Izdavač
Publisher
Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo
11000 Beograd, Simina 13

Suizdavač
Co publisher
Univerzitet u Novom Sadu Prirodno matematički fakultet
21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 3

Za izdavača
Representative of the Publisher
Predrag Bogdanović, dipl. građ. inž.
Predsednik Upravnog odbora Udruženja
Chairman, Association's Board of Directors

Glavni i odgovorni urednik:
Editor-in-chief
dr *Jasmina Agbaba*, dipl. hem.
Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet

Redakcioni odbor:
Editorial Board
dr *Marko Ivetić*, dipl. građ. inž.
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet
dr *Slobodan Petković*, dipl. građ. inž.
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet
dr *Božo Dalmacija*, dipl. hem.
Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet
dr *Vladimir Pavićević*, dipl. inž.
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
dr *Zoran Stevanović*, dipl. inž.
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
dr *Aleksandar Šotić*, dipl. inž.
Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd
dr *Nebojša Veljković*, dipl. inž.
Agencija za zaštitu životne sredine,
Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije

Lektura i redaktura:
Proofreading and editing
Zorana Radibratović, dipl. inž.
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi" Beograd
dr *Malcolm Watson*, dipl. hem.
Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet

Saradnici iz inostranstva:
International Associates
dr *Dragan Savić*
KWR Water Research Institute, Netherlands
dr *Čedomir Maksimović*
Imperial College London, United Kingdom
dr *Branislav Petruševski*
IHE Delft Institute for Water Education, Netherlands
Aida Bučo Smajić, dipl. inž.
Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches - DVGW, Germany

Marketing i pretplata
Marketing and subscription
Sonja Milovanović, dipl.ecc
Bojana Vranešević
Svetlana Đurica

Redakcija / *Office*
UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE
I SANITARNO INŽENJERSTVO
11000 BEOGRAD, Simina 13
Tel: 011/322-17-72
office@utvsi.com • www.utvsi.com

YU ISSN 0350-5049
UDK 628 + 624 + 626

voda I SANITARNA TEHNIKA

ČASOPIS UDRUŽENJA ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO • BEOGRAD
MAGAZINE OF THE ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING • BELGRADE

broj 4/2025

SADRŽAJ
CONTENTS

ANALIZA REZULTATA PREKOGRANIČNOG MONITORINGA ZAGAĐENJA VODE I SEDIMENTA U SRBIJI
ANALYSIS OF MONITORING RESULTS TRANSBOUNDARY WATER AND SEDIMENT POLLUTION IN SERBIA
- **NEBOJŠA VELJKOVIĆ, TAMARA PERUNOVIĆ ĆULIĆ, LJUBIŠA DENIĆ, ZORAN STOJANOVIĆ, TATJANA DOPUĐA GLIŠIĆ, IVANA DERŠEK, IVANA MARIĆ 5**

ELEKTROKOAGULACIJA KAO ODRŽIVA TEHNOLOGIJA ZA TRETMAN VODE: PRINCIPI, DIZAJN I SAVREMENE PRIMENE
ELECTROCOAGULATION AS A SUSTAINABLE TECHNOLOGY FOR WATER TREATMENT: PRINCIPLES, DESIGN, AND RECENT APPLICATIONS
- **KRISTIANA ZRNIĆ TENODI, EMILIJAN MOHORA, SLAVEN TENODI, NATAŠA DUDUKOVIĆ, ĐORĐE PEJIN, JASMINA AGBABA, SRĐAN RONČEVIĆ 17**

UPRAVLJANJE BUNARSKIM POLJIMA: UTICAJ EKSPLOATACIJE I REDOKS USLOVA NA KAPACITET I KVALITET VODE
***INTEGRATED MANAGEMENT OF WELL FIELDS: IMPACT OF EXPLOITATION PRACTICES AND REDOX CONDITIONS ON WATER CAPACITY* AND QUALITY**
- **ALEKSANDAR T. TANASKOVIĆ 31**

KLJUČNI ELEMENTI ZA REALIZACIJU POUZDANIH MERENJA PROTOKA U KANALIZACIONIM SISTEMIMA: ISKUSTVA STEČENA NA NOVOM BEOGRADU
KEY ELEMENTS FOR RELIABLE FLOW MEASUREMENTS IN SEWER AND URBAN DRAINAGE SYSTEMS: EXPERIENCE ACQUIRED IN NOVI BEOGRAD
- **DAMJAN IVETIĆ, DUŠAN PRODANOVIĆ, ROBERT LJUBIČIĆ, MILOŠ STANIĆ, MILOŠ MILAŠINOVIĆ, BRANISLAV BABIĆ 39**

ZNAČAJ PRIMENE AUTOMATSKIH ANALIZATORSKIH STANICA ZA KONTINUALNO PRAĆENJE KVALITETA I KVANTITETA KOMUNALNIH OTPADNIH VODA NA DOVODNOM KOLEKTORU PRE ULASKA NA POSTROJENJE ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA I NAJNOVIJA REŠENJA U OVOJ OBLASTI
THE SIGNIFICANCE OF THE APPLICATION OF AUTOMATIC ANALYZING STATIONS FOR CONTINUOUS MONITORING OF THE QUALITY AND QUANTITY OF MUNICIPAL WASTEWATER AT THE INLET COLLECTOR BEFORE ENTERING THE WASTEWATER TREATMENT PLANT AND THE LATEST SOLUTIONS IN THIS FIELD
- **DUŠAN OTAŠEVIĆ, DEJAN OTAŠEVIĆ 51**

PROGRAMI OBUKE I RAZVOJA KAPACITETA UTVSI
RAZMENA ZNANJA I SASTANAK ZAJEDNICE PRAKTIČARA U SUBOTICI
- **BOJANA VRANEŠEVIĆ 67**

YU ISSN 0350-5049
UDK 628 + 624 + 626

VODA I SANITARNA TEHNIKA

ČASOPIS UDRUŽENJA ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO • BEOGRAD
MAGAZINE OF THE ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING • BELGRADE

ISSN 0350-5049
9 770350 504008 >

YU ISSN 0350-5049
UDK 628 + 624 + 626

IZDAVAČ
UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽINJERSTVO
11000 BEOGRAD, Simina 13
TEL: (+381 11) 322 17 72
E-mail: office@utvsi.com
Web: www.utvsi.com

PUBLISHER
ASSOCIATION FOR WATER TECHNOLOGY AND SANITARY ENGINEERING
11000 BEOGRAD, Simina 13
TEL: (+381 11) 322 17 72
E-mail: office@utvsi.com
Web: www.utvsi.com

Radove slati na e-mail Udruzenja:
casopis@utvsi.com
office@utvsi.com

Please send your paper via e-mail to office@utvsi.com

Grafička priprema
Page layout
Katarina Čović, Beograd

Slika na koricama
Cover page image
Ada Ciganlija
autor fotografije Svetlana Đurica

Štampa
Printed by
Planeta Print, Beograd

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

628

VODA i sanitarna tehnika : časopis Udruženja za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo - Beograd = Water and sanitary technology : magazine of the association for water technology and sanitary engineering - Belgrade / glavni i odgovorni urednik Jasmina Agbaba. - God. 1, br. 1 (1971)- . - Beograd : Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, 1971- (Beograd : Planeta print). - 29 cm

Tromesečno. - Tekst na srp. i engl. jeziku.
ISSN 0350-5049 = Voda i sanitarna tehnika
COBISS.SR-ID 4034818

REČ GLAVNOG UREDNIKA

Poštovani čitaoci,

Pred vama je novo izdanje časopisa Voda i sanitarna tehnika, posvećenog savremenim izazovima i dostignućima u oblasti zaštite voda, upravljanja vodnim resursima, kao i komunalnom infrastrukturom. U ovom broju objedinjujemo različite aspekte ove složene oblasti: od monitoringa kvaliteta površinskih voda i sedimenata, preko inovativnih tehnologija tretmana, do iskustava iz prakse u radu vodovodnih i kanalizacionih sistema.

Prvi rad prikazuje rezultate višegodišnjeg monitoringa kvaliteta sedimenta i vode na međugraničnim profilima reka Dunav, Sava i Tisa, koji sprovodi Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije. Analiza ovih podataka doprinosi razumevanju prekograničnih uticaja i naglašava potrebu za definisanjem standarda za tretirane sedimente, čime pruža dragocen uvid za buduće upravljanje rečnim ekosistemima.

Sledi pregledni rad na temu elektrokoagulacije kao savremene, održive tehnologije za tretman voda, sa širokim spektrom primene i potencijalom za integraciju u buduće sisteme zasnovane na obnovljivim izvorima energije.

Treći rad analizira upravljanje bunarskim poljima u kontekstu hidrogeoloških uslova, redoks procesa i antropogenih uticaja. Kroz prikaz konkretnih iskustava, u radu se posebno ističe značaj održavanja stabilnih uslova eksploatacije, rezervi kapaciteta i redovnog monitoringa kvaliteta vode, kao preduslova za dugoročno pouzdano i bezbedno vodosnabdevanje.

U okviru ovog broja časopisa skrećemo vam pažnju na dva rada koja se bave izazovima preciznog merenja protoka u kanalizacionim sistemima, kao i primenom automatskih analizatorskih stanica koje omogućavaju pravovremeno praćenje i kontrolu kvaliteta otpadnih voda. Ovaj segment infrastrukture često je zapostavljen u domaćoj praksi, iako upravo pouzdano merenje protoka i kvaliteta otpadnih voda pre njihovog dospevanja na postrojenje za prečišćavanje predstavlja osnovu za racionalno planiranje, optimizaciju rada i efikasno upravljanje komunalnom infrastrukturom.

Poseban segment posvećen je izveštaju o razmeni znanja realizovanoj u okviru projekta Regionalne mreže za razvoj kapaciteta (RCDN), koja je okupila stručnjake iz komunalnog sektora i međunarodne partnere.

Verujemo da će teme obrađene u ovom broju doprineti unapređenju stručne prakse, razmeni znanja i jačanju kapaciteta svih koji se bave zaštitom voda i održivim razvojem komunalnih sistema.

Prof. dr Jasmina Agbaba

ИНСТИТУТ ЗА ВОДОПРИВРЕДУ
„ЈАРОСЛАВ ЧЕРНИ"

Институт за водопривреду „Јарослав Черни" ДОО је водећа научноистраживачка организација у Србији и региону у области вода.

Наше богато искуство, као и спрега науке, истраживања и пројектовања, гаранција су квалитета наших услуга већ више од 75 година.

ОБЛАСТИ:

- *бране и акумулације*
- *хидроелектране*
- *снабдевање водом*
- *каналисање и пречишћавање отпадних вода*
- *наводњавање и одводњавање*
- *заштита од поплава и уређење река и сливова*
- *инфраструктура – путеви, метро, гасовод*
- *рудници и депоније*
- *глобално управљање водама и заштита животне средине*

УСЛУГЕ:

- *истраживање и развој у техничко-технолошким наукама*
- *пројектовање, надзор, консалтинг и инжењеринг у грађевинарству, управљању водама и заштити животне средине*
- *теренска и лабораторијска испитивања, мерења и осматрања воде, земљишта и грађевинских конструкција*
- *израда мултидисциплинарних студија, планских и стратешких докумената*
- *софтверски инжењеринг*
- *развој и имплементација информационих система*

ЛАБОРАТОРИЈЕ:

- *хидрауличка лабораторија (површине ско 3500 m²)*
- *лабораторија „Јарослав Черни" (акредитована према SRPS ISO/IEC 17025:2017 за узорковање воде, седимента и земљишта и физичко-хемијска и микробиолошка испитивања узорака земљишта, седимента, површинских, подземних и отпадних вода)*

Институт за водопривреду „Јарослав Черни" ДОО
Јарослава Черног 80, 11226 Београд, Србија, +381 11 61 76 600, office@jcerni.rs, **www.jcerni.rs**

Naučni rad
UDK: 502.51:502.175(28)(497.11)
https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.17631036.svg

Nebojša Veljković, Tamara Perunović Ćulić, Ljubiša Denić, Zoran Stojanović, Tatjana Dopuđa Glišić, Ivana Deršek, Ivana Marić

ANALIZA REZULTATA PREKOGRANIČNOG MONITORINGA ZAGAĐENJA VODE I SEDIMENTA U SRBIJI

ANALYSIS OF MONITORING RESULTS TRANSBOUNDARY WATER AND SEDIMENT POLLUTION IN SERBIA

IZVOD

U radu su predstavljeni rezultati kvaliteta sedimenta i vode reka u okviru monitoringa koji sprovodi Agencija za zaštitu životne sredine na osnovu godišnjih programa koji usvaja Vlada Republike Srbije. Prezentovana je analiza kvaliteta sedimenta za period 2012-2017. godina i kvaliteta vode reka za 2023. godinu za međugranične profile na rekama Dunav, Sava i Tisa. Izbor profila je urađen prema kriterijumu reprezentativnosti dobijanja uvida u mogući uticaj prekograničnog zagađenja u slivu reke Dunav. Analiza ima za cilj da prezentuje „istorijski zapis“ sedimenta i sa aktuelnim rezultatima kvaliteta vode na istim profilima ukaže na moguće uzročno-posledične veze. Za ocenu kvaliteta sedimenta reka korišćen je međunarodni kriterijum zasnovan na empirijskom pristupu, odnosno terenskim i laboratorijskim podacima o odgovorima bentičkih organizama na izlaganje zagađenom sedimentu. U zaključnim razmatranjima data je preporuka za definisanje standarda kvaliteta za tretirane sedimenta, čime će se proširiti postojeća regulativa koja uređuje oblast deponija i otpada, pri čemu bi se u obzir uzela specifična svojstva materijala bagerovanog sa rečnog dna.

Ključne reči: prekogranične vode, sediment, zagađenje

ABSTRACT

The paper presents the results of sediment and surface water quality as part of the monitoring carried out by the Environmental Protection Agency based on the annual program adopted by the Government of the Republic of Serbia. An analysis of sediment quality for the period 2012-2017 and water quality for the year 2023 was presented for transboundary profiles on the rivers Danube, Sava and Tisa. The selection of the profile was made according to the representativeness criterion of obtaining an insight into the possible impact of cross-border pollution in the Danube river basin. The analysis aims to present the “historical record” of the sediment and with the current water quality results on the same profiles to indicate possible cause-and-effect relationships. International criteria based on an empirical approach were used for sediment quality assessment, regarding laboratory data like the responses of benthic organisms to exposure to polluted sediment. In the final deliberations, a recommendation was made to define quality standards for treated sediments, which will expand the existing regulations governing the area of landfills and waste, thereby taking into account the specific properties of material dredged from the river bottom.

Key words: transboundary water, sediment, pollution

* Nebojša Veljković[1], Tamara Perunović Ćulić[2], Ljubiša Denić[2], Zoran Stojanović[2], Tatjana Dopuđa Glišić[2], Ivana Deršek[2], Ivana Marić[2]

[1] Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Simina 13, 11158 Beograd
[2] Ministarstvo zaštite životne sredine/Agencija za zaštitu životne sredine
* nebojsa.veljkovic55@gmail.com

1. UVOD

Sediment je mešavina različitog materijala, organskog i neorganskog porekla koji se prenosi vodom ili ledom i najčešće obuhvata mineralne soli, glinu, mulj, pesak i biološki materijal (alge). Erozijom u rečnom slivu pod uticajem vode razaraju se čestice na površini zemljišta i dolazi do njihovog transporta iz gornjih u donje delove sliva posredstvom energije površinskih voda koje se slivaju. Do slivanja atmosferskih voda i transportovanja pokrenutih čestica sedimenta dolazi kada intenzitet padavina postane veći od intenziteta upijanja palih voda na zemljište, pri čemu se transportuju i hemikalije i zagađujuće materije različitog porekla. Zagađeni sediment je akumulirani materijal rečnog korita koji sadrži toksične ili opasne materije koje su štetne za zdravlje ljudi i životnih zajednica u vodenoj sredini. Zagađanje potiče od tačkastih/koncentrisanih izvora (industrijska i komunalna otpadna voda ili drugi izvori otpadnih voda) i rasutih/difuznih izvora oticanjem preko kontaminiranih zemljišta (rudnički otpad, industrijske i komunalne deponije i gradska područja).

