

## OCJENA SAMOPREČIŠĆAVAJUĆE SPOSOBNOSTI RIJEKE NERETVE PRIMJENOM MATEMATIČKOG MODELA KVALITETA VODE

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

### REZIME

Nepoznavanje izvora zagađenja, kvantiteta i kvaliteta otpadnih voda, uticaja na recipijente kao i veoma nizak stepen prečišćavanja urbanih otpadnih voda predstavlja ozbiljan problem u oblasti zaštite životne sredine. Glavni indikator za predviđanje čistoće rijeka jeste njen samoprečišćavajući kapacitet. Kako su rijeke kontinuirano izložene zagađenju, dolazi do pogoršanja kvaliteta voda i one postepeno počinju da gube svoju sposobnost samoprečišćavanja.

Kompleksna pojava samoprečišćavanja, tj. transformacije tereta zagađenja pod uticajem niza hidroloških i bioloških faktora prisutnih u vodotoku je predmet intenzivnog proučavanja. Izrađen je niz matematičkih modela, počev od najjednostavnijeg Streeter – Phelps modela pa do puno složenijih modela pomoću kojih se uz veća ili manja pojednostavljena pokušalo reproducirati prirodne uslove, tj. predvidjeti promjene sadržaja kisika i BPK duž toka izazvanih procesom autopurifikacije kao i drugim biološkim, hemijskim i fizičkim procesima koji se javljaju u vodnim tokovima [1].

Cilj ovog rada bio je procjena uticaja organskog zagađenja i nutrijenata na kvalitet vode i asimilativni kapacitet organske materije u rijeci Neretvi na području grada Mostara. Za procjenu kapaciteta samoprečišćavanja odabrana je dionica nizvodno od HE Mostar do MP Bačevići. Koeficijenti deoksigenacije (K1) i reaeracije (K2) su utvrđeni i testirani u rijeci Neretvi tokom perioda malih voda.

Simulacija pronosa zagađenja i procesa prečišćavanja izvršena je korišćenjem numeričkog modela MIKE 11. Rezultati modeliranja rastvorenog kiseonika i biološke potrošnje kiseonika, kao i nutrijenata dobro se slažu sa mjerenim vrijednostima, što ukazuje na prevalenciju deoksigenacije ugljenika zbog nitrifikacije i takođe

pokazuje važnost prirodne reakcije kao dio procesa prečišćavanja. Može se zaključiti da su matematički modeli koji se koriste za simuliranje kvaliteta vode i procesa samoprečišćavanja vodnih tijela važna sredstva za podršku efikasnom upravljanju vodnim resursima.

**Ključne riječi:** samoprečišćavanje, BPK<sub>5</sub>, otopljeni kisik, nutrijenti, kvalitet vode, model MIKE 11

### 1 UVOD

Vode su bez obzira na porijeklo ili tip veoma kompleksan sistem, promjenljiv u fizičkom, hemijskom ili pak biološkom pogledu. Već sama prirodna sredina (atmosfera, biosfera) mijenja osobine voda, tome treba dodati utjecaj živih organizama, pa i djelovanje čovjeka koji sve više narušava, a često i ruši prirodnu ravnotežu u njima. Sve vode u prirodi imaju sposobnost da do određene mjere uklanjaju zagađenja unijeta u njih, sve dok se ponovno ne postigne njihova prethodna ravnoteža fizičkih, hemijskih i bioloških osobina. Ova se sposobnost vode naziva samoprečišćavanje ili autopurifikacija vode, a odvija se zbog djelovanja mikroorganizama [1][3]. Proces samoprečišćavanja (autopurifikacije) ovisi o: - sastavu i brojnosti vodenih biocenoza - hidrodinamičkim uvjetima (protok, brzina toka, dubina vode) - vremenskim i klimatskim uvjetima (godišnje doba, hladna ili topla podneblja) - fizikalnim osobinama (temperatura i boja vode) - hemijskim osobinama (koncentracija otopljenog kisika) [3]. U povoljnim se uvjetima samoprečišćavanjem većina zagađenja unijeta u vodu uklanja. Za proces samoprečišćavanja najvažnija je prisutnost kisika i mikroorganizama u vodi. Međutim, neke materije u otpadnim vodama (pesticidi, fenoli, deterdženti, teški metali) onemogućuju samoprečišćavanje djelujući inhibitory ili vrše razaranje mikrobiološke aktivnosti u vodi. Prisutnost ulja ili nafte u vodi, koja na površini vode stvara sloj tankoga filma - onemogućava

prozračivanje vode i utječe na sadžaj kisika u vodi. Za povećavanje samoprečišćavanja vode često se na vodotocima grade kaskade čime se povećava aeracijska sposobnost vodotoka [1].

Asimilacija zagađenih materija obavlja se u vodotocima posredstvom biohemijskih procesa. Ključnu ulogu u tim procesima ima hidrodinamička struktura toka. Konvekcijom se zagađenje prenosi niz tok, a razblaženje zagađenja se obavlja posredstvom turbulentne difuzije i disperzije[1][3].

Riječni tok je živa ekološka sredina, koja sadrži brojne organizme koji međusobno utječu jedni na druge. Biohemijsko dejstvo ovih organizama obezbjeđuje razgradnju „nekonzervativne materije” organskog porijekla. Na taj način se ostvaruje samoprečišćavanje rijeke kao ekološkog sistema. Ta sposobnost vodotoka je ključni faktor za kvalitet vode[3].

Za održavanje biohemijskih reakcija je neophodna energija. Osnovni izvor energije za žive organizme je otopljeni kisik. Koncentracija otopljenog kisika je osnovni parametar kvaliteta vode i indikator biohemijske aktivnosti. Ova koncentracija je u korelaciji sa produktima te aktivnosti, kao što su ugljendioksid, amonijak, nitriti, nitrati itd. Pored toga, za opstanak živih organizama (riba, krustaca i dr.) neophodna je određena (minimalna) koncentracija otopljenog kisika. U nastavku se detaljnije razmatra pitanje kvaliteta riječne vode, pri čemu se biohemijsko zagađenje tretira isključivo na osnovu bilansa otopljenog kisika u vodotoku [3].

## 2 ISPUŠTANJE OTPADNIH VODA U PRIJEMNIKE – VODOTOKE

### 2.1 Osobine prijemnika

U pogledu ispuštanja otpadnih voda u prijemnike od temeljne važnosti su sljedeće dvije skupine njihovih osobina:

- hidrološke i hidrauličke osobine,
- fizikalne, hemijske, biološke i bakteriološke osobine.

