

# Analiza robusnosti tehnoloških jedinica bistenja vode za piće: uobičajeni i vanredni uslovi rada

Slobodanka Zorić<sup>1</sup>, Milena Bečelić-Tomin<sup>2</sup>, Božo Dalmacija<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vodovod Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

<sup>2</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija

## Izvod

Primarni cilj sistema vodosnabdijevanja je zaštita zdravlja ljudi obezbjeđivanjem mikrobiološki i hemijski ispravne vode za piće. Značajne promjene u kvalitetu vode izvorišta zahtjevaju dovoljno robusne sisteme pripreme vode za piće čije su performanse neosjetljive na date varijacije i promjenjive radne uslove. Mutnoća vode predstavlja važan parametar u kontroli filtracije vode i obezbjeđivanju efikasnosti dezinfekcije. U ovom radu ispitana je efikasnost uklanjanja mutnoće vode u fabrici vode za piće "Vodovod" u Banjaluci u toku uobičajenih uslova rada, kada je maksimalna detektovana vrijednost iznosila 25 NTU i vanrednih uslova rada u toku kojih je mutnoća vode dostizala vrijednost >240 NTU. Procjena robusnosti sistema bistenja vode izvršena je pojedinačno za period uobičajenih i vanrednih uslova rada (u toku i nakon pražnjenja akumulacije). Za izračunavanje indeksa robusnosti korišćena je stroža ciljna vrijednost kvaliteta filtrirane vode (0,5 NTU) u odnosu na onu koja se zahtjeva aktuelnim zakonodavstvom, što u postojećoj praksi predstavlja novi kriterijum u analizi rizika. Rezultati obrade podataka ukazali su na visoku stabilnost rada tehnoloških jedinica u uobičajenim uslovima. Ustanovljen je značajan uticaj operativnih uslova fabrike na mutnoću filtrirane vode u vanrednim uslovima rada čija bi se optimizacija mogla izvršiti uz prethodan adekvatan monitoring izvorišta vode. Na taj način bi se smanjio potencijalni rizik od pojave patogena u vodi za piće.

*Ključne reči:* mutnoća vode, filtracija, kvalitet vode, analiza rizika.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

STRUČNI RAD

UDK: 658.265:628.1.033: 66.067.1

Hem. Ind. 74(2) 91-102 (2020)

## 1. UVOD

Akumulacije su od suštinskog značaja za snabdijevanje vodom za ljudsku potrošnju, navodnjavanje, proizvodnju energije itd. Pored činjenice da korišćenje površinskih voda u date svrhe može imati značajan hidromorfološki uticaj, akumulacije predstavljaju davno ustanovljene mjere protiv štetnih posljedica po količinu i kvalitet vode (periodi ekstremnih suša i poplava) omogućavajući održavanje hidrološkog i ekosistemskog režima u nizvodnim dionicama [1]. Izgradnja hidroelektrana i njihova operativnost, sa druge strane, povezane su sa brojnim ozbiljnim ekološkim problemima kao što su prekid migracije riba, promjene nivoa vode u nizvodnim akumulacijama, inundacija pejzaža i promjene u biogeochemijskom ciklusu [2]. Obzirom da su akumulacije i hidroenergetski objekti veliki i zahtjevni sistemi, potreban je njihov nadzor zbog potencijalnih havarijskih situacija. Polazeći od ovakvih postavki, neophodno je preventivno održavanje opreme, kako bi se preduprijedila pojava kvara ili lošeg pogonskog stanja, koje bi rezultiralo pogoršanjem kvaliteta vode [3]. Remont i održavanje opreme u najvećem broju slučajeva zahtijeva povremeno pražnjenje akumulacije. Sve akumulacije su u većoj ili manjoj mjeri, u zavisnosti od primijenjenih mjera prevencije, podložne sedimentaciji. Formirani sedimenti predstavljaju rezervoare i potencijalne izvore širokog spektra zagađujućih materija organskog i neorganskog porijekla, kao i mikroorganizama u vodenom stubu [4-5].

Rijeka Vrbas, površinska voda koja služi kao resurs vode za piće grada Banjaluka, u uobičajenim uslovima rada podložna je čestim i naglim promjenama u kvalitetu koje su najčešće povezane sa meteorološkim uslovima. Sezonske varijacije ovog

Korespondencija: Slobodanka Zorić, Vodovod Banja Luka, Sime i Ilije Partalo 15, 78 000 Banja Luka

E-mail : [szoricnf@gmail.com](mailto:szoricnf@gmail.com)

Rad primljen: 09. septembar 2019.

Rad prihvaćen: 10. april 2020.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND190909009Z>



parametra su najizraženije u proljetnom i jesenjem periodu [6]. Posmatrano na godišnjem nivou, za proteklih 15 godina, mutnoća vode se kretala od  $< 1$  NTU do  $> 100$  NTU. U najvećem broju uzoraka vode rijeke Vrbas (oko 70 %) izmjerene mutnoće su u opsegu od 0,65-5 NTU, dok je u najmanjem broju uzoraka ( $\sim 0,14$  %) mutnoća bila  $> 100$  NTU.

Najznačajnije promjene kvaliteta rijeke Vrbas su u toku pražnjenja akumulacije HE Jajce II, Federacija Bosne i Hercegovine, koje se vrši povremeno u cilju čišćenja dna (zamuljenost akumulacije oko 70 %) i remonta opreme. Tada, dio ispuštene količine mulja dospijeva u nizvodni tok rijeke Vrbas na čijim se određenim riječnim dionicama nalazi akumulacija Bočac, kompenzaciono jezero i vodozahvat u Novoseliji koji je namijenjen snabdijevanju grada vodom za piće. Jedan dio mulja se zadrži u koritu rijeke Vrbas, od akumulacije Jajce II do akumulacije Bočac, u kojoj, zbog njene desetostruko veće zapremine dolazi do razrjeđenja ispuštenog mulja. Pri svakom pražnjenju akumulacije HE Jajce II u gradskom vodovodu se proglašavaju vanredni uslovi rada. Pregledom istorijskih podataka ustanovljeno je da je ovakva vrsta dešavanja zabilježena 1972., 1983., 1989. i 2006. godine. Ispuštanje mulja 1972. godine prouzrokovalo je zaustavljanje proizvodnje vode za piće u trajanju od 4 dana [7]. Ekstremne vrijednosti zabilježene su i 1983. godine, na lokalitetu izlaz iz akumulacije Jajce II, kada je vrijednost mutnoće vode iznosila čak 5300 NTU, a projektovani kapacitet industrijskog postrojenja je bio do 300 NTU. Vjerovatno da će daleko veće posljedice po kvalitet vode izazvati moguće pražnjenje akumulacije Bočac, jer nizvodno kompenzaciono jezero neće moći značajno ublažiti "vodeni udar" sa svojom deset puta manjom zapreminom (oko  $5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> vode).

