

## Korelaciono-regresiona analiza modelirane prostorne raspodele reziduala hlora u vodovodnoj mreži

Rezidual hlora tj. koncentracija slobodnog hlora sposobnog da vrši dezinfekciju u pitkoj vodi je važan parametar kvaliteta pitke vode, koji govori prvenstveno o njenoj bakteriološkoj ispravnosti. Sa druge strane, prisustvo slobodnog hlora je preduslov za formiranje trihalometana (THM-a). Sa ovog stanovišta razumljiv je zahtev o kvalitetu isporučene vode da ona treba da bude minimalno hlorisana, a bezbedna za piće. Prema brojnim rezultatima modeliranja i eksperimentalnih istraživanja u distributivnim mrežama, prostorna raspodela reziduala hlora je u tesnoj korelaciji sa dinamikom potrošnje, temperaturom vode, početnom dozom hlora i sadržajem organske materije u vodi. U radu su prikazani neki od načina za predviđanje sadržaja reziduala hlora i THM-a u vodovodnim mrežama. Posebna pažnja je posvećena njihovoj prostornoj promenljivosti u slučaju promene početne koncentracije hlora. Za izvođenje računskog primera je korišćen EPANET i postojeća vodovodna mreža naselja Petrovac na Mlavi.

**Ključne reči:** kvalitet isporučene vode, rezidual hlora, trihalometani

### 1. UVOD

Postoji šest kategorija materija koje mogu kontaminirati vodu za piće: (1) mikroorganizmi, (2) dezinficijensi, (3) nusproizvodi dezinficijensa, (4) anorganske hemikalije, (5) organske hemikalije, i (6) radioaktivni elementi [1]. Dezinfekcija vode je osnovni proces obrade vode za uklanjanje (uništavanje ili inaktiviranje) patogenih mikroorganizama prisutnih u vodi. Dezinfekcioni procesi se ostvaruju direktnom primenom toplote (termička dezinfekcija), zračenjem (ultraljubičasto (eng.ultraviolet-UV),  $\gamma$ , ili X-zračenje), primenom ultrazvuka i/ili primenom hemijskih agenasa (hemijska dezinfekcija) [2].

Kvalitetna i bakteriološki ispravna pitka voda se, dakle, može proizvesti i bez uporebe hemijskih agenasa. Najbolji primer za to su vodovodi u Holandiji čija se strategija za proizvodnju kvalitetne pitke vode može sagledati iz sledećih, osnovnih postulata [3]:

- obaveza korišćenja najkvalitetnijeg raspoloživog izvora vode, što znači da prvenstveno treba koristiti mikrobiološki bezbedne, biološki stabilne, aerisane podzemne vode, a potom površinske vode isfiltrirane kroz slojeve peska, odnosno direktno prečišćavanje površinske vode,
- preporučeni fizički procesi su sedimentacija, filtracija i UV dezinfekcija, a ukoliko se oksidacija ne može izbeći treba koristiti ozon ili peroksid<sub>1</sub>

- kontinualno preduzimanje mera vezanih za sprečavanje ulaska patogena u distributivni sistem,
- primena procesa preventivnog sprečavanja opstanka i rasta patogena korišćenjem biostabilnih materijala u distribuciji i proizvodnji vode ima prednost nad procesima uništavanja patogena, i
- praćenje i blagovremeno otkrivanje kvarova u sistemu.

Ovakav pristup proizvodnji vode je osporavan mnogo puta uz iznošenje činjenica koje govore u prilog upotrebi dezinfekcije hlorom, kao što su:

- dezinfekcija hlorom obezbeđuje dopunsku barijeru postojanju ili rastu patogena u slučaju da se prečišćavanje pokaže neefikasnim ili dođe do zagađenja u distributivnoj mreži
- dezinfekcija hlorom sprečava ponovni rast bakterija i izbijanje zaraza zahvaljujući hlorom rezidualu [4].

Kako je hemijska dezinfekcija ekonomski najpovoljnija kada se radi o obradi većih količina vode, za pripremu vode za piće i u obradi otpadnih voda, kod nas, skoro isključivo se koristi hemijska dezinfekcija. Kao dezinfekciona sredstva se koriste neki teški metali, mineralne kiseline i baze, ozon, peroksidi, kalijum-permanganat i halogeni elementi, ali najviše korišćeni dezinfektant je hlor i neka jedinjenja hlora. Hlorisanjem se uklanja veliki broj supstanci koje su prisutne u prirodnim i otpadnim vodama. Od neorganskih supstanci uklanjaju se: H<sub>2</sub>S, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, NH<sub>3</sub>, a od organskih: fenoli, aminokiseline, ugljovodonici i belančevine.

Posle dodavanja hlora vodi i utroška na "potražnju vode za hlorom" u okviru koje hlor reaguje sa organskim ili neorganskim materijama

Adrese autora: <sup>1</sup>Hidroprojekat saobraćaj, Vele Nigrinove 16a, Beograd, <sup>2</sup>Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Primljeno za publikovanje: 22. 10. 2013.

