

ЈУГОСЛОВЕНСКО ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ВОДА

31. конференција о актуелним проблемима коришћења и заштите вода

ВОДА 2002

*The 31st Annual Conference of Yugoslav Water Pollution Control Society
"WATER 2002"
Conference Proceedings*



Врњачка Бања, 11 – 14. јун 2002.

ОРГАНИЗАТОРИ:

Југословенско друштво за заштиту вода и Друштво за заштиту вода Србије у сарадњи са Пословним удружењем водовода и канализације Југославије, Институтом за водопривреду "Јарослав Черни", Београд и ДП "Жупа" Хемијска Индустрија, Крушевац.

ОДРЖАВАЊЕ КОНФЕРЕНЦИЈЕ СУ ПОМОГЛИ:

- Министарство за науку, технологију и развој Републике Србије
- Министарство пољопривреде, шумарства и водопривреде Републике Србије
- ЈКП Београдски водовод и канализација
- ДП "Жупа" Хемијска индустрија, Крушевац
- ЈКП "Водовод-Крушевац", Крушевац
- Дирекција за планирање и изградњу "Краљево", Краљево
- ЈП "Србијаводе" Београд, Водопривредни центар "Дунав", Нови Сад
- Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд
- НИС-Рафинерија нафте Панчево
- ЦИП Саобраћајни институт, Београд
- МП "Велика Морава", Београд
- "Темерин" СЦ доо, Темерин

ОРГАНИЗАЦИОНИ ОДБОР:

Драган ТОМИЋ, дипл.инж.техн., ДП "Жупа", Крушевац Председник
Бранислав УДОВЧИЋ, дипл.еџ., Крушевац
Дејан АЗДЕЈКОВИЋ, дипл.инж.грађ., Крушевац
Георги НИКОЛИЋ, дипл.хем., Крушевац
Слободан ГРАШИЋ, дипл.биол., Крушевац
Драгослав ИЛИЋ, дипл.инж.техн., Крушевац
Веселин ПЕРОВИЋ, дипл.инж.грађ., ЈКП Водовод и канализација, Подгорица
Владимир ТАУШАНОВИЋ, дипл.инж.грађ., ЈКП "Београдски водовод и канализација", Београд
Момир ТАБАЧКИ, дипл.инж.грађ., ЈВП "Србајводе", ВПЦ Дунав, Нови Сад
Александар ЂУКИЋ, дипл.инж.грађ., Грађевински факултет, Београд
Светислав СТАНКОВИЋ, дипл.инж.маш., МИН Холдинг Цо МИН Инжењеринг, Ниш
Богољуб БОГДАНОВИЋ, дипл.инж.грађ., Министарство пољопривреде, шумарства и водопривреде Републике Србије Београд
Милутин МАНДИЋ, дипл.инж.грађ., Дирекција за планирање и изградњу "Краљево", Краљево
Милан ДИМКИЋ, дипл.инж.грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд
Павле ВУЧКОВИЋ, дипл.инж.маш., "Енергопројект-Хидроинжењеринг", Београд
Момчило ПАНИЋ, дипл.инж.грађ., МП "Велика Морава", Београд
Љубомир МИРКОВ, дипл.инж.техн., НИС Рафинерија нафте Панчево, Панчево
Мирољуб ГАОН, дипл.инж.грађ., Инжењеринг Гоша Пројметал, Београд
Милена МИЛОРАДОВ (секретар Организационог одбора)

РЕДАКЦИОНИ ОДБОР:

Проф. др Бранислав ЂОРЂЕВИЋ, дипл.инж.грађ., Београд - ПРЕДСЕДНИК
Проф. др Милоје МИЛОЈЕВИЋ, дипл.инж.грађ., Београд
Проф. др Мирко ПОПОВИЋ, дипл.инж.технол., Београд
Проф. др Божо ДАЛМАЦИЈА, дипл.хем., Нови Сад
Др Дубравка РЕГНЕР, дипл.биолог, Котор

УРЕДНИК: Мр Александар ЂУКИЋ, дипл.инж., Београд

ШТАМПА: "Никола Николић", Крагујевац

ТИРАЖ: 400

По мишљењу Министарства културе Републике Србије бр. 413-841/2000-04 ослобођено плаћања пореза на промет