Višestruke barijere u sistemu tretmana vode za piće smanjuju rizik po zdravlje ljudi. Postavljanje standarda zasnovanih na performansama za svaku barijeru tj. jedinicu tretmana smatra se veoma važnim [8]. Brzi gravitacioni filteri predstavljaju posljednju barijeru čestičnim materijama [9], a mutnoća vode ukazuje na učinak uklanjanja patogena koji se prenose vodom [10]. U praksi, mutnoća vode se prati rutinskim monitoring programom pri čemu se performanse sistema pripreme vode za piće ispituju analizom seta podataka upravo ovog parametra [11]. Prema preporukama Svjetske zdravstvene organizacije u reviziji Direktive vode za piće EU, mutnoći vode, kao jednom od parametara kvaliteta u Direktivi trebalo bi pripisati važnu ulogu u operativnom monitoringu sistema filtracije, jer se do sada pokazao kao dobro utvrđen parametar za nadgledanje performansi filtracionih procesa [12]. Ukoliko se nakon filtracije vrši završna dezinfekcija, vrijednost mutnoće treba da bude do 0,5 NTU za 15 uzastopnih minuta, dok prosječne vrijednosti treba da su  $< 0,3$  NTU (95 %). Ovakav kvalitet vode u pogledu mutnoće smatra se značajnim u smislu kontrole enteričnih patogena u vodi za piće i smanjenog rizika od rasta patogena u distributivnom sistemu [10]. Naime, štiteći mikroorganizme u vodi za piće, čestice mutnoće na taj način mogu redukovati njihovu izloženost dezinfektantima u završnoj fazi dezinfekcije [13]. Tipični tehnološki parametri kontrole filtracije u tretmanu vode za piće su: stepen opterećenja filtera, dužina rada, pad pritiska i brzina pada, kao i vrijeme potrebno za pranje filtera [14]. Ovi parametri, odnosno indeksi performansi filtera, najčešće se koriste u vodovodima i u najvećem broju slučajeva ne uzimaju u obzir robusnost performansi. Sistem za pripremu vode za piće se smatra robusnim kada su njegove performanse neosjetljive na varijacije u kvalitetu sirove vode i promjene u radu tj. kada i pored toga omogućava postizanje željenog kvaliteta vode [11,15]. U današnjim uslovima promjena kvaliteta površinske vode prouzrokovanih različitim faktorima, na prvom mjestu akcidentnim ispuštanjima zagađujućih materija ili naglim meteorološkim promjenama, primjena indeksa robusnosti (izražen preko mutnoće vode) TRI (indeks robusnosti sistema/*turbidity robustness index*) se u procjeni efikasnosti pripreme vode za piće smatra bitnom. Na ovaj način može se procijeniti rizik koji je od velikog značaja pri primjeni planova za sigurno snabdijevanje vodom za piće [16]. Prema saznanjima autora, u literaturi su u poslednjim godinama razvijene formule za izračunavanje indeksa robusnosti [11,17].

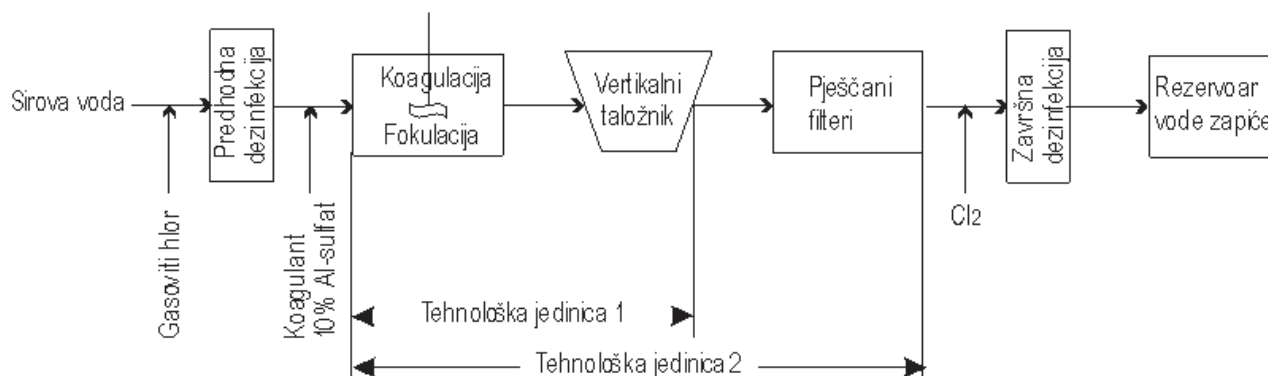
U ovom radu, predstavljen je uticaj poslednjeg pražnjenja akumulacije HE Jajce II na nizvodni tok rijeke Vrbas, resursa vode za piće stanovništva grada Banjaluka. Prikazani su rezultati efikasnosti konvencionalnog tretmana pripreme vode za piće na industrijskom postrojenju. Određene su performanse procesa koagulacije, flokulacije, taloženja i filtracije u pogledu mutnoće vode primjenom indeksa robusnosti sistema u uobičajenim i vanrednim uslovima rada. Krajnji cilj rada bio je procjena sposobnosti sistema pripreme vode za piće, tj. tehnoloških jedinica bistrenja vode, u budućim, sličnim vanrednim uslovima rada i potrebe za ustanovljavanjem dodatnih mjera u svrhu postizanja ciljanog kvaliteta vode za piće i istovremeno smanjenja potencijalnog rizika po zdravlje stanovništva.

## 2. EKSPERIMENTALNI DIO

Vodosnabdijevanje grada Banjaluke skoro je isključivo vezano za rijeku Vrbas (98 %). Kvalitet vode rijeke Vrbas, na vodozahvatu Novoselija, prema Uredbi o klasifikaciji voda i kategorizaciji vodotoka u najvećem dijelu godine ispunjava zahtjeve II kategorije, te se na osnovu toga može koristiti kao sirovina za proizvodnju vode za piće [18]. Kvalitet vode na vodozahvatu je pod direktnim uticajem akumulacije hidroelektrane "Bočac" na udaljenosti cca 30 km (ukupne zapremine  $V_{uk} = 52,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ , srednje dubine  $h_{cp} = 22,3 \text{ m}$ , površine  $P = 233 \text{ ha}$ , za srednji godišnji proticaj u profile brane  $Q_{cp} = 81,13 \text{ m}^3/\text{s}$ , vrijeme izmjene vode u akumulaciji je oko 7 dana) i njene kompenzacione akumulacije na brani koja je udaljena cca 20 km od vodozahvata. U uzvodnom toku rijeke Vrbas oko 20 km od akumulacije HE Bočac nalazi se akumulacija HE Jajce II. U akumulaciju HE Bočac, najveće količine vode dotiču rijekom Vrbas preko ispusnih sistema HE Jajce II.

Monitoring kvaliteta rijeke Vrbas nizvodno od akumulacije Bočac do izvorišta Novoselija trajao je 16 dana. U ovom radu su prikazani rezultati kvaliteta vode izvorišta i vode nakon primijenjenih tehnoloških procesa.

Tehnološke faze pripreme vode za piće na industrijskom postrojenju (Slika 1) su bile sljedeće: (1) predhlorisanje (gasni hlor); (2) koagulacija (10 % rastvor aluminijum-sulfata); (3) taloženje (vertikalni taložnik); (4) filtracija (filteri od kvarcnog pijeska; visina ispune 1 m); (5) završna dezinfekcija (gasni hlor).



Slika 1. Šema konvencionalnog tretmana vode za piće

Figure 1. Scheme of conventional drinking water treatment

Uzorkovanje trenutnih uzoraka vode izvršeno je prema standardnim metodama [19-20]. Mjerna mjesta uzimanja uzoraka vode za mjerenje mutnoće su sirova voda na vodozahvatu, izlaz iz taložnika i zbirno mjesto nakon filtracije. U radu je bilo osam filtera čija je ukupna površina  $448 \text{ m}^2$ .

