

PILOT ISTRAŽIVANJE VIŠESLOJNOM FILTRACIJOM VODE IZVORIŠTA JADRO

dr. sc. Tatjana Ignjatić Zokić
Vododer d.o.o.,
Kačićeva 21, Zagreb, Hrvatska

Branko Miletić, dipl. ing. stroj.
Vododer d.o.o.,
Kačićeva 21, Zagreb, Hrvatska

dr. sc. Matija Cvetnić
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

mr. sc. Marinko Markić
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

doc. dr. sc. Dajana Kučić Grgić
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

**Viktorija Prevarić,
mag. ing. cheming.**
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije
Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

Izvorište Jadro u Solinu koristi se za opskrbu vodom za ljudsku potrošnju za gradove Split, Solin, Kaštela i Trogir, te općine Podstrana, Klis, Seget i Okrug. Povremeno, s pojavom obilnijih padalina, dolazi do zamućenja izvorišta te voda nije sukladna zakonskim propisima kao voda za konzumaciju. Kao prijedlog rješavanja problema povremenog zamućenja izvorišta predlaže se višeslojni filtracijski medij koji se sastoji od kvarcnog pijeska i antracita. Takav sustav uspješno uklanja zamućenja od 45 NTU na manje od 4 NTU, što zadovoljava sadašnje zakonske propise. Dodatkom koagulanta, FeCl_3 , smanjio se sadržaj suspendiranih tvari, odnosno mutnoće, što je značajno smanjilo potrošak klora u vodi te time stvorilo bolje uvjete za dezinfekciju vode. Dezinfekcija vode i potrošnja klora u vodi je ispitana dodatkom natrijevog hipoklorita sa i bez UV post-tretmana vode. Kod sustava s post-tretmanom vode UV zračenjem dolazi do značajnog smanjenja utroška hipoklorita kao dezinficijensa. Otpadna voda nastala procesom filtracije veoma jednostavno obrađuje se procesima koagulacije i flokulacije te taloženjem. Rezultati ispitivanja i konačni prijedlog rješenja povremenog zamućenja vode s izvorišta Jadro se iznose u ovom radu.

Ključne riječi: Izvorište Jadro, zamućenje vode, pješčana filtracija, UV dezinfekcija

1. UVOD

Rijeka Jadro je krški izvor vode s karakterističnim brzim i velikim oscilacijama protoka. Slivno područje proteže se duboko u zaleđe Splitsko-dalmatinske županije te pripada Dinaridima s površinom koja se procjenjuje od 250 do 500 km^2 . [Fritz i Kapelj 1998.] To slivno područje karakteriziraju karbonatne stijene i visoki stupanj tektonskih poremećaja te drugi tipični krški fenomeni. Zbog podzemnih i još uvijek nedovoljno poznatih veza slivno područje Jadra u pravilu se sagledava zajedno sa slivnim područjem izvora Žrnovnice te uključuje i područje vezano uz sliv rijeke Cetine. [Bonacci 1986.; Kapelj i sur. 2001.]

Izvor rijeke Jadro najviše se koristi za vodoopskrbu grada Splita te Solina, Kaštela i Trogira s nizom

prigradskih i okolnih naselja. Do Splita se voda doprema kroz stari Dioklecijanov kanal, propusne moći 550–880 l/s i kroz novi betonski kanal kapaciteta 2000 l/s u gornjem i 1350 l/s u donjem dijelu. Dioklecijanov kanal je širok 60 cm, visok 120 cm i dugačak oko 9,0 km, a nastao je još u doba Rimskog Carstva prije 1700 godina. Danas se koristi samo dio ovog kanala, do crpne stanice Kopilica, dužine 7450 m, koji je detaljno rekonstruiran. Na crpnim stanicama Ravne Njive i Kopilica dospjela voda s izvora Jadra se tlači u pripadajuće glavne gradske vodospreme. Prema klasifikaciji voda, rijeka Jadro pripada I. kategoriji voda na cijelom toku od izvora do vodnih pragova nizvodno od centra grada. Nizvodni dio rijeke, koji je pod utjecajem mora, i samo ušće pripadaju

II. kategoriji voda. [Kapelj i sur., 2002.] U zadnje vrijeme dolazi do povećane urbanizacije cijelog područja sliva, što uzrokuje znatne štetne posljedice u vidu kakvoće podzemne vode i učestalija zamućenja. Mutnoću vode u pravilu čine koloidno raspršene čestice te suspendirane tvari. Koloidi su čestice veličine od 10^{-3} do $1 \mu\text{m}$, dok suspendiranu tvar definiramo kao onu čija je veličina čestice veća od $0,45 \mu\text{m}$ te imaju istoimeni naboj koji sprječava njihovu aglomeraciju i taloženje. Mutnoća je optička metoda kojom se mjeri intenzitet raspršenja svjetlosti te se mjeri pomoću turbidimetra. Mutnoća se izražava nefelometrijskom jedinicom mutnoće (NTU, engl. *Nephelometric Turbidity Units*).