Ispuštanjem otpadnih voda u prijemnike dolazi do promjene vrijednosti ovih pokazatelja, odnosno do promjene svojstava prijemnika. Promjena je toliko izraženija koliko je niži stepen prečišćavanja otpadnih voda. Prema tome, možemo zaključiti da je osnovni problem sadržan u tome što se s otpadnim vodama

ispuštaju i znatne količine razgradivih otpadnih materija, čime se osjetno povećava potrošnja otopljenog kisika iz prijemnika [1].

Dodatno, kisik troši vodna flora i fauna, uključujući i mikroorganizme (prvenstveno bakterije) koji u isto vrijeme konzumiraju kisik i organsku tvar kojom se hrane. Dakle, ispuštanjem otpadnih voda u prijemnike može doći do osjetnog smanjenja otopljenog kisika, a u ekstremnim situacijama može i sasvim nestati, tako da u krajnjem slučaju dolazi do potpunog izumiranja akvatičnog života. Zato se u prijemnicima javlja tendencija obnavljanja kisika (iz zraka i procesom fotosinteze). Međutim prisutstvo (plivajućih) mineralnih ulja i tvrdih deterdženata, te koloidnih i lebdećih materija u vodi znatno umanjuje oksigenaciju [1][3]. Obnavljanje kisika takođe usporavaju i otpadne vode s povišenom temperaturom, jer je kisik slabije topiv u toplijoj nego u hladnijoj vodi [3].

Nezagađeni prijemnici u načelu sadržavaju količinu otopljenog kisika koja približno odgovara saturacijskoj vrijednosti. Ispuštanjem otpadnih voda opterećenih organskim materijama u takav prijemnik doći će (zbog djelovanja mikroorganizama) do postupnog smanjenja otopljenog kisika u vodi. Ako su količine otpadnih voda i organskih materija u njima male u usporedbi s količinom vode (protokom) u prijemniku, onda će u prijemniku biti dovoljno otopljenog kisika za aerobnu razgradnju organske materije, odnosno neće doći do poremećaja prirodnih osobina prijemnika. Međutim, kod aerobnog stanja u prijemniku i dalje će postojati bakteriološka zagađenost koja predstavlja potencijalnu opasnost po zdravlje ljudi (ako prethodno nije izvršena dezinfekcija efluenta) [1][3].

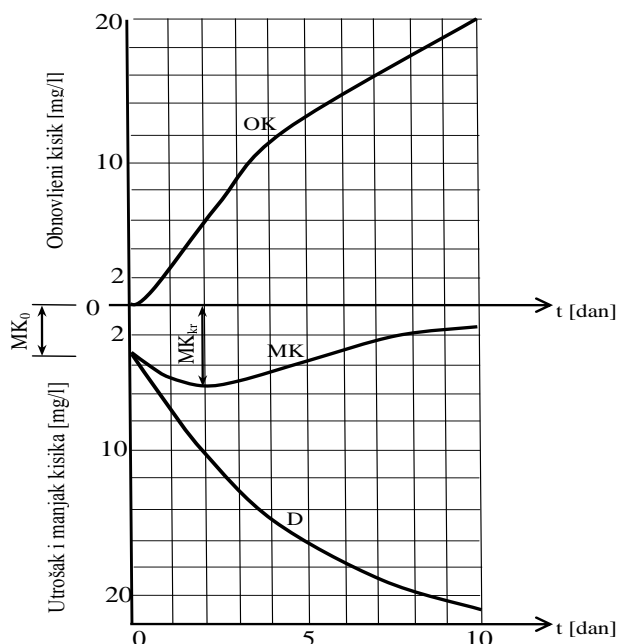
U recipijentima u kojima količina otopljenog kisika nije dovoljna za proces aerobne razgradnje doći će do anaerobnih procesa, odnosno do truljenja, pojave neugodnih mirisa i sl. Prema tome, količina otopljenog kisika predstavlja temeljni kriterij čistoće, odnosno onečišćenja (zagađenja) prijemnika.

Primjer odnosa otopljenog kisika u prijemniku i vremena ispuštanja otpadnih voda u prijemnik grafički je prikazan dijagramom na sljedećoj slici (Slika 1) [1].

### 2.2 Uticaj zagađenja na prijemnik

Zagađenje predstavlja svaku fizikalnu, biološku ili hemijsku promjenu u kvaliteti voda koja štetno djeluje na žive organizme ili čini vodu neupotrebljivom za

željenu namjenu. Različite materije koje se nalaze u otpadnim vodama različito štetno utiču na vode i time zagađuju vode prijemnika.

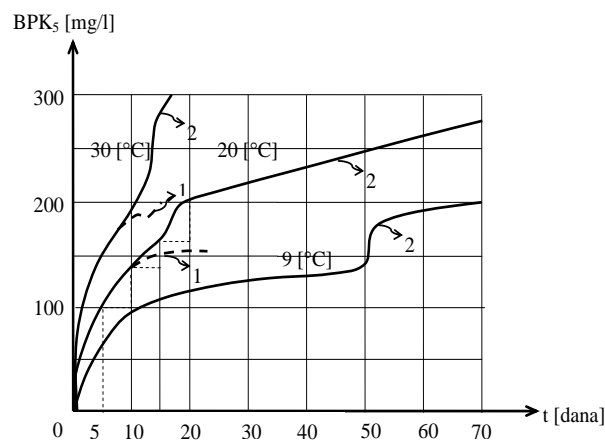


Slika 1. Dijagram otopljenog kisika u prijemniku u funkciji vremena

OK – krivulja obnavljanja kisika; MK0 – početno manjak kisika; D – krivulja deoksigenacije (MK0 + BPK); MK – krivulja manjka kisika (OK – D); MKcr – kritični manjak kisika [1]

U standardnim prilikama većinu zagađenja otpadnih voda (posebno komunalnih), predstavljaju organske materije za čiju se razgradnju troši otopljeni kisik iz vode. Prema tome, stepen zagađenja otpadnih voda organskom materijom u direktnoj je vezi s količinom kisika potrebnom za oksidaciju, odnosno razgradnju te materije. Količina kisika potrebna da se razgradi biološki razgradiva organska materija u vodi posredstvom aerobnih mikroorganizama naziva se biohemijska potrošnja kisika (BPK).

Radi kvantificiranja opterećenja otpadnih voda organskom materijom za praktične potrebe je uveden pokazatelj petodnevnne biohemijske potrošnje kisika BPK<sub>5</sub>. Ako bi se potrošnja kisika prikazala kumulativnom krivom u funkciji vremena, dobio bi se dijagram kao na sljedećoj slici (Slika 2) [1].