Uzorci za mjerenje mutnoće vode su uzimani sledećom frekvencijom: uobičajeni uslovi rada na svakih dva sata i vanredni uslovi rada na svakih sat vremena u toku 24 h. Mutnoća vode određena je nefelometrijski, primjenom turbidimetra (2100AN Laboratory Turbidimeter, EPA, 115 Vac, HACH, USA).

Tehnološki i hidraulički uslovi na postrojenju u vrijeme uobičajenih i vanrednih uslova rada prikazani su u Tabeli 1.

Prosječne vrijednosti temperature i pH sirove vode bile su  $8,3 \text{ }^\circ\text{C}$  i pH 8,01 u uobičajenim uslovima rada, a u vanrednim ove vrijednosti su iznosile  $14,8 \text{ }^\circ\text{C}$  i pH 8,00. Vremenski period ciklusa filtracije iznosio je oko 24 h u uobičajenim uslovima i oko 12 h u vanrednim uslovima. Dužina filtracionog ciklusa je zavisila od količine profiltrirane vode, mutnoće izbistrene vode koja dolazi na filter, padu pritiska u filteru i mutnoći efluenta.

Tabela 1. Srednje vrijednosti pojedinih tehnoloških parametara pripreme vode za piće u uobičajenim i vanrednim uslovima rada

Table 1. Average values of individual technological parameters for drinking water preparation in normal and emergency operating conditions

| Tehnološki parametri   | Uslovi rada     |                  |
|--|-----------------|------------------|
|  | Uobičajeni      | Vanredni         |
| Protok sirove vode, $\text{m}^3 / \text{h}$  | $2303 \pm 149$  | $1910 \pm 172$   |
| Doza koagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 16 \text{ H}_2\text{O}$ , $\text{mg} / \text{l}$ | $8,71 \pm 6,59$ | $13,02 \pm 9,73$ |
| Brzina filtracije, $\text{m} / \text{h}$   | 5,2             | 4,3              |
| Doza hlora, $\text{mgCl}_2 / \text{l}$   | $1,99 \pm 0,62$ | $4,87 \pm 0,93$  |

Za izračunavanje indeksa robusnosti korištena je formula [17]:

$$TRI_{90} = \left[ \frac{T_{90}}{T_{50}} + \frac{T_{50}}{T_{cilj}} \right] 0,5 \quad (1)$$

gde je:

$TRI_{90}$  - indeks robusnosti

$T_{cilj}$  - ciljna vrijednost mutnoće filtrirane vode, 0,5 NTU

$T_{90}$  i  $T_{50}$  - vrijednosti 90 i 50 % pojave mutnoće

0,5 - faktor ponderisanja

U jednačini (1) prvi termin predstavlja uniformnost performansi tokom jednog ciklusa filtracije, dok drugi dio predstavlja ukupni učinak filtera u odnosu na cilj i oba termina su sa jednakim ponderisanjem čime je data jednaka važnost varijabilnosti performansi filtera i ispunjavanju cilja.

Podaci dobijeni mjerenjem mutnoće vode analizirani su i u svrhu dobijanja informacije o vremenu stabilnih uslova rada filtera tj. vremenu rada filtera u toku jednog ciklusa kada je mutnoća filtrirane vode niža od zadate ciljane vrijednosti, pri čemu je korišćena sljedeća modifikovana formula [11]:

$$TRI_{90J} = \left[ 1 - \frac{G}{100} \frac{T_{90}}{T_{50}} \right] + \left[ \frac{t_{50}}{T_{cilj}} \frac{G}{100} \right] \quad (2)$$

gdje  $TRI_{90J}$  (vrijeme stabilnih uslova rada filtera),  $G / \%$  je dio vremena u ukupnom vremenu ciklusa rada filtera kada je mutnoća vode niža od ciljane vrijednosti, dok ostali članovi imaju gore navedeno značenje.

U cilju poređenja performansi, indeks je računat u periodu uobičajenih uslova i u toku tzv. vanrednih uslova tj. perioda pražnjenja akumulacije, a dobijeni rezultati primjenom obe formule su upoređeni.

Praćenje performansi tehnoloških jedinica koagulacija-flokulacija-taloženje-filtracija izvršeno je na osnovu kriterijuma za stabilne tj. nestabilne uslove rada date u Tabeli 2.

Tabela 2. Kriterijumi za stabilne i nestabilne uslove rada

Table 2. Criteria for stable and unstable operating conditions

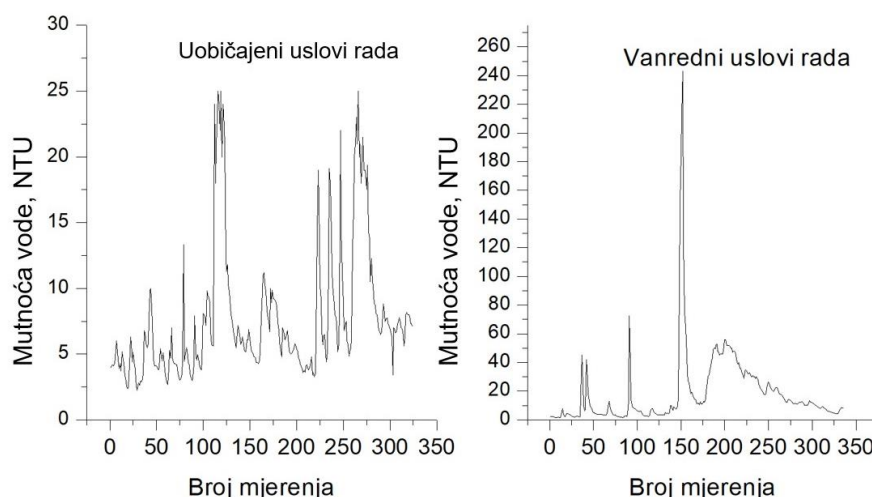
| Kriterijum              | Stabilni uslovi  | Nestabilni uslovi  |
|-------------------------|--|--|
| Mutnoća filtrirane vode | < 0,5 NTU bez velikih operativnih promjena<br>Operativni periodi:<br>- stabilni uslovi rada filtera<br>- uslovi sazrijevanja i probijanja mutnoće, zaustavljanja i ponovnog rada | > 0,5 NTU<br>Operativni periodi:<br>- promjene u kvalitetu sirove vode<br>- neoptimalni uslovi koagulacije i flokulacije |

Deskriptivna statistička analiza podataka mutnoće vode nakon primijenjenih tehnoloških jedinica, za period uobičajenih i vanrednih uslova rada sprovedena je korišćenjem programa Microsoft Office Excel 2010. Za utvrđivanje statistički značajne razlike između srednjih vrijednosti mutnoće vode primijenjen je z-Test testiranjem nulte ( $\mu_1 - \mu_2 = 0$ ) i alternativne hipoteze ( $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ ) za  $\alpha = 0,05$  u istoj softverskoj aplikaciji.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 3.1. Promjene u kvalitetu vode izvorišta nakon pražnjenja akumulacije

Kvalitet vode izvorišta tj. na ulazu u industrijsko postrojenje (u daljem tekstu: sirova voda) u periodu prije pražnjenja akumulacije (uobičajeni uslovi rada) i u toku tj. nakon pražnjenja akumulacije (vanredni uslovi rada) prikazan je na Slici 2. Podaci mjerenja mutnoće vode u uobičajenim uslovima odnose se na period mart-april 2006. godine, a za vanredne uslove na period avgust-septembar 2006. godine. Broj uzoraka u jednom i drugom periodu iznosio je oko 330.