Prihvaćeno za publikovanje: 12. 01. 2014.

prisutnim u vodenom toku i zidovima cevi u vodi preostaje "ukupan rezidual hlora", koji se sastoji od "kombinovanog reziduala hlora" i "slobodnog reziduala hlora". "Slobodni rezidual hlora ili slobodni raspoloživi hlor" u vidu hipohloraste kiseline, hipohloritnog jona i molekuskog hlora predstavlja parametar kvaliteta vode jer učestvuje u procesu dezinfekcije i garantuje bakteriološku ispravnost vode, a "kombinovani rezidual hlora ili vezani raspoloživi hlor" čine hlorna jedinjenja sa azotom, kao što su monohloramini, dihloramini, azottrihlorid i on nema ulogu u dezinfekciji vode [5].

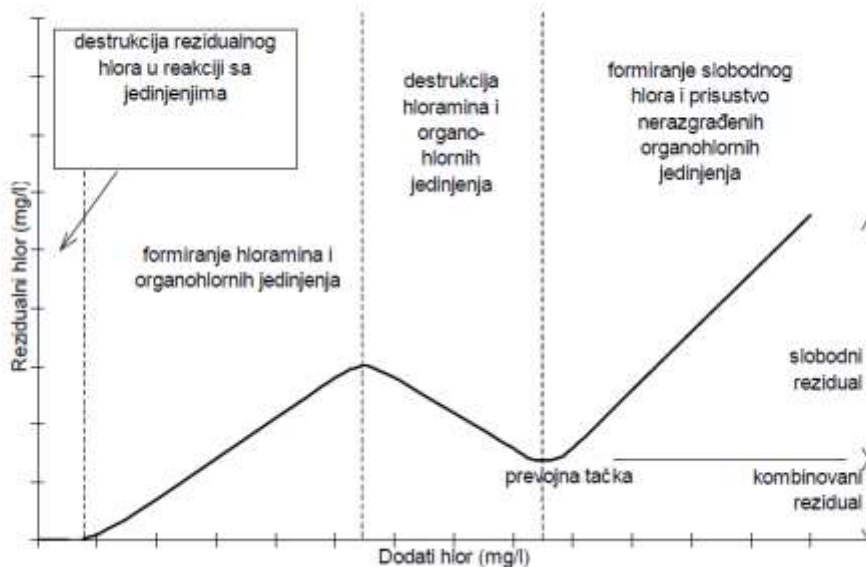
U zavisnosti od sadržaja rezidualnog hlora u vodi po isteku određenog vremena razlikujemo:

1. Hlorisanje do probojne tačke – Kada se u vodu koja sadrži amonijak dodaje hlor, i posle svakog dodavanja određuje sadržaj rezidualnog hlora, a dobijene vrednosti se prikazuju grafički, u zavisnosti od ukupne količine dodatog hlora, dobija se karakteristična kriva prikazana na slici 1. Oblik krive je funkcija, odnosno posledica načina reagovanja hlora i amonijaka, a na krivoj se uočava tačka proboja. Na krivoj se uočava prvi deo, na početku reakcije između amonijaka i hlora, kada nastaju monohloramin i dihloramin. Maksimalna krive odgovara molskom odnosu  $Cl_2/NH_3$  jedan. Dalji procesi doprinose opadanju sadržaja rezidualnog hlora zbog oksidativne razgradnje 60 prethodno obrazovanog hloramina. Na krivoj se zatim uočava "tačka proboja", koja odgovara molskom

odnosu  $Cl_2/NH_3$  dva. Daljim dodavanjem hlora iznad tačke proboja dolazi do pojave "slobodnog" hlora. Hlorisanje do tačke proboja se izvodi zbog efikasne dezinfekcije vode.

2. Hlorisanje uz dobijanje slobodnog hlora - U vodama sa malom potrebom za hlorom, odnosno dezinfekcijom, relativno lako se ostvaruje postojanje slobodnog hlora u vodi. Prisustvo slobodnog hlora moguće je ostvariti i u vodama sa većom količinom kontaminanata, hlorisanjem iznad probojne tačke. Održavanjem slobodnog hlora u postrojenju za pripremu vode za piće minimiziran je razvoj mikroorganizama i bioloških filmova u peščanim filtrima i taložnicima.

3. Hlorisanje uz dobijanje vezanog (rezidualnog) hlora - Ovaj način hlorisanja pogodan je za obezbeđivanje naknadne dezinfekcione aktivnosti. Vezani, rezidualni, hlor u reakciji sa amonijakom u obliku hloramina je manje reaktivan od slobodnog hlora i zato može duže vremena ostati sposoban za dezinfekciju. Hlorisanje uz dobijanje vezanog hlora može se ostvariti na nekoliko načina u zavisnosti od hemijske prirode vode. Vode koje sadrže malo (ili nimalo) amonijaka zahtevaju dodavanje i amonijaka i hlora, da bi se dobio vezani hlor, odnosno izvela hloraminacija. Ukoliko voda sadrži dovoljno amonijaka, dovoljno je jednostavno dodati hlor, odnosno izvesti hlorisanje. Ukoliko voda već sadrži slobodni hlor, on se može prevesti u vezani dodavanjem amonija.