PRIMENA FUZZY TEORIJE ZA ODREĐIVANJE KVALITETA VODE

Dašić Tina*, Ćurčić Svetlana**, Đorđević Branislav*, Čomić Ljiljana**

* Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

** Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Kragujevcu

REZIME

U radu se razmatra mogućnost primene teorije fazi skupova za određivanje kvaliteta vode na osnovu mikrobioloških parametara. U razmatranje je uključeno pet osnovnih mikrobioloških parametara: ukupan broj bakterija, broj aerobnih heterotrofa, fekalni koliformi, hlorofil-a i indeks fosfatazne aktivnosti. Predložene (ili definisane) su fazi funkcije za određivanje pripadnosti parametara klasama kvaliteta vode, kao i metod za određivanje fmWQI (fazi mikrobiološki Water Quality Index). Na osnovu vrednosti ovog indeksa određuje se klasa kvaliteta kojoj pripada vodeni ekosistem.

KLJUČNE REČI: kvalitet vode, mikrobiološki parametri, fazi skupovi

APPLICATION OF FUZZY THEORY FOR WATER QUALITY ASSESSMENT

ABSTRACT

Application of fuzzy theory for water quality assessment using the microbiological parameters is presented in the paper. Five parameters are included: total number of bacteria, number of heterotrophs, Escherichia coli, concentration of chlorophyll a and intensity of phosphatase activity. Fuzzy functions for determining the degrees of memberships for the water quality parameters are defined, as well as the methodology for estimating fmWQI (fuzzy microbiological Water Quality Index). On the base of this index, water classes can be determined.

KEY WORDS: water quality, microbiological parameters, fuzzy sets

UVOD

Svi zadaci koji se obavljaju u okviru vodoprivrede mogu se svrstati u tri osnovne grupe: korišćenje voda, zaštita voda i zaštita od voda. Za prve dve grupe zadataka kvalitete vode vodenih ekosistema (kako u prirodnim uslovima, tako i nakon izvođenja neophodnih hidrotehničkih radova) ima presudan značaj. Tako npr. da bi se moglo uspešno planirati i koristiti postrojenje za prečišćavanje vode za piće neophodno je detaljno ispitati kvalitet vode vodotoka iz koga se voda zahvata i/ili predvideti kvalitet u budućem akvatičkom sistemu (vodotoku ili akumulaciji), jer od njega zavisi izbor tehnološke linije prečišćavanja.

Određivanje kvaliteta vode u našoj zemlji zakonski je regulisano Uredbom o klasifikaciji voda međurepubličkih vodotoka, međudržavnih voda i voda obalnog mora Jugoslavije. Prema ovoj klasifikaciji vode se svrstavaju u četiri klase, od I klase - voda najboljeg kvaliteta, do IV klase. Ova klasifikacija zasniva se na ispitivanju većeg broja fizičko-hemijskih parametara i samo jednog mikrobiološkog - prisustvo koliformnih klica. S obzirom da su mikrobiološki parametri značajni pokazatelji kvaliteta vode, predložena je metodologija po kojoj se određuje mWQI (mikrobiološki Water Quality Index) (Ćurčić i Čomić, *In press*). Pošto, prema klasifikacijama raznih autora, granice između klasa nisu strogo definisane (za skoro sve parametre su pored osnovnih klasa definisane i međuklase) u radu se daje predlog metodologije za određivanje mWQI korišćenjem fazi pristupa (fmWQI). Ovaj indeks bi se mogao priključiti fizičko-hemijskim parametrima koji se prema Uredbi koriste pri određivanju kvaliteta vode, kao izvestan zbirni mikrobiološki pokazatelj kvaliteta vodenog ekosistema.

ODREĐIVANJE fmWQI

Kao što je već istaknuto, metodologija za određivanje fmWQI dobijena je modifikacijom metode mWQI. Modifikacija se odnosi na način definisanja pripadnosti parametara klasama vode - u novoj metodi pripadnost parametara definisana je fazi skupovima, i uvođenjem limitirajućeg parametra kvaliteta. U analizu je uključeno pet mikrobioloških parametara: ukupan broj bakterija (T), broj aerobnih heterotrofa (H), fekalni koliformi (*E. coli*), hlorofil-a i indeks fosfatne aktivnosti (IFA). Oba indeksa kvaliteta vode mWQI i fmWQI uzimaju vrednosti od 0 do 100. Razlog za ovo je ideja od koje se krenulo pri izradi metode za određivanje mWQI, a to je formiranje indeksa uporedivog sa WQI indeksa (*Development of Water Quality Index, 1976*), koji će biti određen na osnovu mikrobioloških parametara (WQI se određuje na osnovu 10 parametara, od kojih je samo jedan mikrobiološki). U zavisnosti od vrednosti indeksa određuje se klasa kojoj vodeni ekosistem pripada. Granice su, za sve indekse kvaliteta, definisane na sledeći način: 100 - 90 I klasa, 90 - 70 II klasa, 70 - 40 III klasa i 40 - 0 IV klasa vode.