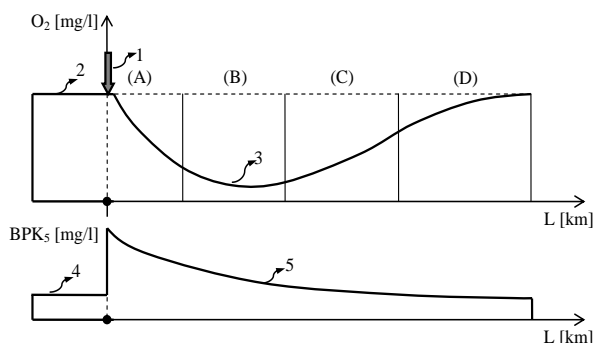
Slika 2. Dijagram biokemijske potrošnje kisika za tri različite temperature vode 1 – prva faza; 2 – druga faza

### 3 SAMOPREČIŠĆAVAJUĆA SPOSOBNOST PRIJEMNIKA

Samoprečišćavanje – autopurifikacija vode označava sve fizikalne, hemijske i biohemijske procese koji utiču na količinu, sastav i svojstva otpadnih materija u vodenim sredinama. Sve otpadne vode naselja se nakon skupljanja putem jednog ili više glavnih ispusta upuštaju u prijemnik otpadnih voda, najčešće otvoreni vodotok. Najveći dio tereta zagađenja ovih otpadnih voda je organskog porijekla, iz čega proizilazi da je kod proračuna uvjeta upuštanja otpadnih voda u vodotoke sa prirodnim režimom toka od primarnog značaja pitanje autopurifikacione moći tih vodnih tokova. U toku samoprečišćavanja u vodenoj sredini dolazi do razgradnje otpadnih materija do njihovog odstranjivanja prirodnim putem. Biološkim putem se odstranjuju uglavnom prirodne organske otpadne materije, dok industrijski otpad teško nestaje iz neprečišćenih voda.

Proces samoprečišćavanja je vezan za metabolizam mikroorganizama koji svojim enzimima razgrađuju organske materije, međutim, u slučaju većeg zagađivanja, ovaj postupak ne može u potpunosti omogućiti održavanje površinskih voda u prirodnom stanju. Idealno rješenje bi bilo kada bi recipijenti prihvatili već prečišćene vode, bar do onog stepena koji ne bi ugrozio korisnike sistema u njima [1][2].

Na sljedećoj slici (Slika 3) dat je šematski prikaz područja samoprečišćavanja prijemnika [2].



Slika 3. Područja samoprečišćavanja prijemnika [2]

A – područje zagađenja; B – područje razgradnje; C – područje oporavka; D – područje čiste vode; 1 – ispuštanje otpadnih voda; 2 – početno stanje otopljenog kisika; 3 – krivulja otopljenog kisika u prijemniku; 4 – početno stanje BPK; 5 – krivulja BPK

Na osnovu prethodnog, jasno je, da je osnovni indikator čistoće, odnosno zagađenja vode jednog vodotoka rastvoreni kisik, koji je i najvažniji parametar za definiranje moći samoprečišćavanja. Zato je, prije svega, neophodno znati:

- količinu kisika koju vodotok nosi sa sobom,
- količinu kisika koju vodotok može da usvoji iz vazduha i
- količinu kisika koju stvaraju vodene biljke pod dejstvom sunčeve svjetlosti.

Sadržaj rastvorenog kisika je dalje uvjetovan dinamikom, količinom i kvalitetom upuštene otpadne vode zagađivača. Složeni proces samoprečišćavanja u vodotoku odvija se u četiri faze, odnosno zone [2]: degradacije, razlaganja, oporavka i zona čiste vode, od kojih svaku karakteriše određeni kvalitet vode, što je opet uvjetovano prisustvom, odnosno odsustvom kisika.

Kompleksna pojava autopurifikacije, tj. transformacije tereta zagađenja pod utjecajem niza hidroloških i bioloških faktora prisutnih u vodotoku je predmet intenzivnog proučavanja. Izrađen je niz matematskih modela pomoću kojih se uz veća ili manja pojednostavljenja pokušalo reproducirati prirodne uvjete, tj. predvidjeti promjene sadržaja kisika i BPK duž toka izazvanih procesom autopurifikacije kao i drugim biološkim, hemijskim i mehaničkim procesima koji se javljaju u vodnim tokovima [1].

Relativno lako utvrđivanje prosječne vrijednosti deficita kisika duž vodnog toka, tj. promatranja autopurifikacione sposobnosti vodotoka tokom

vremena, uvjetovala su da su prvi matematski modeli, koji predstavljaju razvoj procesa autopurifikacije, bili zasnovani na proračunu deficita kisika.

Pri definiranju matematskih modela pretpostavljeno je da na proces razgradnje u vodnom toku utječu sljedeći faktori [1]:

- koncentracija zagađenja i otopljenog kisika opada usljed djelovanja mikroorganizama koji u procesu razgradnje troše kisik iz vode;
- brzina potrošnje kisika je proporcionalna količini prisutnih organskih materija;
- veličina zagađenja može se smanjiti i usljed taloženja ili adsorpcije u tlu, kod čega je brzina smanjenja proporcionalna njegovoj koncentraciji;
- zagađenje se može povećati i iz nekontroliranih izvora zagađenja duž toka, neovisno od veličine zagađenja u toku;
- otopljeni kisik opada konstantnom brzinom usljed dodatne potrošnje od strane taloga na dnu korita vodotoka, a povećava se usljed procesa fotosinteze i doprinosa vodenih biljaka.

Izmjena plinova između vode i atmosfere vrlo je bitna. Veličina izmjene ovisi o temperaturi vode, otopljivosti plinova, te parcijalnom pritisku plina u atmosferi. Transfer kisika iz atmosfere u vodu ovisi o razlici između zasićenosti vode plinom pri određenoj temperaturi i trenutnoj koncentraciji [1][6]:

$$\frac{dC}{dt} = (C_s - C) K_a \quad (1)$$

gdje je:

$C_s$  - koncentracija zasićenosti plinom pri određenoj temperaturi

$C$  - koncentracija plina u trenutku izmjene plina

$K_a$  - koeficijent transfera plina

Koeficijent  $K_a$  zavisi od temperature, veličine rubne površine između plinovite i tekuće faze, te o otporu prijelaza iz jedne u drugu.