Slika 2. Mutnoća vode rijeke Vrbas na izvorištu „Novoselija“  
 Figure 2. Water turbidity of the Vrbas river in „Novoselija“ water source

U uobičajenim uslovima detektovana je značajno niža maksimalna vrijednost mutnoće vode od 25 NTU u poređenju sa vanrednim uslovima, dok je srednja vrijednost iznosila  $7,7 \pm 5,0$  NTU. Ovakve vrijednosti kvaliteta sirove vode karakteristične su za proljetni period.

Mutnoća sirove vode u toku vanrednih uslova rada kretala se u širokom opsegu (<2 NTU do >240 NTU). Srednja vrijednost iznosila je  $18,5 \pm 26,2$  NTU. Zapažena je značajna varijacija tj. odstupanje od srednje vrijednosti u periodu vanrednih u odnosu na uobičajene uslove. Jedan od razloga je to što se vanredni uslovi u vodovodu proglašavaju u momentu dobijanja informacije o početku pražnjenja akumulacije, iako je kvalitet sirove vode još uvijek stabilan u smislu niskih vrijednosti mutnoće vode. Sa druge strane, varijabilnosti doprinose visoke vrijednosti prouzrokovane dospijevanjem suspendovanih materija nakon pražnjenja akumulacije do izvorišta, što je prouzrokovalo i maksimalnu izmjerenu vrijednost mutnoće vode, odnosno 243 NTU. Analizom višegodišnjih podataka mutnoće sirove vode u uobičajenim uslovima rada u avgustu i septembru mjesecu, izračunate su srednje vrijednosti mutnoće vode koje su se kretale od 0,98 do 5,78 NTU, u zavisnosti od analizirane godine, što je značajno niža vrijednost od srednje vrijednosti izračunate u periodu pražnjenja akumulacije.

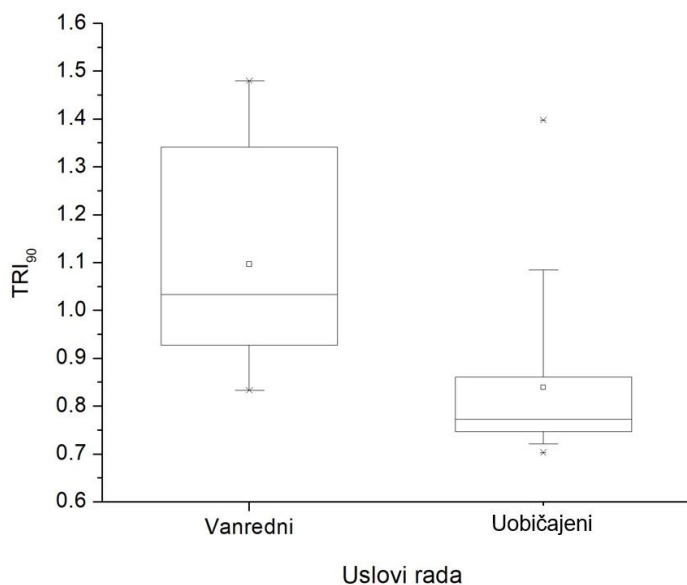
Pored značajnih promjena u mutnoći vode, u prethodno publikovanim radovima ukazano je i na ostale promjene u kvalitetu vode izvorišta u toku vanrednih uslova [21]. Naime, pražnjenje akumulacije rezultiralo je i povećanim sadržajem azotnih materija u sirovoj vodi na vodozahvatu Novoselija. Poznato je da amonijum jon interaguje sa česticama mutnoće zahvaljujući pozitivnom naelektrisanju, i vrlo se brzo oksiduje bakterijama do nitrita i nitrata uz potrošnju rastvorenog kiseonika u vodi, što može imati negativan uticaj na akvatični živi svijet [22]. Tako je maksimalna detektovana vrijednost azotnih materija u izvorištu, izražena preko sadržaja amonijum jona i nitritnog jona iznosila  $1,80 \text{ mg NH}_4\text{-N dm}^{-3}$  i  $0,20 \text{ mg NO}_2\text{-N dm}^{-3}$ , redom, a u vodi za piće te vrijednosti su iznosile  $1,46 \text{ mg NH}_4\text{-N dm}^{-3}$  i  $0,013 \text{ mg NO}_2\text{-N dm}^{-3}$ , redom [21]. U uobičajenim uslovima rada vrijednosti sadržaja amonijum jona i nitritnog jona u vodi za piće su u skoro svim uzorcima ispod granice detekcije.

### 3. 2. Uticaj promjene u kvalitetu vode izvorišta na robusnost sistema

Procjena robusnosti sistema vode za piće sa aspekta osjetljivosti na varijacije u kvalitetu sirove vode izvršena je izračunavanjem indeksa robusnosti. Indeks je dobijen kao bezdimenzioni podatak, pri čemu niže vrijednosti ovog parametra (do 1) ukazuju na proces tretmana kojim se postiže cilj kvaliteta vode sa relativno niskom varijacijom i istovremeno se sistem ocjenjuje kao robusniji.

Varijacije  $TRI_{90}$  u periodu uobičajenih uslova rada i u toku/nakon pražnjenja akumulacije (uzeti su u obzir svi ciklusi rada filtera) prikazane su kutijastim dijagramom (eng. *box and whisker plot*) na Slici 3. Stepenn raspršenosti i asimetričnosti  $TRI_{90}$  značajno je veći u vanrednim uslovima u odnosu na uobičajene uslove rada. Najviša izračunata

vrijednost  $TRI_{90}$  iznosi 1,48. Razlog značajne razlike u izračunatim  $TRI_{90}$  je to što su i u ovom periodu, kako je napomenuto, postignuti stabilni uslovi rada sa vrijednostima mutnoće vode  $< 0,5$  NTU, sa  $TRI_{90}$  između 0,8 i 1. Sa druge strane određen broj dana sistem je funkcionisao u tzv. nestabilnim uslovima prouzrokujući prevazilaženje ciljne vrijednosti mutnoće vode i sa velikom varijabilnošću između 50 i 90 % vrijednosti mutnoće vode. I u jednim i u drugim uslovima rada pojavljuju se ekstremne vrijednosti (označene sa \* na dijagramu).



