

Analiza pouzdanosti pri numeričkom modeliranju kvalitete vodotoka

Vouk, Dražen; Malus, Davor; Bekić, Damir

Source / Izvornik: **Građevinar, 2008, 60, 601 - 607**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:105224>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Analiza pouzdanosti pri numeričkom modeliranju kvalitete vodotoka

Dražen Vouk, Davor Malus, Damir Bekić

Ključne riječi

kakvoća vode,
rijeka Sava,
analiza pouzdanosti,
Monte Carlo simulacija,
model QUAL2E,
funkcija gustoće

Key words

water quality,
the Sava River,
reliability analysis,
Monte Carlo simulation,
QUAL2E Model,
density function

Mots clés

qualité d'eau,
la rivière de Sava,
analyse de fiabilité,
simulation de
Monte-Carlo,
modèle de QUAL2E,
fonction de densité

Ключевые слова

качество воды,
река Сáva,
анализ надёжности,
симулирование Монте
Карло,
модель QUALZE,
функция плотности

Schlüsselworte

Wasserqualität,
Fluss Sava,
Zuverlässigkeitsanalyse,
Monte Carlo - Simulation,
Modell QUAL2E,
Dichtefunktion

D. Vouk, D. Malus, D. Bekić

Prethodno priopćenje

Analiza pouzdanosti pri numeričkom modeliranju kvalitete vodotoka

Ispitana je opravdanost uključivanja analize pouzdanosti pri numeričkom modeliranju kvalitete vodotoka. Modelom QUAL2E-UNCAS analizirana je kakvoća vode rijeke Save na njenom gornjem toku kroz RH. Monte Carlo simulacijom analizirana je pouzdanost ulaznih parametara u obliku koeficijenata razgradnje organske tvari i obogaćivanja vode kisikom. Rezultati analize prikazani su osnovnim svojstvima funkcije gustoće vjerojatnosti relevantnih izlaznih parametara na odabranim lokacijama.

D. Vouk, D. Malus, D. Bekić

Preliminary note

Reliability analysis during watercourse quality numerical modelling

The applicability of reliability analysis in numerical modelling of the quality of watercourses is studied. The QUAL2E-UNCAS Model is used to analyze the water quality in the upper reaches of the Sava River, in the territory of Croatia. The Monte Carlo simulation is used to analyse reliability of input parameters in form of coefficients relating to the organic matter disintegration and oxygen content in water. The analysis results are presented through basic properties of the probability density function for relevant output parameters on selected sites.

D. Vouk, D. Malus, D. Bekić

Note préliminaire

Analyse de fiabilité dans la modélisation numérique de la qualité des cours d'eau

L'applicabilité de l'analyse de fiabilité dans la modélisation numérique de la qualité des cours d'eau est étudiée. Le modèle de QUAL2E-UNCAS est utilisé pour analyser la qualité d'eau dans le cours supérieur de la rivière de Sava en Croatie. La simulation de Monte-Carlo est utilisée pour analyser la fiabilité des paramètres d'entrée en forme des coefficients relatifs à la désintégration des matières organiques et la teneur en oxygène de l'eau. Les résultats de l'analyse sont présentés comme propriétés de base de la fonction de densité de probabilité pour les paramètres de sortie sur sites choisis.

Д. Воук, Д. Малус, Д. Бекич

Предварительное сообщение

Анализ надёжности при числовом моделировании качества водотока

В работе описывается оправданность включения анализа надёжности при числовом моделировании качества водотока. При помощи модели QUALZE-UNCAS анализировано качество воды реки Савы на её верхнем течении через Республику Хорватию. Симулированием Монте Карло анализируется надёжность входных параметров в обличье коэффициентов разложения органического вещества и обогащения воды кислородом. Результаты анализа показаны основными свойствами функций плотности вероятности релевантных исходных параметров на выбранных локациях.

D. Vouk, D. Malus, D. Bekić

Vorherige Mitteilung

Zuverlässigkeitsanalyse beim numerischen Modellieren der Qualität des Wasserlaufs

Untersucht ist die Berechtigung der Einführung der Zuverlässigkeitsanalyse beim numerischen Modellieren der Qualität des Wasserlaufs. Mit dem Modell QUAL2E-UNCAS analysierte man die Qualität des Flusses Sava an seinem Oberlauf durch Kroatien. Mit der Monte Carlo - Simulation analysierte man die Zuverlässigkeit der Eingangparameter in Form der Beiwerte der Zerlegung organischer Stoffe und Bereicherung des Wassers mit Sauerstoff. Die Ergebnisse der Analyse sind durch die Grundeigenschaften der Funktion der Wahrscheinlichkeitsdichte der relevanten Ausgangsparameter an ausgewählten Stellen dargestellt.