Deficit kisika  $D$  je :

$$D = C_s - C \quad (2)$$

Promjena deficita kisika tokom vremena (uz pretpostavku da je  $C_s$  konstanta u promatranom razdoblju) će biti [1]:

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{dC}{dt} \quad (3)$$

Ako je početna organska materija u vodi izražena kao BPK, označen sa  $L_0$ , tada će se u vremenu  $t$  razgraditi:

$$Y = L_0 - L_t \quad (4)$$

Promjena potrošene organske materije (kao BPK) tokom vremena tada iznosi:

$$\frac{dY}{dt} = -\frac{dL_t}{dt} \quad (5)$$

Uz pretpostavku da je razgradnja organske materije mikroorganizmima reakcija prvog reda, tada je razgradnja organske materije proporcionalna raspoloživoj organskoj materiji [6]:

$$\frac{dL_t}{dt} = -K_1 L_t \quad (6)$$

Na izloženim pretpostavkama su STREETER i PHELPS 1925. godine napravili prvi matematički model bilansa kisika koji glasi [6]:

$$\frac{dY}{dt} = -\frac{dC}{dt} \quad \text{ili} \quad \frac{dY}{dt} = \frac{dD}{dt} \quad (7)$$

Nakon uvrštavanja dobije se:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L_t \quad (8)$$

Slijedi da je promjena deficita kisika  $D$ , reakcija prvog reda i da je proporcionalna nerazgrađenoj organskoj materiji. Postupak razgradnje organske materije i otapanja kisika iz atmosfere (reaeracija) događaju se istovremeno i mogu se povezati sljedećom jednačinom:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L_t - K_2 D \quad (9)$$

gdje je:

$D$  - deficit kisika u vodnom toku u vremenu ( $t$ ) nizvodno od jednog kontinuiranog izvora zagađenja organskim teretom u (mg/l)

$L$  - preostali BPK u vodotoku nakon vremena ( $t$ ), u (mg/l)

$K_1$  - koeficijent brzine potrošnje kisika, u (1/dan)

$K_2$  - koeficijent brzine reaeracije kisika, u (1/dan)

Jednačina se zasniva na pretpostavci da do smanjenja sadržaja BPK i kisika duž vodnog toka, dolazi samo posredstvom bakterijske oksidacije organskih materija, dok se obnavljanje kisika odvija putem reaeracije preko površine vodnog lica. Takođe je pretpostavljeno da je brzina potrošnje kisika neovisna od koncentracije kisika u vodnoj masi, tj. da koeficijent brzine potrošnje kisika ima konstantnu vrijednost koja je jednaka  $K_1 = 0,23$ .

Gornja jednačina pokazuje da je brzina promjene deficita kisika  $dD/dt$  jednaka sumi potrošnje kisika putem BPK bez reaeracije  $dD/dt = K_1(L_0 - Y)$ , a da je

brzina adsorpcije kisika usljed reaeracije u odsutnosti BPK jednaka  $dD/dt = -K_2 D$  ili

$$\frac{dD}{dt} = K_1(L_0 - Y) - K_2 D \quad (10)$$

gdje je:

$L_0$  - BPK prve faze, u (mg/l)

$Y$  - BPK zadovoljena u vremenu  $t$ , u (mg/l)

Integracijom gornje jednačine između graničnih vrijednosti, a na mjestu zagađenja ( $Y=0, t=0$ ), dobije se jednačina [5][6]:

$$D_t = \frac{K_1 \cdot L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \quad (11)$$

gdje je:

$D_t$  - deficit kisika u vremenu  $t$ , (mg/l)

$D_0$  - početni deficit kisika na mjestu ispusta otpadne vode u vremenu  $t = 0$ , (mg/l)

Jednačina se može koristiti za dobivanje bilo koje tačke na krivoj deficita kisika. Minimum otopljenog kisika (najveći deficit) javlja se u vremenu  $t_{krit}$ . U toj tački krivulja kisika ima minimum, odnosno  $dD/dt = 0$  [5][6].

$$D_{krit} = \frac{K_1}{K_2} L_0 \cdot e^{-K_1 t_{krit}} \quad (12)$$

$$t_{krit} = \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \left[ \frac{K_2}{K_1} \left( 1 - \frac{D_0 (K_2 - K_1)}{K_1 \cdot L_0} \right) \right] \quad (13)$$

gdje je:

$t_{krit}$  - kritično vrijeme (dan)

Za rješavanje prethodnih jednačina neophodno je odrediti konstante  $K_1$  i  $K_2$ . Konstanta  $K_1$ , konstanta brzine potrošnje kisika, utvrđuje se analizom vode na biohemijisku potrošnju kisika. Konstantu brzine reaeracije,  $K_2$ , teže je odrediti jer zavisi od hidrološko-hidroloških faktora koji karakterišu hidrološki režim vodotoka [1][2].

Odnos ova dva koeficijenta definira **koeficijent samoprečišćavanja** [1][5]  $f = \frac{K_2}{K_1}$  (14)

Uz srednju brzinu vodotoka  $v$ , tačka najvećeg deficita kisika bit će od ispusta udaljena [1][5][6]

$$x_{krit} = t_{krit} \cdot v \quad (15)$$

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] [2].

$$K_1(T) = K_1(20^\circ) \cdot 1,047^{(T-20)} \text{ za } T \text{ u } (^\circ\text{C}) \quad (16)$$

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
Prečišćene otpadne vode	0,12 - 0,23	10 - 30

Određivanje koeficijenta brzine potrošnje kisika ( $K_1$ ) se obično odnosi na određivanje  $K_1$  iz serije uzoraka riječne vode i različit je od stvarne vrijednosti  $K_1$  ( $r$ ) u prirodnim uslovima toka. Proračun koeficijenta brzine potrošnje kisika u vodotoku  $K_1(r)$  jedino se može izračunati pomoću bilansa kisika na dva ili više mjernih profila na kojima se uzimanje uzoraka vrši u dovoljno čestim vremenskim intervalima. Uz poznavanje srednjeg vremena toka između dva mjerna profila, koeficijent  $K_1(r)$  može se izračunati pomoću jednačine [1]:

$$K_1(r) = \frac{1}{t} \log \frac{L_{uzv}}{L_{niz}} \quad (17)$$

gdje je:

$t$  - srednje vrijeme toka na posmatranom potezu (dana)

$L_{niz}$  - BPK<sub>5</sub> na nizvodnom profilu (mg/l)

$L_{uzv}$  - BPK<sub>5</sub> na uzvodnom profilu (mg/l)

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 [1][2]:

$$\text{O'Connor: } K_2 = \frac{12,9u^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

$$\text{Churchill: } K_2 = \frac{11,6u}{H^{1,67}} \quad (19)$$

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 [1][2]:

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

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

Jednačina STREETER-a i PHELPS-a [5][6] ne može se primijeniti u mnogim vodnim tokovima, naročito onim sa sporim tokom, gdje postoje procesi sedimentacije ili adsorpcije, difuzije djelomično razgrađenih materija prethodno istaloženih na dnu, povećanja sadržaja kisika usljed fotosintetičkog djelovanja planktona i kontinuiranih promjena sadržaja BPK i kisika usljed djelovanja uzdužne disperzije.