Pojedine zagađujuće materije mogu biti dugotrajni izvori problema u životnoj sredini. Najproblematičniji zagađivači u istaloženom i suspendovanom sedimentu su pojedini metali, a pogotovu bioakumulativne toksične supstance, kao što su POPs (Persistent Organic Pollutants) hemikalije (Sakan i sar., 2017). Sediment deluje kao potencijalni sunđer za mnoge toksične hemikalije. Istorijski posmatrano, od industrijske revolucije veštački proizvedene hemijske supstance spiranjem putem zemljišta ili emisijom u vode završavaju u površinskim vodama. Zbog svojih svojstava, mnoge od ovih hemikalija-zagađivača se akumuliraju u sedimentu. Na taj način, rečni tokovi ili akumulacije imaju svojstvo „dugog zapisa“ u sedimentu i odražavaju istoriju zagađenja u rečnom slivu. U slučaju poboljšanja kvaliteta površinske vode, nasleđe prošlosti i dalje može biti prisutno u sedimentima sakrivenim na dnu reka ili iza brana akumulacija. Zato sedimenti mogu postati sekundarni izvori zagađenja, kada se erodiraju zbog poplave i erozije i transportuju dalje nizvodno u slivu (Brils J., 2008).

Ako se budu ostvarile projekcije klimatskih promena za oblast Jugoistočne Evrope nastaviće se trend sezonskih hidroloških varijacija reka srpskog podunavlja, što će imati za posledicu izraženu neravnomernost vodnog režima koja će se manifestovati periodima visokih voda bujičnog tipa i dugim periodima malih voda (*IPCC - Sixth Assessment Report Working Group I*, 2021). Prethodni stav je potpuno u skladu sa informacijama iz jednog ranijeg izveštaja namenjenog, kako je navedeno, „kreatorima politika za različite nivoe upravljanja i faze političkih formulacija kao podrška planiranju i primeni prilagođavanja na klimatske promene“ (*Adaptation in Europe*, 2013). Ovo je vredno pomena jer je u narednom izveštaju o stanju i izgledima evropske životne sredine naglašeno da će prekogranični transport zagađivača igrati sve veću ulogu sa potencijalno negativnim uticajima na kvalitet evropskih voda (*The European environment — state and outlook 2015*, SOER 2015). Konačno ono što je najvažnije, ovo predviđanje se ostvarilo avgusta 2022. godine na reci Odri. Suša i nizak vodostaj sa visokom temperaturom vode u kombinaciji sa ispuštanjem zagađene vode iz rudnika soli i pratećim zagađenjem fosforom i azotom iz gradskih otpadnih voda, koje je dovelo do masovne eutrofikacije duž celog toka, imalo je ekološki uticaj na oko 500 km reke Odre. Procenjeni mortalitet riba i drugih vodenih organizama bio je oko hiljadu tona. Početni akcident se dogodio u Poljskoj i tokom reke proširio kroz Nemačku (*Europe's state of water 2024*, 2024). Ovaj događaj je naglasio važnost razvoja praksi upravljanja rečnim slivovima kako bi se poboljšao prekogranični monitoring, komunikacije i upravljanje rizicima.

Prethodna iskustva koja smo izneli su bila dovoljan podsticaj da u ovom radu predstavimo ranije rezultate kvaliteta sedimenta u okviru monitoringa na prekograničnim profilima Dunava, Save i Tise i sa aktuelnim rezultatima kvaliteta vode na istim profilima ukažemo na moguće uzročno-posledične veze. Izbor profila je urađen prema kriterijumu reprezentativnosti dobijanja uvida u mogući uticaj prekograničnog zagađenja u slivu reke Dunav na teritoriji naše zemlje.

2. KRITERIJUMI ZA OCENU KVALITETA SEDIMENTA

Tokom proteklih decenija, tačnije od osamdesetih godina prošlog veka, razvijeno je više kriterijuma za ocenu kvaliteta sedimenta u nastojanju da se definišu granične vrednosti koje će pomoći u donošenju stavova u vezi upravljanja zagađenim sedimentima. U skladu sa opštom definicijom pojma kriterijum, da je to merilo procene ili ocene u odnosu na poželjnu ili referentnu vrednost, hemijska kontaminacija sedimenta određuje se merenjem koncentracija pojedinačnih elemenata ili jedinjenja u ukupnoj (rasutoj) masi sedimenta i njihovim poređenjem sa referentnim vrednostima. Generalno, analitičke hemijske metode su danas standardna procedura tako da je jednostavno određivanje koncentracija zagađujućih elemenata ili jedinjenja i ostaje samo definisanje kriterijuma za standarde, smernice, indikatore ili nivo upozorenja, kao polazište za donošenje zakonom utvrđene procedure delovanja

(*Sediment Screening Values*, 2004). Mere delovanja se odnose na ograničeno odlaganje iskopanog mulja iz korita reke i njegovog daljeg korišćenja, zbog moguće kontaminacije rečne vode u zoni deponovanog rečnog sedimenta i uticaja na riblji fond i ljudsko zdravlje.

Svi dosada korišćeni kriterijumi na međunarodnom nivou se mogu sistematizovati u dve grupe nastale iz dve vrste pristupa. Prvi pristup, koji se oslanja na hemizam sedimenta upoređenjem sa referentnim vrednostima tako da se dobija ocena kvaliteta. Drugi pristup, gde se kontaminacija sedimenta upoređuje sa štetnim efektima na živi svet u vodi. Primer kriterijuma iz prvog pristupa je regulativa koja se primenjuje u Srbiji kojom su utvrđene granične vrednosti zagađujućih supstanci u sedimentu (*Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje*, 2012) i preporuke ICPDR-a (*Joint Danube Survey 2*, 2008). Srpska uredba definiše ciljnu vrednost – maksimalno dozvoljenu koncentraciju (MDK) i remedijacionu vrednost za koncentracije pojedinačnih ili grupe zagađujućih materija. Ciljna vrednost je granična vrednost koncentracije zagađujuće materije ispod koje su negativni uticaji na okolinu zanemarljivi i ona predstavlja dugoročni cilj kvaliteta sedimenta, dok je maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) zagađujućih materija vrednost iznad koje su negativni uticaji na okolinu verovatni.

Drugi pristup definisanja kriterijuma kvaliteta sedimenta generalno postavlja dva praga nivoa sadržaja zagađujućih materija u sedimentu, prvi, ispod kojeg se retko javljaju negativni efekti na akvatične beskičmenjake (makroivertebrate) [nivo najnižeg efekta (LEL), prag nivoa efekta (TEL), nizak raspon efekta (ERL), prag minimalnog efekta (MET)], i drugi, iznad kojeg se negativni efekti verovatno javljaju [nivo ozbiljnog efekta (SEL), nivo verovatnog efekata (PEL), srednji raspon efekta (ERM), prag toksičnog efekta (TET], (Burton G. A., 2002; *Kvalitet sedimenta reka i akumulacija Srbije*, 2019).

3. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA KVALITETA SEDIMENTA

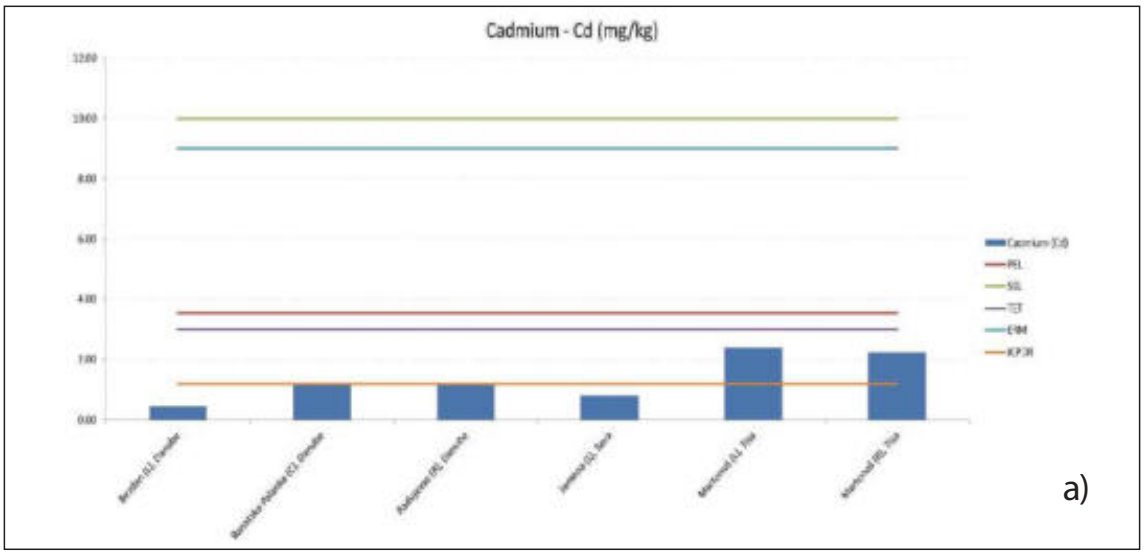
Analiza rezultata ispitivanja kvaliteta sedimenta na prekograničnim profilima reka Dunav (Bezdan – ulazni profil/Mađarska, Radujevac – izlazni profil/Rumunija), Sava (Jamena – ulazni profil/Hrvatska), Banatska Palanka (Dunav – državna granica Srbija/Rumunija) i Tisa (Martonoš – ulazni profil/Rumunija), (slika 1). Monitoring se odnosi na period od 2012 do 2017. godine koji je sprovela Agencija za zaštitu životne sredine na osnovu godišnjih programa koji usvaja Vlada Republike Srbije. Za potrebe analize kvaliteta sedimenta primenjeni su sledeći statistički postupci: kod jednog uzorkovanja na jednom profilu u šestogodišnjem periodu korišćena je izmerena koncentracija; a za profile na kojima su vršena dva i više uzorkovanja u šestogodišnjem periodu izračunata je aritmetička sredina izmerenih koncentracija tokom perioda ispitivanja (*Kvalitet sedimenta reka i akumulacija Srbije*, 2019).

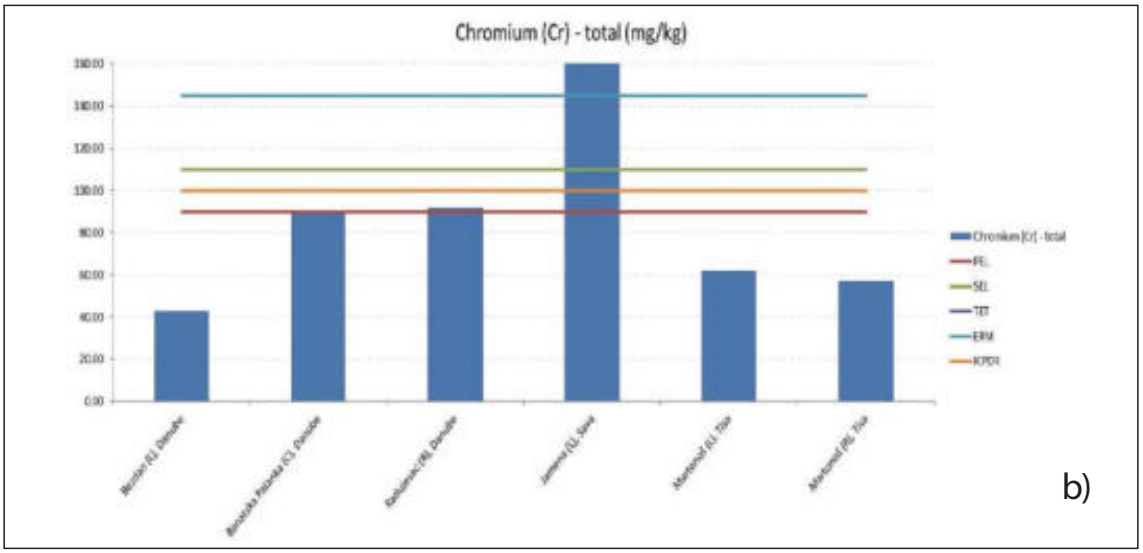
Slika 1. Prekogranični profili na rekama u slivu Dunava na teritoriji Srbije (*Countries of the Danube river basin*, https://www.icpdr.org/danube-basin/countries)