Slika 1 - Hlorisanje u prisustvu amonijaka do probojne tačke

Prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće (Službeni list SRJ br.42/98) propisana je maksimalna dozvoljena koncentracija hlora (ukupnog), kao dezinfekcionog sredstva, do 3 mg/L, a slobodnog (rezidualnog) hlora do 0,5 mg/L. Ukoliko se pretera sa količinom hlora koja je dodata u vodu, radi ubrzanja procesa dezinfekcije, dolazi

do pojave viška hlora. Višak hlora, iznad željene koncentracije slobodnog, rezidualnog hlora (0,2-1,0 mg/L) može se ukloniti na različite načine. Jedan od načina je hemijskim procesom, redukcijom sa  $SO_2$ ,  $NaHSO_3$  ili  $Na_2SO_3$ , propuštanjem kroz sloj aktivnog uglja ili aeracijom, pri određenoj vrednosti pH.

## 2. MERENJE I MODELIRANJE SADRŽAJA REZIDUALNOG HLORA U VODI

Hlor je neselektivno oksidaciono sredstvo, koje reaguje i sa organskim i sa neorganskim materijama u vodi a istovremeno deluje i kao antimikrobni agens. Za potrebe sprovođenja analiza vezanih za određivanje prostorne raspodele ukupnog i slobodnog reziduala hlora u distributivnoj mreži period u kome se predviđa uzimanje uzoraka ne treba da bude manji od 1 godine, a uzorke treba uzimati na svaka 2 sata, tokom 2 sedmice tokom tekućeg meseca, sa lokacija bliskih uličnim hidrantima, kako bi bili reprezentativni. Pre uzimanja uzoraka treba otvoriti hidrant i pustiti da voda isteče, kako bi se obezbedila konstantna temperatura vode, a za određivanje sadržaja ukupnog hlora mogu se koristiti:

- test uz primenu otolidina (jeftin i jednostavan za upotrebu, koristi se u bazenskoj tehnici za dobijanje podatka o prisustvu ukupnog rezidualnog hlora u vodi na osnovu indikatora, žute boje uzorka),
- kolorimetrijski test uz primenu DPD (N,N-dietil-p-fenilendiamin) i analiziranje promene boje uzorka na kolirimetru uz dobijanje podataka o ukupnom rezidualu hlora, slobodnom rezidualu hlora (a samim time i o vezanom rezidualnom hloru), i
- kolorimetrijski test uz primenu DPD (N,N-dietil-p-fenilendiamin) i analiziranje promene boje uzorka na digitalnom kolirimetru uz dobijanje podataka o ukupnom rezidualu hlora, slobodnom rezidualu hlora (a samim time i o vezanom rezidualnom hloru).



Slika 2 - Digitalni kolorimetar

Početna matrica podataka dobijenih merenjem za dalje analize treba da sadrži podatke sa svih mesta uzorkovanja i za ceo period tokom koga su vršena meranja.

Za mehanizam razgradnje hlora je karakteristično da se može podeliti u dve faze:

- *I faza razgradnje - kratkotrajna, intenzivna potrošnja u granicama postrojenja za prečišćavanje vode* usled reakcija sa *neorganskim supstancama* u smanjenom valentnom stanju (prethlorisanje) i reakcija tokom vremena provedenog u kontaktnom bazenu postrojenja za prečišćavanje, posle filtracije na peščanim filtrima a pre hlorisanja u rezervoaru. Ova faza razgradnje hlora, prema [18] traje oko 1 sat.

- *II faza razgradnje - dugotrajna potrošnja u distributivnoj mreži* (posle hlorisanja u rezervoaru postrojenja za prečišćavanje vode) čiji intenzitet u najvećoj meri zavisi od prirode i količine prirodnih organskih materija (POM) koje su prisutne u vodi. POM predstavljaju kompleksnu smešu organskog materijala, čiji su glavni konstituenti huminske i fulvinske kiseline, hidrofilne kiseline, proteini, lipidi, ugljeni hidrati i aminokiseline. Pošto su organske i neorganske čestice prisutne u vodi u različitim koncentracijama i imaju različite stepene reaktivnosti, razgradnja hlora tokom vremena je postepen proces, a vreme poluraspada u prečišćenoj vodi može da varira od nekoliko sati do nekoliko dana.

Druga faza razgradnje hlora, posle proteklih 1 sata u okviru postrojenja za prečišćavanje vode, se može korektno modelirati modelom I reda:

$$C_t = C_0 * e^{-k_b t} \quad (1)$$

$C_0 [\frac{mg}{L}]$  - početna koncentracija hlora,  $k_b [\frac{1}{h}]$  - koeficijent potražnje za hlorom usled reakcija u vodenom toku (povezan sa vremenom poluraspada),  $C_t [\frac{mg}{L}]$  - koncentracija hlora posle proteklog vremena  $t$ .

Kao jako oksidaciono sredstvo, hlor može da reaguje i sa materijalom koji se nalazi istaložen po zidovima cevi distributivnih sistema, kao što su naslage ili biofilm. Zbog toga, osim potražnje za hlorom koja je rezultat reakcija sa organskim ili neorganskim materijama u vodenom toku, deo potražnje za hlorom proističe usled reakcija sa zidovima cevovoda, rezervoara i cevnog fittinga. Ova potražnja za hlorom obuhvata koroziju, nagomilavanje sedimenta i biofilma po zidovima cevovoda. Ona zavisi od stanja zidova cevovoda, cevnog materijala, prečnika, starosti cevovoda, vrste unutrašnje izolacije cevovoda i prisustva biofilma.