#### 4 MODELIRANJE KVALITETA VODE I SAMOPREČIŠĆAVAJUĆEG KAPACITETA RIJEKE NERETVE

##### 4.1 Opis područja

Analizirajući rijeku Neretvu kao jednu od najvećih i najznačajnijih rijeka na njezinu toku kroz Bosnu i Hercegovinu, uočavaju se pojedine dionice vodotoka znatno više opterećene otpadnim materijama. Područje od posebnog interesa je srednji tok Neretve kojem gravitira urbano područje grada Mostara i njegove okoline. Trenutno ispuštanje neprečišćenih otpadnih i oborinskih voda na promatranom području, sistemski zagađuje riječni tok Neretve u koju se ulijevaju svi mali i veliki tokovi kao i bujice sa okolnih planina [1][4].

Sadašnje direktno izlivanje neprečišćenih otpadnih voda u rijeku Neretvu ima ozbiljne dugoročne posljedice na ekosistem rijeke kao i na osjetljive močvare u njenom donjem toku. Smanjenje količine nutrijenata je od posebnog značaja za zaštitu rijeke i ekosistema močvara. Ako se nastavi izlivanje neprerađenih otpadnih voda u rijeku, opterećenje nutrijentima će se povećati, te će rijeka i močvare biti izložene eutrofikaciji tj. gubitku kisika. Unatoč ovakvim uslovima, kvalitet vode u rijeci Neretvi i dalje je u II klasi, stim da povremeno spadne i u III klasu, u vrijeme ljetnih sušnih mjeseci [1][4]. Prema postojećim planovima za zaštitu voda predviđena je izgradnja centralnog uređaja za prečišćavanje otpadnih voda

kojima bi se smanjio ukupni unos otpadnih materija u rijeku Neretvu (u toku je izgradnja I faze UPOV) [1].

Racionalno rješenje cjelokupne komunalne vodoprivredne problematike na širem području grada Mostara zahtjeva i razmatranje stanja, odnosno asimilacionog kapaciteta rijeke Neretve - prijemnika otpadnih voda, iz čega treba da proistekne i režim zaštite kvaliteta vodotoka.

#### 4.2 Numerički model MIKE 11

Numerički model MIKE 11 omogućuje analizu hidrodinamičkih, transportnih i ekoloških parametara u riječnim sistemima i njime je moguće ostvariti numeričke simulacije nestacionarnog i stacionarnog strujanja. Ovaj model propagira oblak zagađenja uzimajući u obzir osim advekcije i disperzije još jedan značajan proces, a to je koeficijent odumiranja supstance koja se transportira usljed hemijskih ili fizikalnih procesa transfera mase u rijeci. Detalji o primijenjenim numeričkim formulacijama [1] za model MIKE 11 mogu se naći u literaturi.

##### 4.2.1 Modeliranje kvalitete vode (BOD – DO model sa nutrijentima) u modelu MIKE 11

Modeliranje kvalitete vode u modelu MIKE 11 može se raditi na različitim nivoima složenosti (nivo modela od 1 do 6). U ovome radu za modeliranje kvaliteta vode izabran je nivo **modela 4**. Na ovom nivou modelirana je temperatura, a koncentracije otopljenog kisika ( $O_2$ ), biohemijske potrošnje kisika ( $BPK_5$ ), amonijuma ( $NH_4-N$ ) i nitrata ( $NO_3$ ) su izračunate uzimajući u obzir advekciju – disperziju i najvažnije fizičke, hemijske i biološke procese. To znači da BOD – DO model obuhvata sljedeće procese: reaeraciju, raspad prvog reda, resuspenziju, BOD sedimentaciju, te nitrifikaciju i denitrifikaciju [1].

##### Modeliranje temperature

Temperatura se računa kao razlika između ulazne solarne energije u toku dana i gubitka energije usljed emitirane toplote zračenja, odnosno [1]:

$$\frac{dT}{dt} = I_s - I_r \quad (21)$$

gde je: T - temperatura, t je vrijeme,  $I_s$  je ulazna solarne energija i  $I_r$  je izlazni gubitak toplote.

##### Modeliranje otopljenog kisika $O_2$

Model otopljenog kisika (DO model), u proračun uključuje procese fotosinteze, respiracije, reaeracije,

razgradnje BPK i nitrifikaciju i broj procesa ovisi od nivoa modela koji je pokrenut. Model otopljenog kisika na nivou 4 četiri može da se napiše kako slijedi [1] [4]:

$$\frac{dC}{dt} = P_{(t)} - R + K_a(C_s - C) - K_{BOD}L - \alpha K_{nit}[NH_4]^{e_4} - K_{SOD} \quad (22)$$

gdje je: C – koncentracija otopljenog kisika (mg  $O_2/l$ ),  $C_s$  – koncentracija saturisanog kisika (mg  $O_2/l$ ),  $K_a$  – koeficijent reaeracije (1/dan),  $K_{BOD}$  – koeficijent razgradnje  $BPK_5$  (1/dan), L – koncentracija  $BPK_5$ ,  $\alpha$  je iznos kisika koji se koristi u pretvaranju jedinice mase amonijuma u nitrata u procesu nitrifikacije,  $K_{nit}$  – koeficijent nitrifikacije (1/dan),  $NH_4$  – je koncentracija amonijuma,  $e_4$  – je koeficijent koji opisuje ovisnost koncentracije amonijuma od procesa nitrifikacije,  $K_{SOD}$  – je koeficijent sedimentacije otopljenog kisika.

Koeficijent reaeracije se može izračunati koristeći formule Thyssen et al. (1987) i O'Connor and Dobbins (1958), ili Churchill et al. (1962). Alternativno, mogu se koristiti mjerene vrijednosti ili neka druga formula [1].