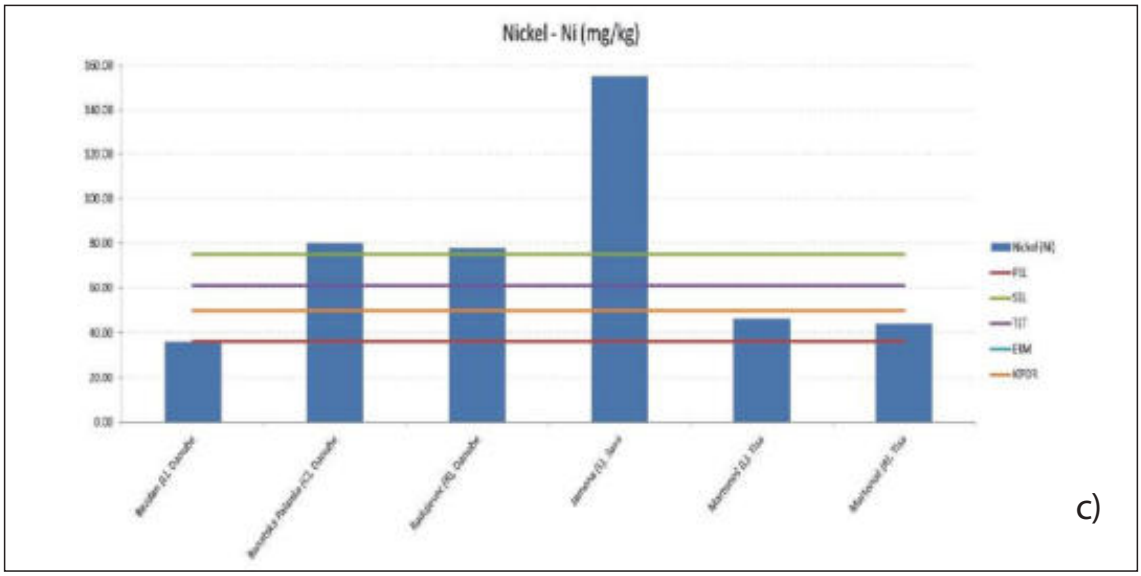
3.1. Koncentracije teških metala

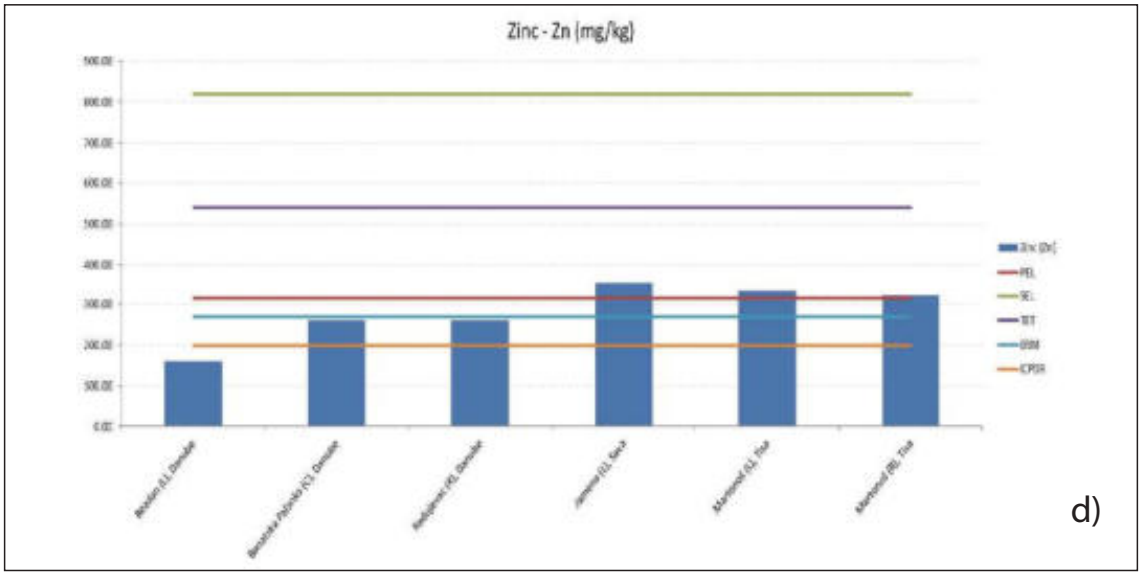
Teški metali su izuzetno važna grupa polutanata zbog toksičnosti koju mogu da ispolje na živi svet i perzistencije u okolini usled nemogućnosti biološke razgradnje. U nastavku je prikazana analiza rezultata za pojedine metale, čije su izmerene visoke koncentracije prevazilazile definisane kriterijume. Sadržaj kadmijuma (Cd), cinka (Zn), nikla (Ni), bakra (Cu) i hroma (Cr) u sedimentu reka na prekograničnim profilima ocenjeni prema graničnim vrednostima nivo verovatnog efekta (PEL), srednji raspon efekta (ERM), nivo ozbiljnog efekta (SEL) i prag toksičnog efekta (TET) ukazuju na umeren, ozbiljan i toksičan efekat na živi svet u vodi, dok procena kvaliteta sedimenta na bazi preporuka ICPDR-a pokazuje na sadržaj veći od ciljne granične vrednosti (Quality target).

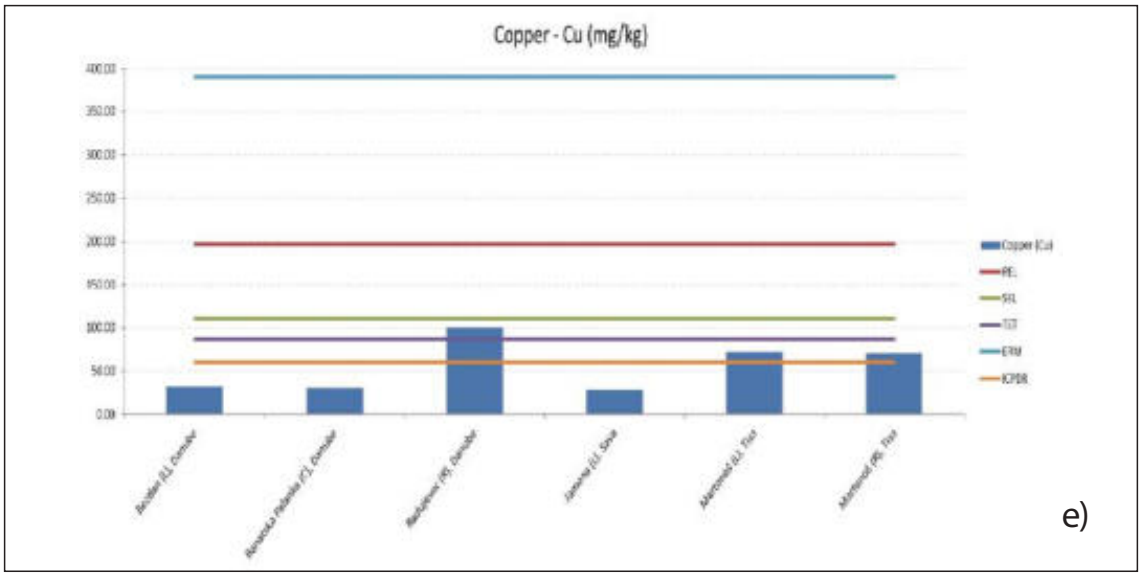
Procena kvaliteta sedimenta na sadržaj nikla pokazala je da izmerene koncentracije u sedimentima reke Dunav na profilima Banatska Palanka (80mg/kg) i Radujevac (78mg/kg) prevazilaze granične vrednosti za PEL (Ni)=36mg/kg, ERM (Ni)=50mg/kg, TET (Ni)=61mg/kg i SEL (Ni)=75mg/kg, što ukazuje na nivo verovatnog, srednjeg, ozbiljnog i toksičnog efekta na akvatični živi svet. Ciljna granična vrednost za kadmijum u sedimentu prema preporukama ICPDR-a (Quality target (Cr)=1.2mg/kg) prevaziđena je na profilu Martonoš (Tisa), a u odnosu na sadržaj bakra prema preporuci ICPDR-a – na istom profilu (Martonoš (L) i Martonoš (D) – sadržaj bakra bio je veći od ciljne granične vrednosti (Quality target (Cu)=60mg/kg). Procena kvaliteta sedimenta na sadržaj hroma pokazala je da izmerene koncentracije u sedimentima reke Save na profilu Jamena (160mg/kg) prevazilaze definisane granične vrednosti za PEL (Cr)=90mg/kg, ERM (Cr)=145mg/kg, SEL (Cr)=110mg/kg i TET (Cr)=100mg/kg, što ukazuje na nivo verovatnog, srednjeg, ozbiljnog i toksičnog efekta na akvatični živi svet. Istovremeno je i ciljna granična vrednost za hrom u sedimentu prevaziđena na mernom profilu Jamena prema preporukama ICPDR-a (Quality target (Cr)=100mg/kg), (slika 2(a-e)).









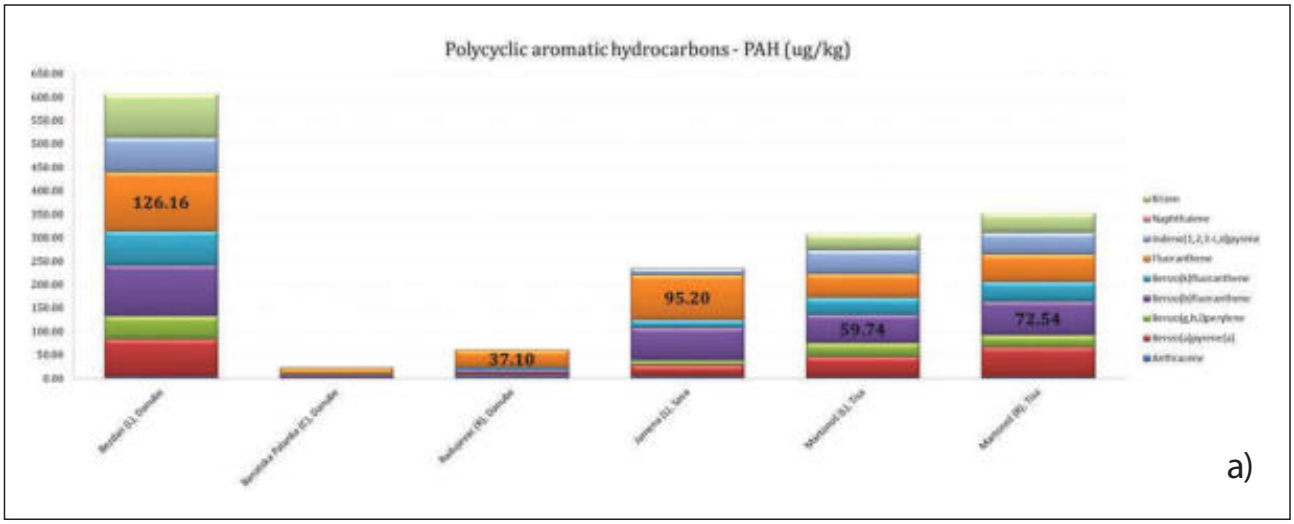


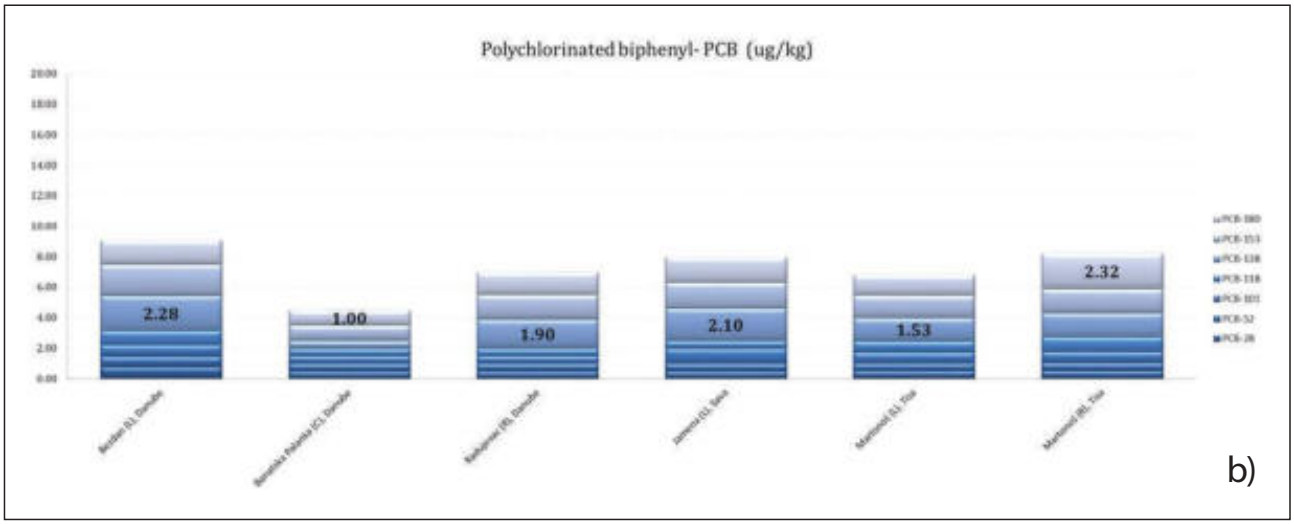
Slika 2 (a-e). Prosečne koncentracije sadržaja teških metala u sedimentu reka prekograničnih profila u slivu Dunava na teritoriji Srbije (2012-2017)

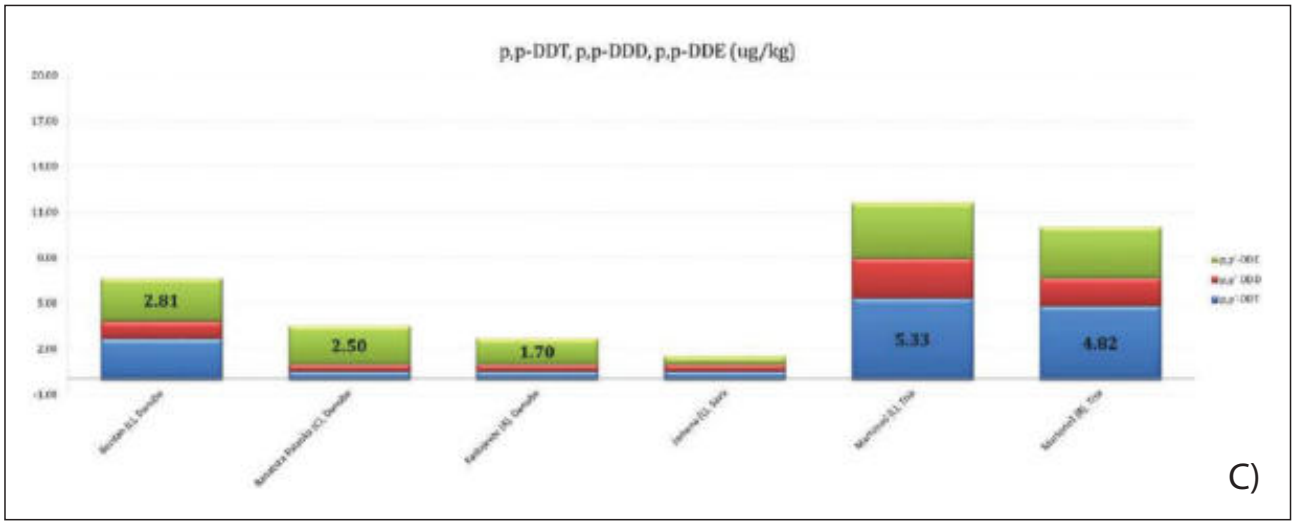
3.2. Koncentracije organskih polutanata

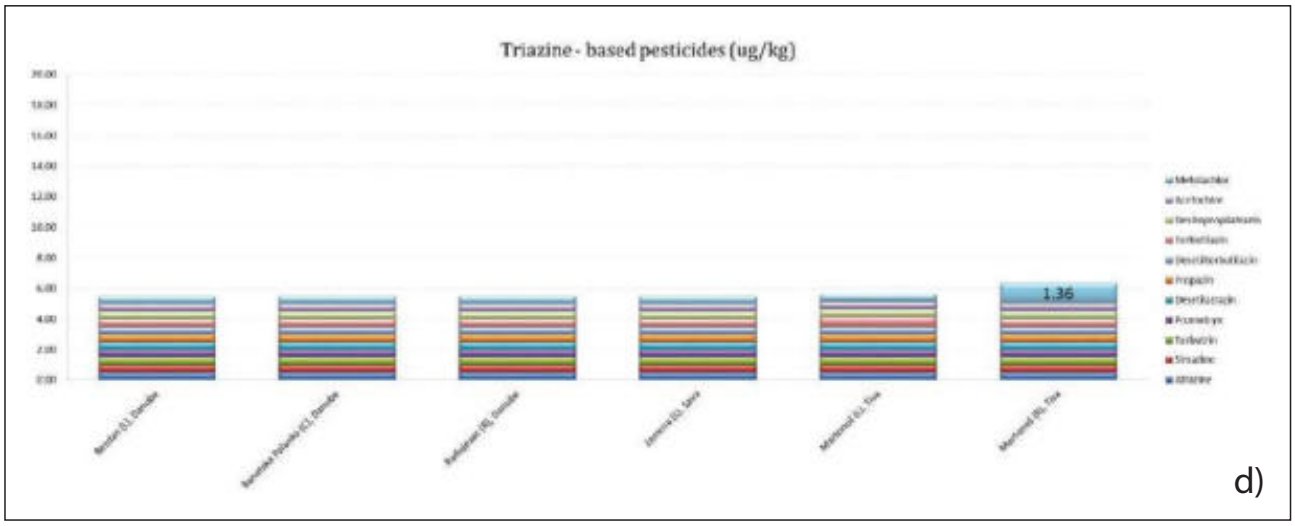
Od organskih polutanata određivani su policiklični aromatični ugljovodonici (PAH), polihlorovani bifenili (PCB), organohlorni pesticidi i pesticidi na bazi triazina (slika 3(a-d)).