Autori: Mr. sc. **Dražen Vouk**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Davor Malus**, dipl. ing. građ.; mr. sc. **Damir Bekić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

1 Uvod

Procjene utjecaja na okoliš (ispitivanja ekološke osjetljivosti) i potencijalni rizici koji su njihov neizostavni dio, često uključuju različite oblike procjena stupnja pouzdanosti koji u većoj ili manjoj mjeri utječu na dobivene rezultate, a time i na donošenje konačnih zaključaka i odluka. Simulacije postojećih i budućih stanja kvalitete vodotoka, kao bitnih ulaznih parametara pri donošenju opće strategije upravljanja pojedinim vodnim sljevovima (podsljevovima), znatno su olakšani uz primjenu sofisticiranih numeričkih modela. Ograničenost relevantnih ulaznih podataka često dovodi do potrebe za njihovim procjenama, najčešće uporabom uprosječenih literaturnih podataka te vlastitog iskustva i intuicije samog istraživača. Provedba analiza konvencionalnim načinom, bez dodatnih procjena rizika, odnosno ispitivanja pouzdanosti procijenjenih parametara, može rezultirati donošenjem pogrešnih zaključaka i odluka.

Analizirajući rijeku Savu kao jednu od značajnijih pritoka Dunavskog sljeva, na njezinu toku kroz Republiku Hrvatsku, uočavaju se pojedine dionice znatno više opterećene otpadnim tvarima. Područje od posebnog interesa je gornji tok Save kojem gravitira urbano područje grada Zagreba i njegove okolice. Trenutačno ispuštanje (ne)pročišćenih otpadnih i oborinskih voda na promatranom području sustavno zagađuje riječni tok Save, opterećujući ga intenzivno otpadnom tvari. Prema vrijedećim planovima za zaštitu voda predviđa se izgradnja nekoliko uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kojima bi se smanjio ukupni unos otpadne tvari u rijeku Savu, uz napomenu da je nedavnim završetkom izgradnje prethodne faze (1.200.000 ES) pušten u pogon centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba (CUPOVZ) s II. stupnjem pročišćavanja.

U ovome ćemo radu opisati (simulirati) pojedina stanja kvalitete vode rijeke Save na navedenoj dionici. U sklopu opisanih istraživanja posebno ćemo istaknuti provedbu analize pouzdanosti dobivenih rezultata u odnosu na različito definirane vrijednosti manje poznatih ulaznih parametara.

2 Metodologija

Ovim je radom odabran i analiziran jedan metodološki pristup analizi kvalitete vode u vodotocima koji uključuje i provedbu analize pouzdanosti dobivenih rezultata vezanih za procjene postojećih i budućih stanja. Najčešće se analize kvalitete vodotoka provode prema biološkom opterećenju (BPK_5) i otopljenom kisiku. Prema tome, analiza pouzdanosti obuhvaćena ovim radom odnosi se prvenstveno na definiranje vrijednosti relevantnih koeficijenata razgradnje organske tvari i obogaćivanja vode kisikom iz atmosfere koje će biti mjerodavne za simulacije (prognoziranje) budućih stanja.

BPK_5 i otopljeni kisik ključni su parametri kvalitete, a u sklopu opširnije analize kvalitete vodotoka, ovisno o raspoloživim mjerenim podacima, analizom pouzdanosti bilo bi potrebno obuhvatiti čitav niz različitih koeficijenata.

Za provedbu analize pouzdanosti odabrana je simulacija Monte Carlo koja je jedan od modula poznatoga numeričkog modela QUAL2E-UNCAS [1]. Numerički model QUAL2E razvila je američka agencija za zaštitu okoliša (USEPA) i širom svijeta se uspješno primjenjuje za modeliranje kvalitete vode u vodotocima. Model je jednodimenzijski što ne umanjuje vjerodostojnost njegovih rezultata simulacija. U konkretnom slučaju ograničenosti raspoložive baze ulaznih podataka, primjena jednostavnijih modela (jednodimenzijskim) ocijenjena je primjerenijim rješenjem.

Simulacija Monte Carlo je metoda kojom se određuje funkcija gustoće i distribucije izlazne veličine na temelju zadanih funkcija gustoće, odnosno vjerojatnosti ulaznih parametara. Takav je tip proračuna osnova provođenja analize pouzdanosti s pomoću koje se može dobiti jasan uvid u moguće raspone i vjerojatnosti ostvarenja razmatranih scenarija u ovisnosti o odabranom skupu fiksnih i promjenjivih ulaznih parametara. Drugim riječima, predloženom analizom omogućen je pregled potencijalnih stanja kvalitete vode u odnosu na definirani raspon određenih ulaznih veličina.

Jedan od osnovnih zahtjeva za provedbu analiza jest okvirno poznavanje osnovnih svojstava pouzdanosti relevantnih ulaznih parametara. U konkretnom slučaju, kritičnim ulaznim parametrima za modeliranje kvalitete vode rijeke Save smatraju se koeficijenti razgradnje organske tvari i obogaćivanja vode kisikom otapanjem iz atmosfere. Naime, u nedostatku mjerenih vrijednosti navedenih koeficijenata (eksperimentalno ili na licu mjesta), neminovna je potreba za uporabom uprosječenih literaturnih podataka. Takva praksa upućuje na smanjeni stupanj pouzdanosti konačnih rezultata simulacija budućih stanja.