##### Modeliranje biokemijske potrošnje kisika $BPK_5$

Modeliranje biohemijske potrošnje kisika  $BPK_5$  na nivou četiri u sklopu (WQ) modela kvaliteta vode uključuje biološku oksidaciju ili degradaciju i resuspenziju, odnosno [1][4]:

$$\frac{dL}{dt} = -K_{BOD}L - K_{set}BPK + K_{sus} \quad (23)$$

gdje je:  $K_{set}$  – koeficijent raspadanja BPK koji se zadržao na dnu,  $K_{sus}$  – koeficijent resuspenzije, BPK – koncentracija BPK koja se zadržala na dnu vodotoka. Koeficijent raspadanja organske materije izražene preko BPK računa se prema sljedećem izrazu [1][4]:

$$K_{BOD} = K_1L \frac{C^2}{K_2 + C^2} \theta_{BOD}^{(T-20)} \quad (24)$$

gdje je:  $K_1$  – je koeficijent oksidacije BPK, C - je koncentracija otopljenog kisika,  $K_2$  je koeficijent reaeracije i  $\theta_{BOD}$  - temperaturni koeficijent utjecaja.

##### Modeliranje amonijuma ( $NH_4$ ) i nitrata ( $NO_3$ )

U modelu MIKE 11 ciklus kruženja dušika obuhvata procese nitrifikacije i denitrifikacije. Prema tome, jednačina koja opisuje transformaciju amonijuma glasi

$$\frac{d[NH_4]}{dt} = -K_{nit}[NH_4]^{e_4} - \alpha_3P + \alpha_4R \quad (25)$$

gdje je:  $\alpha_3$  – je količina amonijuma po jedinici mase proizvedenog kisika u procesu fotosinteze,  $\alpha_4$  – je

količina amonijuma po jedinici mase potrošenog kisika u procesu respiracije.

Jednačina transformacije nitrata glasi [1]:

$$\frac{d[NO_3]}{dt} = K_{nit} [NH_4]^{e_4} - K_{denit} [NO_3]^{e_6} \quad (26)$$

gdje je:  $NO_3$  – koncentracija nitrata,  $K_{den}$  – koeficijent denitrifikacije i  $e_6$  – koeficijent koji karakterizira ovisnost koncentracije  $NO_3$  od denitrifikacije.

Svi koeficijenti u prethodnim jednačinama su dati za temperaturu  $T = 20^\circ C$ , pa se moraju korigovati sa temperaturnim koeficijentom  $\theta$  koji je nešto veći od 1. U narednoj tabeli date su vrijednosti temperaturnih koeficijenata.

Tabela 3: Vrijednosti temperaturnih koeficijenata za koeficijente razgradnje/produkcije [1]

Koeficijent (1/dan)	razgradnje/produkcije	Temperaturni koeficijent
$K_{BOD}(t) = K_{BOD}(20^\circ C) \theta_{BOD}^{(T-20)}$		$\theta = 1,047$
$K_a(t) = K_a(20^\circ C) \theta_a^{(T-20)}$		$\theta = 1,024$
$K_{nit}(t) = K_{nit}(20^\circ C) \theta_{nit}^{(T-20)}$		$\theta = 1,100$
$K_{denit}(t) = K_{denit}(20^\circ C) \theta_{denit}^{(T-20)}$		$\theta = 1,135$

### 4.3 Uspostava i razvoj numeričkog modela

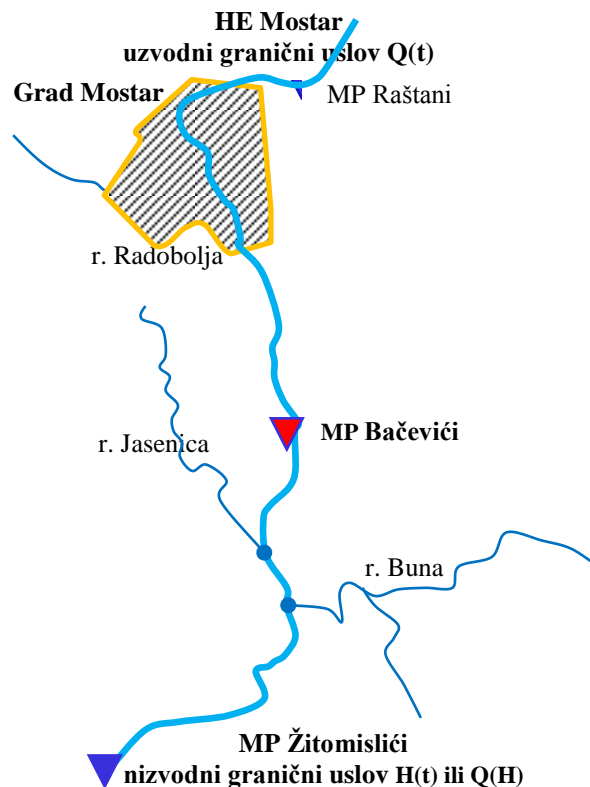
Razmatrano područje, na koje je primijenjen model MIKE 11, nalazi se u srednjem toku rijeke Neretve nizvodno od HE Mostar do MP Žitomislji. Ukupna dužina razmatrane dionice iznosi cca 26,0 km. Numerički model uključuje i pritoke rijeke Neretve na razmatranoj dionici: Radobolju, Jasenicu i Bunu kao bočne dotoke [1][4].

Za primjenu modela MIKE 11, 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)  $BPK_5$  i otopljeni kisik kao ključni parametri kvaliteta. Pored kiseoničkog režima ( $BPK_5$  i  $O_2$ ) modelirani su takođe i nutrijenti (amonijum i nitrati) [1].

Prema tome, modeliranje kvaliteta vode obuhvaćeno ovim radom odnosi se prvenstveno na definiranje vrijednosti relevantnih koeficijenata razgradnje organske materije i obogaćivanja vode kisikom otapanjem iz atmosfere te koeficijenata nitrifikacije i

denitrifikacije koji će biti mjerodavni za simulacije (prognozirane) budućih stanja [1].



Slika 4. Situativni prikaz računске dionice r. Neretve [1][4]

### 4.4 Rubni uvjeti za kalibraciju WQ modela

Kao ulaz u model kvaliteta vode (WQ) korišteni su rezultati prethodno kalibriranog i verificiranog HD modela kao i rezultati kalibracije AD modela, odnosno tarirani koeficijent hrapavosti "n" i koeficijent uzdužne disperzije "D". Za kalibraciju WQ modela korišteni su podaci o simultanom mjerenju proticaja i koncentracijama biohemijske potrošnje kisika, otopljenog kisika, amonijaka i nitrata te temperature na dva mjerna profila na rijeci Neretvi (Raštani i Bačevići) u periodu od 28.06. – 30.06.1979.god. [1][4]. Raspored razmatranih profila uzorkovanja odgovara potrebama modela za procjenu prijemnog kapaciteta rijeke Neretve nizvodno od grada Mostara. Mjerni profil Raštani osigurava podatke potrebne za definiranje ulaznih rubnih uvjeta u model, dok su podaci s mjernog profila Bačevići poslužili za kalibraciju modela u postojećem stanju. Kalibracija WQ modela provedena je tariranjem



koeficijenta razgradnje organske materije, reaeracije, nitrifikacije i denitrifikacije, sve dok se nije dobilo približno dobro slaganje mjerenih i simuliranih (modeliranih) vrijednosti pokazatelja kvaliteta [1][4].