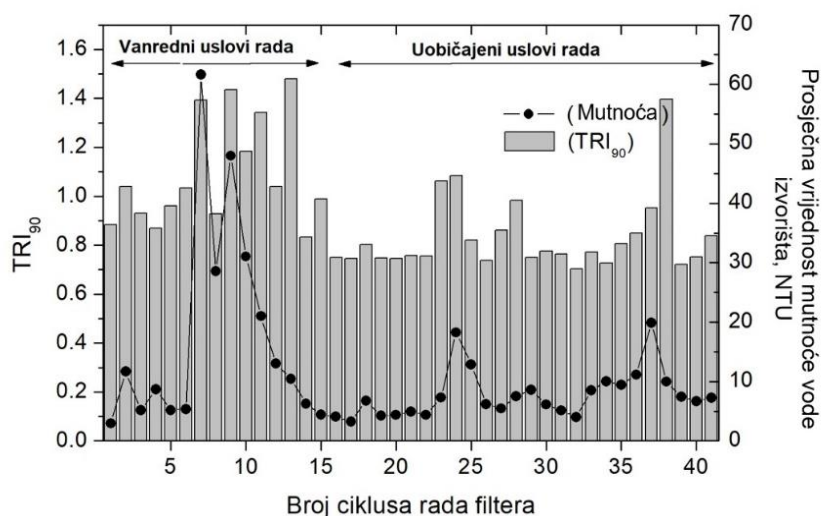
Slika 3. Kutijasti dijagram  $TRI_{90}$  u vanrednim i uobičajenim uslovima rada  
Figure 3. Box diagram  $TRI_{90}$  for normal and emergency operating conditions

Poređenjem  $TRI_{90}$  po dnevnim ciklusima rada filtera sa prosječnim vrijednostima mutnoće vode izvorišta tj. sirove vode, nije u svim slučajevima uočena značajna zavisnost (Slika 4). Generalno posmatrajući, vrijednosti  $TRI_{90}$  više su na kraju perioda pražnjenja akumulacije, kada su izračunate prosječne vrijednosti mutnoće sirove vode niže od maksimalno detektovanih, što navodi na zaključak da su zavisne od operativnih uslova postrojenja za pripremu vode za piće. Naime, prolazak talasa zagađenja i sedimentacija suspendovanih materija u izvorištu imalo je za posledicu pad vrijednosti mutnoće sirove vode (na Slici 4, u periodu od 7 do 14 ciklusa rada filtera), ali izračunate vrijednosti  $TRI_{90}$  ukazuju na nedovoljnu efikasnost pomenutih procesa. Indeksi performansi procesa su u većini slučajeva rada filtera niži od 1, osim u pet ciklusa kada  $TRI_{90}$  prevazilazi datu vrijednost.

Analizom podataka mjerenja mutnoće vode ustanovljeno je da je u ukupnom broju izvršenih mjerenja u vanrednim uslovima, ciljna vrijednost mutnoće vode od 0,5 NTU, premašena u 17 % uzoraka. Ove vrijednosti premašene su u određenim periodično uzimanim uzorcima u toku ciklusa rada filtera, a u pojedinim ciklusima je ova vrijednost bila premašena skoro cijeli vremenski period rada. Ovi podaci potvrđeni su analizom stabilnosti uslova rada filtera u okviru vremenskog perioda njihovog ciklusa tj. izračunatim indeksom  $TRI_{90i}$  (Slika 5). Veći broj izračunatih vrijednosti  $TRI_{90i}$  niži je od  $TRI_{90}$ , ali su u pojedinim ciklusima date vrijednosti bile izjednačene, a identifikovan je slučaj kada je  $TRI_{90i} > TRI_{90}$ .

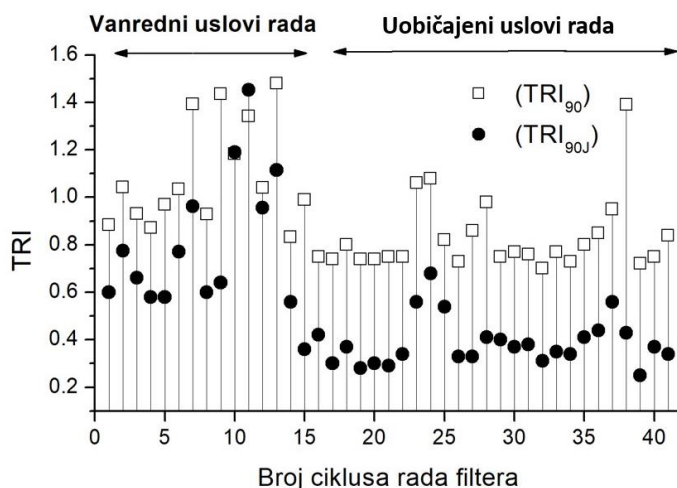
Poređenjem sa vrijednostima indeksa  $TRI_{90}$  u uobičajenim uslovima rada, može se zaključiti da su vrijednosti indeksa  $TRI_{90i}$  u svim ciklusima rada filtera značajno niže. Ovo ukazuje na činjenicu da je, pored razlike u izračunatim vrijednostima indeksa i varijacijama u kvalitetu, kvalitet filtrirane vode bio ispod ciljane vrednosti  $T_{cilj}$  u toku većeg vremenskog perioda rada filtera za sve cikluse

Podaci dobijeni analizom zavisnosti performansi procesa pripreme vode za piće od kvaliteta sirove vode i izračunatih vrijednosti indeksa robusnosti bili su osnova za analizu mogućeg uticaja operativnih uslova na kvalitet vode i efikasnost datih procesa.



Slika 4. Zavisnost  $TRI_{90}$  i mutnoće vode izvorišta od ciklusa rada filtera u uobičajenim i vanrednim uslovima rada

Figure 4. Dependence of  $TRI_{90}$  and water source turbidity on filter working cycle in normal and emergency operating conditions



Slika 5. Vrijednosti parametara  $TRI_{90}$  i  $TRI_{90J}$  u uobičajenim i vanrednim uslovima rada

Figure 5.  $TRI_{90}$  and  $TRI_{90J}$  value in normal and emergency operating conditions

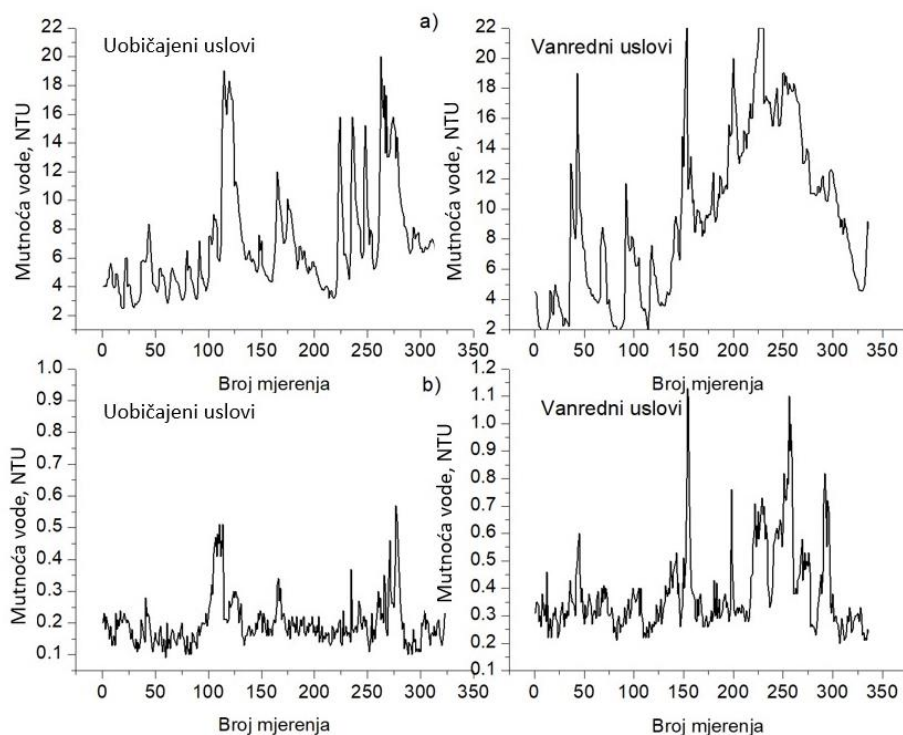
### 3. 3. Uticaj operativnih uslova na efikasnost sistema