U modelu QUAL2E-UNCAS svojstva pouzdanosti pojedinih ulaznih parametara definiraju se na dva načina: a) određivanjem vrijednosti varijance (mjera raspršenja rezultata oko aritmetičke sredine); b) definiranjem funkcije gustoće vjerojatnosti. U konkretnom slučaju, pouzdanost veličine oba koeficijenta definirana je funkcijom gustoće vjerojatnosti uz određivanje relativne vrijednosti standardne devijacije za njihove prethodno definirane najvjerojatnije vrijednosti. Iz velikog skupa literaturnih podataka, vezanih za vodotoke sličnih karakteristika (sličnih morfoloških i hidroloških svojstava unutar sličnih klimatskih uvjeta), definirane su normalne distribucije vjerojatnosti razmatranih koeficijenata. Prema zadanom broju simulacija, u sklopu provođenja metode, Monte

Carlo veličine razmatranih parametara se slučajno generiraju prema prethodno definiranoj distribuciji vjerojatnosti. Kao jedan od izlaznih oblika provedenih simulacija generirat će se statistička obrada ključnih parametara kvalitete vode (koncentracije BPK_5 i otopljenog kisika) u sklopu koje su izdvojene sve karakteristične vrijednosti (minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i dr.). Prikaz izlaznih rezultata analize pouzdanosti vezan je za prethodno odabrane lokacije.

Vjerodostojnost rezultata simulacije Monte Carlo u sklopu primijenjenoga numeričkog modela potvrdit će se analizom postojećeg stanja kvalitete vode u sklopu kojeg se raspolaže određenim skupom mjerenih vrijednosti razmatranih parametara. Usporedba rezultata simulacije i statistički obrađenih mjerenih vrijednosti poslužit će za definiranje konačnih vrijednosti razmatranih ulaznih parametara mjerodavnih za analizu budućih stanja kvalitete vode rijeke Save u njezinu gornjem toku kroz Hrvatsku.

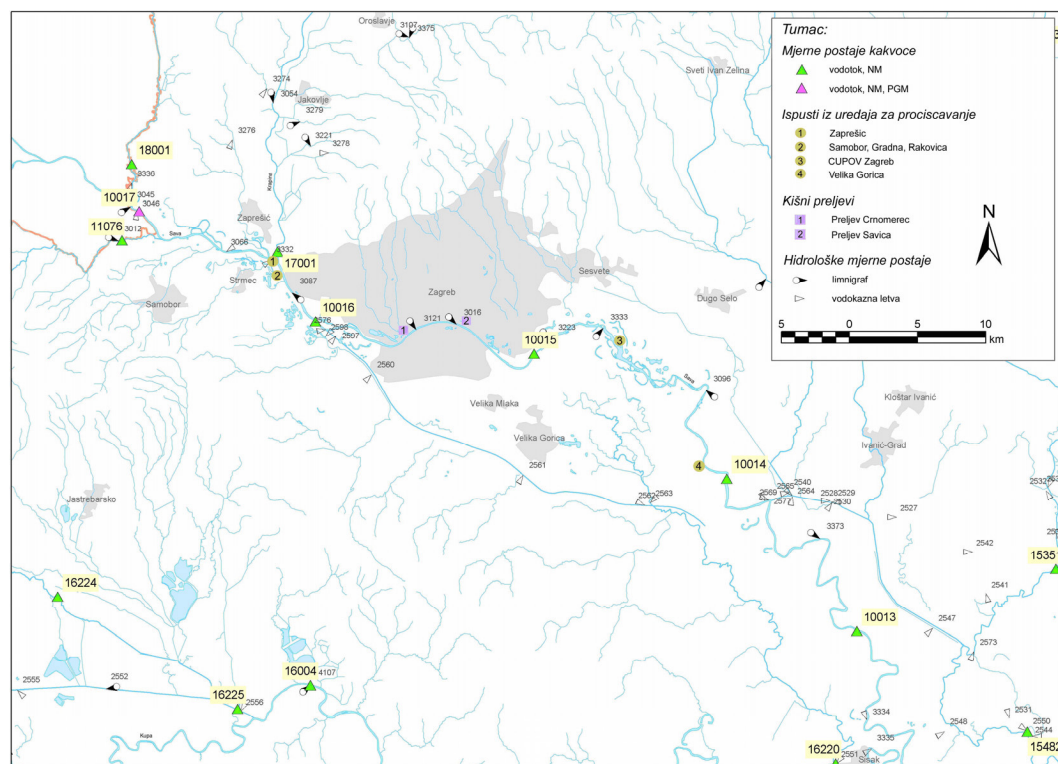
Za procjenu kvalitete vodotoka, te utjecaja ispuštenih otpadnih voda, mjerodavne su male vode rijeke Save. Naime, pojavom većih protoka dolazi do razrjeđivanja koje ima pozitivan učinak na stanje kvalitete vodotoka. Postoji više načina (normi) određivanja mjerodavnih malih voda. U Republici Hrvatskoj kao mjerodavni mali protok određen je mali protok (mala voda) u tijeku 30

uzastopnih dana (bilo koji niz unutar jedne godine) s 95 %-tnom vjerojatnosti pojave ($Q_{30,95\%}$).

3 Modeliranje kvalitete vode rijeke Save

Područje istraživanja ovog rada jest analiza stanja kvalitete vode rijeke Save, na dionici od granice s Republikom Slovenijom (mjerna postaja Jesenice) do grada Siska (mjerna postaja Galdovo), u ukupnoj duljini od približno 123,0 km (slika 1.).