Policiklični aromatični ugljovodonici (PAH) su detektovani u većini ispitivanih uzoraka sedimenta na prekograničnim profilima u koncentracijama značajno nižim od propisanih graničnih vrednosti. Bez obzira na niske detektovane koncentracije, važno je napomenuti da, emisije za dati izvor zavise od









Slika 3 (a-d). Prosečne koncentracije sadržaja organskih polutanata u sedimentu reka prekograničnih profila u slivu Dunava na teritoriji Srbije (2012-2017)

procesa koji su proizveli PAH-ove (Manoli i sar., 2004). Naime, tokom procesa sa niskim temperaturama, npr. sagorevanje drveta, najčešće se formiraju PAH molekuli niskih molekularnih masa. Sa druge strane, visokotemperaturni procesi sagorevanja (npr. goriva u motorima) izazivaju stvaranju PAH komponenti sa višim molekularnom masama (Mostert *et al*., 2010). Upravo stoga se korišćenjem različitih PAH odnosa može ustanoviti izvor zagađenja PAH komponentama. Za analizirane PAH u ovim uzorcima sedimenta najprikladniji je dijagnostički odnos IcdP/(IcdP + BghiP), koji za uzorak sedimenta Bezdan/Dunav iznosi 0,6 što prema literaturnim izvorima ukazuje na pirogene izvore sagorevanjem drveta, uglja ili trave (Yunker i sar., 2002. i Tobieszewski, Namiesnik, 2012).

Sadržaj polihlorovanih bifenila (suma PCB) u uzorcima sedimenta je bio znatno ispod propisanih graničnih vrednosti za nivo verovatnog efekta (PEL (PCBs)=277µg/kg), srednjeg raspona efekta (ERM (PCBs)=400µg/kg), praga toksičnog efekta (TET (PCBs)=1000µg/kg) i nivoa ozbiljnog efekta (SEL (PCBs)=5300µg/kg). Ukupni DDTs, odnosno sume p,p-DDT, p,p-DDD i p,p-DDE u svim ispitivanim uzorcima su bile značajno ispod propisane vrednosti za nivo verovatnog efekta (PEL (DDTs)=4500µg/kg), srednji raspon efekta (ERM (DDTs)=350µg/kg) i nivo ozbiljnog efekta (SEL (DDTs)=120µg/kg). Sa druge strane, na profilu Bezdan (Dunav) detektovan sadržaj sedimenta p,p-DDE od 2.8ug/kg ukazuje na prekoračenje maksimalno dozvoljene koncentracije od MDK (p,p-DDE=1µg/kg) na osnovu kriterijuma definisanih *Uredbom* (Sl.glasnik RS br. 50/2012). Procena kvaliteta sedimenta na osnovu kriterijuma definisanih *Uredbom* (Sl. glasnik RS br. 50/2012), u odnosu na sadržaj p,p-DDD na profilima Martonoš_Leva obala/Tisa (2.60µg/kg) i Martonoš_Desna obala/Tisa (1.86µg/kg), ukazuje na prekoračenje maksimalno dozvoljene koncentracije. Procena kvaliteta sedimenta na osnovu kriterijuma definisanih *Uredbom* (Sl. glasnik RS br. 50/2012), u odnosu na sadržaj p,p-DDE na profilima: Martonoš_Leva obala/Tisa (3.68µg/kg) i Martonoš_Desna obala/Tisa (3.35µg/kg).

4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA KVALITETA VODE I DISKUSIJA

Rezultati izvršenih hemijskih analiza uzoraka površinskih voda (vodotoka) u okviru monitoringa za 2023. godinu, koji je sprovela Agencija za zaštitu životne sredine, za komparativne parametre kvaliteta sedimenta upoređene su sa graničnim vrednostima klasa kvaliteta propisanih podzakonskim aktom (*Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje*, 2012). Vrednosti prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci upoređene su sa vrednostima *standarda kvaliteta životne sredine* (SKŽS), odnosno prosečnom godišnjom koncentracijom (PGK) i maksimalno dozvoljenom koncentracijom (MDK), propisanim podzakonskim aktom (*Uredba o graničnim vrednostima prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje*, 2014). Za utvrđivanje klase kvaliteta korišćeni su kriterijumi propisani prethodno navedenim podzakonskim aktom i prikazani u Tabeli 1, (*Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih i podzemnih voda 2023*, 2024).

Prezentovani rezultati analize kvaliteta monitoringa vode na prekograničnim profilima u slivu Dunava u svrhu utvrđivanja moguće uzročno-posledične veze

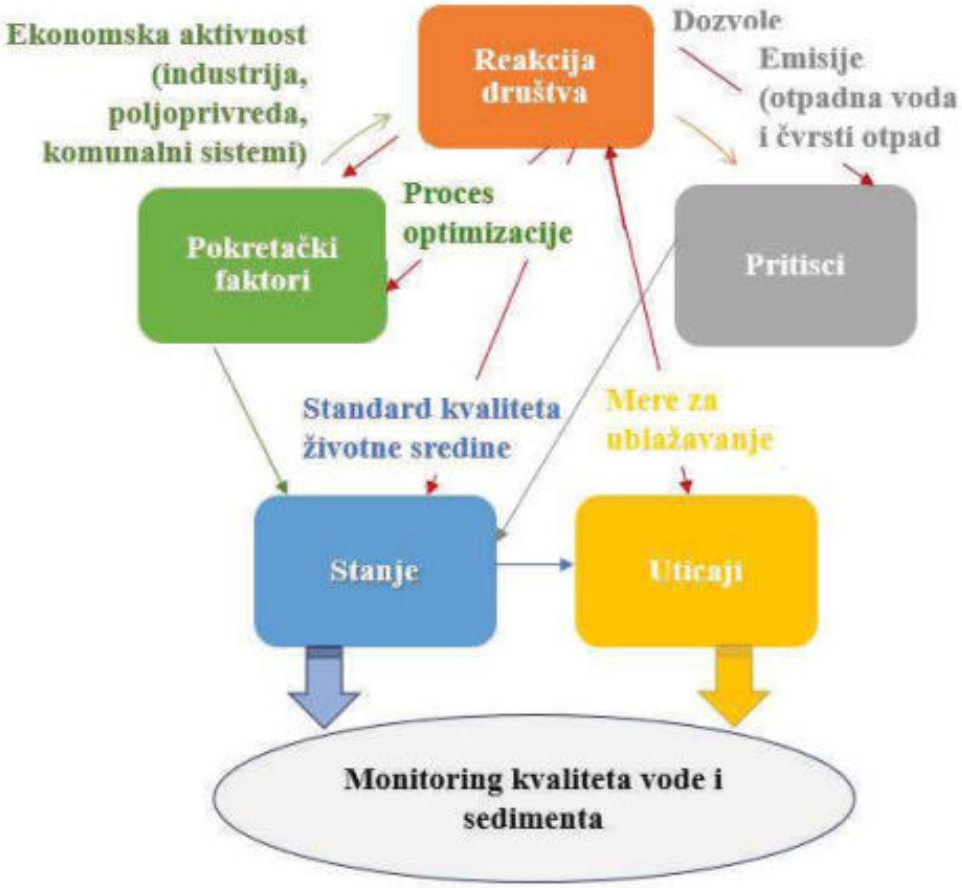
sa rezultatima monitoringa kvaliteta sedimenta, ukazuje na jednu važnu činjenicu. Cilj sprovođenja monitoringa kvaliteta površinskih voda i sedimenta je utvrđivanje prisustva zagađenja koje može biti jedna od prepreka za postizanje "dobrog ekološkog statusa" površinske vode. Dosadašnji rezultati monitoringa koje sprovodi Agencija za zaštitu životne sredine, a u ovom radu je prezentovan deo rezultata, pokazuje da ne postoje jednoznačne uzročno-posledične veze. Osim toga, objavljena istraživanja koja su sprovedena prethodnih godina su pokazala da kontaminirani sedimenti koji prevazilaze kriterijum zahtevanog kvaliteta ne utiču uvek svojom toksičnošću na životnu zajednicu na rečnom ili jezerskom dnu (bentos). Drugim rečima, nije primećeno smanjenje biološke raznovrsnosti kao rezultat kontaminiranog sedimenta. Ponekad je utvrđeno suprotno, da je sediment koji odgovara zahtevu kvaliteta izazvao negativne efekte na bentos zbog kombinovane toksičnosti ili prisustva neidentifikovanih jedinjenja (*Guidance for the use and application of sediment quality targets for the protection of sediment-dwelling organisms*, 2007).

Važno je istaći da prezentovani rezultati opravdavaju uvođenje i razvoj monitoringa sedimenta. A to je zbog boljeg razumevanja odnosa između kontaminacije sedimenata (opasnosti) i njegovog stvarnog rizika za funkcionisanje ekosistema (ekološki status akvatične sredine), što je preduslov preduzimanja delotvornih mera za očuvanje ili obnovu ekološkog statusa površinskih voda. Monitoring sedimenta omogućuje praćenje trenda i uz monitoring kvaliteta vode obezbeđuje informacije za valjanu indikaciju promena tokom dužeg perioda – povećanje ili smanjenje koncentracija zagađujućih materija tokom vremena. Prostorni monitoring sa matematičkim modeliranjem daje indikaciju stepena kontaminacije u nekom delu rečnog sliva (Veljković N. *et al.*, 2013). Ovakav monitoring je neophodan kako bi se otkrio horizontalni razmak zagađivača duž vodotoka i locirao njegov izvor i intenzitet emisije zagađenja u slivu. Drugim rečima, da bi se obezbedio uvid u ekološke procese i veze između ekonomskih aktivnosti i utvrdio njihov uticaj na životnu sredinu, kao što su rečni slivovi, Agencija za zaštitu životne sredine je uspostavila metodski okvir „pokretački faktori – pritisci – stanje – uticaji – reakcija društva" (*drivers - pressures - state - impact - response, DPSIR*), (*Pravilnik o nacionalnoj listi indikatora zaštite životne sredine*, 2011), (slika 4).

Sa druge strane, treba naglasiti da *Zakon o vodama* pojmovno definiše *standard kvaliteta životne sredine* kao koncentraciju pojedinačne zagađujuće supstance ili grupe zagađujućih supstanci u vodi, sedimentu ili bioti, koja ne može da bude prekoračena u cilju zaštite ljudskog zdravlja i životne sredine (*Zakon o vodama*, 2018).

Tabela 1: Rezultati analize klasifikacije vode na prekograničnim profilima u slivu Dunava (2023)

Profil	Reka	Hrom (ukupni) µg/	Cink µg/l	Bakar µg/l	Prioritetne i prioritetne hazardne supstance
		Klase kvaliteta vode			
Bezdan	Dunav	I	I	I-II	-
Banatska Palanka	Dunav	I	I	I-II	*Ni-rast. 1x(III/IV)*
Radujevac	Dunav	I	I	I-II	-
Martonoš	Tisa	I	I	I-II	-
Jamena	Sava	I	I	I-II	-
Ostružnica	Sava	I	I	I-II	*Fluoranten 1x(III/IV)*



Slika 4. Uzročno – posledični odnosi u rečnom slivu i položaj monitoringa kvaliteta vode i sedimenta

5. ZAKLJUČAK

Rezultati analiza kvaliteta sedimenta i vode u našim rekama prekograničnih profila sliva Dunava i diskusija, prezentovano u ovom radu, ukazuje na svu specifičnost problema u vezi upravljanja sedimentom i upućuje na sledeće preporuke koje imaju integralno polazište problemu:

1. Postojeća regulativa koja uređuje oblast deponija i otpada se mora proširiti uzimajući u obzir specifična svojstva materijala bagerovanog sa rečnog dna. Ovaj materijal tretirati kao „mulj od jaruženja“ koji može sadržati opasne materije.
2. Afirmisati nastojanje za korisnom upotrebom sedimenta sa ili bez prethodnog tretmana, tako da se razmotri *standard kvaliteta životne sredine* za tretirane sedimente.
3. *Plan upravljanja slivom*, za delove slivnog područja za koja su urađene prethodne studije, dopuniti *Planom upravljanja sedimentom*.

Plan upravljanja sedimentom treba, najmanje, da sadrži: (a) Akcioni plan za smanjenje izvora zagađivanja, posebno iz difuznih izvora i sa kontaminiranih lokaliteta; (b) Plan čišćenja/bagerovanja, deponovanja, eventualnog tretiranja i kasnijeg korišćenja sedimenta; i (c) Plan za smanjenje erozije zemljišta i redukciju deponovanja sedimenta sa pratećim zagađenjem u rečno korito.

LITERATURA

1. *Adaptation in Europe - Addressing risks and opportunities from climate change in the context of socioeconomic developments*, EEA Report No 3/2013.
2. Brils, J. **(**2008). *Sediment monitoring and the European Water Framework Directive***.** Ann Ist Super Sanità, Vol. 44, No. 3: 218-223, Deltares, Utrecht, The Netherlands.
3. Burton, A. (2002). *Sediment quality criteria in use around the world*. Limnology 3: p. 65–75.
4. *Europe's state of water 2024 - The need for improved water resilience*, European Environment Agency (2024), p. 56.
5. *Guidance for the use and application of sediment quality targets for the protection of sediment-dwelling organisms in Minnesota*, Minnesota Pollution Control Agency, MPCA Document Number: tdr-gl-04, 2007.
6. *IPCC - Sixth Assessment Report Working Group I – The Physical Science Basis, Regional fact sheet – Europe* (2021). Retrived 20 september 2025 from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/resources/factsheets/
7. *Joint Danube Survey 2 - Final Scientific Report (*2008). *Technical Report of the International Commission for the Protection of the Danube River*. ICPDR.
8. *Kvalitet sedimenta reka i akumulacija Srbije*, Agencija za zaštitu životne sredine (2019). Preuzeto 15. septembra 2025. sa https://sepa.gov.rs/wp-content/uploads/2024/10/Kvalitet-Sedimenta-Reka-Akumulacija-Srbije.pdf
9. Levei, E. et al. (2014). *Assessment of contamination and origin of metals in mining affected river sediments: a case study of the Aries River catchment, Romania, J. Serb. Chem. Soc. 79* (8) 1019–1036. Retrived 15 september 2025 from http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0352-5139/2014/0352-51391300086L.pdf
10. Manoli, E. et al. *(*2004). *Profile analysis of ambient and source emitted particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from three sites in northern Greece*, Chemosphere 56, p. 867–878.
11. Mosert, M. et al. (2010), *Application of chemometrics to analysis of soil pollutants*. TrAC Trends in Analytical Chemistry, Volume 29, Issue 5, p. 430-445.
12. *Pravilnik o nacionalnoj listi indikatora zaštite životne sredine* ("Sl. glasnik RS", br. 37/2011).
13. *Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih i podzemnih voda 2023*, Agencija za zaštitu životne sredine (2024), Preuzeto 12. septembra 2025. sa https://sepa.gov.rs/wp-content/uploads/2024/12/KvalitetVoda2023.pdf
14. Sakan, S. *et al*., *Persistent organic pollutants (POPs) in sediments from river and artificial lakes in Serbia*, Journal of Geochemical Exploration, Volume 180, September 2017, p. 91-100. Retrived 10 september 2025 from https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.008
15. *Sediment Screening Values* (2004). *United States Environmental Protection Agency Region* 5. Retrived 8 september 2025 from https://archive.epa.gov/reg5sfun/ecology/web/html/benchmemo.html
16. *The European environment - State and outlook: Assessment of global megatrends 2015*. (2015). European Environment Agency, p. 10.
17. Tobiszewski, M, Namiesnik, J. (2012). *PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources*, Environmental Pollution, p. 110-119.
18. *Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje* ("Sl. glasnik RS", br. 50/2012).
19. *Uredba o graničnim vrednostima prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje* („Sl. glasnik RS", broj 24/2014.
20. Veljković, N. i sar. (2013). *Analiza rezultata monitoringa POPs supstanci u površinskim vodama Srbije* (ppt prezentacija), Workshop on Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Supstances (POPs), Sarajevo.
21. Veljković, N. i sar. (2013). *Modeliranje i procena difuznog zagađenja vodotokova sliva Kolubare*. Voda i sanitarna tehnika, br. 3/2013, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, str. 47-52.
22. Veljković, N., et al. (2013). *Modeling and Assessment of Diffuse Water Pollution Load – Principles and application*, LAP Lambert Academic Publishing.
23. Yunker, M. et al. (2002). *PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition*, Organic Geochemistry, Volume 33, Issue 4, April 2002, p. 489-515.
24. Zakon o vodama (*"Sl. glasnik RS", br. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018 - dr. zakon*).