Poznato je da uklanjanje mutnoće vode procesom filtracije zavisi od više faktora među kojima su najznačajniji fizičke i hemijske karakteristike čestica suspendovanih u vodi koje dopijevaju na filtere, ali i tip i efikasnost predtretmana (koagulacija, flokulacija i taloženje) [23]. Iz tog razloga su u ovom radu pored kvaliteta filtrirane vode prikazani rezultati kvaliteta vode nakon prethodnih primijenjenih tehnoloških jedinica pripreme vode. Tehnološki parametri konvencionalnog tretmana bili su izmijenjeni u vanrednim uslovima rada u odnosu na redovne kao što se može vidjeti u Tabeli 1. Prije svega, izvršeno je smanjenje protoka sirove vode i do 30 %, na osnovu dotadašnjeg iskustva rada, kada je primijećeno da u vrijeme povećane mutnoće sirove vode i njenom velikom protoku (samim tim i velikoj brzini filtracije) dolazi do tzv. "proboja" mutnoće ispod filtera i skraćivanja vremena njegovog rada. Smanjenje brzine filtracije direktno utiče na bolji transport suspendovanih čestica te kvalitetniju aglomeraciju i taloženje čestica unutar filterske ispune [24].

Na Slici 6 prikazane su izmjerene vrijednosti mutnoće vode nakon procesa taloženja (Slika 6a) i filtracije (Slika 6b) na industrijskom konvencionalnom postrojenju. Ovim postupcima prethodili su hlorisanje-koagulacija-flokulacija.



Statističkom obradom podataka mutnoće vode nakon primijenjenih tehnoloških jedinica, za period uobičajenih i vanrednih uslova, dobijeni su podaci prikazani u Tabeli 3.



Slika 6. Mutnoća vode nakon: a) taloženja i b) filtracije na industrijskom konvencionalnom postrojenju za pripremu vode za piće u uobičajenim i vanrednim uslovima rada

Figure 6. Water turbidity after: a) sedimentation and b) filtration in a conventional industrial plant for drinking water preparation in normal and emergency operating conditions

Tabela 3. Srednje ( $\bar{x}$ ) i maksimalne vrijednosti mutnoće sa standardnim devijacijama ( $sd$ ) i brojem mjerenja ( $n$ ), nakon primijenjenih procesa u periodu uobičajenih i vanrednih uslova rada industrijskog postrojenja

Table 3. Average ( $\bar{x}$ ) and maximal water turbidity values with standard deviations ( $sd$ ) and number of measurements ( $n$ ), after applied processes in a period of normal and emergency operating conditions of industrial plant

|  | Srednje vrijednosti mutnoće vode (NTU)<br>sa standardnim devijacijama, ( $\bar{x} \pm sd$ ) | Maksimalna vrijednost mutnoće vode (NTU) |
|--|---|--|
| <b>Hlorisanje-koagulacija-flokulacija-taloženje</b>            |   |  |
| Uobičajeni uslovi rada*  | 7,05 ± 3,68   | 20                                       |
| Vanredni uslovi rada**   | 9,51 ± 5,37   | 22,3                                     |
| <b>Hlorisanje-koagulacija-flokulacija-taloženje-filtracija</b> |   |  |
| Uobičajeni uslovi rada*  | 0,20 ± 0,08   | 0,57                                     |
| Vanredni uslovi rada**   | 0,38 ± 0,16   | 1,13                                     |

\*n=324; \*\*n=336

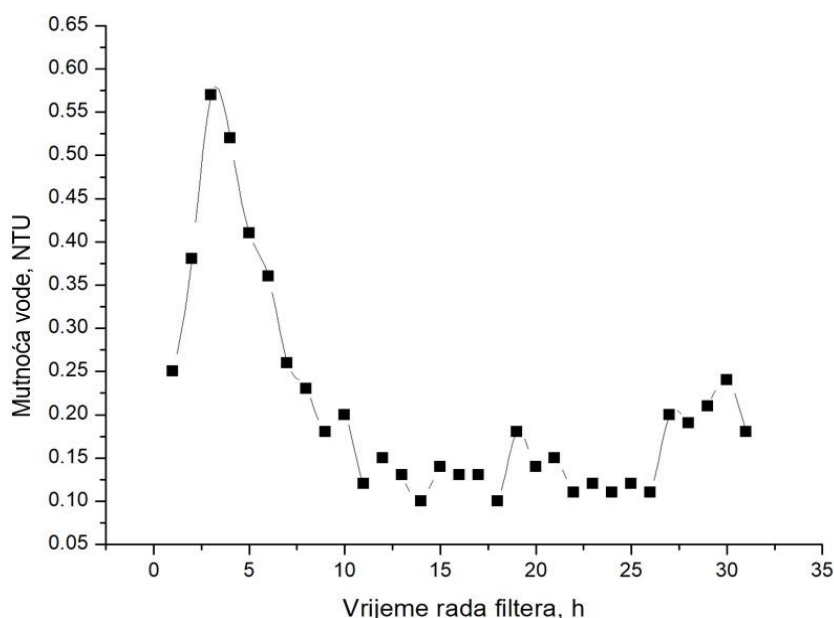
Rezultati z-Testa ukazali su da postoje statistički značajne razlike između srednjih vrijednosti mutnoće vode nakon primijenjenih tehnoloških jedinica u periodu uobičajenih i vanrednih uslova rada. Osnovni razlog razlike u srednjoj vrijednosti mutnoće vode je razlika u kvalitetu sirove vode, na šta ukazuju numeričke vrijednosti datog parametra u ova dva perioda.

Posmatrajući nezavisno oba perioda, ustanovljeni su dodatni uticaji na mutnoću vode nakon taloženja i filtracije, razmotreni u narednom tekstu. U toku uobičajenih uslova rada, u 92,9 % uzoraka filtrirane vode zabilježena je vrijednost mutnoće  $\leq 0,3$  NTU, a u 5,9 % uzoraka te vrijednosti su bile u opsegu od 0,3 do 0,5 NTU. Ove vrijednosti pokazuju da je u najvećem dijelu perioda tehnološki proces bio optimizovan tj. sistem je bio stabilan. Međutim, posmatrajući po pojedinačnim tehnološkim jedinicama, srednja i maksimalna vrijednost kao i standardna devijacija mutnoće vode nakon



taloženja u ovom periodu rada ukazuju na dodatne moguće uticaje na kvalitet vode, na prvom jestu operativne. Naime, ustanovljena je smanjena efikasnost procesa taloženja u ovim uslovima pri vrijednostima mutnoće sirove vode od 10-25 NTU (Slika 6a, od 100-120 i 220-270 mjerenja). Posebno „teške“ za obradu se izdvajaju vode čije su vrijednosti ukupne mutnoće u opsegu od 10-20 NTU, gdje je koloidna mutnoća 2-5 NTU, kako je dotadašnjim radom ustanovljeno. Zaostali dio koloidne mutnoće se vrlo teško uklanja na filterima pri povećanoj brzini filtracije kakva je bila u uobičajenim uslovima.