Najprije je provedena simulacija postojećeg stanja koja predstavlja interpretaciju rezultata Programa motrenja kvalitete vode koji provode *Hrvatske vode* [2]. Promatranom dionicom obuhvaćeno je ukupno šest mjernih postaja, od kojih je prva poslužila za definiranje ulaznih veličina u modelu. Iskorišteni su podaci dobiveni iz statističke obrade mjerenih vrijednosti u razdoblju od 1995. do 2005. godine. Međutim, važno je istaknuti da raspored postaja uzorkovanja, kao i vrijeme uzorkovanja nisu povoljni za potrebe matematičkog modeliranja rijeke Save. Uzorkovanja nisu vremenski i prostorno konzistentna, već se odvijaju za svaku mjernu postaju prema vremenskim razmacima koji ne slijede put vode i onečišćenja. Na taj je način onemogućeno praćenje iste mase vode na njezinu putu kroz promatranu dionicu, pa se ne mogu proračunati koeficijenti razgradnje organske tvari, kao i veličina obogaćivanja vodotoka kisikom otapanjem iz atmosfere. Navedeni nedostaci nadoknađeni



Slika 1. Rijeka Sava – dionica obuhvaćena simulacijom

su uporabom uprosječenih literaturnih podataka [3], uz naknadnu provedbu analize pouzdanosti. Pri analizi pouzdanosti definirane su normalne funkcije distribucije vjerojatnosti za relevantne koeficijente razgradnje organske tvari i otapanja kisika iz atmosfere. Srednja vrijednost obaju koeficijenata po pojedinim dionicama na koje je podijeljen razmatrani tok Save definirana je uprosječivanjem literaturnih podataka i za koeficijent razgradnje organske

tvori iznosi 0,4 l/d s relativnom vrijednosti standardne devijacije od 15 %, a za koeficijent otapanja kisika iz atmosfere 5,2 l/d s relativnom vrijednosti standardne devijacije od 13 %.

Nezgodno je što ne postoji mjerna postaja nizvodno u blizini uljeva otpadnih voda grada Zagreba, kojom bi se moglo bolje opažati njihov utjecaj. Prva postaja nizvodno od mjesta ispusta nalazi se na udaljenosti oko 22 km. Kao posljedica navedenog, postoji razmjerno mali broj opažanja koji odgovara uskom rasponu malih protoka koji opisuju mjerodavna stanja pri provedbi danih analiza. Mjerodavni mali protok određen je prema elaboratu [4]. Vrijednost mjerodavnoga malog protoka na početnoj postaji Jesenice određena je sa $Q_{30,95\%} = 75,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Kako bi se dobio donekle zadovoljavajući broj mjerenja u daljnjoj obradi, u ovom radu uzimani su ishodi mjerenja kvalitete vode kod raspona protoka od 50 – 100 m^3/s .

Modelirano je hidrauličko stanje karakteristično za ljetne mjesec (mjesec svibanj - rujan) jer je u ekološkom smislu najnepovoljnije.

Postojeće opterećenje otpadnom tvari rijeke Save proračunano je za sve točkaste i raspršene izvore onečišćenja [5]. Točkastim su izvorima obuhvaćena sva naselja duž predmetne dionice s izgrađenim sustavom javne odvodnje kojima se sanitarne i industrijske otpadne vode ispuštaju u Savu, bilo u pročišćenom, bilo nepročišćenom obliku. Iako je CUPOVZ nedavno pušten u pogon, uz završenu izgradnju prethodne faze (1.200.000 ES) s II. stupnjem čišćenja, analiza postojećeg stanja pretpostavlja ispuštanje otpadnih voda grada Zagreba u nepročišćenom stanju. Razlog tome je raspoloživost baze mjernih podataka o stanju kvalitete vode rijeke Save, jer za novije stanje u kojem je CUPOVZ pušten u pogon nema relevantnih podataka koji se mogu rabiti za odabrani tip analize.

Ukupno je pri analizi postojećeg stanja provedeno 2000 simulacija Monte Carlo za četiri prethodno odabrane lokacije koje se poklapaju s lokacijama mjernih postaja iz nacionalnog programa motrenja (Jankomir, Petruševac, Oborovo i Galdovo) te dodatna lokacija neposredno iza mjesta ispusta otpadnih voda grada Zagreba (ušće GOK-a). Na taj je način omogućena kalibracija modela međusobnom usporedbom simuliranih rezultata s mjernim vrijednostima iz državnog motrenja (monitoringa). Također je omogućen i bolji uvid u stanje kvalitete Save na kritičnoj dionici neposredno iza mjesta ispusta otpadnih voda grada Zagreba. Odabrani broj od 2000 provedenih simulacija utvrđen je prethodnim istraživanjima [1] kao najpovoljniji s obzirom da rezultira ostvarivanjem traženih vrijednosti koje se nalaze unutar 95 %-tnog intervala pouzdanosti. Odabirom manjeg broja simulacija Monte Carlo povećava se vjerojatnost pojave većih pogrešaka u prezentaciji dobivenih rezultata.