AWWARF (1996) [6] definiše koeficijent ukupne potražnje za hlorom  $K_T$  kao zbir koeficijenata potražnje za hlorom usled reakcija sa organskim i neorganskim materijama u vodenom toku  $K_B$  i koeficijenta potražnje za hlorom  $K_W$  usled reakcija sa organskim ili neorganskim materijama sa zidova cevovoda:

$$K_T = K_B + K_W \quad (2)$$

Određeni broj modela preporučuje kompleksniju hemijsku reakciju za distribucionu mrežu, kao na primer:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - K_B * C - \frac{K_f}{r_h} * (C - C_w) \quad (3)$$

$C(\frac{mg}{lit})$ ,  $C_w(\frac{mg}{lit})$  - koncentracija hlora u vodenom toku i na zidu cevovoda,  $t$  - vreme,  $u(m/s)$  - brzina vode,  $x$  - udaljenost duž cevovoda i  $k_f(\frac{m}{h})$  - koeficijent prenosa- transfera mase.

Rossmann et al. (1994) je pretpostavio jedinačinu I reda i za reakcije u vodenom toku i za reakciju sa materijalom sa zidova cevovoda i dobio veoma dobre rezultate u slučajevima primene na distribucionim mrežama koje su raspolagale kalibrisanim hidrauličkim modelima. Razvijen je koncept koeficijenta transfera mase za obračun radijalnog prenosa i procenjena potrošnja hlora usled reakcija sa zidovima cevovoda je:

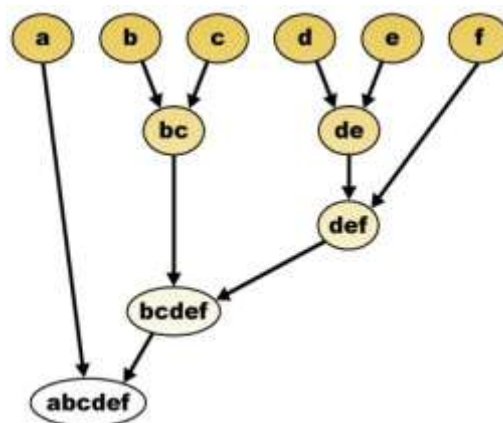
$$K = K_B + \frac{K_w * K_f}{r_H * (K_w + K_f)} \quad (4)$$

gde je  $r_H(m)$  - hidraulički radijus.

Modeliranje potražnje za hlorom tj. reziduala hlora bazirano na ovom konceptu je primenjeno u programskom paketu EPANET, koji je korišćen za potrebe ovog rada [7].

### 3. MATEMATIČKE METODE ZA ANALIZU PROSTORNE PROMENLJIVOSTI REZIDUALA HLORA I SADRŽAJA TRIHALOMETANA PO DISTRIBUTIVNIM VODOVODNIM MREŽAMA

Osnovne metode za određivanje prostorne promenljivosti reziduala hlora i sadržaja trihalometana (THM) po distributivnim vodovodnim mrežama su zasnovane na analizi stepena statističke povezanosti između pojava tj. formiranja korelacionih matrica kojima se dokazuje ili opovrgava povezanost rezultata merenja (ili modeliranja) po različitim čvorovima mreže. Najšire primenjivane su analiza faktora i cluster analiza. Primena ovih ili nekih drugih statističkih metoda istraživanja ima za cilj redukovanje velikog broja podataka i dobijanje kvalitetne informacije o njihovoj homogenosti (grupisanosti) i povezanosti.



Slika 3 - Grafički prikaz principa klaster analize-dendrogram

**Klaster analiza** [8] se može primeniti za grupisanje mernih mesta sa sličnim rezidualima hlora, a ovakav postupak bi podrazumevao dvo-stepeni postupak. U prvom delu bi se proračunavala matrica "međusobnih rastojanja".

$$d(y_i, y_s) = \sum_{j=1}^m |y_{ij} - y_{sj}|^r \quad (7)$$

a u drugom delu bi se vršilo objedinjavanje "najbližih" klustera, preračunavanje novih matrica međusobnih rastojanja, sve do momenta dok se ne dođe do toga da svi podaci pripadaju jednom klasteru. Proces se završava dobijanjem dendograma, koji omogućava kvalitetnu analizu optimalnog broja i lokacija mernih mesta po vodovodnim distributivnim mrežama gde je ovakva analiza neophodna.

**Faktorska analiza** [8] se takođe može primeniti za opis međusobne zavisnosti velikog broja promenljivih definisanjem seta zajedničkih osnovnih, međusobno nekorelisanih promenljivih, koje se nazivaju faktorima i kojima se mogu "opisati" sve ostale promenljive.

Tabela 1 - Chadocova skala za procenu reprezentativnosti regresione zavisnosti

R <sup>2</sup>	Tumačenje
0	Odsutnost veze
0,00-0,25	Slaba veza
0,25 – 0,64	Veza srednje jačine
0,64 - 1	Čvrsta veza
1	Potpuna veza

U okvirima ovoga rada, na primeru distributivne mreže Petrovca na Mlavi izvršen je pokušaj sprovođenja slične, ograničene "korelaciono-regresione" analize. Kao specifičan pokazatelj reprezentativnosti regresije je korišćen koeficijent determinacije R<sup>2</sup>, koji predstavlja odnos zbrova kvadranih odstupanja empirijskih podataka i podataka dobijenih regresijom koji se mogu i koji se ne mogu obja-

sniti postavljenom regresionom zavisnošću. Model regresije je reprezentativniji što je koeficijent determinacije bliži jedinici, a njegova značajnost se može proceniti na osnovu *Chaddockove skale* (tabela 1).

