvaćena ovim radom odnosi se na definiranje vrijednosti koeficijenata hrapavosti, koeficijenata disperzije, te vrijednosti relevantnih koeficijenata razgradnje organske materije i obogaćivanja vode kisikom iz atmosfere. Tokom sprovedenih simulacija vršena je prvo kalibracija koeficijenata hrapavosti upoređivanjem proračunatih i osmotrenih proticaja vode na VS Merdani. Koeficijenti hrapavosti su tarirani duž toka i po visini poprečnog presjeka sve dok se nije dobilo dobro slaganje proračunatih i osmotrenih vrijednosti. Pošto u proračun nisu posebno unošeni objekti na toku, koeficijenti hrapavosti obuhvataju i lokalne otpore tih objekata (mostova idr.). Najbolje slaganje izmjerenih i izračunatih nivoa vode bilo je za koeficijent hrapavosti koji se za glavno korito kretao od vrijednosti  $n \approx 0,02-0,045 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ , a za inundacije  $n \approx 0,045-0,055 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ . Za verifikaciju HD modela koristili su se podaci o proticaju na VS Merdani za dan 8.1.2011.godine.





Slika 6. Kalibracija HD modela-uporedni prikaz simuliranih i mjerenih nivoa vode na 20 osmatračkih mjesta duž razmatrane dionice,  $Q=18 \text{ m}^3/\text{s}$

Nakon kalibracije i verifikacije hidrodinamičkog modela, izvršena je kalibracija transportno kvalitativnog modela. Modelom su tarirani koeficijent uzdužne disperzije, koeficijent razgradnje organske materije i koeficijent reeracije sve dok se nije dobilo približno slaganje proračunatih/ simuliranih i osmotrenih koncentracija modeliranih parametara. Kalibracija modela provedena je na osmotrene podatke kvaliteta vode na profilu VS Merdani za 9.9.2009. godine, kada je proticaj iznosio  $Q=4,1 \text{ m}^3/\text{s}$  (tabela 6). Koeficijenti disperzije dobijeni kalibracijom kreću se u rasponu od 10,0-30,0 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] osrednjeni po potezima razmatrane dionice, a koeficijenti razgradnje prvog reda dobiveni kalibracijom kreću se u granicama od 0,5 – 1,5 1/dan, što odgovara vodotocima kakva je rijeka Lašva (brdski vodotok sa izrazitom turbulencijom). Početne vrijednosti koeficijenata disperzije pri kalibraciji modela, dobijene su na osnovu empirijskih obrazaca (tabela 5). Verifikacija transportno-kvalitativnog modela (tabela 7) urađena na osnovu podataka o kvalitetu vode na VS Merdani za dan 8.1.2011.

Tabela 4. Hidrauličke karakteristike toka r. Lašve – rezultati kalibriranog HD modela

Profil	B	H	A	R	S	U	Q	U*
	m	m	$\text{m}^2$	m		m/s	$\text{m}^3/\text{s}$	m/s
P4820	18,4	0,5	8,4	0,5	0,001	0,5	4,1	0,07
P2230	16,3	0,4	6,8	0,4	0,002	0,6	4,1	0,09

Tabela 5. Proračunati koeficijenti disperzije za rijeku Lašvu po empirijskim formulama raznih autora

Profil	Koeficijent uzdužne disperzije D					
	Fischer	Seo i Cheng	Deng	Falc.	Tayf.	Sah.
	$(\text{m}^2/\text{s})$					
P 4820	27,68	30,15	29,54	16,69	13,67	25,29
P 2230	28,78	32,89	32,19	18,34	13,67	27,41
D <sub>red</sub>	28,23	31,52	30,86	17,52	13,67	26,35

Tabela 6. Poređenje parametara kvaliteta na VS Merdani/kalibracija modela: (1) Mjereni podaci za 9.9.2009., (2) Rezultati dobijeni modeliranjem

Parametri kvaliteta	O <sub>2</sub>	BPK <sub>5</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
(1)	8.4	2.3	0.072	2.06
(2)	8.480	2.270	0.0713	2.041

Tabela 7. Poređenje parametara kvaliteta na VS Merdani/verifikacija modela: (1) Mjereni podaci za 8.1.2011., (2) Rezultati dobijeni modeliranjem

Parametri kvaliteta	O <sub>2</sub>	BPK <sub>5</sub>	NO <sub>3</sub>
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
(1)	11.6	0.98	1.2
(2)	11.460	0.780	1.090