Kao osnova za formiranje graničnih vrednosti (intervala) ispitivanih parametara po klasama, kao i fazi funkcija pripadnosti korišćeni su klasifikacije, koje se radi preglednosti i doslednosti daju u tabelarnom obliku u nastavku rada (tabele 1 - 5) (Petrović *et al.*, 1998).

Tabela 1: Kategorizacija vode na osnovu ukupnog broja bakterija (Ambrazene, 1976)

Table 1: Water categories depending on total number of bacteria (Ambrazene, 1976)

Ukupan broj bakterija ($10^6 / \text{cm}^3$)	Karakteristike vode (uslovno)
-	Maksimalno čista
3.5	Čista
6.0	Naznatno zagađena
10.0	Umereno zagađena
20.0	Vrlo zagađena
> 20.0	Prljava

Tabela 2: Klasifikacija vode na osnovu brojnosti aerobnih heterotrofa (Kohl, 1975)

Table 2: Water categories depending on number of heterotrophs (Kohl, 1975)

Broj saprofitnih bakterija po cm^3	Klasa vode
< 500	I klasa
500 - 1 000	I-II klasa
1 000 - 10 000	II klasa
10 000 - 50 000	II-III klasa
50 000 - 100 000	III klasa
100 000 - 750 000	III-IV klasa
< 750 000	IV klasa

Tabela 3: Zagadenost vode na osnovu zastupljenosti fekalnih koliforma (Kavka, 1994)

Table 3: Water quality depending on number of colonies of *Escherichia coli* (Kavka, 1994)

Fekalni koliformi (<i>Escherichia coli</i>) (br. kolonija/100 cm ³)	Fekalno zagađenje vode
1 - 10	Vrlo slabo zagađena
10 - 100	Slabo zagađena
100 - 1 000	Umereno zagađena
1000 - 5 000	Zagađena
5 000 - 10 000	Vrlo zagađena
10 000 - 1000 000	Visoko zagađena
> 100 000	Maksimalno zagađena

Tabela 4: Stepen trofičnosti vodenog ekosistema na osnovu koncentracije hlorofila-a (Felföldy, 1980)

Table 4: Water quality depending on concentration of chlorophyll a (Felföldy, 1980)

Koncentracija hlorofila-a (mg / m ³)	Stepen trofičnosti
0	atrofičan
< 1	ultra-oligotrofičan
1 - 3	oligotrofičan
3 - 10	oligo-mezotrofičan
10 - 20	mezotrofičan
20 - 50	mezo-eutrofičan
50 - 100	eutrofičan
100 - 200	eu-politrofičan
200 - 800	politrofičan
> 800	hipertrofičan

Tabela 5: Kategorizacija vode prema opterećenosti organskim polutantima na osnovu indeksa fosfatane aktivnosti vode (Matavulj, 1986)