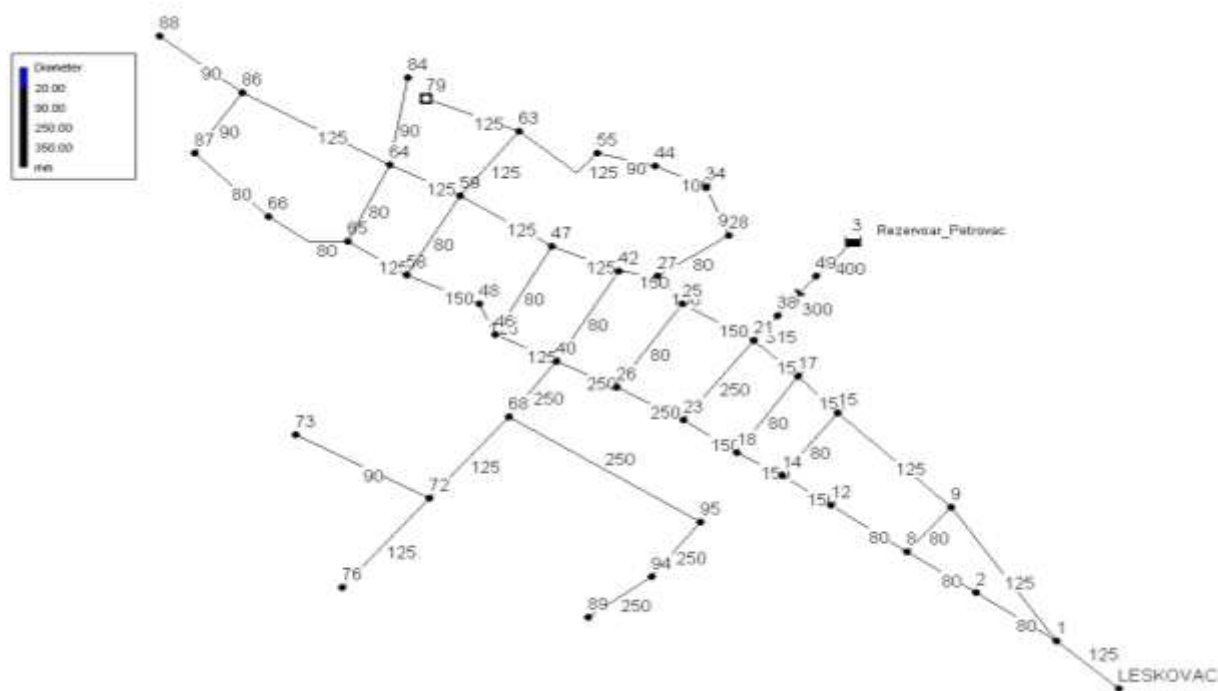
4. MATEMATIČKI MODEL VODOVODNOG SISTEMA PETROVCA I ANALIZA PROSTORNE PROMENLJIVOSTI REZIDUALA HLORA I THM-A

Gradski vodovod u Petrovcu na Mlavi je izgrađen 1973. godine, a rekonstruisan tokom 2007. - 2010. godine. Osnovno izvorište gradskog vodovoda predstavlja karstno vrelo "Šetonje" u blizini istoimenog naselja, a alternativno, dopunsko izvorište u malovodnom periodu je Malo Laole u aluvionu reke Mlave, na profilu sela Malo Laole [9,10].

Kapitalni objekti u postojećem sistemu vodosnabdevanja su: PPV Šetonje instalisanog kapaciteta  $Q = 80 \text{ L/s}$  i magistralni gravitacioni cevovod ukupne dužine  $L = 9.471 \text{ m}$  od PPV Šetonje do rekonstruisane PS "Malo Laole" sa merno-regulacionim blokom kojim se reguliše kapacitet gravitacione deonice, rekonstruisana PS "Malo Laole", crpilištem zapremine  $75 \text{ m}^3$  i tri pumpna agregata

tipa P8C/5/20/3C  $Q = 20 \text{ L/s}$ ,  $H = 47 \text{ m}$ ,  $N = 22\text{kW}$ , magistralni potisni cevovod PE 100, NP 10  $\varnothing 400 \text{ mm}$   $L = 9620 \text{ m}$  od rekonstruisane PS "Malo Laole" do rezervoara PETROVAC, dvokomorni poluukopani rezervoar PETROVAC zapremine  $V = 1.500 \text{ m}^3$  i gravitacioni dovodni cevovod PE 100, NP 10  $\varnothing 315 \text{ mm}$   $L = 640 \text{ m}$  od rezervoara PETROVAC do distributivne mreže u Petrovcu.

Za potrebe ovog rada izvršeno je uprošćenje realne vodovodne mreže (slika 4) tako što je kompletni magistralni dovod zamenjen gravitacionom deonicom (bez PS "Malo Laole"), a osnovno izvorište Šetonje, alternativno izvorište Malo Laole i rezervoar Petrovac jednim čvorom koji ima smisao neiscrpnog izvora snabdevanja za celu distributivnu mrežu [11]. Ovim se eliminiše uticaj rezervoara, crpilišta i režima pumpanja na parametre kvaliteta vode (koji može biti veoma značajan) i omogućava se pravilno sprovođenje analize prostorne promenljivosti reziduala hlora i sadržaja THM-a po pojedinim čvorovima distributivne mreže [12].