Rubni uvjeti za kalibraciju WQ modela dati su na uzvodnom mjernom profilu Raštani (HE Mostar) kao vremenske serije modeliranih parametara, a na nizvodnom profilu (MP Žitomislići) je data konstantna vrijednost i iznosi nula (open transport).

Početna vrijednost temperature usvojena je 12°C, dok početne vrijednosti za ostale pokazatelje kvaliteta iznose:  $O_2 = 10,5$  mg/l,  $BPK_5 = 1,2$  mg/l,  $NH_4 = 0,04$  mg/l i  $NO_3 = 0,15$  mg/l. Doprinos pritoka Radobolje i Bune dat je takođe preko vremenskih serija protoka i svih razmatranih pokazatelja kvaliteta kao bočni dotok (point source). Prosječna vrijednost proticaja u rijeci Neretvi u periodu mjerenja iznosila je  $Q = 120, 0$  m<sup>3</sup>/s.

Pored rubnih uvjeta koji se odnose na kvantitativno – kvalitativne karakteristike rijeke Neretve u model su na lokacijama tačkastih ispusta (Carinski most u Mostaru i ušće Jasenice) unešeni i podaci o količini i kvalitetu ispuštene otpadne vode [1][4].

Tabela 4: Teret zagađenja i količina otpadne vode koja se ispušta u rijeku Neretvu[1]

Područje obuhvata	Lokacija tačkastog ispusta	EBS	Teret zagađenja (kg/dan)	$Q_{otp.vode}$ (l/s)
Grad Mostar (uže urbano područje) + (industrija)	Carinski most	100.000	5.400	471
Južna kotlina	Ušće Jasenice	10.000	540	34

U narednoj tabeli date su osrednjene koncentracije zagađujućih materija u otpadnoj vodi na mjestima tačkastih ispusta u rijeku Neretvu.

Tabela 5: Osrednjene vrijednosti koncentracija zagađujućih materija u otpadnoj vodi koja se ispušta u rijeku Neretvu[1]

Lokacija tačkastog ispusta	T (°C)	El.prov. ( $\mu$ S/cm)	$BPK_5$ (mg/l)	$O_2$ (mg/l)	$NH_4$ (mg/l)	$NO_3$ (mg/l)
Carinski most	16	3000	133	3	5	35
Ušće Jasenice	15	2350	184	5	7	50

## 5 REZULTATI I DISKUSIJA

Tokom kalibracije AD/WQ modela upoređivane su simulirane i mjerene koncentracije  $O_2$ ,  $BPK_5$ ,  $NH_4$  i  $NO_3$  na MP Bačevići. Kalibracijom AD modela dobijene su vrijednosti koeficijenata disperzije koje se kreću u rasponu od 130 – 280 m<sup>2</sup>/s, osrednjene za pojedine dionice razmatrane računске oblasti. Koeficijenti razgradnje dobiveni kalibracijom WQ modela, kreću se u rasponu od 0,5 – 1,5 1/dan, što odgovara vodotocima kakva je rijeka Neretva (brdski vodotok sa izrazitom turbulencijom), dok se koeficijent reaeracije kreće u prosjeku oko 2,0 1/dan. Koeficijenti nitrifikacije dobiveni kalibracijom kreću se u rasponu od 0,5 – 0,7 1/dan, a koeficijenti denitrifikacije u rasponu od 0,5 – 1,0 1/dan. Kako samoprečišćavajući kapacitet vodotoka predstavlja odnos koeficijenata  $K_a/K_{BPK}$  može se procijeniti da se on kreće u granicama od 2,0-3,0 te se može zaključiti da rijeka Neretva ima izrazito dobru samoprečišćavajuću sposobnost.

Kako postoji veoma veliki broj faktora koji utječu na stvaranje/razgradnju modeliranih parametara kiseoničkog režima ( $BPK_5$  i  $O_2$ ) kao i nutrijenata ( $NH_4$  i  $NO_3$ ) praktično je bilo nemoguće obezbijediti toliki broj eksperimentalnih podataka koji bi opisali iste, te nije bilo moguće izvršiti precizno tariranje transportno - kvalitativnog modela. Na grafikonima (slika 5) se jasno uočavaju ta odstupanja. Statističkom analizom mjerenih i simuliranih vrijednosti parametara kvaliteta vode došlo se do sljedećih koeficijenata korelacije (Tabela 6.).

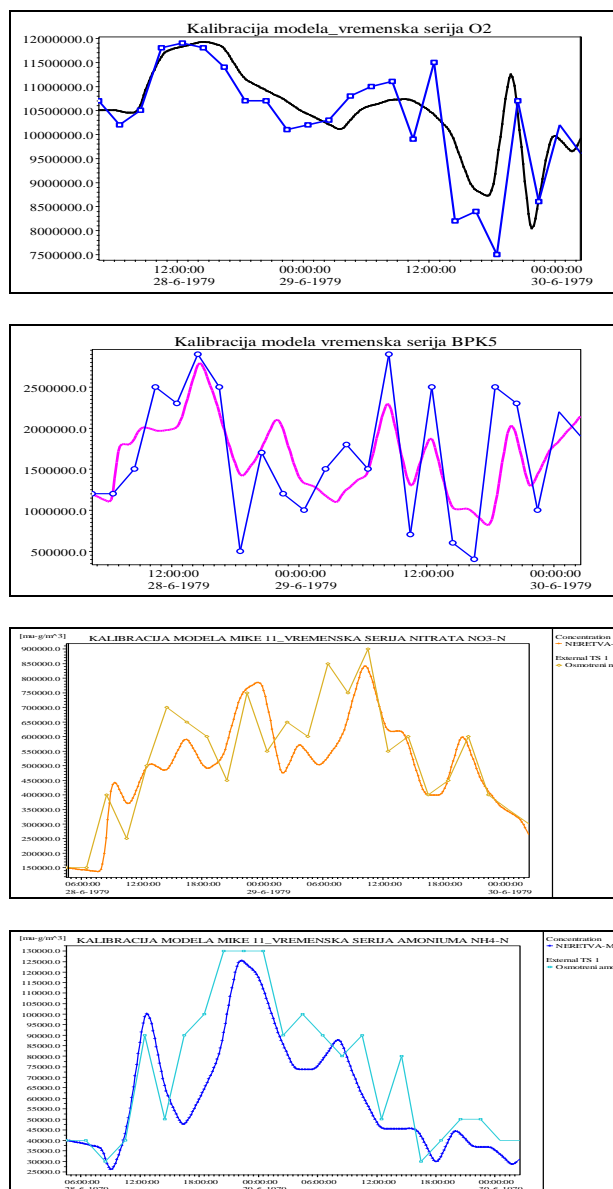
Tabela 6: Koeficijenti korelacije između mjerenih i simuliranih (modelskih) vrijednosti parametara[1]

Pokazatelj	Koeficijent korelacije $R^2$
$O_2$ [mg/l]	0,658
$BPK_5$ [mg/l]	0,512
Amonijum [mg/l]	0,756
Nitrati [mg/l]	0,712

U narednoj tabeli date su vrijednosti koeficijenata na osnovu kojih je provedena kalibracija WQ modela.