REŠENJA ZA AUTOMATIZACIJU U INDUSTRIJI

od jednostavnih aplikacija
do kompletnih industrijskih sistema

INDAS automation

GET AUTOMATED

Solutions for excellence

milanović
tretman voda

www.mwt.rs

Razvoj kompletnog rešenja za prečišćavanje sanitarnih otpadnih voda korišćenjem SBR i MBBR

Kao deo **MIND** – Milanović Industries Group, **Milanović tretman voda** posluje sa sedištem u Srbiji i predstavništvima u Nemačkoj i UAE. Iskustvo duže od 20 godina i stručni tim inženjera iz oblasti tretmana voda, najveće su vrednosti ove kompanije. Kvalitetan i inovativan proizvod, kreiran od strane tima Milanović tretmana voda, uskoro će biti dostupan na tržištu Srbije.

Kompletno rešenje pokriva sve faze, od identifikovanja potreba i planiranja, proizvodnje, instalacije i ugradnje, do servisa i održavanja sistema za prečišćavanje sanitarnih otpadnih voda. Kapaciteta od 100 ES do 7000 ES, ovaj sistem je odlično rešenje za mala i srednja preduzeća, velike kompanije, kao i naselja, opštine i gradove koji imaju potrebu za ovom vrstom tretmana vode.

Kompaktan paketni sistem kontejnerskog tipa koristi SBR i MBBR tehnologiju, a u zavisnosti od potreba klijenata, Milanović tretman voda u mogućnosti je da ponudi adekvatno rešenje za primarni i tercijarni tretman vode.

Tim servisera u kratkom roku može da reši svaki zahtev korisnika koji se javi tokom rada sistema, dok sam sistem ima mogućnost daljinskog praćenja i nadzora.

Milanović tretman voda
Aleja Milanović bb , 34325 Kragujevac
+381 34 61 70 746
office@mwt.rs, www.mwt.rs

Member of MIND GROUP

Pregledni rad
UDK: 628.349:66.087.5
https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.17630976.svg

Kristiana ZRNIĆ TENODI, Emilijan MOHORA, Slaven TENODI, Nataša DUDUKOVIĆ, Đorđe PEJIN, Jasmina AGBABA, Srđan RONČEVIĆ

ELEKTROKOAGULACIJA KAO ODRŽIVA TEHNOLOGIJA ZA TRETMAN VODE: PRINCIPI, DIZAJN I SAVREMENE PRIMENE

ELECTROCOAGULATION AS A SUSTAINABLE TECHNOLOGY FOR WATER TREATMENT: PRINCIPLES, DESIGN, AND RECENT APPLICATIONS

IZVOD

Elektrokoagulacija (EK) je održiva tehnologija za tretman voda koja *in-situ* generiše gvozdene ili aluminijumske koagulantne vrste elektrolitičkim rastvaranjem anoda. Kombinuje neutralizaciju naelektrisanja, flokulaciju, adsorpciju/koprecipitaciju i elektroflotaciju, uz moguće oksidacione efekte reaktivnih vrsta. Dizajn reaktora (geometrija, A/V odnos, tok), izbor i konfiguracija elektroda (Fe/Al; MP-P, MP-S, BP-S), rastojanje između elektroda i gustina struje presudno utiču na efikasnost, potrošnju energije, generisanje mulja i pasivizaciju. EK pouzdano uklanja arsen i druge metale/metaloide, prirodne organske materije i boje, ulja, PFAS, farmaceutike te mikroorganizme/viruse, uz dobru prilagodljivost pilotu i industriji i posebnu pogodnost za decentralizovane/ruralne sisteme. Dalji razvoj obuhvata integraciju obnovljivih izvora i unapređenje kontrole radi energetske optimizacije i produženja veka elektroda.

Ključne reči: elektrokoagulacija, tretman vode, elektrode, primenjivost

ABSTRACT

Electrocoagulation (EC) is a sustainable water-treatment technology that in situ generates iron- or aluminum-based coagulant species via electrolytic dissolution of sacrificial anodes. It combines charge neutralization, flocculation, adsorption/co-precipitation, and electroflotation, with possible oxidative effects from reactive species. Reactor design (geometry, electrode area-to-volume ratio, flow regime), electrode selection and configuration (Fe/Al; MP-P, MP-S, BP-S), interelectrode spacing, and current density are critical determinants of removal efficiency, energy consumption, sludge generation, and passivation. EC reliably removes arsenic and other metals/metalloids, natural organic matter and color, oils, PFAS, pharmaceuticals, and microorganisms/viruses, demonstrating strong adaptability from pilot to full scale and particular suitability for decentralized/rural systems. Future development includes integration of renewable energy sources and advanced control to optimize energy use and extend electrode lifetime.

Keywords: electrocoagulation, water treatment, electrodes, applicability

1. ELEKTROKOAGULACIJA, ISTORIJAT I PRIMENA

Elektrokoagulacija (EK) ima dugu i dobro dokumentovanu istoriju,pri čemu je prva primena na industrijskom nivou dokumentovana je 1889. u Londonu (*Vik i sar., 1984; Mao i sar., 2023*), a rani patenti A. E. Dietericha (1906) i J. T. Harriesa (1909) uveli su istovremenu upotrebu (Fe) i aluminijumskih (Al) elektroda, praksu koja se zadržala do danas (*U.S. Patent, 1909; Vik i sar., 1984*). Značajan korak napred usledio je 1976. godine, kada je opisana EK jedinica za separaciju ulje–voda sa do 99% efikasnosti u 10–20 min, čime je otvoren put širem industrijskom usvajanju (*Kaliniichuk i sar., 1976*). Danas se EK smatra tehnologijom velikog potencijala za uklanjanje

Kristiana Zrnić Tenodi*[1] (https://orcid.org/0000-0002-4251-0477), Emilijan Mohora[2],
Slaven Tenodi[1] (https://orcid.org/0000-0002-8073-8915), Nataša Duduković[1], (https://orcid.org/0000-0003-4903-9101)
Đorđe Pejin[1] (https://orcid.org/0009-0009-2471-743X), Jasmina Agbaba[1] (https://orcid.org/0000-0002-9915-2885),
Srđan Rončević[1] (https://orcid.org/0000-0001-8698-4204)
[1]Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine, 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 3, e-mail: kristiana.zrnic@dh.uns.ac.rs
[2]Univerzitet Singidunum, 11000 Beograd, Danijelova 32

zagađujućih materija, posebno arsena u vodi za piće (*Zrnić Tenodi i sar.,2023; 2024*), pogodnom za male decentralizovane sisteme, ali skalabilnom na >1000 m^3/d paralelnim modulima (*Holt i sar., 2006; Lu i sar., 2021*).

Istraživanja dosledno potvrđuju uklanjanje suspendovanih čestica, koloida, organskih materija, boja, ulja i masti, metala i metaloida, fluora, fosfata, bakterija i virusa. EK je naročito efikasna prema hidrofobnim makromolekulima (huminske/fulvinske kiseline, tanini, boje), dok je učinak na mala hidrofilna organska jedinjenja ograničen (*Liu i sar., 2018*). U uklanjanju teških metala/metaloida (Cd^{2+}, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Cr^{6+}, As^{5+}, As^{3+}), EK pokazuje visok učinak, što je čini privlačnom i za industrijske/komunalne vode i za pripremu podzemnih voda za piće. Poslednja decenija beleži nagli rast publikacija sa fokusom na podzemnim i površinskim vodama, kao i komunalnim i industrijskim voda, što potvrđuje prilagodljivost tehnologije (*Lu i sar., 2021*). U kontekstu Četvrte industrijske revolucije integracija solarne, vetro i hidro energije može smanjiti troškove i emisije CO_2 i zameniti konvencionalno napajanje EK reaktora (*Kumar i Pan, 2020*). Dalji razvoj treba da cilja energetsku optimizaciju dizajna reaktora i spajanje sa unapređenim digitalnim alatima (AI, prediktivna kontrola, automatizacija), čime se povećavaju stabilnost, iskorišćenost elektroda i ukupna energetska efikasnost (*Lu i sar., 2021*).

2. MEHANIZAM ELEKTROKOAGULACIJE I FORMIRANJE KOAGULACIONIH VRSTA

EK je srodna hemijskoj koagulaciji sa solima gvožđa (Fe) ili aluminijuma (Al), ali se koagulantne katjonske vrste kod EK stvaraju „*in situ*“ elektrolitičkim rastvaranjem materijala elektrode usled oksidacije, takozvane „žrtvene“ anode (*eng. sacrificial electrode*). Nastali Fe/Al (mono- i polimerni) hidroksikompleksi brzo neutrališu površinska naelektrisanja zagađujućih materija i podstiču aglomeraciju i taloženje. U odnosu na klasičnu koagulaciju, EK često postiže niže rezidualne koncentracije zagađujućih materija potencijalno smanjujući ili potpuno eliminišući potrebu za relativno skupim koagulantima. Tehnologija koristi elektrode od Fe i Al-najčešće zbog povoljne cene i visoke efikasnosti, ali se u ovu svrhu mogu koristiti materijali na bazi Zn, Mg ili Ti (*El-Ghenimi i sar., 2020*).

Glavni princip EK zasniva se na prolasku električne struje kroz anode, čime dolazi do aglomeracije nastalih metalnih koagulacionih vrsta, bilo monomernih ili polimernih. U zavisnosti od pH vrednosti rastvora, mogu se formirati nerastvorni amorfni metalni hidroksidi, koji dodatno adsorbuju i koprecipituju zagađujuće materije. Istovremeno, generisani OH^-/H^+ joni pomažu puferovanje, pa se proces najčešće odvija blizu neutralnog pH. Uklanjanje kontaminanata pomoću EK je kombinacija neutralizacije naelektrisanja, “sweep” flokulacije, adsorpcije i koprecipitacije. Ključne elektrodne i hemijske transformacije u ćeliji opisane su odgovarajućim reakcijama (1-3) (*Holt i sar., 2006*):

Anodna reakcija - rastvaranje metala sa anode:

$$M_{(S)} \rightarrow M^{n+}_{(aq)} + ne^- \quad (1)$$

Gde *M* predstavlja metal koji se koristi kao anoda (najčešće Fe ili Al), a *n* je broj elektrona oslobođenih tokom reakcije. Ova reakcija rezultira stvaranjem metalnih katjona u rastvoru. Anodna i katodna reakcija – oksidacije, odnosno redukcije vode, respektivno dovode do, stvaranje gasovitog kiseonika i protona (H^+) na anodi, odnosno stvaranje gasovitog vodonika i hidroksidnih jona na katodi (*Hamdan i El-Naas, 2014*):

$$2H_2O \rightarrow 4H^+_{(aq)} + O_{2(g)} + 4e^- \quad (2)$$

$$nH_2O + ne^- \rightarrow (n/2)H_{2(g)} + nOH^-_{(aq)} \quad (3)$$

Rastvoreni metalni joni iz reakcije (1) mogu da formiraju metalne hidrokside u rastvoru, koji dalje deluju kao koagulati. Reakcija (2) pokazuje oksidaciju vode, koja dovodi do stvaranja kiseonika (O_2) na anodi, dok reakcija (3) dovodi do stvaranja vodonika (H_2) na katodi. Ovako nastali gasovi stvaraju mehuriće koji imaju važnu ulogu. Mehurići zahvataju mikroflokule i iznose ih na površinu, gde formiraju sloj pene koji se lako može ukloniti. Ovaj proces se naziva elektroflotacija i smatra se jednim od glavnih mehanizama uklanjanja zagađujućih materija u EK procesu naročito prilikom primene Al elektroda (*Sahu i sar. 2014*).

Konkretno za Al i Fe elektrode, sledeće reakcije (4-11) predstavljaju osnovu funkcionisanja sistema EK:

Za elektrode od aluminijuma, na anodi se odvijaju:

$$Al_{(s)} \rightarrow Al^{3+} + 3e^- \quad (4)$$

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_{3(s)} + 3H^+ \quad (5)$$

a na katodi:

$$3H_2O + 3e^- \rightarrow 1{,}5H_2 + 3OH^- \quad (6)$$

$$Al_{(s)} + 4\,OH^- \rightarrow [Al(OH)_4]^- + 3e^- \quad (7)$$

Za elektrode od gvožđa, na anodi se odvijaju sledeće reakcije:

$$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^- \quad (8)$$

$$4Fe^{2+} + O_2 + 10H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^+ \quad (9)$$

a na katodi:

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \quad (10)$$

$$[Fe(OH)_4]^- + 2OH^- \rightleftarrows [Fe(OH)_6]^{3-} \quad (11)$$

Glavni mehanizmi elektrokoagulacije, uključujući flokulaciju, sorpciju, flotaciju, oksidaciju i redukciju, prikazani su na slici 1 (*Holt i sar., 2006*).

Slika 1. Prikaz EK ćelije sa mehanizmima (prilagođeno iz Holt i sar., 2006)

Količina rastvorenih metalnih jona u elektrokoagulacionom procesu je direktno proporcionalna primenjenoj gustini struje i ova veza je definisana Faradejevim zakonom (jednačina 12) *(Singh i Ramesh, 2014)*.

$$m = \frac{ItM}{FZ} \qquad [g] \quad (12)$$

gde je: m-masa oslobođenog metala [g], I-primenjena struja [A], t-vreme trajanja tretmana [s], M-molarna masa (Fe - 56 g/mol; Al - 27 g/mol), F-Faraday-eva konstanta [96485 C/mol] i Z-broj elektrona u reakciji. Iz jednačine se vidi da je količina rastvorenog metala direktno proporcionalna primenjenoj struji i vremenu, dok je obrnuto proporcionalna broju elektrona. Jačina struje utiče i na količinu oslobođenih mehuriće, njihova veličina je obrnuto, a broj direktno proporcionalna. Veća gustina struje daje sitnije i brojnije mehuriće, s većom ukupnom površinom, što pojačava adsorpciju i flotaciju zagađujućih materija (*Hamdan i El-Naas, 2014*).