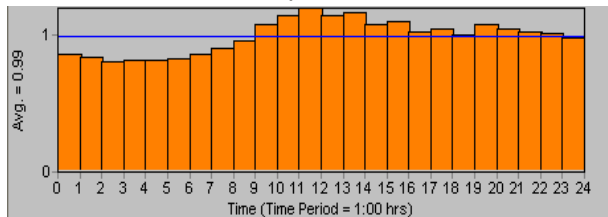
Slika 4 - Uprošćeni model vodovodne mreže grada Petrovac na Mlavi

Ukupna potrošnja u danu maksimalne potrošnje je raspoređena između potrošačkih čvorova. Prilikom izbora potrošačkih čvorova korišćeni su rezultati istraživanja do kojih se došlo tokom izrade Matematičkog modela vodovodnog sistema grada Petrovca na Mlavi – Idejni projekat, VODING – 92 - Beograd 1996.god, kao i dijagrami časovnih ne-

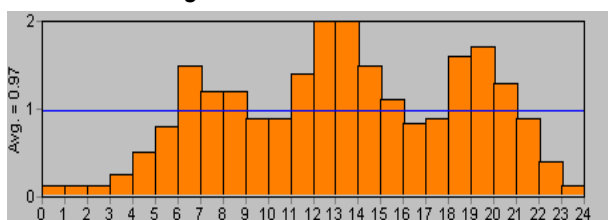
ravnomernosti za pojedine kategorije potrošača, preuzeti iz istog projekta. Prema ovoj dokumentaciji, postoje tri kategorije potrošača:

1. gradsko stanovništvo
2. seosko stanovništvo
3. industrijski potrošači

Dijagrami časovnih neravnomernosti korišćeni u hidrauličkom proračunu za gradsko stanovništvo i seosko stanovništvo su prikazani na slikama 5 i 6.



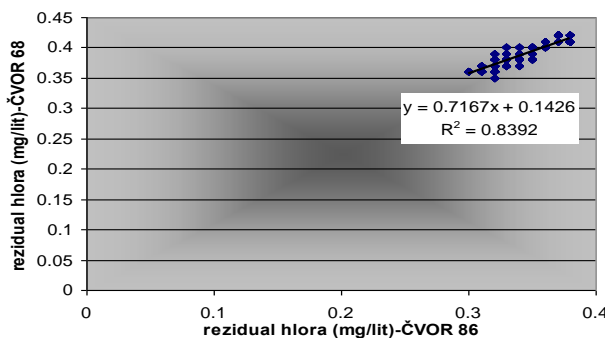
Slika 5 - Dijagram časovnih neravnomernosti za gradsko stanovništvo



Slika 6 - Dijagram časovnih neravnomernosti za seosko stanovništvo

Poštujući preporuke i analize koji govore o prostornoj raspodeli reziduala hlora [12,13], na matematičkom modelu su sprovedene sledeće analize [14]:

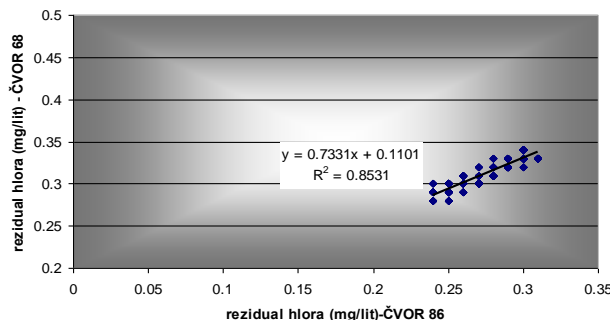
1. regresiona analiza koncentracija rezidualnog hlora realizovanih u čvorovima 86 i 68 distributivne mreže u kojima je primenjen dijagram časovnih neravnomernosti za gradsko stanovništvo za slučajeve da početna koncentracija hlora po čvorovima mreže iznosi  $C_0=0,5\text{mg/lit}$ , odnosno  $C_0=0,4\text{ mg/lit}$ , bez promene koeficijenta  $k_b, k_w$ .



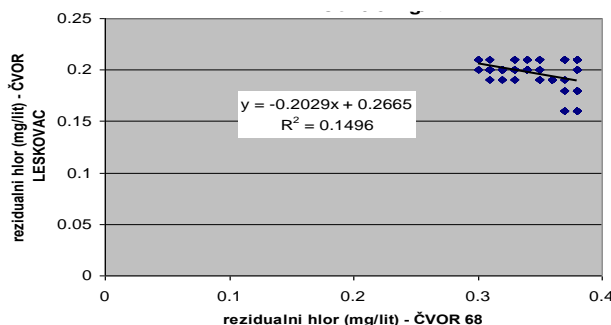
Slika 7 - Dijagram rasipanja i regresiona zavisnost reziduala hlora za čvorove 86(grad) i 68(grad), sa istim dijagramom časovnih neravnomernost,i za  $C_0 = 0.5\text{ mg / lit}$