Pješčana filtracija je najzastupljeniji tehnološki proces u svrhu pročišćavanja vode za ljudsku potrošnju. Vrlo često korištena i vrlo robusna metoda koja služi za uklanjanje suspendiranih čestica iz vode. Filtracija (pješčana ili membranska) je proces kojim se uslijed veličine pora filtarskog medija zadržavaju čestice veće od propusnosti filtarskog medija. S obzirom na sastav sirove vode odabiru se slojevi pješčanog filtra koji mogu biti od različitih granulacija pijeska te, po potrebi, od slojeva ugljena. Neke od lokacija u Republici Hrvatskoj gdje se primjenjuje pješčana filtracija kao postupak za uklanjanje mutnoće s ciljem pročišćavanja vode za ljudsku potrošnju navedeni su u [tablici 1](#).

Kako se filtracijski medij ne bi mijenjao, pješčana filtracija radi sekvencijalno; proces filtracije i kod povećanja pada tlaka i/ili probijanja nečistoća protustrujno ispiranje. Time se osigurava dugoročni rad filtarskog postrojenja. Protustrujno pranje filtra se odvija čistom vodom i zrakom. Time nastaje otpadna voda. Otpadna voda sadrži suspendirane tvari koje su se

uklonile procesom filtracije te sadrže elemente i spojeve u većim koncentracijama. Ukoliko proces proizvodnje vode za ljudsku potrošnju u svojoj obradi uključuje i dodavanje drugih sredstava ili se pak druga sredstva dodaju za održavanje tehnološkog procesa, nužno je računati u sadržaju otpadne vode na sve sadržaje, zbirno, nastale u procesu proizvodnje vode za ljudsku potrošnju. Tehnološku otpadnu vodu prije ispuštanja u odvodnju ili prirodni prijemnik potrebno je pročititi sukladno Pravilniku o graničnim vrijednostima emisije otpadnih voda (NN 80/13, 43/14, 27/15 i 3/16). Pročišćavanjem vode za ljudsku potrošnju tehnološke otpadne vode nastaje mulj u kojem su sadržani svi elementi i spojevi uklonjeni pri obradi tehnološke vode. Takav mulj, većinom anorganskog sastava, potrebno je dehidrirati i stabilizirati, odnosno obraditi na način da ga je moguće koristiti i odložiti na odlagalište neopasnog komunalnog otpada sukladno Zakonu o održivom gospodarenju otpadom (NN94/13, 73/17, 14/19) i Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 114/15, 103/18).

Odabirom tehnoloških procesa pročišćavanja vode optimizacijom sustava u smislu fleksibilnog rada i načina vođenja, upravljanjem distribucijskom mrežom vodoopskrbe, pravovremenom sanacijom potencijalnih kritičnih točaka na sustavu vodoopskrbe, u velikoj je mjeri moguće utjecati na ukupnu cijenu vode.

Krajnji je cilj izgradnja postrojenja za proizvodnju vode za ljudsku potrošnju sukladno Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/17)

Tablica 1: Lokacije primjene pješčane filtracije u Republici Hrvatskoj

#	Lokacija	Kratki opis	Uklanjanje
1	Belišće	Koagulacija, taloženje, pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
2	Buzet	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
3	Duga Resa - rijeka Dobra	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća
4	Nova Gradiška, Bačica	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
5	Omiš (Omiš, Makarska, Hvar, Brač i Šolta)	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
6	Pakrac	Koagulacija, taloženje, pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća
7	Plitvice	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća
8	Ponikve, Krk	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća
9	Pula - Rakonek	Koagulacija, taloženje, pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
10	Senj	Pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
11	Senj (Rab, Pag)	Dva sustava: Pješčana filtracija, dezinfekcija i ultrafiltracija, dezinfekcija	Mutnoća, boja
12	Sisak - rijeka Kupa	Ozonizacija, pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća, organska tvar
13	Voćin	Koagulacija, pješčana filtracija, dezinfekcija	Mutnoća

Tablica 2: Mikrobiološki pokazatelji sirove vode izvorišta Jadro pri uobičajenim uvjetima (14. 11. 2018.)

Pokazatelj	Jedinice voda za piće	Rezultat	MDK
Broj kolonija 22 °C	Broj / 1mL	38	100
Broj kolonija 37 °C	Broj / 1 mL	4 (40/10 mL)	20
Escherichia coli	Broj / 100 mL	14	0
Enterokoki	Broj / 100 mL	31	0
Fekalni koliformi	Broj / 100 mL	9	0
Ukupni koliformi	Broj / 100 mL	34	0
Pseudomonas sp.	Broj / 100 mL	46 (<i>Pseudomonas</i> sp., nije <i>P. aeruginosa</i> - nema pigment)	0
Clostridium perfringens	Broj / 1 mL	6	0

i Zakonom o vodi za ljudsku potrošnju (NN 56/13, 64/15, 104/17, 115/18) te Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 80/13, 43/14, 27/15 i 3/16). U ovom je radu dano tehnološko rješenje za pročišćavanje vode Jadro koje je ispitano pilot- postrojenjem sukladno normama koje definiraju sličnost postrojenja na lokaciji vodocrpilišta. Ispitane su dvije situacije; kada je vrijednost mutnoće sirove vode manja od 4 NTU te kada je vrijednost mutnoće sirove vode manja od 0,3 NTU.