Takođe, razlike u kvalitetu filtrirane vode, usko su zavisne od perioda rada filtera tj. vremena nakon pranja filtera (posmatrajući 12 i 24-časovni ciklus rada filtera). Imajući u vidu da se dati operativni uslovi ne mogu odvojiti od cjelokupnog ciklusa rada filtera, isti se posmatraju u procjeni stabilnosti procesa filtracije. Kada se nakon pranja (pranje traje od 8 – 10 min) filter čija ispuna ekspandira 20 – 30 %, pusti u ponovni rad, vrijeme potrebno za vraćanje filterske ispune pod pritiskom vodenog stuba u normalno stanje je relativno dugo. Da bi se skratilo to vrijeme, prije potpunog formiranja filtera, vrši se otvaranje regulacionog ventila za filtriranje što dovodi do stvaranja vakuma u kratkom periodu. Posledica toga jeste smanjenje veličine pora između čestica filterske ispune, nakon čega filter dobija svoj puni kapacitet u pogledu uklanjanja čestica mutnoće. U vremenskom periodu od otvaranja regulacionog ventila do potpunog formiranja filterske ispune dolazi do povećanja mutnoće vode efluenta. Ova pojava uslovljava razlike u izračunatim  $TRI_{90}$  (Slika 5). Na Slici 7 dat je ilustrativni primjer povećane mutnoće filtrirane vode, neposredno nakon pranja filtera tj. na početku njegovog ciklusa rada.



Slika 7. Ilustrativni primjer povećane mutnoće vode nakon pranja filtera

Figure 7. An illustrative example of increased water turbidity after filter cleansing

U periodu vanrednih uslova, srednje vrijednosti mutnoće filtrirane vode po najvećem broju dnevnih ciklusa rada filtera značajno su ispod ciljane vrijednosti od 0,50 NTU. Međutim, posmatrajući opseg detektovanih vrijednosti, mutnoća vode se kretala od 0,20 do 1,13 NTU. Iako u relativno malom broju analiziranih uzoraka (tri uzorka), ipak je izmjerena vrijednost mutnoće bila i iznad 1 NTU što je maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) za vodu za piće prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće [25]. Ove vrijednosti su zabilježene neposredno nakon maksimalnih detektovanih vrijednosti mutnoće sirove vode i mutnoće nakon primijenjenih procesa koagulacije-flokulacije-taloženja što je, kako je uočljivo i na Slici 5, imalo uticaj na odstupanja  $TRI_{90}$  od prosječnih izračunatih vrijednosti indeksa. Naime, maksimalna izmjerena vrijednost nakon taloženja u tom periodu iznosila je 22,3 NTU (koloidna mutnoća je bila 4,74 NTU). Ovaj maksimum je izmjeren pri mutnoći sirove vode od 124 NTU i značajno višoj dozi koagulant (60,5 g m<sup>-3</sup>) od prosječno primijenjenih (oko 40 g m<sup>-3</sup>) što je za posljedicu imalo izmjerenu mutnoću filtrirane vode iznad 1 NTU. Ovo su tipični nestabilni uslovi rada tj. neoptimalni uslovi koagulacije i flokulacije [26] kako je napomenuto u kriterijumima

datim u Tabeli 2. Pored negativnog uticaja na mutnoću vode, prekomjerno doziranje koagulanta dovodi do povećanja rezidualnog aluminijuma u filtriranoj vodi preko  $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$  [27-28], što je MDK za vodu za piće po Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće. Razlog neoptimalnih uslova koagulacije je na prvom mjestu taj što sam sistem operativnog monitoringa nije prilagođen na način da bi se moglo preventivno djelovati na velike fluktuacije mutnoće sirove vode. Monitoring kvaliteta sirove vode započinje na samom vodozahvatu, dakle neposredno prije tehnološkog procesa. U tom slučaju operater nema dovoljno vremena da adekvatno prilagodi doze koagulanta promjeni mutnoće (nema automatskog sistema doziranja koagulanta u odnosu na mutnoću sirove vode).

Ovi značajni pikovi u izmjerenim vrijednostima mutnoće pripadali su dužem vremenskom intervalu (mjerenja od 180-250), kada je ustanovljen komplementaran porast mutnoće vode rijeke Vrbas (Slika 2) i mutnoće vode nakon taloženja i filtracije (Slika 6). Iako se očekivalo, imajući u vidu razliku u temperaturi sirove vode u analiziranim periodima, da će proces koagulacije u vanrednim uslovima biti efikasniji, naprijed navedeni podaci nisu to potvrdili. Stoga se pretpostavlja da je razlog za povećanje mutnoće vode u prirodi suspendovanih i koloidnih čestica koje čine mutnoću, kao i njihove nedovoljno intenzivne interakcije sa koagulantom [29]. Treba napomenuti da u tehnološkom i hidrauličkom pogledu veliki doprinos za nedovoljnu efikasnost procesa u vanrednim situacijama ima i vanredan rad sistema za odmuljivanje taložnika. Tada je frekvencija odmuljenja taložnika veća do pet puta u odnosu na redovne uslove.

#### 4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je ukazao na značaj promjena u kvalitetu sirove vode izvorišta namijenjenog vodosnabdijevanju i optimizacije tehnologije pripreme, na kvalitet vode za piće u datim uslovima. Procjena robusnosti sistema bistrenja vode izvršena je pojedinačno za period uobičajenih i vanrednih uslova rada (u toku i nakon pražnjenja akumulacije) bez njihovog direktnog poređenja, jer su se tehnološki parametri pripreme vode za piće značajno razlikovali. Metodom deskriptivne statistike utvrđeno je da je sistem bistrenja vode stabilan u dužem vremenskom periodu za oba uslova. Međutim, izračunatim TRI vrijednostima identifikovani su ciklusi rada filtera nakon pražnjenja akumulacije kojima su prethodili nestabilni uslovi koagulacije, flokulacije i taloženja. Ovi podaci su od velikog značaja za primjenu preventivnih akcija prije slijedećeg proglašavanja vanrednih uslova koji mogu biti prouzrokovani ne samo radom hidroelektrane već i sve češćim promjenama meteoroloških uslova koji imaju negativan uticaj na kvalitet vode izvorišta. U tom smislu, neophodan je dobro dizajniran proces koagulacije koji se, na osnovu podataka kvaliteta sirove vode, izvodi pod strogom kontrolom doziranja koagulanta, a čime bi se postigao ciljani kvalitet vode sa malim vrijednostima varijanse mutnoće i istovremeno smanjio rizik od pojave enteričnih patogena u vodi za piće. Da bi to bilo izvodljivo, monitoring izvorišta je potrebno sprovoditi i na tački uzvodno od postojeće čime bi operater u vodovodu imao dovoljan vremenski period za prilagođavanje rada tehnoloških jedinica bistrenja vode uslovima njenog kvaliteta. Uz to, da bi se izbjegao uticaj operatera na potrebne doze koagulanta, pri datim mutnoćama sirove vode, neophodno je uvesti sistem automatskog doziranja koagulanta.

#### LITERATURA

- [1] Chang EE, Chiang PC, Huang SM, Lin YL. Development and implementation of performance evaluation system for a water treatment plant: case study of Taipei Water Treatment Plant. *Pract Period Hazard, Toxic, Radioact Waste Manag.* 2007; 11(1): 36-47.
- [2] Truffer B, Bratrich C, Markard J, Peter A, Wüest A, Wherli B. Green Hydropower: The contribution of aquatic science research to the promotion of sustainable electricity. *Aquat Sci.* 2003; 65(2): 99-110.
- [3] Bunea F, Bucur DM, Dumitran GE, Ciocan GD. Water Quality in Hydroelectric Sites. In: Kostas V, ed. *Ecological Water Quality – Water Treatment and Reuse.* IntechOpen. 2012; 391-408.
- [4] Weston NB, Dixon RE, Joye SB. Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: Geochemistry and microbial pathways of organic matter mineralization. *J Geophys Res.* 2006; 111: G01009(14).
- [5] Wang XY, Feng J. Assessment of the Effectiveness of Environmental Dredging in South Lake, China. *Environ Manage.* 2007; 40:314–322.
- [6] Hurst AM, Edwards MJ, Chipps M, Jefferson B, Parsons SA. The impact of rainstorm events on coagulation and clarifier performance in potable water treatment. *Sci Total Environ.* 2004; 321, 219-230.