2. regresiona analiza koncentracija rezidualnog hlora realizovanih u čvorovima 68 i LESKOVAC distributivne mreže u kojima su primenjeni dijagrami časovnih neravnomernosti za gradsko i seosko stanovništvo za slučajeve da početna koncentracija hlora po čvorovima mreže iznosi  $C_0 = 0.5\text{ mg / lit}$ ,

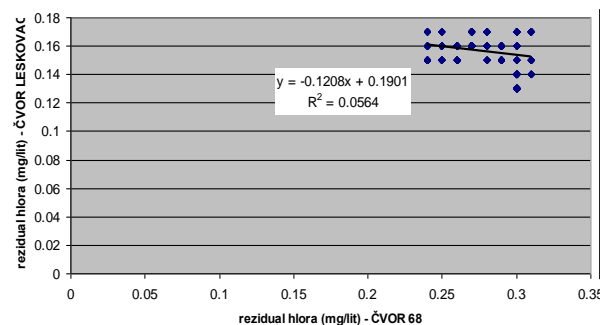
odnosno  $C_0 = 0.4\text{ mg / lit}$ , bez promene koeficijenta  $k_b, k_w$



Slika 8 - Dijagram rasipanja i regresiona zavisnost reziduala hlora za čvorove 86(grad) i 68(grad), sa istim dijagramom časovnih neravnomernost,i za  $C_0 = 0.4\text{ mg / lit}$

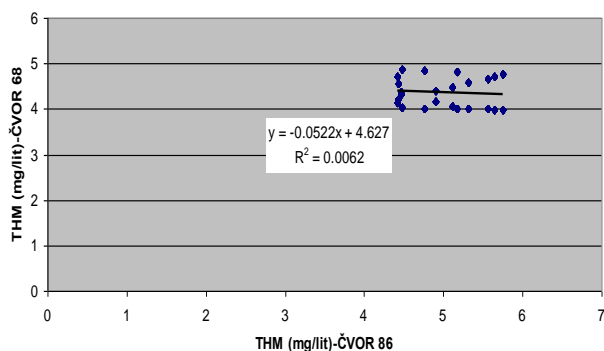


Slika 9 - Dijagram rasipanja i regresiona zavisnost reziduala hlora za čvorove 68 (grad) i LESKOVAC (selo), sa različitim dijagramima časovnih neravnomernost,i za  $C_0 = 0.5\text{ mg / lit}$

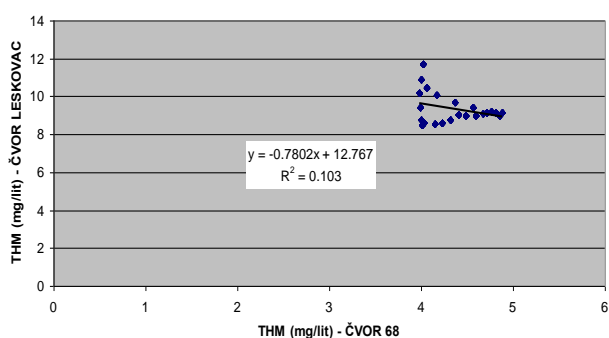


Slika 10 - Dijagram rasipanja i regresiona zavisnost reziduala hlora za čvorove 68 (grad) i LESKOVAC (selo), sa različitim dijagramima časovnih neravnomernost,i za  $C_0 = 0.4\text{ mg / lit}$

3. regresiona analiza koncentracija THM u čvorovima 86 i 68 u kojima su primenjeni dijagrami časovnih neravnomernosti za gradsko stanovništvo i čvorovima 68 i LESKOVAC u kojima su primenjeni dijagrami časovnih neravnomernosti za gradsko i seosko stanovništvo.



Slika 11 - Dijagram rasipanja i regresiona zavisnost sadržaja THM-a po čvorovima 86(grad) i 68(grad), sa istim dijagramima časovnih neravnomernosti



Slika 12 - Dijagram rasipanja i regresiona zavisnost sadržaja THM-a po čvorovima 68(grad) i Leskovac (selo), sa različitim dijagramima časovnih neravnomernosti

Rezultati sprovedenih analiza dovode do sledećih zaključaka:

- postoji jaka korelaciona povezanost između koncentracija rezidualnog hlora u slučaju da se radi o čvorovima u kojima potrošači imaju isti dijagram časovnih neravnomernosti, bez obzira na početnu koncentraciju hlora. Koeficijent determinacije prilikom primene linearne regresije iznosi oko 0,84 -0,85.
- ne postoji korelaciona povezanost između koncentracija rezidualnog hlora u slučaju da se radi o čvorovima u kojima potrošači imaju različite dijagrame časovnih neravnomernosti, bez obzira na početnu koncentraciju hlora. Koeficijent determinacije prilikom primene linearne regresije iznosi oko 0,01-0,1.
- ne postoji korelaciona povezanost između koncentracija THM-a u slučajevima da se radi o čvorovima u kojima potrošači imaju iste ili različite dijagrame časovnih neravnomernosti, pa za analizu prostorne promenljivosti THM-a regresiona analiza nije primenljiva [15].