U nastavku istraživanja simulirano je buduće stanje za koje je kao planska godina razmatrana 2015. U tom razdoblju pretpostavljeno je da će biti izgrađeni uređaji s II. stupnjem čišćenja otpadnih voda svih urbanih cjelina koje gravitiraju promatranom dionici. Daljnja je pretpostavka da će i uzvodno od mjerne postaje Jesenice biti u pogonu uređaji za čišćenje svih otpadnih voda barem II. stupnja, pa će na postaji Jesenice voda rijeke Save zadovoljavati zahtjeve dobrog stanja kvalitete. Kao ulazni parametri simuliranja budućeg stanja (koeficijenti razgradnje organske tvari i otapanja kisika iz atmosfere), odabrane su mjerodavne vrijednosti utvrđene u sklopu prethodno provedene analize pouzdanosti (kod postojećeg stanja).

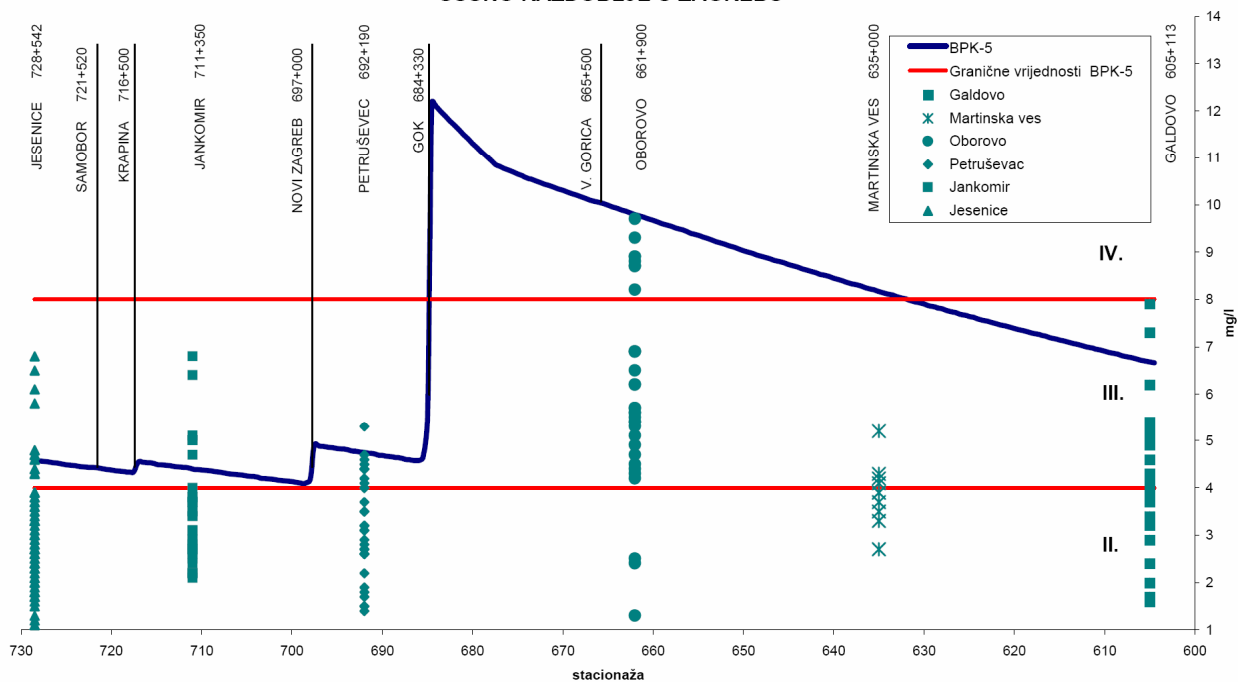
4 Rezultati

Numeričkim modeliranjem kvalitete vode rijeke Save na njezinu gornjem toku kroz Hrvatsku uočeno je da u postojećem stanju (bez utjecaja izgrađenog dijela CUPOVZ-a) kakvoća vode rijeke Save nizvodno od grada Zagreba ne zadovoljava uvjete kategorizacije vode prema Državnom planu za zaštitu voda (NN 8/99). Kritičnim se parametrom pokazao pokazatelj BPK_5 , prema kome se Sava na dionici nizvodno od Zagreba svrstava u IV. kategoriju. Otopljeni kisik se gotovo na čitavoj dionici nalazi na prijelazu iz I. u II. kategoriju, čime su zadovoljeni uvjeti propisane kategorizacije.

Vjerodostojnost dobivenih rezultata simulacije postojećeg stanja, odnosno kalibracija odabranog modela, provjerena je usporedbom sa statistički obrađenim mjernim vrijednostima u sklopu nacionalnog motrenja. Utvrđeno je da se simulirane vrijednosti nalaze unutar raspona mjerenih vrijednosti. Dodatna je provjera provedena analizom pouzdanosti, ovisno o promjenjivim vrijednostima koeficijenata razgradnje organske tvari i otapanja kisika iz atmosfere s različito definiranim vjerojatnostima pojave.