U rastvorima sa Cl^- tokom elektrohemijskog tretmana na Fe elektrodama, anodnom oksidacijom mogu nastati reaktivne vrste hlora kao što su Cl_2 i HOCl/OCl^-. (reakcije 13–15). One obezbeđuju jak oksidacioni kapacitet, pa se teško razgradive organske supstance transformišu/modifikuju i lakše uklanjaju (*Delaire i sar., 2015*).

$$2Cl^-_{(aq)} \rightarrow Cl_{2(g)} + 2e^- \quad (13)$$

$$Cl_{2(g)} + H_2O_{(aq)} \rightarrow HClO + Cl^-_{(aq)} + H^+_{(aq)} \quad (14)$$

$$HClO \leftrightarrows ClO^- + H^+ \qquad pK_a = 7{,}56 \quad (15)$$

O_2 oslobođen sa anode podstiče nastanak H_2O_2, koji kao intermedijer omogućava prevođenje toksičnih u netoksične vrste. „*In situ*" formirani oksidi gvožđa ubrzavaju oksidaciju Fe^{2+} i uz katalizaciju pomoću O_2 doprinose stvaranju hidroksilnih radikala (*Qian i sar., 2019*). Tokom procesa mogu se formirati i druge reaktivne vrste kiseonika, poput $O_2^{\bullet-}$ i ferila (Fe(IV)) (jednačine reakcije 16-19). Standardni redukcioni potencijali Fe(IV)/Fe(III) tokom ovog procesa iznose približno 2,0 V/SHE, dok za $O_2^{\bullet-}/H_2O_2$ iznosi 0,9 V/SHE (*Qian i sar., 2019*).

$$Fe^{2+} + O_2 \rightarrow Fe^{3+} + O_2\bullet^- \quad (16)$$

$$Fe^{2+} + O_2\bullet^- \xrightarrow{2H^+} Fe^{3+} + H_2O_2 \quad (17)$$

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + \bullet OH + OH^- \quad (18)$$

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{4+} + 2OH^- \quad (19)$$

Flokule nastale tokom procesa brzo sedimentiraju, a nedostaci su trošenje žrtvenih anoda, troškovi električne energije i potreba za većom provodljivošću vode.

3. UTICAJ DIZAJNA REAKTORA NA EFIKASNOST TRETMANA

Kako kod većine tehnologija, različiti operativni parametri i faktori značajno utiču na efikasnost tretmana pa je u slučaju elektrokoagulacije to pre svega materijal elektroda, dizajn reaktora, tip napajanja i gustina struje, kao i rastojanje, povezivanje i konfiguracija elektroda.

3.1. Materijal elektroda

Izbor elektrodnog materijala u praksi predstavlja izbor između Fe, Al, Cu, Mg, Zn, Ti, nerđajući i niskougljenični čelik, kao i legure (*Sahu i sar., 2014; Gilhotra i sar., 2018*). Zbog dostupnosti, cene i

elektrohemijskih svojstava, najčešći izbor su Fe i Al elektrode, koje generišu različite metalne hidrokside tokom procesa (*Ezechi i sar., 2020*).

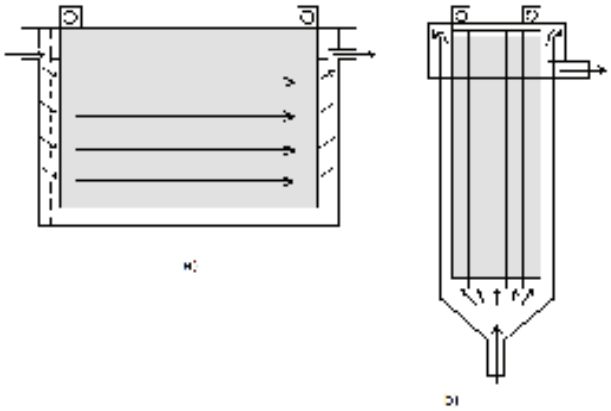
Efikasnost Fe/Al sistema snažno zavisi od pH tretiranog medijuma (*Kobya i sar., 2020*). Fe anode obično pokazuju veću brzinu oksidacije od Al zbog većeg oksidacionog kapaciteta i postojanja više valentnih stanja Fe (npr. Fe^{2+}/Fe^{3+}), što utiče na tip i reaktivnost nastalih hidroksida (*Weiss i sar., 2021*).

U praksi, izbor između Fe i Al zavisi od dostupnosti, redoks uslova, ciljnih zagađujućih materija i željenog pH radnog opsega. Fe elektrode najbolje rade u višem pH (6,5–9), stvarajući $Fe(OH)_3$ koagulante, time su posebno efikasne za arsen, fosfate i teške metale, ali im učinak opada pri jakom kiselom ili iznad 9 pH. Al elektrode pokazuju optimalnu efikasnost oko neutralnog/blago kiselog pH (6–7), formiraju $Al(OH)_3$ i bolje uklanjaju huminske kiseline i teške metale u tom opsegu, uz veću fleksibilnost prema različitim tipovima otpadnih voda. Al elektroda je prirodno pasivna zbog stvaranja površinskog sloja oksida. Mana ovih slojeva jeste mogućnost formiranja debelih filmova i oštećenje i nemogućnosti zaštite od procesa korozije. Prilikom oksidacije Al gubi tri elektrona i stepen oksidacije povezan je sa njenim elektrodnim potencijalom (*Ezechi i sar., 2020*).

Fe elektrode takođe razvijaju pasivni sloj, pri čemu u spoljašnjoj zoni dominira Fe(III), a na metal/oksid granici postoje Fe(II) mesta (*Ezechi i sar., 2020*). Ako se na površini akumuliraju slabo provodljivi oksihidroksidi (goetit, lepidokrocit), raste otpor prenosa naelektrisanja i pomera se reakcija ka evoluciji O_2 umesto rastvaranja Fe(0) i formiranje Fe(II), što snižava učinak. Zato je uklanjanje pasivnog sloja ključno za šta se može koristiti promena polariteta, uslovi skladištenja, mehanička abrazija elektroda, gde su *Bandaru i sar., (2020) i Müller i sar., (2019)* potvrdili efikasnost mehaničkog čišćenja, dok se kod *Zrnić Tenodi i sar., (2024)* hemijski predtretman i promena polariteta pokazala kao bolja. Fe je često povoljniji od Al zbog nižih troškova, niže toksičnost materijala, šireg pH opsega, modularnost i dostupnosti samog materijala i zbog svega navedenog, veče pogodnost za ruralne sredine (*Kobya i sar., 2020*). Elektrodni tretman sa Ti anodama za uklanjanje huminske kiseline ispitivali su *El-Ghenymy i saradnici (2020) i* više od 94% uklanjanja ukupnog organskog ugljenika (TOC) i potpuno obezbojenje rastvora od huminskih kiselina je postignuto nakon 90 min. Generalno, EK sa modernim elektrodama postiže >80% uklanjanja većine zagađujućih materija kao što su teški metali, organske materije, nitrati i fosfati pod umerenim uslovima *(Lu i sar., 2021*).

3.2. Dizajn reaktora

Sistematski metod za projektovanje EK reaktora još uvek ne postoji; zato se njihov dizajn zasniva na rezultatima laboratorijskih, pilot i industrijskih ispitivanja. Oblik reaktora direktno određuje performanse, energetsku potrošnju i kapacitet sistema. Najčešće su pravougaoni ili cilindrični, dok se prema orijentaciji protoka dele na tipove sa horizontalnim i vertikalnim tokom (slika 2) (*Chen, 2004*).

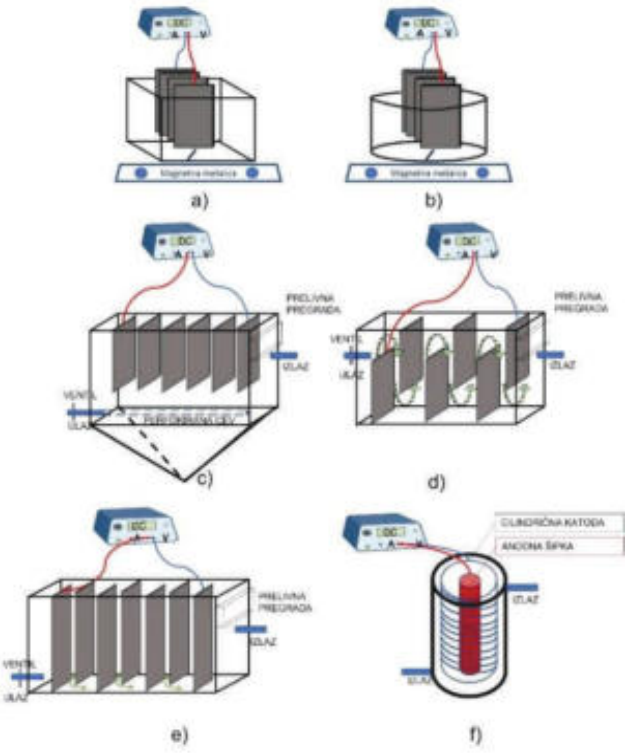


Slika 2. Prikaz reaktora sa horizontalnim (a) i vertikalnim (b) tokom (prilagođeno iz Chen, 2004)

Radi veće efikasnosti mešanja i prenosa mase razvijeni su EK reaktori sa turbulentnim i serpentinastim tokom (*Hakizimana i sar., 2017*). Najčešće se koriste pravougaoni i cilindrični šaržni reaktori (slike 3 a, b) pri čemu je cilindrični pogodniji za laboratoriju zbog jednostavne izrade. Za kontinuirani rad se koriste reaktori sa horizontalnim ili vertikalnim elektrodama (slika 3 c, d), pri čemu se vertikalne češće primenjuju jer se ploče lakše menjaju. Ugradnja perforiranih ulaznih cevi (slika 3c) i pregradnih ploča (slike 3d, e) obezbeđuje ravnomerniji protok i povećava turbulenciju, čime se poboljšava prenos mase i transport koagulanta (*Graca i sar., 2019*). Cilindrični stubni reaktori (slika 3f) sa koaksijalnim elektrodama (unutrašnja šipka–anoda, spoljašnja mreža–katoda) omogućavaju rad u oba režima i visoku fleksibilnost (*Kobia i sar., 2020*). Visoki reaktor sa vertikalnim pločama je popularan i lako skalabilan. Otvoren gornji deo olakšava održavanje, a glavni nedostatak je slabo mešanje *(Hakizimana i sar., 2017).*

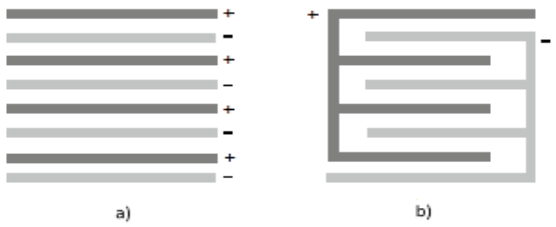
EK reaktori mogu biti jednokanalni ili višekanalni (slika 4) (*Bilgili i sar., 2016*). Višekanalni obezbeđuju jednostavnu raspodelu protoka, dok jednokanali omogućavaju veću brzinu strujanja i „ribanje“ površine elektroda, čime se smanjuje pasivizacija. Klasični reaktori sa statičkim elektrodama često pate od slabe difuzije i prenosa mase, pa su razvijene izvedbe sa rotirajućim i vibrirajućim elektrodama koje poboljšavaju mešanje i sprečavaju formiranje

„mrtvih zona“. Savremeni razvoj dizajna EK reaktora usmeren je na povećanje efikasnosti i isplativosti, uz jednostavnu konstrukciju, lako održavanje i mogućnost integracije sa obnovljivim izvorima energije (*Hakizimana i sar., 2017; Lu i sar., 2021*).



Slika 3. Tipovi najčešće korišćenih EK reaktora (prilagođeno iz Lu i sar., 2021)

Tokom dizajna EK reaktora ključni su geometrija, odnos površine elektrode i zapremine reaktora (A/V odnos), te optimizacija gustine struje, vremena zadržavanja i režima protoka. A/V ima značajan uticaj na količinu formiranih hidroksida/oksihidroksida i na putanju/dužinu kretanja mehurića. Iako retko istraživan, A/V je najčešće 6,5–45 (m^2/m^3) a njegovo povećanje može skratiti vreme tretmana i smanjiti potrebnu optimalnu gustinu struje (*Hakizimana i sar., 2017*). Prevelik A/V vodi do nepotrebne potrošnje elektroda što dovodi do većeg generisanja mulja, povećava rizik od pasivizacije elektroda, kao i potrošnju energije, otežavajući automatizaciju i upravljanje (*Damaraju i sar., 2019*).



Slika 4. Prikaz višekanalnog (a) i jednokanalnog (b) toka u zavisnosti od položaja elektroda

Kada je površina elektrode dovoljno velika, glavni operativni parametar je trenutna koncentracija (*Hakizimana i sar., 2017)*. Ovaj parametar obuhvata odnos struje (proizvod gustine struje i površine elektrode) i radne zapremine EK ćelije, i omogućava definisanje količine oslobođenog metala u datom vremenu tretmana u šaržnom režimu rada korišćenjem jednačine (20). U kontinualnom režimu, zapremina reaktora omogućava definisanje vremena zadržavanja za razmatranu brzinu protoka vode i tako se može odrediti količina oslobođenog metala.

$$C_{teorijska} = \frac{ItM}{ZFV} \qquad [\mathrm{g/m^3}] \tag{20}$$

gde je: $C_{teorijska}$-teorijska koncentracija oslobođenog metala [g/m^3], I-primenjena struja (A), t-vreme trajanja tretmana [s], M-molarna masa [Fe 56 g/mol; Al 27 g/mol], F-Faraday-eva konstanta [96485 C/mol], Z-broj elektrona u reakciji., V-radna zapremina reaktora (m^3).

3.3. Vrste napajanja i gustina struje

Osnovna oprema koja se koristi u EK tehnologiji je izvor-napajanje strujom. Najčešće se koristi jednosmerna struja (DC), ali ona podstiče pasivizaciju elektroda, povećava pad napona i potrošnju energije. Istraživanja predlažu prelazak na naizmeničnu (AC) ili impulsnu struju. AC često povećava efikasnost uklanjanja, smanjuje mulj i potrošnju energije, npr. pri uklanjanju nitrata sa Al elektrodama operativni troškovi su bili 40% niži nego kod DC, a za Cd sa Fe elektrodama ostvarena je veća efikasnost uz manju potrošnju (*Karamati-Niaragh i sar., 2019*).

Gustina struja je definisana kao struja po jedinici površine elektrode, i direktno određuje brzinu nastajanja koagulanta i mehurića, veličinu flokula, mešanje i prenos mase (*Sahu i sar., 2014*). Prevelika gustina struje ubrzava pasivizaciju elektroda, povećavajući napon i smanjujući efikasnost struje (Ce) (jednačina 21), koja predstavlja odnos stvarne i teoretske proizvodnje metala (*Chen i sar., 2020*). Ce od 1,0 (100%) ukazuje na potpunu efikasnost anode, a smanjenje Ce kroz vreme označava opadanje učinka EK tretmana.

$$Ce = \frac{\Delta m_{exp}}{\Delta m_t} \cdot 100\ [\%] \tag{21}$$

gde je: Δm_{exp} - merena razlika masa elektrode pre i posle tretmana nakon čišćenja, pranja i sušenja elektroda, [g] i Δm_t - teorijska masa oslobođenog gvožđa ili aluminijuma sa anode, [g].

Na optimalnu gustinu struje utiču i pH, temperatura i protok. Za dugotrajan rad bez čestog održavanja preporučuje se da gustina struje EK procesa bude u

opsegu od 20–25 A/m^2 ako se ne preduzmu efikasne mere za periodično čišćenje površina elektroda (*Chen i sar., 2020; Lu i sar., 2021*). U EK procesu, pored potrošnje elektroda, drugi relevantni operativni trošak je potrošnja električne energije. Električna energija ($E_{energija}$ kWh/m^3) se jednostavno izražava pomoću jednačine 22, kao:

$$E_{energija} = \frac{UIt/1000}{V_L} \quad (22)$$

gde je: U-primenjeni napon [V]; I-primenjena struja [A]; t-reakciono vreme [h] i V_L-zapremina fluida [m^3].