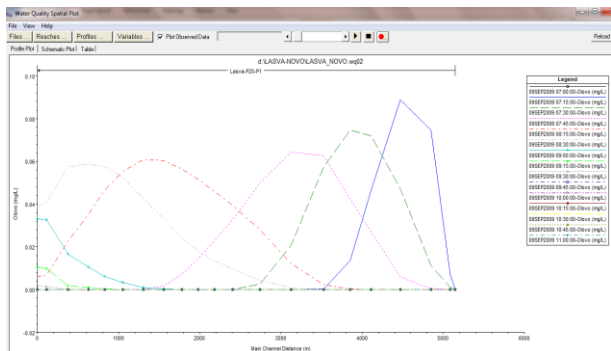
## 5.2 Simulacija incidentnog zagađenja

Nakon sprovedene kalibracije i verifikacije numeričkog modela urađena je i simulacija incidentnog zagađenja (hipotetski primjer). Za procjenu budućeg stanja kvalitete vodotoka, te utjecaja ispuštenih otpadnih voda, mjerodavne su male vode rijeke Lašve ( $Q_{\text{min}}=4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Naime, pojavom većih protoka dolazi do razrjeđivanja koje ima pozitivan učinak na stanje kvalitete vodotoka. U nastavku istraživanja simulirano je buduće stanje kvalitete vode rijeke Lašve u periodu malih voda i to za slučaj iznenadnog i nekontroliranog trenutnog ispuštanja otpadnih voda.

Pretpostavljeno je iznenadno i nekontrolirano ispuštanje tehničke otpadne vode opterećene olovom mase 600 gr. Ispust otpadne vode je lociran na profilu P 20 (5+295 km), a oko 2190 m nizvodno na stacionaži 3+105 m nalazi se potencijalni zahvat vode.

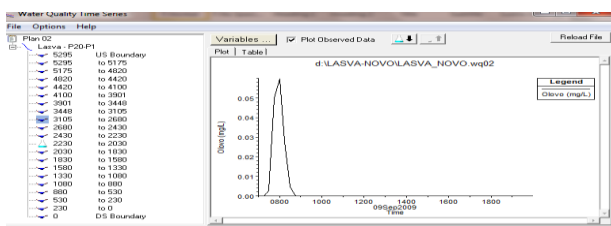
Rezultati simulacije incidentnog zagađenja dati su na slikama 7, 8 i 9. Na slici 7 se može uočiti nagli porast koncentracije olova (max. 0,0887 mg/l), da bi nakon toga imali ponovo pad koncentracije. Naime, najveća koncentracija olova iznosi 0,0887 mg/l i javlja se na stacionaži 4+820, i to 15 minuta nakon ubacivanja otpadnih voda u vodotok. Najveća koncentracija olova na profilu 3+105 se javlja nakon 60 min i iznosi 0,059 mg/l, što je iznad MDK za vodotoke I – II klase kvalitete.

Usporedbom krivih vrijeme - koncentracija može se uočiti utjecaj disperzije na veličinu maksimalne koncentracije u zavisnosti od udaljenosti od mjesta upuštanja, kao i potrebno vrijeme putovanja oblaka zagađenja do razmatranog profila (zahvata), (slika 7).



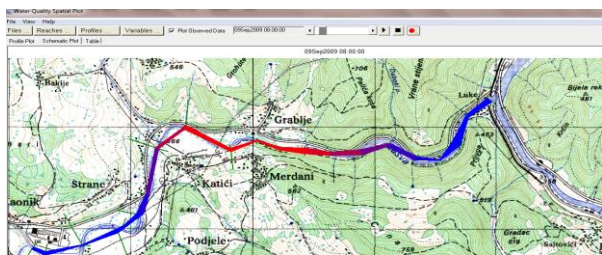
Slika 7. Prostorna i vremenska promjena zagađivala

Za analizirane granične i početne uvjete i za protok od  $Q=4,1 \text{ m}^3/\text{s}$  oblak zagađenja prođe analiziranu dionicu vodotoka u vremenu od dva i pol sata. Na slici 8 dat je grafički prikaz koncentracije zagađivala na profilu vodozahvata, u vremenu maksimalne koncentracije.



Slika 8. Prikaz rezultata modeliranja-koncentracija zagađivala na profilu vodozahvata nakon 1 h

Na slici 9 je dat situativni prikaz promjene koncentracije zagađivala u rijeci Lašvi na razmatranom potezu, 60 minuta nakon ispuštanja otpadnih voda.



Slika 9. Shematski prikaz položaja zagađivala nakon 60 minuta od njegovog ubacivanja u vodotok

## 6. ZAKLJUČCI

U radu je prikazana primjena jednodimenzionalnog numeričkog modela HEC – RAS u analizi transporta zagađenja u vodotocima pri trenutnom (incidentnom) ispuštanju zagađivala u rijeku Lašvu.