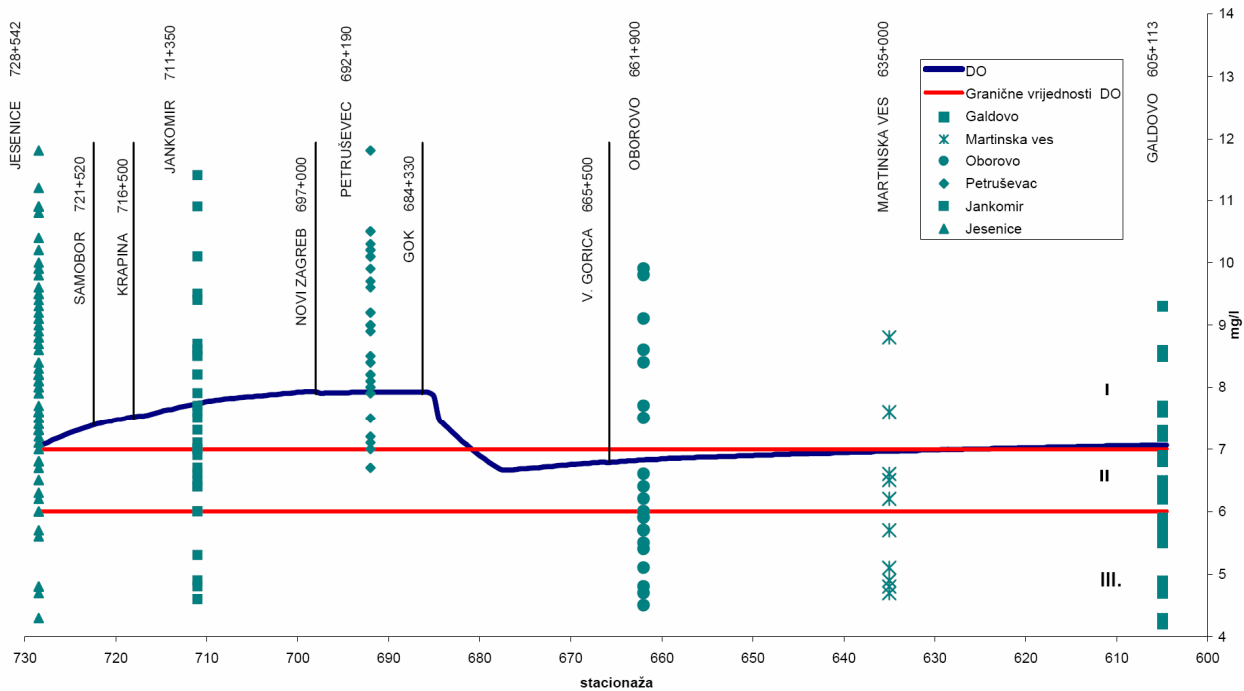
Izlazni parametri analize pouzdanosti u sklopu upotrijebljenoga matematičkog modela opisani su statistički obrađenim podacima i osnovnim parametrima funkcija distribucije vjerojatnosti simuliranih pokazatelja kvalitete vode rijeke Save (koncentracije BPK_5 i otopljenog kisika) na ukupno 5 lokacija. Obrada rezultata izlaznih veličina uključuje prikaz srednjih vrijednosti, minimuma, maksimuma, raspona vrijednosti, standardne devijacije, koeficijente raspršenosti i koeficijente spljoštenosti rezultirajućih distribucija vjerojatnosti. U tablici 1. su prikazani rezultati provedene analize pouzdanosti postojećeg stanja kvalitete vode rijeke Save na odabranim lokacijama. Dobiveni rezultati proizlaze iz ukupno 2000 provedenih simulacija Monte Carlo.

RIJEKA SAVA - MALI PROTOCI (50 - 100 m³/s)
 BPK-5 (1999.)
 KONCENTRACIJA 90% TRAJANJA
 SUŠNO RAZDOBLJE U ZAGREBU



Slika 2. Rezultati simulacije postojećeg stanja – BPK₅

RIJEKA SAVA - MALI PROTOCI (50 - 100 m³/s)
 DO (1999.)
 KONCENTRACIJA 90% TRAJANJA
 SUŠNO RAZDOBLJE U ZAGREBU



Slika 3. Rezultati simulacije postojećeg stanja – otopljeni kisik

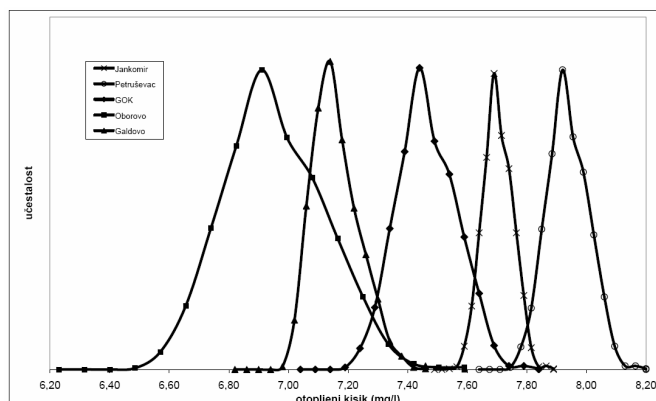
Tablica 1. Statistička obrada rezultata analize pouzdanosti