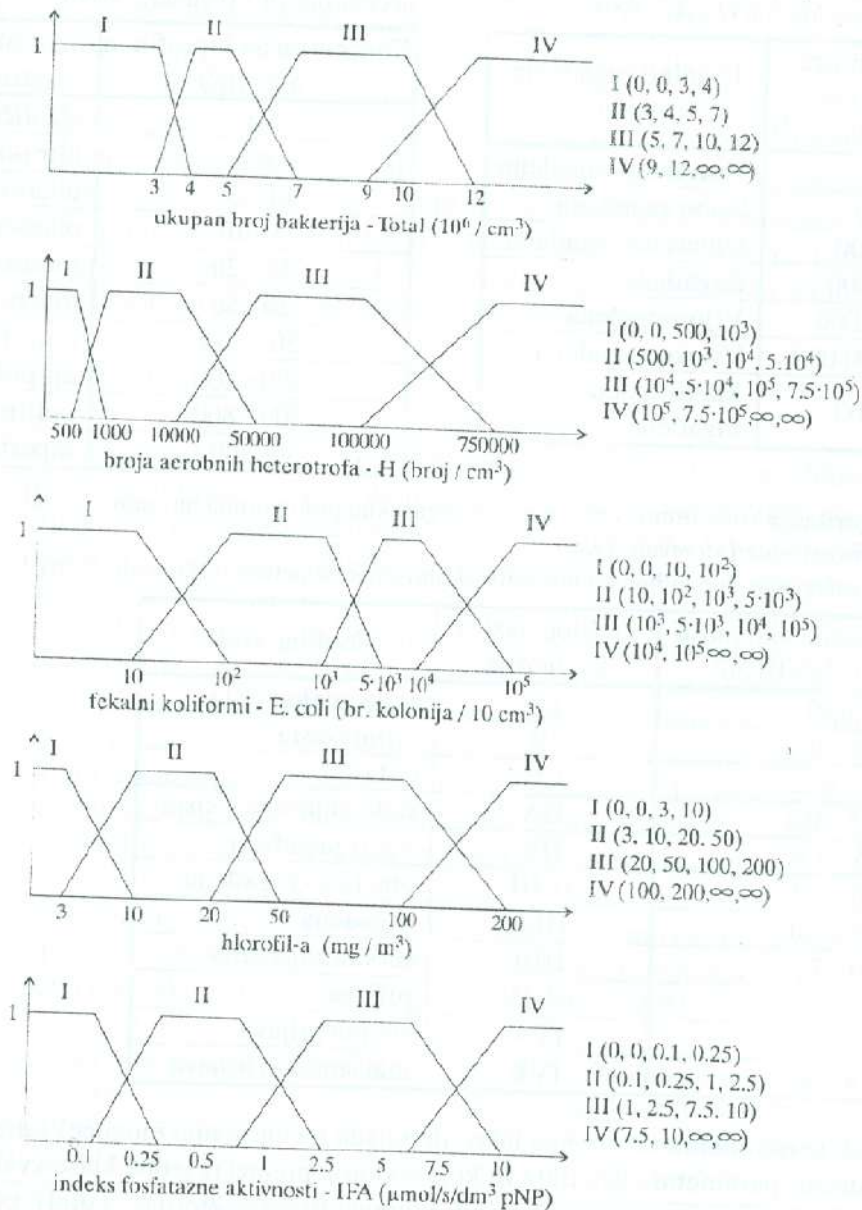
Table 5: Water categories depending on intensity of phosphatase activity (Matavulj, 1986)

Indeks fosfatane aktivnosti (μmol/s/dm ³ pNP) 30°	Predlog naziva kategorije	Osobine vode
< 0.01	IA	maksimalno čista
0.01 - 0.1	IB	veoma čista
0.1 - 0.25	I-II	čista
0.25 - 0.5	IIA	zadovoljavajuće čista
0.5 - 1.0	IIB	slabo zagađena
1.0 - 2.5	II-III	umereno zagađena
2.5 - 5.0	IIIA	zagađena
5.0 - 7.5	IIIB	veoma zagađena
7.5 - 10	III-IV	prljava
10 - 15	IVA	veoma prljava
> 15	IVB	maksimalno prljava

Kao što se vidi iz navedenih tabela nije lako (ili možda tačnije - nije moguće) odrediti precizne granične vrednosti parametara kvaliteta za koje vodotok prelazi iz jedne klase kvaliteta u drugu. Zbog toga su za skoro sve parametre (izuzev ukupnog broja bakterija - Total), pored osnovnih klasa, definisane i međuklase kvaliteta vode. Zbog svega navedenog postoji potreba da se granice između klasa kvaliteta vode za razmatrane parametre definišu nešto fleksibilnije - šire, a ne klasičnim (binarnim) skupovima (pripada - ne pripada). Teorija fazi (rasplnutih) skupova predstavlja matematički aparat koji omogućava definisanje klasa na opisani način.