2. KVALITETA VODE IZVORIŠTA JADRO

Izvorište Jadro smješteno je u Gradu Solinu, a izvire u podnožju Mosora na 35 metara nadmorske visine i ulijeva se u Solinski zaljev nakon 4,5 km dugog toka. Fizikalno-kemijski i mikrobiološki sastav vode Jadra u direktnoj je vezi sa padalinama, [slika 1](#), kod kojih se problemi s onečišćenim podzemnim vodama najjače manifestiraju. Naime, kod značajnijih oborina dolazi do promjene sadržaja vode Jadra uslijed utjecaja čovjeka (antropogenog utjecaja) i okoliša. Tipičan sadržaj vode Jadra, analiziran kroz ovaj projekt, prikazan je [tablicama 2 i 3](#).

Prilikom značajnih oborina voda izvorišta Jadro ima povećane vrijednosti mutnoće. Promjena mutnoće je indikator da su se biološka i fizikalno-kemijska svojstva vode promijenila. Ono što se manifestira kod izvorišta Jadro uslijed promjene mutnoće je promjena sljedećih parametara vode:

- koncentracija željeza, aluminija, mangana,
- količina organske tvari
- mikrobiološki sastav.

U cilju predlaganja isplativog i učinkovitog tehnološkog procesa za uklanjanje mutnoće, potrebno je definirati uzrok nastajanja mutnoće te sastav i stanje mutnoće. Upravo zbog toga nužno je poznavati i kemijski i mikrobiološki sastav vode koji se pojavljuje, uz pojavu povećane mutnoće i pratiti njegovu promjenu tijekom tehnoloških procesa.

Tablica 3: Značajni kemijsko fizikalni parametri sirove vode izvorišta Jadro pri uobičajenim uvjetima (14. 11. 2018.)

Parametri	Sirova 14.11.2018.	MDK
T, °C	14,1	25
pH	7,8	6,5-9,5
Mutnoća, NTU	1,0	4,0
Alkalitet, mg/L CaCO ₃	190,0	-
Ukupna tvrdoća, mg/L CaCO ₃	217,7	-
Kalcijeva tvrdoća, mg/L CaCO ₃	199,5	-
Magnezijeva tvrdoća, mg/L CaCO ₃	18,2	-
Permanganatni broj, mg/L KMnO ₄	3,5	20
Litij, mg/L	<0,001	-
Natrij, mg/L	7,60	200
Amonijak, mg/L NH ₄ ⁺	<0,001	0,5
Kalij, mg/L	0,46	12
Magnezij, mg/L	4,36	-
Kalcij, mg/L	79,80	-
Kloridi, mg/L	9,46	250
Nitriti, mg/L	<0,001	0,5
Bromid, mg/L	<0,001	-
Nitrati, mg/L NO ₃ ⁻	1,86	50
Fosfati, mg/L	<0,001	300
Sulfati, mg/L	9,59	250
Aluminij, µg/L	1,60	200
Krom, µg/L	0,31	50
Željezo, µg/L	12,08	200
Mangan, µg/L	0,22	50
Silicij, mg/L	2,08	-

Tablica 4: Mikrobiološki pokazatelji sirove vode izvorišta Jadro pri povišenim vrijednostima mutnoća (NTU > 4) (27. 11. 2018., 28. 11. 2018., 23. 01. 2019.)

Pokazatelj	Jedinice voda za piće	Sirova 27.11.2018.	Sirova 28.11.2018	Sirova 23.01.2019.
Broj kolonija 22 °C	Broj / 1 mL	57	Nebrojivo	nebrojivo
Broj kolonija 37 °C	Broj / 1 mL	33	Nebrojivo	54
<i>Escherichia coli</i>	Broj / 100 mL	<i>E. coli</i> = 39	<i>E. coli</i> = 26	8
Enterokoki	Broj / 100 mL	31	3	10
Fekalni koliformi	Broj / 100 mL	0	0	28
Ukupni koliformi	Broj / 100 mL	71	36	71
<i>Pseudomonas sp.</i>	Broj / 100 mL	Nebrojivo (ali nije <i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	Nebrojivo (ali nije <i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	60

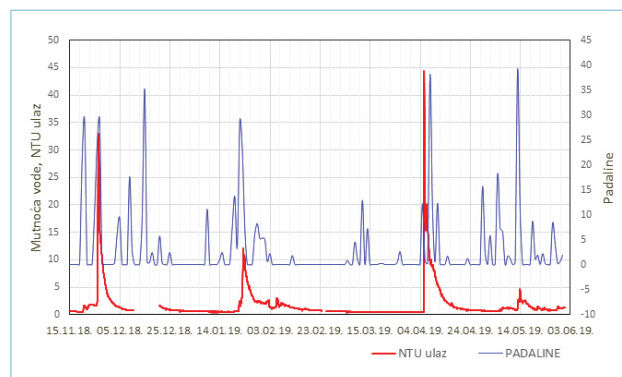
Tablica 5: Značajni kemijsko fizikalni parametri sirove vode izvorišta Jadro pri povišenim vrijednostima mutnoća (NTU > 4) (27. 11. 2018., 28. 11. 2018., 23. 01. 2019.)