| Parametar kvalitete vode | Otopljeni kisik | | | | | BPK ₅ | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------|------|-------|-------|------------------|---------|-------|-------|-------|
| | Jank. | Petruš. | GOK | Obor. | Gald. | Jank. | Petruš. | GOK | Obor. | Gald. |
| Kontrolna postaja | | | | | | | | | | |
| Sr. vrijednost (kalibrirana) | 7,69 | 7,92 | 7,44 | 6,90 | 7,13 | 4,42 | 4,74 | 11,60 | 9,40 | 6,42 |
| Sr. vrijednost (MC) | 7,69 | 7,92 | 7,44 | 6,91 | 7,14 | 4,43 | 4,75 | 11,61 | 9,42 | 6,46 |
| Minimalna vrijednost (MC) | 7,54 | 7,73 | 7,16 | 6,43 | 6,96 | 4,25 | 4,39 | 11,13 | 8,32 | 4,83 |
| Maksimalna vrijednost (MC) | 7,88 | 8,17 | 7,80 | 7,57 | 7,53 | 4,63 | 5,18 | 12,21 | 10,91 | 8,96 |
| Raspon vrijednosti (MC) | 0,33 | 0,44 | 0,64 | 1,14 | 0,57 | 0,39 | 0,79 | 1,08 | 2,59 | 4,13 |
| 95%-tni interval pouzdanosti | 0,20 | 0,26 | 0,38 | 0,67 | 0,32 | 0,23 | 0,47 | 0,64 | 1,51 | 2,38 |
| Standardna devijacija | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,17 | 0,08 | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,38 | 0,59 |
| Koeficijent raspršenosti (%) | 0,60 | 0,80 | 1,30 | 2,40 | 1,10 | 1,30 | 2,50 | 1,40 | 4,00 | 9,20 |
| Koeficijent spljoštenosti | 0,12 | 0,18 | 0,19 | 0,25 | 0,67 | 0,12 | 0,16 | 0,17 | 0,21 | 0,34 |
| MC simulacija Monte Carlo | | | | | | | | | | |

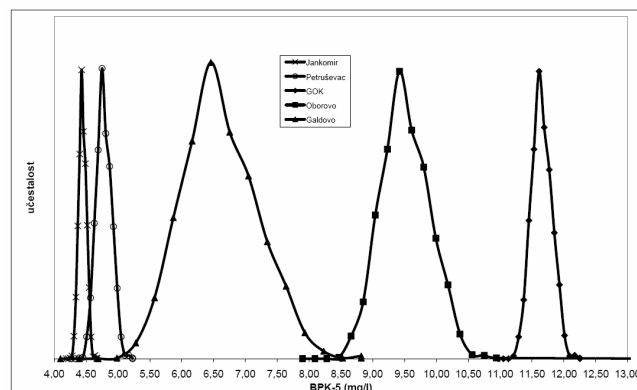
Iz rezultata se može uočiti visok stupanj podudaranja kalibriranih (na temelju vrijednosti utvrđenih mjerenjima) i simuliranih vrijednosti razmatranih parametara. Za otopljeni su kisik odstupanja oko 0,1 %, dok su odstupanja za BPK₅ neznatno veća i iznose maksimalno 0,6 %. Vrijednost standardne devijacije pri analizi obaju parametara uglavnom raste u nizvodnom smjeru. Taj je fenomen izraženiji kod parametra BPK₅ i može se pripisati učinku kumulativnog djelovanja (ne)pouzdanosti razmatranih ulaznih veličina u odnosu na njihovu propagaciju duž razmatrane dionice.

Srednja je vrijednost koeficijenta raspršenosti za pokazatelj otopljeni kisik 1,25 %, dok je za BPK₅ raspršenost nešto izraženija s koeficijentom od 3,50 %.

Grafički prikaz rezultata provedene analize pouzdanosti prikazan je na slikama 4. i 5. Za oba simulirana parametra kvalitete vode rijeke Save dan je prikaz funkcija gustoće vjerojatnosti na odabranim kontrolnim lokacijama.