- [7] Kapić I, Karaselimović S. Neka praktična iskustva prečišćavanja vode u vanrednim uslovima. *Zaštita i unapređenje čovjekove sredine*. 1984; 2: 35 – 40 (in Serbian)
- [8] Zhang K, Achari G, Sadiq R, Langford CH, Dore MHI. An integrated performance assessment framework for water treatment plants. *Water Res*. 2012; 46, 1673-1683.
- [9] Upton A, Jefferson B, Moore G, Jarvis P. Rapid gravity filtration operational performance assessment and diagnosis for preventative maintenance from on-line data. *Chem Eng J*. 2017; 313, 250-260.
- [10] Hamouda MA, Anderson WB, Van Dyke MI, Douglas IP, McFadyen SD, Huck PM. Scenario-based quantitative microbial risk assessment to evaluate the robustness of a drinking water treatment plant. *Water Qual Res J Can*. 2016; 51.2, 81-96.
- [11] Hartshorn AJ, Prpich G, Upton A, Macadam J, Jefferson B, Jarvis P. Assessing filter robustness at drinking water treatment plants. *Water Environ J*. 2015; 29, 16-26.
- [12] WHO. Support to the revision of Annex I Council Directive 98/83/EC on the Quality of Water Intended for Human Consumption (Drinking Water Directive). Drinking Water Parameter Cooperation Project. 2017.
- [13] Dalmacija B, Agbaba J, Klačnja M. Mikrobiološki aspekti primene i efikasnost dezinfekcije vode za piće. U: Dalmacija B, Agbaba J, Klačnja M, ur. *Dezinfekcija vode*. PMF, Departman za hemiju, Novi Sad; 2005; 2: 88-104. (in Serbian).
- [14] Logsdon G, Hess A, Chipps MJ, Rachwal A. Filter Maintenance and Operations Guidance Manual. Denver Colo. American Water Works Association. 2002.
- [15] Zakarian A, Knight J, Baghadaryan L. Modelling and Analysis of System Robustness. *J Eng Design*. 2007; 18(3),243-263.
- [16] WHO. Water Safety Plans-Managing drinking-water quality from catchment to consumer. 2005.
- [17] Huck PM, Coffey BM. The Importance of Robustness in Drinking-Water Systems. *J Toxicol Environ Health*. 2004; 67, 20-22, 1581-1590.
- [18] Uredba o klasifikaciji i kategorizaciji vodotoka. *Službeni glasnik RS broj 42/01*. Banja Luka, 2001. (in Serbian)
- [19] APHA, AWWA and WPCF. *Standard Method for Examination of Water and Wastewater*. 20 edition, American Public Health Association, Washington D.C. 1998.
- [20] USEPA. *ICR Microbiology Laboratory Manual*. Office of Research and Development, Washington D.C. 1996.
- [21] Đukić Z. Uticaj pražnjenja akumulacije „Jajce II“ na kvalitet vode Banjalučkog vodovoda. U: *Upravljanje sistemima, savremena oprema, tehnička rešenja i tehnička regulativa u oblasti vodovoda i kanalizacije*. Jahorina, BiH, 2007 (in Serbian).
- [22] Wang H, Shen Z, Guo X, Niu J, Kang B. Ammonia adsorption and nitrification in sediments derived from the Three Gorges Reservoir, China. *Environ Earth Sci*. 2010; 60:1653– 1660.
- [23] Morehouse J. *Small Water Treatment Plants in Small Water System Operation and Maintenance*. 3<sup>rd</sup> ed., California State University, Sacramento. 1990.
- [24] Bogner M, Stanojević M. *O vodama*. ETA, Beograd. 2006. (in Serbian).
- [25] Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće. *Službeni glasnik RS br.40/03*, Banja Luka, 2003. (in Serbian).
- [26] Bratby J. Coagulants, in *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. 2<sup>nd</sup> ed., London, IWA Publishing. 2006.
- [27] Martyn CN, Barker DJP, Osmond C, Harris EC, Edwardson JA, Lacey RF. Geographical relation between Alzheimer's disease and aluminium in drinking water. *Lancet*. 1989; 1, 59-62.
- [28] Letterman RD, Pero RW. Contaminants in polyelectrolytes used in water treatment. *J AWWA*. 1990; 82, 87-97.
- [29] Dalmacija B, Ivančev-Tumbas I. Koagulacija i flokulacija. U: Dalmacija B, Ivančev-Tumbas I, ur. *Prirodne organske materije u vodi*. PMF, Departman za hemiju, Novi Sad; 2002; 3: 101-115. (in Serbian).

## SUMMARY

### Robustness analysis of technological units for drinking water clarification: normal and emergency operating conditions

Slobodanka Zoric<sup>1</sup>, Milena Becelic-Tomin<sup>2</sup>, Bozo Dalmacija<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Vodovod Banja Luka, Republika Srpska, Bosnia and Herzegovina*

<sup>2</sup>*University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Republic of Serbia*

(Technical paper)

The primary goal of a water supply system is the protection of human health by providing microbiologically and chemically safe drinking water. Significant changes in water quality require sufficiently robust systems for water preparation, performances of which are unaffected by present variations and changing operational conditions. Water turbidity is an important parameter for the water filtration control and efficiency of disinfection. The efficiency of turbidity removal in the drinking water treatment plant "Vodovod" in Banjaluka under normal and emergency operating conditions was examined in this paper. At normal conditions the maximal detected value was 25 NTU while at emergency operating conditions it was above 240 NTU. Robustness evaluation of the water clarification system was performed separately for periods of normal and emergency operating conditions (during and after emptying the accumulation). The robustness index was calculated based on a more stringent target turbidity value (0.5 NTU) than that specified by the current legislation, which represents a new criterion in the risk analysis in the existing practice. Data processing results indicate high operational stability of technological units under normal conditions. The filtered water quality was below the target value during most of the time of filter operation in all cycles. The recorded turbidity value was  $\leq 0.3$  NTU for 92.9 % of filtered water samples. Analysis of the water turbidity data has shown that 17% of all taken measurements under emergency operating conditions (336 samples) had higher turbidity than the target value (0.5 NTU). Large variations in raw water turbidity over short periods of times during the emergency operating conditions, present a problem for prompt response in the drinking water plant. Calculated robustness index values point to inadequate efficiency of the water clarification process in a certain number of filter operating cycles. We have found a significant impact of the plant operating conditions on the filtered water turbidity under emergency conditions, such as suboptimal coagulation and flocculation conditions as well as the nature of suspended and colloid particles inducing turbidity and insufficient particle interactions with the coagulant. Along with the negative influence on water turbidity, excessive coagulant dosage leads to increased concentrations of residual aluminum in filtered water. Optimization of emergency working conditions could be performed based on adequate monitoring of water sources, which would further decrease potential risks of pathogen appearance in drinking water.

*Keywords:* water turbidity, filtration, water quality, risk analysis