Parametri	Sirova 27.11.2018.	Sirova 28.11.2018.	Sirova 23.01.2019.
T, °C	-	-	13,1
pH	7,9	7,9	7,8
Mutnoća, NTU	12,8	7,1	8,5
Alkalitet, mg/L CaCO ₃	183,50	203,00	-
Ukupna tvrdoća, mg/L CaCO ₃	210,57	205,83	219,00
Kalcijeva tvrdoća, mg/L CaCO ₃	198,43	194,68	201,00
Magnezijeva tvrdoća, mg/L CaCO ₃	12,15	11,15	18,00
Permanganatni broj, mg/L KMnO ₄	4,35	4,95	4,60
Natrij, mg/L	3,59	3,22	4,70
Amonijak, mg/L NH ₄ ⁺	0,16	<0,01	<0,01
Kalij, mg/L	0,58	0,66	0,40
Magnezij, mg/L	2,91	2,68	4,40
Kalcij, mg/L	79,38	77,88	80,60
Kloridi, mg/L	6,79	5,59	7,90
Nitriti, mg/L	<0,01	<0,01	<0,01
Nitrati, mg/L NO ₃ ⁻	5,83	5,03	1,90
Sulfati, mg/L	20,07	63,95	7,20
Aluminij, µg/L	0,35	0,49	25,30
Krom, µg/L	80,04	64,05	3,90
Željezo, µg/L	1,72	4,13	73,10
Mangan, µg/L	3,03	3,55	3,60
Silicij, mg/L	4,35	4,95	1,10

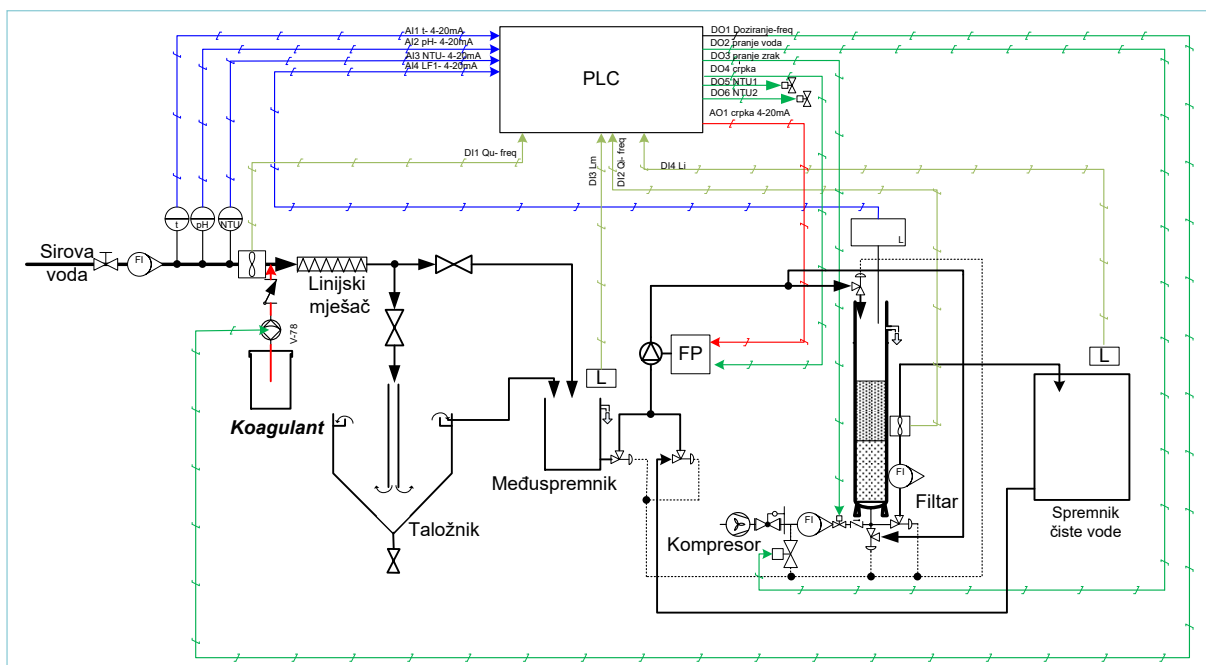
Ono što je bitno napomenuti, za vrijeme povećane mutnoće svi mikrobiološki parametri su iznad maksimalno dopuštene koncentracije (MDK), dok fizikalno-kemijski parametri, odnosno njihove zbirne vrijednosti, čine promjenu koja se vidi na povećanju mutnoće vode. U tablicama 4 i 5 su dane vrijednosti kod povišene mutnoće.

Ovim je istraživanjem potvrđeno da na izvorištu Jadro povremeno dolazi do pojave povećane mutnoće, što se može povezati s padalinama. Ono što se vidi na slici 1 je da obilnije padaline ne uzrokuju uvijek i povećanje mutnoće. Sadržaj mutnoće ima direktnu vezu sa sadržajem tla. S obzirom da je područje izvorišta Jadro krškog tipa, kalcijeve i magnezijeve soli (karbonati) također doprinose povećanoj mutnoći. Također, povećanje organskog opterećenja i mikrobiološkog sastava mogu biti posljedica mogućeg površinskog ispiranja humusa i/ili antropogenog onečišćenja koji je dospio u podzemne vode. Osim navedenog, za očekivati je da u sastavu suspendiranih čestica nalazimo čestice gline koje osim kalcija i magnezija mogu sadržavati i metale: silicij, željezo, mangan, aluminij, te krom i litij, tablice 4 i 5.