Za svaki mikrobiološki parametar kvaliteta definisane su ulazne funkcije pripadnosti. Ulazna funkcija pripadnosti definiše stepen pripadnosti (0 - 100%) parametra određenoj klasi vode, a svaka klasa vode predstavljena je jednim fazi brojem trapeznog oblika (slika 1). Prilikom definisanja fazi skupova pridržavalo se sledećeg principa: pripadnost određenoj klasi je 100% za vrednosti za koje prema originalnoj klasifikaciji parametar pripada toj klasi. Za vrednosti koje su

originalnom klasifikacijom definisane kao međuklasa pripadnost parametra se menja od 100 - 0% za klasu jednog kvaliteta (odnosno, od 0 - 100% za klasu drugog kvaliteta).



Slika 1: Fazi funkcije pripadnosti parametara određenim klasama vode
Figure 1: Fuzzy membership functions for water classes

Izlazna funkcija pripadnosti formirana je od četiri štapičasta fazi skupa (četiri klase kvaliteta). Granice klasa, odnosno fazi skupova, predstavljaju već pomenute granice između klasa kvaliteta za fmWOI, i iznose: 0 - 40 IV klasa, 40 - 70 III klasa, 70 - 90 II klasa i 90 - 100 I klasa.

Indeks fmWOI se određuje kao ponderisana vrednost težišta površine koju odsecaju sumarni procenti pripadnosti svakoj od klasa F_i . Klasa vode kojoj pripada razmatrani vodotok određuje se na osnovu fmWOI i graničnih vrednosti klasa kvaliteta.

$$FI_i = \frac{\sum_{j=1}^5 FU_{i,j}}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 FU_{i,j}}$$

gde su: FI_i - sumarna vrednost pripadnosti parametara i-toj klasi kvaliteta; $FU_{i,j}$ - pripadnosti j-tog parametra i-toj klasi kvaliteta; i - oznaka za klasu kvaliteta vode (i=1, 2, 3, 4); j - oznaka za parametre na osnovu kojih se određuje fmWQI (j=1, ..., 5).

$$fmWQI = \sum_{i=1}^4 w_i \cdot FI_i + 5 \cdot FI_1 - 20 \cdot FI_4$$

gde je: w_i - težište i-tog fazi skupa u izlaznoj funkciji pripadnosti. Ovaj koeficijent uzima sledeće vrednosti: $w_1=95$, $w_2=80$, $w_3=55$, $w_4=20$.

Pošto je zastupljenost fekalnih koliforma, odnosno brojnost kolonija bakterije *Escherichia coli* jedini mikrobiološki parametar koji je ušao u zakonsku regulativu (granične vrednosti za ovaj parametar definisane su u Uredbi o klasifikaciji voda) i pošto je to bakterija opasna po zdravlje ljudi, za određivanje konačnog fmWQI indeksa ovaj parametar uzima se kao ograničavajući. Dobijena vrednost fmWQI upoređuje se sa klasom kvaliteta koja je dobijena prema parametru *E. coli* i određuje se konačna klasa vode:

- ako je klasa kvaliteta vode dobijena preko fmWQI ista ili lošija od klase dobijene preko parametra *E. coli* zadržava se dobijena klasa kvaliteta;
- ako je kvalitet vode dobijen preko *E. coli* lošijeg kvaliteta usvaja se kvalitet vode dobijen preko tog parametra.

$$\text{klasa vode} = \max(k(fmWQI), k(E. coli))$$

gde su: $k(fmWQI)$ - klasa vode dobijena preko fmWQI indeksa; $k(E.coli)$ - klasa vode dobijena na osnovu zastupljenosti fekalnih koliforma tj., bakterije *E. coli*; max - označava veću vrednost klase kvaliteta, odnosno lošiji kvalitet vode.

PRIMER PRIMENE fmWQI

Opisana metoda primenjena je za određivanje kvaliteta vode u akumulaciji Gruža, na mernom mestu pored vodozahvata, na četiri različite dubine: 0.5 m, 10 m, 20 m i 30 m i za pet različitih vremenskih preseka: februar, maj, jul, septembar, novembar (u tabeli oznaka mesec/dubina). U tabeli 6 dati su, zbog ograničenosti prostora, samo konačni rezultati o kvalitetu vode: fmWQI, klasa određena preko fmWQI ($k(fmWQI)$), klasa dobijena preko parametra *E. coli* ($k(E.coli)$) i konačna klasa kvaliteta vode (klasa-m) određena preko mikrobioloških parametara. Radi upoređivanja vrednosti sa drugim klasifikacijama, daju se i klase vode dobijene preko: mWQI ($k(mWQI)$), WQI ($k(WQI)$) i Uredbe o klasifikaciji voda ($k(Uredba)$).