## 5. ZAKLJUČAK

Modeliranje kvaliteta vode u distributivnim mrežama treba uvesti u praksu projektovanja i eksploatacije vodovodnih sistema i to preko hidrauličkih simulacionih modela distributivne mreže [16], jer se samo tako može dobiti prava slika o prostornoj promenljivosti parametara kvaliteta [17]. Takođe upotreba regresiono-korelacione, faktorske i cluster analize može biti veoma koristan matematičko – statistički aparat za analiziranje pojedinih, ali ne i svih parametara kvaliteta vode isporučene potrošačima. Do ovakvih, interesantnih zaključaka se došlo sprovođenjem veoma ograničene analize na modelu, bez rezultata merenja [18]. Samim time i vrednost ovako dobijenih zaključaka je ograničena, pa u daljim istraživanjima treba raditi sa kalibrisanim matematičkim modelima. Sa druge strane sprovođenje ovakvih analiza je dragoceno u određivanju obima i procedura po kojima bi se sprovodila eksperimentalna istraživanja. Kao jedan od najvažnijih zaključaka treba istaći da dijagrami potrošnje po čvorovima određuju dinamiku promene rezidualnog hlora, ali ne ili ne u istoj meri i koncentracije THM-a po čvorovima.

## Zahvalnost

Rezultati istraživanja modeliranja kvaliteta vode i hemijskih reakcija, spregnutih sa hidrodinamičkim modelima a prezentovani u ovom radu su delom finansirani u okviru naučnog projekta Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije broj TR 37010 "Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture".

## LITERATURA

- [1] EPA priručnik: Uticaj starosti vode na kvalitet vode u distributivnom sistemu, <http://www.epa.gov/safe-water/disinfection/t2/compliance.html>
- [2] AWWA Research Found. (1999): Residential End Uses of Water, <http://www.waterwiser.org/awwarf>
- [3] Eijnvort R.: Ispravna voda za piće / Kontrolisanje mikrobiološkog kvaliteta u distributivnim mrežama.
- [4] Ostojić Ž., D. Ljubisavljević, B. Milanović (2006): Model generator potreba za vodom i hidraulički simulacioni model vodovodne mreže. 14. Savetovanje SDHI Zbornik apstrakata.
- [5] Ostojić Ž., D. Prodanović, S. Marčeta (2012): Prognoza sadržaja trihalometana u distribucionoj vodovodnoj mreži. Vodovod i Kanalizacija, Vršac.
- [6] AWWARF (1996): Characterisation and modeling of chlorinedecay in distribution systems..AWWA, USA
- [7] EPA (2002): EPANET 2 User Manuel.
- [8] Lee L., C. Lu, S.–L. Kung (2004): Spatial diversity of Chlorine Residual in a Drinking Water Distribution system. Journal of Environmental Engineering, Vol. 130, No. 11. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372 (2004) 130:11(1263)

- [9] IWA Consalt (2009): Glavni projekat PS " Malo Laole ", Beograd.
- [10] IWA Consalt (2009): Glavni projekat rezervoara "Petrovac", Beograd
- [11] Ostojčić Ž. (2007): Stohastička analiza potreba za vodom u poljoprivredi i vodosnabdevanju. Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Beograd.
- [12] Ostojčić Ž., D. Prodanović, S. Marčeta (2013): Prostorna promenljivost reziduala hlora u distributivnoj vodovodnoj mreži. Vodovod i Kanalizacija, Tara.
- [13] Rossman L.A., R.M. Clark, W.M. Grayman (1994): Modelling chlorine residuals in drinking water distribution systems. J. Envir Eng Division of the ASCE 120(4):803–820
- [14] Milojević M. (2004): Kvalitet vode u vodovodima. Vodoprivreda, 0350-0519, 36, 211-212 p. 339-360
- [15] Brown D., J. Bridgeman, J.R. West (2011): Predicting chlorine decay and THM formation in water supply systems. Rev Environ Sci. Biotechnol. 10:79–99DOI 10.1007/s11157-011-9229-8
- [16] Walski T.M., D.V..Chase, D. Savić, etc. (2003): Advanced water distribution modelling and management. Haestad Methods, Inc.
- [17] University of Missouri (MU) Water Resources Research Center (WRRRC) (2008): Report of the City of Columbia DBP Analysis Project.
- [18] Molnar J. (2011): Efekti odabranih unapređenih procesa oksidacije i koagulacije na sadržaj prirodnih organskih materija u vodi. Doktorska disertacija, Prirodno matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.

## ABSTRACT

### CORRELATION-REGRESSION ANALYSIS OF MODELLED CHLORINE RESIDUAL'S SPATIAL VARIABILITY IN WATER SUPPLY NETWORK

*Residual chlorine ex. concentration of free chlorine disinfection able to carry disinfection in drinking water is an important parameter of drinking water, primarily talking about its bacteriological safety. On the other hand, the presence of free chlorine is a prerequisite for the Trihalomethane's (THM) formation. From this point of view the water quality request for minimum chlorinated and safe potable water is understandable. In numerable modeling and experimental research the spatial diversity of chlorine residual was found to correlate with the daily consumption schedule, the water temperature, the initial dose of chlorine and organic matter content in the water. This paper presents some of the possibilities in predicting the content of residual chlorine and THM in water distribution networks. Special attention is paid to the spatial variability of residual chlorine and THM's to a change in the initial concentration of chlorine. Results are presented using existing water supplying network of the settlement Petrovac na Mlavi using EPANET simulation software.*

**Keywords:** quality of delivered water, residual chlorine, trihalomethanes

Scientific paper

Received for Publication: 22. 10. 2013.

Accepted for Publication: 12. 01. 2014.