Na slici 1 prikazana je promjena vrijednosti mutnoće u funkciji količine padalina za razdoblje od 15. 11. 2018. do 3. 6. 2019. Podatci o količini padalina su prikupljeni s mjerne postaje „Marjan“. Iako nije



Slika 1: Odnos količine padalina i vrijednosti mutnoće izvorišta Jadro



Slika 2: Shematski prikaz pilot postrojenja na bazi pješčane filtracije

moгуće u potpunosti preslikati količine oborina sa mjerne postaje „Marjan“ i vodotoka Jadro, korelacija postoji. Kako je moguće primijetiti, značajna povećanja mutnoće izvorišta Jadro javljaju se kod padalina koje slijede nakon dužeg suhog perioda. Razlog tome može biti proces desikacije, odnosno potpuno ili gotovo potpuno gubljenje vode iz pornog prostora u tlu kao posljedica hlapljenja vodnog tijela u sušnim uvjetima. Uslijed takve pojave tlo gubi na rahlosti te onemogućuje ujednačen protok padaline kroz tijelo tla. Izvjesno je da baš pojava desikacije te povećane padaline nakon te pojave uzrokuju povećanje mutnoće izvorišta Jadro.

3. PILOT UREĐAJ ZA PROČIŠĆAVANJE PITKE VODE

Pilot postrojenje sastoji se od dozirne stanice za doziranje koagulanta, linijskog miješala, taložnica, među-spremnika obrađene vode nakon taložnica, pumpe za filtraciju i pranje filtra, kompresora sa spremnikom zraka, filtra, dozirne stanice za doziranje hipoklorita i spremnika pročišćene vode, [slika 2](#).

U svrhu vođenja procesa rađena su kontinuirana mjerenja (ulazna mutnoća, protok dolazne vode, temperatura dolazne vode, protok filtracije, razina vode u filtru te izlazna mutnoća). Sva mjerenja su također kontinuirano bilježena i sustavom se upravljalo automatski, nadzorno upravljačkim sustavom (eng. *programmable logic controller*, PLC).

Linijsko miješalo na ulazu ima ulogu homogeniziranja vode i dodanog koagulanta. Taložnica s vremenom zadržavanja od otprilike

jednog sata ugrađena je s ciljem provjere mogućnosti rasterećenja filtara. Među-spremnik sirove vode služi kao usisni spremnik pumpe za filtraciju i pranje filtara. Protok vode reguliran je brojem okretaja te pumpe pa zadovoljava protoke i filtracije i protustrujnog pranja filtra. Kompresor se koristi za rahljenje prilikom protustrujnog pranja filtra, te za tehnički zrak za upravljanje pneumatskim ventilima. Filtar je ispunjen pijeskom i po potrebi antracitom u svrhu filtracije čestica većih od oko 0,5 μm . Spremnik pročišćene vode je zapremina vode za protustrujno pranje filtara. Nadzorno upravljački sustav ima ulogu nadzora i upravljanja radom postrojenja, te za daljinsku nadzor putem interneta. Nadzorno upravljački sustav bilježi sve izmjerene vrijednosti kontinuiranih mjerenja. U svrhu vođenja procesa mjerene su ulazna i izlazna mutnoća, protok sirove vode i protok filtracije, razina vode u filtru te temperatura sirove vode.



Slika 3: Pilot postrojenje na bazi pješčane filtracije na lokaciji izvorišta Jadro

S obzirom na sastav sirove vode izvorišta Jadro odabrani pješčani filter sastoji se od dva medija, pijeska i antracita. Korišteni su kvarcni pijesak tipa FB 150, Kema Puconci, d.o.o., Slovenija, granulacija pijeska je 0,5-1,5 mm, s većinskim udjelom (>90%) čestica od 1 mm te antracit. Na slici 3 je prikazano pilot postrojenje na bazi pješčane filtracije.

Filtarski medij nalazi se na podnici na kojoj su sapnice koje služe pravilnoj distribuciji vode za vrijeme filtracije te vode i zraka za vrijeme protustrujnog pranja filtarskog medija.

Odabrani slojevi filtra su:

- 15 cm – pijesak granulacije 5 – 15 mm – nosivi sloj
- 100 cm – kvarcni pijesak 0,5 – 1,5 mm – filtarski medij
- 25 cm – antracit – filtarski medij

Ukupna visina filtarske ispune je 140 cm. Visina stupca vode iznad filtarske ispune mora biti minimalno 20 cm, što se regulira sa stupnjem otvorenosti ventila na ispustu iz filtarskog polja i senzorom stupca vode u filtarskom polju. Slobodna visina do preljevnog kanala za odvodnju tehnološke vode nastale protustrujnim pranjem filtarskog medija mora biti 40% ukupne visine ispune filtra. Ukupna visina filtarskog polja je 200 cm.

Filtri se održavaju protustrujnim pranjem čistom kloriranom vodom (koncentracija slobodnog klora $\leq 0,55$ mg/L) i rahljenjem zrakom na sljedeći način:

1. Rahljenje zrakom brzinom od 40 m/h u trajanju od 2-3 minute
2. Protustrujno pranje vodom brzinom od 35 m/h u trajanju od 10-12 minuta

4. REZULTATI ISPITIVANJA PILOT POSTROJENJEM

Pilot postrojenjem su ispitani uvjeti pješčane filtracije. Ispitivana je filtracija sa i bez doziranja koagulanta. Odabir koagulanta se ispitao „Jar“ testovima gdje su ispitani koagulanti željezov klorid i aluminijev sulfat u koncentracijama od 0,75 mg/L Fe^{3+} i Al^{3+} i 1,5 mg/L Fe^{3+} i Al^{3+} . Prema rezultatima „Jar“ testova, tablica 5, nema značajne razlike u učinkovitosti koagulacije. Ipak,

postoji značajna opasnost kod doziranja koagulanta na bazi aluminijske soli, s obzirom da aluminij može, ovisno o koncentraciji, temperaturi i vrijednosti pH vode ostati u topivom stanju te proći filtarsku ispunu.