Iz rezultata datih u tabeli 6 očigledno je da se, prema mikrobiološkim karakteristikama, akumulacija celi razmatrani period i po svim dubinama nalazila u drugoj klasi kvaliteta. Ovo nije slučaj sa klasama dobijenim na osnovu fizičko-hemijskih parametara. Klase vode dobijene preko WQI indeksa, pošto se radi o ponderisanoj srednjoj vrednosti, nešto su bolje od klase vode dobijenih na osnovu Uredbe o klasifikaciji, kod koje kvalitet odgovara kvalitetu vode po najlošijem parametru. U letnjim mesecima dolazi do termičke stratifikacije vode u akumulaciji,

što utiče i na promenu koncentracije rastvorenog kiseonika po dubini. Ovaj parametar je razlog što kvalitet vode u letnjim mesecima i na većim dubinama prelazi u IV klasu kvaliteta. Interesantno bi bilo ispitati kvalitet vode u plićim delovima akumulacije, međutim za te segmente akumulacije nisu urađena sva potrebna merenja.

Tabela 6: Klase kvaliteta vode određene korišćenjem različitih metoda
Table 6: Water classes according to different methods

merenje	fmWQI	k(fmWQI)	k(E.coli)	klasa-m	k(mWQI)	k(WQI)	k(Uredba)
II/0.5	82.15	II	II	II	II	I	II
II/10	79.19	II	-	II	II	I	II
II/20	77.23	II	II	II	II	II	II
II/30	77.25	II	II	II	II	II	III
V/0.5	81.73	II	II	II	II	I	II
V/10	89.66	II	-	II	II	II	IV
V/20	84.96	II	-	II	II	III	III
V/30	81.43	II	II	II	II	III	IV
VII/0.5	84.19	II	-	II	II	II	II
VII/10	83.73	II	II	II	II	III	IV
VII/20	89.0	II	-	II	II	III	IV
VII/30	84.0	II	II	II	II	III	IV
IX/0.5	80.91	II	II	II	II	II	III
IX/10	81.96	II	II	II	II	II	IV
IX/20	79.03	II	II	II	II	III	IV
IX/30	82.27	II	II	II	II	II	IV
XI/0.5	84.79	II	II	II	II	I	II
XI/10	86.06	II	II	II	II	I	II
XI/20	86.06	II	II	II	II	I	II
XI/30	82.28	II	II	II	II	II	II

ZAKLJUČAK

U radu je dat predlog metodologije za određivanje jednog parametra fmWQI na osnovu koga se određuje kvalitet vode sa mikrobiološkog aspekta. Ovaj parametar mogao bi da uđe u metodologiju za klasifikaciju voda kao zbirni pokazatelj mikrobiološkog kvaliteta vode. Npr. umesto parametra E. coli mogla bi da se primeni ova metoda, jer je sveobuhvatnija od analize samo jednog mikrobiološkog parametra, a i taj parametar je obuhvaćen predloženom metodologijom. Naravno, ovaj indeks ne može sam za sebe da predstavlja kvalitet vodenog ekosistema, već mora da se kombinuje sa fizičko-hemijskim parametrima kvaliteta.

LITERATURA

1. Ćurčić S. i Čomić Lj: Microbiological Water Quality Index, J. European Water Management (In press)
2. Development of Water Quality Index, Scottish Development, Engineering Division, Edinburg, 1976
3. Đorđević B. i Milanović T.: Primena rasplinutih skupova pri vodoprivrednim analizama mera zaštite voda, Zbornik radova "Zaštita voda'96", Ulcinj, 1996.
4. Đorđević B. i Milanović T.: Primena neuro-fazi metodologije u vodoprivredi, časopis Vodoprivreda, 165-166. Beograd, 1997.
5. Petrović O., Gajin S., Matavulj M., Radnović D., Svrčev Z.: Mikrobiološko ispitivanje kvaliteta površinskih voda, Institut za biologiju, Novi Sad, 1998.
6. Uredba o klasifikaciji voda međurepubličkih vodotoka, međudržavnih voda i voda obalnog mora Jugoslavije, Službeni list SFRJ, br. 6/1978