Na osnovu rezultata numeričkih simulacija može se zaključiti: (i) Numeričkim modelom HEC-RAS simuliran je pronos ispuštenog zagađenja duž toka rijeke Lašve, te pojedina stanja kvaliteta vode. (ii) U sklopu provedenih simulacija izvršena je kalibracija i verifikacija modela (simulacija postojećeg stanja), te simulacija incidentnog zagađenja. (iii) Na tačnost rezultata kalibracije najviše utiču ulazni podaci (teret zagađenja, količina i sastav otpadne vode, mjesto i način upuštanja, karakteristike prijemnika idr.), zatim vjerodostojnost procijenjenih parametara modela, struktura (složenost) modela i na kraju kvalitet kalibracije. (iv) Za bilo koji odabrani parametar kvaliteta vode moguće je dati procjenu njegove koncentracije i time odrediti kategorizaciju rijeke s obzirom na odabranu supstancu. (v) Uspostavljeni (kalibrirani i verifikovani) numerički model rijeke Lašve može poslužiti kao osnova za prognozu incidentnih zagađenja u razmatranom slivnom području i preduzimanje neophodnih mjera u njihovom saniranju.

Osim geometrijskih i hidrauličkih parametara modela, posebno je naglašena uloga koeficijenta disperzije za kalibraciju adveksijsko - disperznog modela. Ovdje su uzete njihove vrijednosti iz literature koji odgovaraju terenskim mjerjenjima na rijekama sličnih karakteristika kao rijeka Lašva i na osnovu raspoloživih empirijskih izraza. Međutim, za bolju procjenu koeficijenta disperzije potrebno bi bilo sakupiti ili provesti traserska ispuštanja te provesti mjerenja koncentracija u poprečnim presjecima. Takođe je važno napomenuti da je za primjenu opisanih modela neophodno imati kvalitetna mjerenja svih zagađenja koji ulaze u vodotok, kako po intenzitetu tako i u vremenu. Ta se mjerenja prvenstveno trebaju odnositi na opterećenje, a ne na koncentraciju. Isključivo mjerenje koncentracije može biti relativnog karaktera i ne dati pravu sliku opterećenja vodotoka. Simultano mjerenje protoka i kvaliteta vode u rijeci vrlo je važna komponenta za dobro upravljanje vodnim resursima. Međutim, važno je napomenuti da, i za zaštitu vode i vodenih ekosistema, kao i za projektiranje i odlučivanje o uređajima za prečišćavanje voda, najvažnija informacija ovisi o opterećenju koje se definira kao protok mase zagađivala ( $\text{mg/s}$ ), a ne o klasičnoj rezidentnoj koncentraciji ( $\text{mg/l}$ ). Europska okvirna direktiva o vodama je zato veliku pažnju skrenula na ovu činjenicu i u skoro svim smjernicama naglašava da jedino podaci o opterećenju vodnih resursa izraženi u masi neke supstance po vremenu mogu biti adekvatno mjerilo za donošenje pravilnih odluka o upravljanju riječnim slivovima.

## LITERATURA

- [1] Bandić, H. (2012): "Analiza primjene numeričkih modela za simulaciju pronosa zagađenja u otvorenim vodotocima", Magistarski rad, fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu
- [2] Lazović, N., Milišić, H., Hadžić, E., Lozančić, Ž.: "Modeliranje transporta zagađenja na potezu rijeke Lašve", 44. Konferencija o korištenju i zaštiti voda – VODA 2015, Zbornik radova, Srpsko društvo za zaštitu voda i Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2 – 4 juni 2015, Kopaonik - Srbija
- [3] Milišić H., Kalajdžisalihović H., Jaćimović N. (2012): „Numeričko modeliranje i simulacija transporta zagađenja Neretvom“, Vodoprivreda 44, 199-206

## ONE-DIMENSIONAL WATER QUALITY MODELING OF RIVER LAŠVA

by

Emina HADŽIĆ, Hata MILIŠIĆ, Nerma LAZOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering University of Sarajevo, BiH

## Summary

Pollution of rivers and environmental disasters poses a significant threat to the natural environment, as well as human. The risk of possible pollution of rivers by wastewater of settlements and industries that without treatment directly discharged into watercourses, serious planning activities and measures to minimize the negative consequences requires. In addition to consideration of the needs of controlling pollution, there is an obvious need to consider the scope of the already formed or predictions of possible accidental pollution. Since the field research often unfeasible, either due to limited financial resources or other reasons, researchers often use the application of numerical models, as well as additional tool in making final conclusions.

In this regard, the present paper is aimed to point out the importance of maintaining the quality of surface water and the possibilities of using numerical models to estimate the present and forecast the future state of water quality, especially in cases of incidental

pollutions. Described the modes of transport of water pollution, given their mathematical formulation, and then the example of the Lašva river (B & H) using the software package HEC - RAS, modeled by the water quality of watercourses. The paper also presents the results of numerical simulation of spatial and temporal variability of key water quality parameters  $O_2$  and  $BOD_5$ . The first was performed calibration, and verification of the model, then the model is simulated (predicted) incidental pollution and its possible impact on water quality of the river Lašva. Results of numerical simulation of contaminant transport and the spread of pollution and water quality using the model HEC-RAS, showed that its application is very reasonable and can be used as a good tool for future activities related to this issue.

Keywords: hydrodynamic model, advection and dispersion, incidental pollution,  $BOD_5$ , dissolved oxygen, water quality, HEC- RAS

Redigovano 20.11.2015.