Značajno je naglasiti kako se različitost rezultata mjerenja mutnoće vode *online* senzorom i laboratorijskim turbidimetrom očituje u malim vrijednostima mutnoće. Razlog navedenom je nemogućnost umjeravanja laboratorijskog turbidimetra na vrijednost nula, za razliku od *online* senzora koji se umjerava destiliranom vodom kao etanolom od 0 NTU. Iz navedenog proizlazi da su razlike u očitavanju mutnoće u iznosu od 0,2 NTU u funkciji vrste mjernog instrumenta.

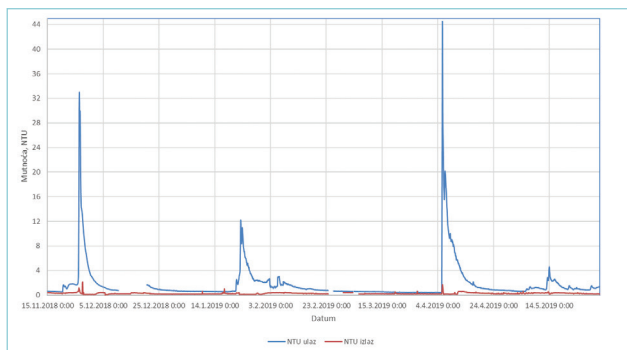
Sukladno dobivenim rezultatima, prilikom povišenih vrijednosti mutnoće sirove vode izvorišta Jadro, filtracija kroz pješčani medij, uz dodavanje koagulanta, željezovog klorida, mutnoća vode smanjuje se na vrijednosti ispod 0,3 NTU, dok se sadržaji željeza, mangana, aluminijske soli i organskih tvari smanjuju u značajnoj mjeri ($Fe < 0,015$ mg/L, $Al < 0,015$ mg/L, $Mn < 0,005$ mg/L, $PB < 1,0$ mg/L O_2), slike 4 i 5. Prisutni mikroorganizmi također se djelomično koaguliraju i zaostaju na površini filtra. Potpuno uklanjanje mikroorganizama, osim dezinfekcije klorom, ispitano je i primjenom UV dezinfekcije koja je pokazala visoku učinkovitost. Ispitivanja pokazuju da koncentracija koagulanta od 0,1 mg/L Fe za mutnoće do 35 NTU zadovoljavaju zahtjeve vrijednosti mutnoće obrađene vode manje od 0,3 NTU. Također, vrijednosti mutnoće obrađene vode bez doziranja koagulanta manje su od 4 NTU, odnosno kreću se oko 2 NTU. Uzimajući faktor sigurnosti, može se potvrditi kako su, za postizanje vrijednosti mutnoće na izlazu manje od 0,3 NTU, potrebne količine koagulanta manje od 1 mg/L Fe.

Ono što je bitno pokazati je to da za postizanje vrijednosti mutnoće na izlazu manje od 4 NTU nije potrebno dozirati koagulant, što govori o vrsti zamućenja koje su zapravo lako-filtrabilne suspendirane čestice.

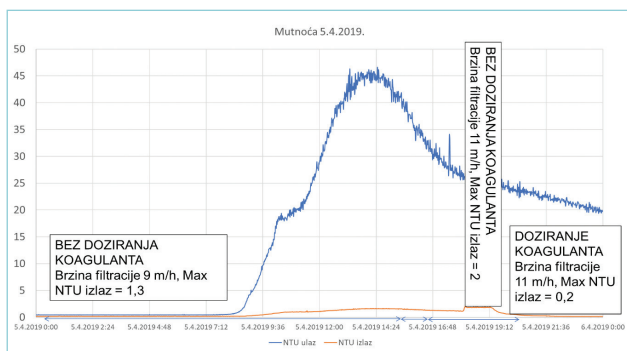
Sukladno dobivenim rezultatima istraživanja potvrđeno je kako se filtracijom kroz dualni sloj (antracit i pijesak) uspješno uklanja mutnoća sirove vode na vrijednosti manje od 4 NTU. Filtracijom kroz dualni medij (antracit i pijesak) uz dodavanje željezovog klorida kao koagulanta, mutnoću obrađene vode moguće je svesti na vrijednosti manje od 0,3 NTU. Ono što je bitno napomenuti kako se otpadna voda nastala procesom