Tabela7: Vrijednost koeficijenata dobivenih kalibracijom WQ modela Mike 11[1]

Stacinaža	$K_{BPK}$ (1/dan)	$K_a$ (1/dan)	$K_{nit}$ (1/dan)	$K_{den}$ (1/dan)
72463.13	0.50	1,5	0.7	1,0
66680.00	1,0	2,5	0,6	0,8
58790.00	1,50	3,0	0,5	0,7
52354.00	1,0	2,5	0,5	0,5
46800.96	0,50	1,5	0,5	0,5
Globalna vrijednost	1,0	2,0	0,6	0,7



Slika 5. Uporedni prikaz mjerenih i modeliranih parametara kvaliteta vode ( $O_2$ ,  $BPK_5$ ,  $NO_3$  i  $NH_4$ ) na MP Bačevići [1][4]

## 6 ZAKLJUČAK

Određivanje samoprečišćavajuće sposobnosti brdskih vodotoka kao što je rijeka Neretva predstavlja određenu specifičnost. Brdski vodotoci su karakterizirani malom količinom vode pri kritičnim proticajima, malom dubinom vode u koritu i izrazitom turbulencijom koja omogućava brzu adsorpciju. Zbog relativno niske temperature u ovim vodotocima, a naročito usljed velike

turbulencije toka, obnavljanje potrošenog kisika vrši se veoma brzo tako da je zasićenost kisikom na granici saturacije, a često i iznad nje.

U ovom radu je uspostavljen i provjeren (kalibriran i validiran) numerički model toka, transporta i kvaliteta vode rijeke Neretve implementiran u softverski paket MIKE 11. Kalibracija modela kvaliteta vode (WQ) provedena je na osmotrene podatke u periodu od 28.06.-30.06. 1979.god. na mjernom profilu Bačevići. Modelirani su otopljeni kisik  $O_2$ , temperatura, amonijum, nitrati i biohemijska potrošnja kisika  $BPK_5$ .

Kalibracija WQ modela provedena je tariranjem koeficijenta koji su karakteristični za pomenute procese ( $K_{BPK}$ ,  $K_a$ ,  $K_{nit}$ ,  $K_{den}$ ) sve dok se nije dobilo dobro slaganje simuliranih i mjerenih krivih. Promjena koncentracije  $BPK_5$  duž razmatranog poteza, ima nagli porast koncentracije na mjestima tačkastog ispusta otpadne vode u Mostaru, a nizvodno niz tok se uočava pad koncentracije usljed odumiranja (razgradnje) organske materije, odnosno samoprečišćavajuće moći rijeke Neretve. Rezultati numeričkog modeliranja pronosa i širenja zagađenja u rijeci Neretvi primjenom modela MIKE 11 su pokazali da je njegova primjena itekako opravdana i da se može koristiti kao dobar alat u budućim aktivnostima vezanim za ovu problematiku.

## LITERATURA

- [1] Bandić, H.: "Analiza primjene numeričkih modela za simulaciju pronosa zagađenja u otvorenim vodotocima", Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2012.
- [2] Hadžić, E., Milišić, H., Lazović, N.: "Jednodimenzionalno modeliranje kvaliteta vode rijeke Lašve", VODOPRIVREDA Vol. 47 (2015).
- [3] Jovanović, M.: "Regulacija reka - Rečna hidraulika i morfologija", Beograd, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2008.
- [4] Milišić H., Kalajdžisalihović H., Jaćimović N.: „Numeričko modeliranje i simulacija transporta zagađenja Neretvom“, Vodoprivreda Vol. 44 (2012).
- [5] Omole, D.O., et al. "Study of Auto Purification Capacity of River Atuwara in Nigeria", International Journal of Engineering and Technology, Volume 2.
- [6] Streeter, H.W. and Phelps, E.B. (1925). A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. Public Health Bulletin No 146, Public Health Service, Washington DC, 1925.

## ASSESSMENT OF AUTOPURIFICATION CAPACITY OF RIVER NERETVA USED BY THE MATHEMATICAL MODEL OF WATER QUALITY

by

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

### Summary

Not knowing the source of pollution, quantity and quality of wastewater, the impact on the recipients, and the very low degree of urban waste water treatment is a serious problem in the field of environmental protection. The main indicator for predicting the purity of the river is its self-purifying capacity. As the rivers are continuously exposed to pollution, water quality deteriorates, and they gradually begin to lose their self-purification ability. The complex self-purification phenomenon, i.e. the transformation of the pollution load under the influence of a series of hydrological and biological factors present in the watercourse is the subject of intensive study. A many of mathematical models have been developed, starting from the simplest Streeter - Phelps model and to a much more complex model that tried to reproduce natural conditions, with greater or lesser simplification, predict changes in the oxygen content and BOD along streams caused by the process of self-purification as well as other biological, chemical and physical processes occurring in watercourses. The aim of this paper was to assess the impact of organic pollution and nutrients on water

quality and the assimilative capacity of organic matter in the Neretva River in the area of the city of Mostar. In order to assess the capacity of self-purification, a study area is selected downstream from HPP Mostar to sampling station Bačevići. The coefficients de-oxygenation (K1) and re-aerations for the stream (K2) were determined and tested in the Neretva River during the period of small water. Simulation transport processes of pollution and self-purification, was performed using the numerical model MIKE 11. The results of modeling dissolved oxygen and biological oxygen demand, as well as nutrients, agree well with measured values, indicating the prevalence of carbon dioxide depletion due to nitrification and also shows the importance of the natural reaction as part of the process purification. It can be concluded that the mathematical models used to simulate water quality and the process of self-purification of water bodies are important tools to support efficient water resources management.

Key words: autopurification, BOD, dissolved oxygen, nutrients, water quality, model MIKE 11

Redigovano 17.10.2017.