Optimalna gustina struje predstavlja kompromis između efikasnosti iskorišćenja i ukupnih troškova procesa. Prevelike vrednosti dovode do prekomernog generisanja mulja i energetskih gubitaka, bez značajnog povećanja učinka. Stoga se optimizacija mora zasnivati na tri kriterijuma, efikasnost uklanjanja, potrošnja energije i količina nastalog mulja. U tom cilju uspešno je primenjen dizajn metode odzivne površine (RSM) za istovremenu optimizaciju gustine struje i vremena tretmana (*Song i sar., 2017*). Radi smanjenja troškova i povećanja primenljivosti u udaljenim područjima, razvijeni su sistemi koji su napajani iz obnovljivih izvora, poput solarne i energije vetra (*Tones i sar., 2020*). Takvi sistemi omogućavaju niže operativne troškove i smanjenje emisija gasova staklene bašte, ali su ograničeni promenljivom proizvodnjom i ekološkim otiskom komponenata. Konvencionalni izvori ostaju stabilniji i jednostavniji za upravljanje, ali donose veće troškove i emisije. U celini, obnovljivi izvori energije nude dugoročno povoljnije i održivije rešenje, uz potrebu za prilagođavanjem zahtevima kontinuiranog napajanja (*Tones i sar., 2020; Lu i sar., 2021*).

3.4. Rastojanje, povezivanje i konfiguracija elektroda

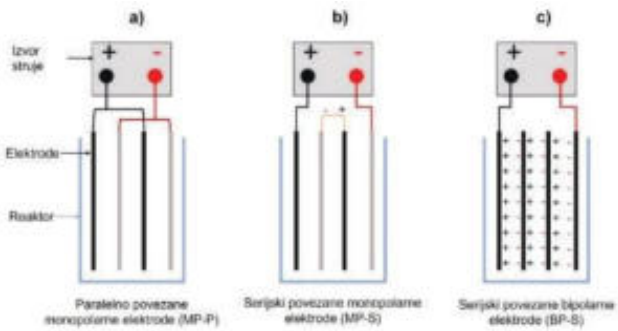
Rastojanje između elektroda snažno utiče na performanse EK jer određuje elektrostatičko polje, režim strujanja, prenos mase, dimenzije reaktora i potrošnju energije. Manji razmak povećava polje i brzinu rastvaranja anode, ali može izazvati lom flokula, prezasićenje čvrstim fazama, otežanu cirkulaciju i pasivizaciju. Optimalan razmak stabilizuje flokule i flotaciju mehurićima; prevelik razmak smanjuje prenos mase i usporava reakcije. Razmak direktno utiče i na ohmski pad: bliže elektrode traže niži napon za isti tok struje, pa smanjuju energetske gubitke i operativne troškove što je potkrepljeno jednačinom 23.

$$IR = \frac{I \cdot d}{A \cdot k} \quad (23)$$

gde je: I-primenjena struja [A], d-rastojanje između elektroda [m], A-površina elektroda [m^2] i k-provodljivost [mS/m] (*Song i sar., 2017*).

Ohmski otpor (R) pokazuje da otpornost zavisi od rastojanja između elektroda (d), površine elektroda (A), i provodljivosti rastvora (k). Dakle, što je manja udaljenost između elektroda, manji je otpor (R) a samim tim i napon IR potreban za prolazak struje.

U EK se najčešće primenjuju tri rasporeda vezivanja elektroda, MP-P (monopolarno–paralelno), MP-S (monopolarno–serijski) i BP-S (bipolarno–serijski) (slika 5), a izbor utiče na efikasnost uklanjanja i potrošnju energije (*Hakizimana i sar., 2017*). U MP-P režimu sve anode su povezane međusobno, kao i sve katode; struja se deli između elektroda pa je potreban niži napon, kod MP-S režimu najudaljenije elektrode su vezane na izvor, a unutrašnje se polarizuju prolaskom struje; ukupni napon je zbir napona svake „ćelije u nizu“, pa je za zadatu struju obično potreban viši napon. U MP-S rasporedu unutrašnje „žrtvene“ elektrode mogu smanjiti potrošnju anode i pasivizaciju katode, dok je struja kroz sve elektrode jednaka (*Hakizimana i sar., 2017*). U BP-S režimu samo krajnje elektrode su direktno povezane na napajanje, unutrašnje se indukovano polarizuju i svaka deluje istovremeno kao anoda i katoda. Ovaj bipolarni raspored često je energetski povoljniji i efikasniji.



Slika 5. Metode povezivanje elektroda :MP-P(a), MP-S (b) i serijski povezane bipolarne elektrode BP–S(c)

Standard su paralelne pločaste elektrode, ali su razvijene perforirane, mrežaste, cilindrične, kuglaste i rotirajuće varijante radi jačeg mešanja, boljeg prenosa mase i smanjene pasivizacije (*Lu i sar., 2021*). Rotirajući diskovi smanjuju pasivizaciju i poboljšavaju performanse povećanjem brzine rotacije. Upotreba otpadnog Fe/Al kao pakovanih anoda dala je 93% uklanjanja As, uz prednost EK-Fe zbog bržeg dostizanja efikasnosti i niže struje. Kod protočnih višeelektrodnih EK reaktora, promene poprečnog preseka toka uzrokuju lokalne fluktuacije brzine i stvaraju turbulentne strukture, što ujednačava raspodelu gustine struje i pojačava prenos mase

uz zadržavanje jednostavnog dizajna (*Castañeda i sar., 2024*). Brzina proticanja fluida predstavlja ključni hidraulični parametar koji direktno utiče na vreme zadržavanja, mešanje i efikasnost reakcije u elektrokoagulacionim reaktorima, i definiše se kao količina fluida koja protiče kroz jedinicu poprečnog preseka reaktora u jedinici vremena, i izražava se prema jednačini 24:

$$v = \frac{Q}{A_r} \qquad [\mathrm{cm/h}] \qquad (24)$$

gde je: v-linearna brzina [cm/h], Q-volumetrijski protok fluida [cm^3/h], a Ar-efektivni poprečni presek reaktora [cm^2].

U uslovima laminarnog toka, linearna brzina omogućava procenu vremena zadržavanja i kinetike uklanjanja zagađujućih materija. Pravilno dimenzionisanje reaktora prema ovom parametru optimizuje kontakt između fluida i aktivne površine elektroda, posebno kod paralelne ili normalne orijentacije elektroda (*Green i Southard, 2019*).

4. PRIMENA ELEKTROKOAGULACIJE U UKLANJANJU RAZLIČITIH ZAGAĐUJUĆIH MATERIJA IZ VODA

Tradicionalno, EK se uspešno primenjuje za efikasno uklanjanje različitih tipova zagađujućih materija iz voda, uključuju prirodne organske materije (*eng. natural organic matter-NOM*), fosfate (PO_4^{3-}), kao i metalne i metaloidne zagađujuće supstance poput arsenata (AsO_4^{3-}) i jone metala (Cd^{2+}, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, CrO_4^{2-}) (*McBeath i sar., 2018; Zrnić Tenodi i sar., 2024*). Usled intenzivne industrijalizacije, pored već poznatih zagađujućih materija, mnoštvo emergentnih hazardnih zagađujućih materija je prisutno i detektovano u vodenim sredinama. Neki od njih su izazvali veliku zabrinutost i stoga predstavljaju fokus mnogih istraživanja. Različite istraživačke grupe su ispitivale primenjivost elektrokoagulacije u uklanjanju ovih zagađujućih materija u koje spadaju ulja, hlorovana organska jedinjenja, PFAS, farmaceutici, mikroorganizmi, i drugih. Ova široka primenljivost potvrđuje potencijal EK kao univerzalne tehnologije za tretman kompleksno zagađenih voda, što je čini posebno značajnom u eri rastuće pojave emergentnih zagađujućih materija.

4.1. Uklanjanje arsena

EK se tradicionalno uspešno primenjuje za efikasno uklanjanje različitih zagađujućih materija, koje, pored prethodno navedenih, uključuju prirodne organske meterije, boje, fosfate (PO_4^{3-}), kao i metalne i metaloidne zagađujuće supstance poput arsenat (AsO_4^{3-}) i jone metala (Cd^{2+}, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, CrO_4^{2-}). Uklanjanje metala i metaloida u EK procesu odvija se kombinacijom precipitacije i ko-precipitacije sa Fe ili Al jonima, adsorpcije putem kompleksiranja i elektrostatičkog privlačenja, te formiranjem metalnih hidroksida i oksihidroksida koji vezuju zagađujuće materije. Brojna istraživanja potvrđuju da je EK izuzetno efikasna i pouzdana metoda za uklanjanje As(V), dok je postignut značajan napredak i u tretmanu As(III). U poređenju sa aluminijumskim, gvozdene elektrode (EK-Fe) pokazuju veću efikasnost u uklanjanju As(III) i manju sklonost pasivizaciji. Novi pristupi uključuju EK sisteme sa katodama koje koriste atmosferski vazduh, čime se poboljšava oksidacija As(III), ali i povećava rizik od pasivizacije elektroda i smanjenja efikasnosti (*Şik i sar., 2017; Si i sar., 2018; Bandaru i sar., 2020; Zhang i sar., 2024*). Dodatni izazov predstavljaju konkurentni joni poput fosfata i silikata, koji inhibiraju oksidaciju i adsorpciju arsena. Zbog jednostavnosti, pouzdanosti i niskih troškova, konvencionalni EK sistemi sa Fe ili Al elektrodama ostaju najpraktičniji izbor, posebno u ruralnim i infrastrukturno ograničenim područjima (*Zrnić Tenodi i sar., 2023*). Ipak, prednosti elektroda sa aeracijom, poput bolje oksidacije i potencijalno niže potrošnje energije, opravdavaju njihovo dalje istraživanje, pod uslovom da ekonomski i operativni parametri budu povoljni (*Bandaru i sar., 2020; Meng i sar., 2025).*

4.2. Uklanjanje prirodnih organskih materija

Elektrokoagulacija se pokazala kao efikasna metoda za uklanjanje prirodnih organskih materija, posebno huminskih i fulvinskih kiselina koje doprinose boji i UV apsorbanciji vode. *Ulu i saradnici (2014)* su došli do optimalnih uslova za gvozdene elektrode pri pH 4, gde se postiže do 87% (do 2 mg/l) uklanjanja rastvorenog organskog ugljenika (eng. *dissolved organic carbon*-DOC). Aluminijumske elektrode daju slične rezultate, ali pri nižoj gustini struje (1,2 mA/cm^2 u odnosu na 3 mA/cm^2). Al-elektrode su pokazale bolji učinak u uklanjanju boje. Slični rezultati potvrđuju da je elektrokoagulacija veoma pogodna za smanjenje rastvorenih i koloidnih organskih materija koje utiču na optička svojstva i kvalitet vode. *De Oliveira i saradnici* (2020) postigli su uklanjanje boje od oko 96% uz nisku potrošnju energije (0,39 kWh/m^3), dok su *McBeath i saradnici* (2020) na pilot-nivou potvrdili da povećanje doze metala ima ključan uticaj na uklanjanje NOM-a, pri čemu je potrošnja energije iznosila 0,48–0,60 kWh/m^3. Pored toga, kombinovano uklanjanje NOM-a i arsena elektrokoagulacijom u kontinuiranom ECF reaktoru pokazalo je da se istovremeno može postići 71–77% smanjenja DOC/UV_{254} i 85% uklanjanja arsena (konačna koncentracija

6,2 µg/l), uz zadovoljenje standarda vode za piće (*Mohora i sar., 2012*). Ovi rezultati potvrđuju potencijal elektrokoagulacije kao održive, energetski efikasne i ekonomične tehnologije za uklanjanje prirodnih organskih materija i metaloida iz voda, posebno u sistemima manjih kapaciteta (*Zrnić Tenodi i sar., 2024*).

4.3. Uklanjanje ulja

Ulja su ključni ugljovodonici u industriji, a otpadne vode s uljem nastaju u rafinerijama, klanicama, metalurgiji i prehrambenoj industriji. Prisustvo ulja u vodi narušava ekosisteme (zasenčenje svetlosti, toksičnost) i zdravlje ljudi (*Khalifa i sar., 2020*). Pored biodegradacije, gravitacione separacije, adsorpcije i hemijske oksidacije, elektrokoagulacija se poslednjih godina ističe kao obećavajuća metoda. EK se od 1976. koristi za uklanjanje ulja, a hibridni sistemi sa sa membranama (mikrofiltracija, RO) dodatno pospešuju proces prečišćavanja i kvalitet vode. Takođe, aeracija poboljšava EK uklanje hemijske potrošnje kiseonika (HPK) na 93,3% u odnosu na 84% bez aeracije, zbog ravnomernije potrošnje anoda (*Khalifa i sar., 2020*), a pulsna struja smanjuje energetsku potrošnju uz povećanje efikasnosti uklanjanja HPK, ulja i masti do 98,3% (*Zheng, 2017*). U brodskim otpadnim vodama, kontinuirani EK tretmani postižu oko 90% uklanjanja ulja i masti (*Bilgili i sar., 2016*). Uklanjanja ulja zasniva se na četiri povezana procesa: (1) flokulacija – kompresija dvosloja i neutralizacija naelektrisanja uz „sweep" taloženje koje hvata kapljice ulja, (2) oksidacija – direktna/indirektna razgradnja ulja do manjih molekula (masne kiseline, CO_2 H_2O); (3) elektroflotacija – vezivanje mehurića H_2 za kapljice i njihovo izdizanje; (4) elektroforeza i elektrodepozicija – usmeravanje i hvatanje kapljica na katodi (*Bennett & Peters, 1988)*.

4.4. Uklanjanje hlorovanih organskih jedinjenja

Vinilhlorid (VC), trihloroetilen (TCE), tetrahoroetilen (PCE) i njihovi delimično hlorisani derivati, predstavljaju jednu od najproblematičnijih grupa organskih zagađujućih materija u vodi zbog svoje toksičnosti, postojanosti i bioakumulativnog potencijala. Njihovo prisustvo u podzemnim i industrijskim vodama povezuje se sa ozbiljnim zdravstvenim rizicima, uključujući kancerogeni potencijal i neurotoksične efekte (*Tang i sar., 2022*). Pokazalo se da elektrohemijski procesi mogu efikasno ukloniti ova jedinjenja. *Tang i sar. (2024)* ispitali su je upotrebu Fe-Ni/rGO/Ni (kompozitne elektorde od Fe, Ni i grafen oksida) za kontrolisanu elektrokatalitičku dehlorinaciju vodenih sistema, sa ciljem da se izbegne formiranje izrazito toksičnih intermedijera poput vinilhlorida. Postignut je visok stepen uklanjnaja TCE od 78%. Ovaj pristup ukazuje da je u budućim istraživanjima potrebno posvetiti pažnju kontroli elektrohemijskih uslova u elektrokoagulacionim ili kombinovanim (EK-EO) sistemima, kako bi se izbegla akumulacija toksičnih intermedijera i povećala efikasnost (*Tang i sar., 2024*).