Tablica 6: Preliminarni pokusi „Jar“ testovima, koagulacija Fe i Al ionima

Jadro 22 NTU 26.11.2018.			Jadro 12 NTU 27.11.2018.			Jadro 22 NTU 26.11.2018.			Jadro 12 NTU 27.11.2018.		
c(Fe^{3+}) mg/L	Mutnoća, NTU	pH	c(Fe^{3+}) mg/L	Mutnoća, NTU	pH	c(Al^{3+}) mg/L	Mutnoća, NTU	pH	c(Al^{3+}) mg/L	Mutnoća NTU	pH
0,5	1,18	7,55	0,5	<0,3	7,47	0,5	0,41	7,49	0,5	<0,3	7,39
0,75	<0,3	7,45	0,75	<0,3	7,37	0,75	<0,3	7,45	0,75	<0,3	7,35
1,0	<0,3	7,36	1,0	<0,3	7,31	1,0	<0,3	7,47	1,0	<0,3	7,36
1,25	<0,3	7,21	1,25	<0,3	7,11	1,25	<0,3	7,39	1,25	<0,3	7,33



Slika 4: Prikaz promjene vrijednosti mutnoće sirove i obrađene vode



Slika 5: Prikaz odnosa vrijednosti mutnoće sirove i obrađene vode u funkciji brzine filtracije i doziranja koagulant

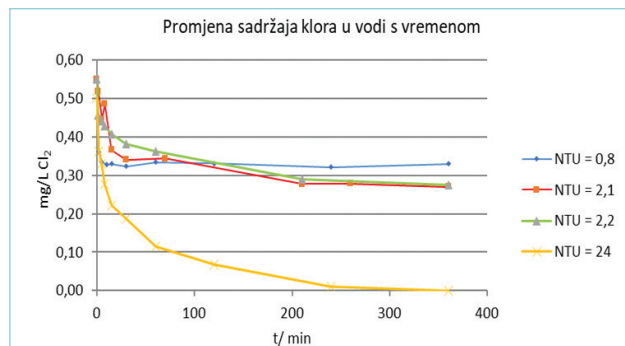
filtracije veoma jednostavno obrađuje procesima koagulacije i flokulacije, taloženjem, dok se nastali mulj dehidrira, što je provjereno u laboratorijskim uvjetima.

Nakon procesa filtracije dolazi proces dezinfekcije vode. Dezinfekcija se provodi kloriranjem vode hipokloritom. S obzirom da oko 90% vremena nije potrebna obrada vode, odnosno uklanjanje mutnoće, postojeći sustav za dezinfekciju je dostatan. Ipak, ovim istraživanjem se pokazalo i kako primjena UV dezinfekcije ima veliku učinkovitost. Ugradnjom ovakvog načina dezinfekcije moguće je smanjiti potrošnju klora od oko 0,2 mg/L Cl₂, što odgovara inicijalnoj potrošnji klora te reducira sadržaj organske tvari u vodi.

Rezultati ispitivanja potrošnje klora u razdoblju niskih mutnoća (manjih od 4 NTU), prikazanih na slici 6, pokazuju da nakon početne visoke potrošnje rezidualna koncentracija ostaje dovoljno dugo stabilna. Također, moguće je uočiti kako pri većim vrijednostima mutnoće (NTU = 24) dolazi do ubrzane potrošnje klora, što potvrđuje i mikrobiološka analiza vode, tablica 7 i 8.

5. ZAKLJUČAK

U periodu od 15. 11. 2018. do 3. 6. 2019. provedena su ispitivanja mogućnosti pročišćavanja vode izvorišta Jadro pilot postrojenjem baziranom na pješčanoj filtraciji. U tom su razdoblju praćeni fizikalno-kemijski i mikrobiološki pokazatelji kvalitete sirove i obrađene vode.



Slika 6: Prikaz potrošnje klora u sirovoj vodi s vremenom

Tablica 7: Mikrobiološki pokazatelji vode uzorkovani 23. 1. 2019. (Mutnoća sirove vode 8,5 NTU)

Pokazatelj	Jedinice voda za piće	Sirova 23.1.2019.	Izlaz F 23.1.2019.	Izlaz + UV-C 23.1.2019.
Broj kolonija 22 °C	Broj / 1 mL	nebrojivo	34	0
Broj kolonija 37 °C	Broj / 1 mL	54	15	0
<i>Escherichia coli</i>	Broj / 100 mL	8	2	0
Enterokoki	Broj / 100 mL	10	0	0
Fekalni koliformi	Broj / 100 mL	28	4	0
Ukupni koliformi	Broj / 100 mL	71	31	0
<i>Pseudomonas</i> sp.	Broj / 100 mL	60	17	0

Tablica 8: Mikrobiološki pokazatelji vode uzorkovani 24. 1. 2019. (Mutnoća sirove vode 7,4 NTU)

Pokazatelj	Jedinice voda za piće	Sirova 24.1.2019.	Izlaz + UV-C 24.1.2019.
Broj kolonija 22 °C	Broj / 1 mL	Nebrojivo	2
Broj kolonija 37 °C	Broj / 1 mL	66	0
<i>Escherichia coli</i>	Broj / 100 mL	23	0
Enterokoki	Broj / 100 mL	39	0
Fekalni koliformi	Broj / 100 mL	60	0
Ukupni koliformi	Broj / 100 mL	20	0
<i>Pseudomonas</i> sp.	Broj / 100 mL	142	0

Dosadašnjim istraživanjima može se zaključiti kako sirova voda izvorišta Jadro ima uobičajeni sadržaj mutnoće od 0,4 do 2,5 NTU. Prilikom povećanih oborina vrijednost mutnoće sirove vode raste, te su najveće zabilježene vrijednosti mutnoće u ovih više od sedam mjeseci praćenja stanja bile 35 NTU. Izrazito visoke mutnoće (NTU>10) su kratkog trajanja, dok se umjereno visoke vrijednosti mutnoće (2,5 – 7 NTU) zadržavaju i po nekoliko dana.