Slika 4. Funkcija gustoće vjerojatnosti za otopljeni kisik

Slika 5. Funkcija gustoće vjerojatnosti za BPK₅

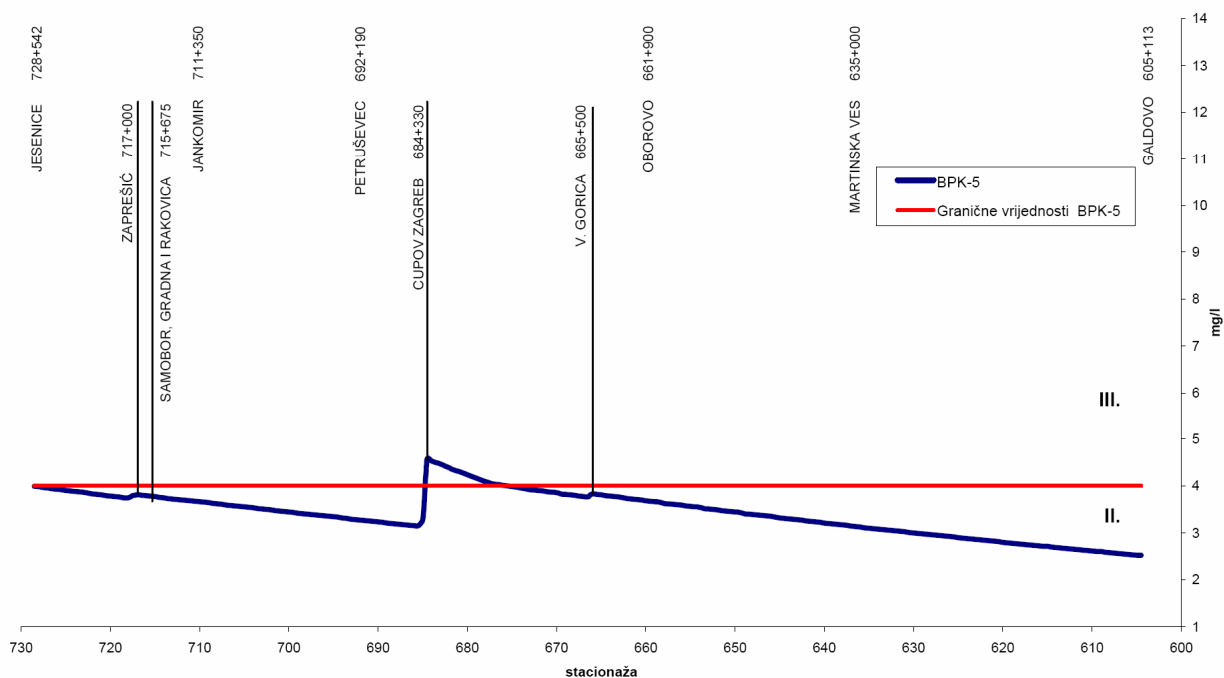
Na temelju dobivenih rezultata provedbe analize pouzdanosti i utvrđivanja realnih vrijednosti relevantnih ulaznih parametara, omogućena je procjena budućih stanja s povećanim stupnjem vjerodostojnosti dobivenih prikaza. Stanje kvalitete vode rijeke Save za planirano opterećenje otpadnom tvari prognozirano je uz pretpostavku da se sve otpadne vode na promatranoj dionici prije ispuštanja u Savu prethodno čiste na uređajima II. stupnja. Kod takvih okolnosti na čitavoj promatranoj dionici mogla bi se održavati kvalitete vode II. kategorije, osim na vrlo kratkom potezu, nakon ušća GOK-a gdje bi se kod malog protoka Save, prema pokazatelju BPK₅, Sava razvrstala u III. kategoriju vode (slika 6.). Stanje s otopljenim kisikom dodatno će se poboljšati u odnosu na rezultate dobivene simulacijom postojećeg stanja.

5 Zaključak

U ovome je radu prikazan nov metodološki pristup procjeni kvalitete vode u vodotocima u Hrvatskoj. Istaknuto je ispitivanje opravdanosti uključivanja analize pou-

RIJEKA SAVA - MALI PROTOCI (50 - 100 m³/s)

BPK-5 (2015.)

KONCENTRACIJA 90% TRAJANJA
SUŠNO RAZDOBLJE U ZAGREBUSlika 6. Rezultati simulacije budućeg stanja – BPK₅

zdanosti dobivenih rezultata u odnosu na manje poznate vrijednosti ključnih ulaznih parametara. Naime, odstupanje veličina relevantnih ulaznih parametara od približno točnih vrijednosti, koje je u nedostatku prethodnih istraživanja potrebno procijeniti, može rezultirati donošenjem pogrešnih zaključaka pri simulaciji kvalitete vode u vodotocima. U konkretnom slučaju ispitivanja kvalitete vode rijeke Save postoji određena baza mjerenih podataka na nekoliko mjernih postaja duž simulirane dionice, čime je omogućena provjera pouzdanosti dobivenih rezultata. Time je utvrđivanje približno točnih vrijednosti koeficijentata razgradnje organske tvari i obojačivanja vode kisikom iz atmosfere znatno olakšano.

Na velikom broju ostalih vodotoka u Hrvatskoj, skupovi mjerenih vrijednosti znatno su skromnije. Za pojedine vodotoke, čak i za one koji gravitiraju pojedinim urbanim cjelinama, i ne postoje mjereni podaci o stanju kvalitete vode. U takvim je okolnostima definiranje vrijednosti relevantnih ulaznih parametara znatno otežano, pri čemu provedba analize pouzdanosti dodatno dobiva na težini.

U odnosu prema utvrđenoj važnosti i jednostavnosti primjene analize pouzdanosti, te njezine integriranosti unutar sofisticiranih numeričkih modela, ona bi trebala postati standardom pri ispitivanju stanja kvalitete vode u vodotocima.

LITERATURA

- [1] *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual* - EPA/600/3-87/007. (1987)
- [2] *Rezultati monitoringa kvalitete vode rijeke Save od 1995 do 2005*, Zagreb, Hrvatske vode, (2006.)
- [3] *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modelling (Second Edition)* EPA/600/3-85/040. (1985)
- [4] *Hidrološke obrade mjerodavnog protoka i izračun prijemnog kapaciteta vodotoka*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb (2000)
- [5] *The Study for Water Pollution Reduction on the Sava River Basin in the Republic of Croatia*, Japan International Cooperation Agency - JICA (2001)