Za pročišćavanja sirove vode izvorišta Jadro može uspješno poslužiti višeslojni filtarski sustav koji se sastoji od kvarcnog pijeska i antracita. Potrebna visina filtarske ispune je 140 cm. U uobičajenim vrijednostima sirove vode (od 0,4 do 2,5 NTU) nije potrebno dozirati koagulant za dobivanje vode veoma niske mutnoće (<0.3 NTU).

Kod obrade sirove vode pri mutnoćama manjim od 45 NTU potrebna koncentracija koagulanta je oko 0,1 mg/L Fe za postizanje vrijednosti mutnoće pročišćene vode manje od 0,3 NTU. Kako je obrađenu vodu potrebno dezinficirati, postojeći sustav ispunjava sve potrebe, međutim, utrošak hipoklorita se može značajno smanjiti ako se kod izvedbe uređaja ugradi i UV dezinfekcija. ■

LITERATURA

Bonacci, O.: Hidrološka studija izvora Jadro i Žrnovnice, OOUR Fakultet građevinskih znanosti – Split, Zavod za hidrotehniku, 1986.

Fritz, F. i Kapelj, J.: Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske M 1:100000, listovi Split i Primošten. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 1998.

Kapelj, S.; Kapelj, J.; Novosel, A.; Singer, D.: Hidrogeološka istraživanja slivnog područja izvora Jadro i Žrnovnice, Institut za geološka istraživanja,

Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, Zagreb, 2001.

Kapelj, S.; Kapelj, J.; Singer, D.: Hidrogeološka istraživanja slivnog područja izvora Jadro i Žrnovnice (II. faza), Institut za geološka istraživanja, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, Zagreb, 2002.

Margeta, J.; Marasović, K.: Vodoopskrbni zahvati na izvoru rijeke Jadro od antike do danas, Građevinar 70 (11), 2018, 985-996.

Pilot research using multi-layer filtration of water from the Jadro source

Abstract. The Jadro source in Solin is used for the supply of water for human consumption to the cities of Split, Solin, Kaštela and Trogir, including the municipalities of Podstrana, Klis, Seget and Okrug. Occasionally, the appearance of abundant precipitation causes the turbidity of the source, resulting in the water that is non-compliant with the regulations related to water for consumption. A multilayer filtration medium consisting of quartz sand and anthracite is proposed as a solution to the problem of occasional turbidity of the source. Such system successfully removes the turbidity of 45 NTU to less than 4 NTUs, which complies with the current legislation. The addition of the coagulant, FeCl₃, reduced the content of suspended solids i.e. turbidity and significantly reduced the use of chlorine use in the water, thus creating better conditions for water disinfection. Water disinfection and chlorine use in water were examined by the addition of sodium hypochlorite, with and without the UV post-treatment of water. In systems with post-treatment of water with UV radiation, there is a significant reduction in the use of hypochlorite as a disinfectant. The wastewater generated by the filtration process is very easily treated using coagulation and flocculation processes and settling. The paper presents the research results and the final proposal for the solution of occasional water turbidity in the Jadro source.

Key words: Jadro source, water turbidity, sand filtration, UV disinfection

Pilotuntersuchung mit mehrschichtiger Wasserfiltration an der Jadroquelle

Zusammenfassung. Die Quelle des Flusses Jadro in Solin versorgt die Städte Split, Solin, Kaštela und Trogir sowie die Gemeinden Podstrana, Klis, Seget und Okrug mit Wasser für den menschlichen Gebrauch. Gelegentlich und zwar mit starken Niederschlägen kommt es zur Trübung des Quellenwassers, so dass in solchen Fällen das Wasser nach der Trinkwasserverordnung die erforderliche Güte für die Nutzung als Trinkwasser nicht besitzt. Zur Lösung dieses Problems der gelegentlichen Trübung der Quelle wird mehrschichtige Filtration mit Quarzsand und Anthrazit vorgeschlagen. Ein solches System reduziert erfolgreich die Trübungen von 45 NTU auf 4 NTU, was den gesetzlichen Vorschriften entspricht. Mit der Verwendung des Flockungsmittels FeCl₃ wurde der Gehalt an Schwebstoffen bzw. die Trübung reduziert, was den Chlorverbrauch im Wasser wesentlich reduzierte. So wurden bessere Bedingungen für die Wasserdesinfektion geschaffen. Die Wasserdesinfektion und der Chlorverbrauch wurden unter Verwendung von Natriumhypochlorit bei oder ohne Einsatz der Nachbehandlung mit Ultraschall untersucht. Bei der Nachbehandlung des Wassers mit Ultraschall konnte der Verbrauch des Natriumhypochlorits als Desinfektionsmittel wesentlich reduziert werden. Das im Filtrationsverfahren entstandene Abwasser wird einfach in den Koagulations- und Flockungsverfahren sowie Sedimentation behandelt. In dieser Arbeit werden die Untersuchungsergebnisse und der endgültige Vorschlag zur Lösung des Problems der gelegentlichen Trübung des Wassers an der Jadroquelle dargestellt.

Schlüsselwörter: Quelle Jadro, Wassertrübung, Sandfiltration, Ultraschalldesinfektion