4.5. Uklanjanje PFAS

Perfluorovana jedinjanja predstavljaju grupu novih postojanih organskih zagađujućih materija koji se sastoje od potpuno fluorisanog hidrofobnog alkil lanca povezanog sa hidrofilnom krajnjom grupom. Zbog snažne veze ugljenik-fluor (C-F), koja je najjača u organskoj hemiji, ovi spojevi su otporni na mnoge tehnologije za tretman vode, uključujući tradicionalne i biološke i fizičke metode. U poslednje vreme postignuto je određeno unapređenje u razvoju elektrohemijske koagulacije (EK) za uklanjanje PFAS. Na primer, *Kim i saradnici* (2020) su koristili Fe EK za uklanjanje perfluorooktanske kiseline (PFOA), postigavši 60% uklanjanja ukupnog organskog ugljenika tokom 6 sati, dok je *Liu i saradnici* (2018) razvili reverzibilni EK proces koristeći kombinaciju šest elektroda, uključujući Fe, Al i Zn, i postigli optimalnu stopu konverzije od 99.6% uz Al-Zn elektrode.

4.6. Uklanjanje farmaceutika

Farmaceutski proizvodi predstavljaju značajnu grupu emergentnih zagađujućih materija zbog svoje postojanosti u vodenim sredinama i potencijala da izazovu endokrine i druge toksične efekte (*Charuaud i sar., 2019*). U ovu grupu spadaju antibiotici, hormoni, analgetici, antiinflamatorni lekovi, regulatori lipida, β-blokatori i citostatici, koji se u vodi javljaju u koncentracijama od ng/l do µg/l. Elektrokoagulacija se pokazala kao efikasna metoda za njihovo uklanjanje, posebno za antibiotike poput ampicilina, doksiciklina, sulfatiazola i tilozina Dodatno, hibridni procesi poput peroksi-EK i EK-flotacije (EKF) razvijeni su u cilju poboljšanja efikasnosti uklanjanja farmaceutika. Na primer, proces EK u sprezi sa persulfatom je bio uspešan u degradaciji okskarbazepina, pri čemu se Fe^{2+} iz anode koristio za aktivaciju persulfata, proizvodeći radikale sulfata i hidroksila, što je značajno doprinelo degradaciji farmaceutskih jedinjenja (*Bu i sar., 2017*).

4.7. Uklanjanje bakterija i virusa

Prisustvo bakterija, virusa i protozoa može izazvati bolesti koje predstavljaju ozbiljan rizik za zdravlje ljudi. Dezinfekcija je ključna za sigurnost vode za piće, pri čemu je hlorisanje najčešća metoda, ali ono ima nedostatke zbog stvaranja toksičnih nusprodukata, poput trihalometana (THM). EK tehnologija sve više dobija pažnju kao efikasan metod za uklanjanje

širokog spektra mikroorganizama iz različitih sistema, poput vode za piće i reciklirane vode (*Bicudo i sar., 2021; Delaire i sar., 2015*). *Escherichia coli (E. coli)* se najčešće koristi kao indikator uspešnosti dezinfekcije dok su drugi indikatori patogeni, poput ukupnih koliformnih bakterija, enterokoka i spora Clostridium perfringens, takođe ispitani u svrhu pročišćavanja vode (*Delaire i sar., 2015*; *Bicudo i sar., 2021*).

Uklanjanje mikroorganizama pomoću EK odvija se: (1) direktna oksidacija na anodi- Ovaj proces direktno oštećuje ćelijsku membranu mikroorganizama, (2) Indirektna oksidacija pomoću reaktivnih vrsta kao što su reaktivne vrste hlora i reaktivne vrste kiseonika koje doprinose oštećenju ćelijske membrane (*Qian i sar., 2019*), (3) Migracija ka žrtvenim anodama izazvana elektroforezom-Mikroorganizmi se kreću ka žrtvenim anodama usled elektroforeze, što pomaže u njihovom uklanjanju, (4) flokulacija, adsorpcija i precipitacija- Ovaj mehanizam uključuje hvatanje mikroorganizama u flokulantima, gde se vezuju i povezuju talozima, (5)Vezivanje virusa za flokulante usled neutralizacije naelektrisanja i hidrofobnih interakcija (*Heffron i sar., 2019; Tanneru i sar., 2014)*, (6) pri pH iznad 7, fizičko uklanjanje virusa postaje dominantno, dok je pri pH 6 inaktivacija virusa češća. Ovi procesi zajednički dovode do efikasnog uklanjanja mikroorganizama i virusa, uglavnom putem oštećenja ćelijske membrane, agregacije i taloženja (*Heffron i sar., 2019*). *Delaire i sar.* (2015) su utvrdili da EK sa Fe elektrodama i prisustvom HCO_3^- favorizuje enkapitulaciju bakterija u flokulama, dok su *Tanneru i sar. (2014)* pokazali da EK sa Al elektrodama efikasno uklanja MS2 bakteriofage putem flokulacije. *Bicudo i saradnici (2021)* uspešno uklonio antibiotik-rezistentne bakterije i viruse. *Hashim i sar.* (2020) su ispitivali EK reaktor sa Al elektrodama za uklanjanje *E. coli* i postigali 96% uklanjanja pri niskim troškovima od 0.11 USD/m^3. EC tehnologija pokazuje visok potencijal za uklanjanje mikroorganizama u tretmanu vode, često pružajući efikasnost uklanjanja od 96%, što je čini obećavajućom alternativom i za dezinfekciju.

5. ZAKLJUČAK

Elektrokoagulacija se pokazala kao pouzdana, efikasna i fleksibilna tehnologija za uklanjanje različitih zagađujućih materija iz vode. Zahvaljujući jednostavnom dizajnu, niskoj potrošnji hemikalija i mogućnosti automatizacije, EK predstavlja konkurentnu alternativu konvencionalnim metodama koagulacije i unapređenim oksidacionim procesima. Optimalna gustina struje, geometrija reaktora, razmak i konfiguracija elektroda presudno utiču na energetsku efikasnost i stabilnost procesa, dok izbor materijala (Fe, Al) određuje selektivnost prema različitim zagađujućim materijama. Primena EK u uklanjanju zagađujućih materija iz podzemnih voda posebno je značajna za ruralne i udaljene oblasti, gde konvencionalne tehnologije zahtevaju visoke troškove i složeno održavanje, kao i to što je tehnologija podložna integrisanju sa alternativnim izvorima električne energije, kao što je solarna ili energija vetra. Istovremeno, uspešna primena EK u tretmanu farmaceutika, perfluorovanih jedinjenja i hlorovanih etilena potvrđuje njenu sposobnost da odgovori na savremene izazove emergentnih zagagađujućih materija, iz svih tipova voda. Dalji razvoj tehnologije treba da bude usmeren ka unapređenju energetske efikasnosti, produženju radnog veka elektroda i integraciji sa obnovljivim izvorima energije i digitalnim upravljanjem procesa. Time elektrokoagulacija ima potencijal da postane jedan od ključnih stubova održivog upravljanja vodnim resursima u budućnosti.

Zahvalnica: Istraživanja je finansiralo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (Ev.br. 451-03-137/2025-03/200125 i 451-03-136/2025-03/200125) i Eureka projekat SAFEWAT (broj 17243)

LITERATURA

1. Bandaru, S. R. S., Roy, A., Gadgil, A. J., Van Genuchten, C. M (2020). Long-term electrode behavior during treatment of arsenic contaminated groundwater by a pilot-scale iron electrocoagulation system. *Water Research*, 175, 115668.
2. Bennett, G. F., Peters, R. W. (1988). The removal of oil from wastewater by air flotation: A review. Critical Reviews in Environmental Control, 18(3), 189–253.
3. Bicudo, B., van Halem, D., Trikannad, S. A., Ferrero, G., Medema, G. (2021). Low voltage iron electrocoagulation as a tertiary treatment of municipal wastewater: Removal of enteric pathogen indicators and antibiotic-resistant bacteria. Water Research, 188, 116500.

4. Bilgili, M. S., Ince, M., Tari, G. T., Adar, E., Balahorli, V., Yildiz, S. (2016). Batch and continuous treatability of oily wastewaters from port waste reception facilities: A pilot scale study. Journal of Electroanalytical Chemistry, 760, 119–126.
5. Bu, L., Zhou, S., Shi, Z., Bi, C., Zhu, S., Gao, N. (2017). Iron electrode as efficient persulfate activator for oxcarbazepine degradation: performance, mechanism, and kinetic modeling. Separation and Purification Technology, 178, 66–74.
6. Castañeda, L. F., García, I., Nava, J. L., Coreño, O. (2024). Concurrent arsenic, fluoride, and hydrated silica removal from deep well water by electrocoagulation: Comparison of sacrificial anodes (Al, Fe, and Al–Fe). *Journal of Environmental Management, 365*, 121597
7. Charuaud, L., Jarde, E., Jaffrezic, A., Thomas, M.-F., Le Bot, B. (2019). Veterinary pharmaceutical residues from natural water to tap water: sales, occurrence and fate. *Journal of Hazardous Materials, 361*, 169–186.
8. Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology, 38(1), 11–41.
9. Chen, M., Dollar, O., Shafer-Peltier, K., Randtke, S., Waseem, S., Peltier, E. (2020). Boron removal by electrocoagulation: Removal mechanism, adsorption models, and factors influencing removal. Water Research, 170, 115362.
10. Damaraju, M., Muraki, R., Bhattacharyya, D., Panda, T., Kurilla, K. (2019). Treatment of a Distillery Wastewater in a Bipolar-Mode Electrocoagulation System: Performance Evaluation and Kinetic Analysis. International Journal of Civil Engineering, 17, 1643- 1652.
11. de Oliveira, A. G., Ribeiro, J. P., Neto, E. F. A., de Lima, A. C. A., Amazonas, Á. A., da Silva, L. T. V., & do Nascimento, R. F. (2020). Removal of natural organic matter from aqueous solutions using electrocoagulation pulsed current: Optimization using response surface methodology. *Water Science and Technology*, 82(1), 56–66.
12. Delaire, C., van Genuchten, C. M., Nelson, K. L., Amrose, S. E., Gadgil, A. J. (2015). Escherichia coli attenuation by Fe electrocoagulation in synthetic Bengal groundwater: Effect of pH and natural organic matter. Environmental Science & Technology, 49(16), 9945-9953.
13. El-Ghenymy, A., Alsheyab, M., Khodary, A., Sirés, I., Abdel-Wahab, A (2020). Corrosion behavior of pure titanium anodes in saline medium and their performance for humic acid removal by electrocoagulation. *Chemosphere*, 246, 125674.
14. Ezechi, E., Isa, M., Muda, K., Kutty, S. (2020). A comparative evaluation of two electrode systems on continuous electrocoagulation of boron from produced water and mass transfer resistance. *Journal of water process engineering*, 34, 101133.
15. Gilhotra, V., Das, L., Sharma, A., Kang, T., Singh, P., Dhuria, R., Bhatti, M (2018). Electrocoagulation technology for high strength arsenic wastewater: Process optimization and mechanistic study. Journal of Cleaner Production, 198, 693–703.
16. Graça, N. S., Ribeiro, A. M., Rodrigues, A. E. (2019). Removal of fluoride from water by a continuous electrocoagulation process. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(13), 5314–5321.
17. Green, Don W., and Marylee Z. Southard, (2019). Perry's Chemical Engineers. Handbook. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education.
18. Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination,* 404, 1-21.
19. Hamdan, S.S., El-Naas, M.H. (2014). An electrocoagulation column (ECC) for groundwater purification. *Journal of Water Process Engineering*, 4, 25–30.
20. Hashim, K. S., Kot, P., Zubaidi, S. L., Alwash, R., Al Khaddar, R., Shaw, A., Al-Jumeily, D., Aljefery, M. H. (2020). Energy efficient electrocoagulation using baffle-plates electrodes for efficient Escherichia coli removal from wastewater. Journal of Water Process Engineering, 33, 101079.
21. Heffron, J., McDermid, B., Maher, E., McNamara, P. J., Mayer, B. K. (2019). Mechanisms of virus mitigation and suitability of bacteriophages as surrogates in drinking water treatment by iron electrocoagulation. Water Research, 163, 114877.
22. Holt, P., Barton. G., i Mitchell, C., (2006). Electrocoagulation as a wastewater treatment. Department of Chemical Engineering, The University of Sydney, New South Wales.
23. Karamati-Niaragh, E., Moghaddam, M. R. A., Emamjomeh, M. M., Nazlabadi, E. (2019). Evaluation of direct and alternating current on nitrate removal using a continuous electrocoagulation process: Economical and environmental approaches through RSM. Journal of Environmental Management, 230, 245–254.

24. Khalifa, O., Banat, F., Srinivasakannan, C., Radjenovic, J., Hasan, S. W. (2020). Performance tests and removal mechanisms of aerated electrocoagulation in the treatment of oily wastewater. Journal of Water Process Engineering, 36, 101290.
25. Kim, M. K., Kim, T., Kim, T. K., Joo, S. W., Zoh, K. D. (2020). Degradation mechanism of perfluorooctanoic acid (PFOA) during electrocoagulation using Fe electrode. Separation and Purification Technology, 247, 116911.
26. Kobya, M., Soltani, R. D. C., Omwene, P. I., Khataee, A. (2020). A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: Reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100519
27. Kumar, A., Pan, S.Y. (2020). Opportunities and challenges of electrochemical water treatment integrated with renewable energy at the water-energy nexus. Water-Energy Nexus, 3, 110–116
28. Liu, Y., Hu, X.-M., Zhao, Y., Wang, J., Lu, M.-X., Peng, F.-H., Bao, J. (2018). Removal of perfluorooctanoic acid in simulated and natural waters with different electrode materials by electrocoagulation. *Chemosphere, 201*, 303–309.
29. Lu, J., Zhang, P., Li, J. (2021). Electrocoagulation technology for water purification: An update review on reactor design and some newly concerned pollutants removal. *Journal of Environmental Management*, 296, 113259.
30. Mao, Y., Zhao, Y., Cotterill, S. (2023). Examining current and future applications of electrocoagulation in wastewater treatment. *Water*, 15(1455).
31. McBeath, S. T., Mohseni, M., Wilkinson, D. P. (2018). Pilot-scale iron electrocoagulation treatment for natural organic matter removal. *Environmental Technology*, 1–9.
32. McBeath, S. T., Nouri-Khorasani, A., Mohseni, M., Wilkinson, D. P. (2020). In-situ determination of current density distribution and fluid modeling of an electrocoagulation process and its effects on natural organic matter removal for drinking water treatment. *Water Research*, 171, 115404.
33. Meng, X., Xu, S., Ji, M., Shi, Q., Guha, B., Mascarenhas, K., Lippincott, L., Zhang, W., Ma, Q. (2025). Determination of main influence mechanism of fulvic acid on arsenic removal by ferric chloride. Journal of Environmental Sciences.153, 22-29.
34. Mohora, E., Rončević, S., Dalmacija, B., Agbaba, J., Watson, M., Karlović, E., Dalmacija, M. (2012). Removal of natural organic matter and arsenic from water by electrocoagulation/ flotation continuous flow reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 257–264.
35. Müller, S., Behrends, T., van Genuchten, C. M. (2019). Sustaining efficient production of aqueous iron during repeated operation of Fe(0)-electrocoagulation. Water Research, 155, 455–464.
36. Qian, A., Yuan, S., Xie, S., Tong, M., Zhang, P., Zheng, Y. (2019). Oxidizing capacity of iron electrocoagulation systems for refractory organic contaminant transformation. *Environmental Science & Technology,* 53(21), 12629–12638.
37. Sahu, O., Mazumdar, B., Chaudhari, P. K. (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. *Environmental Science and Pollution Research,* 21(4), 2397–2413.
38. Singh, T. S. A., Ramesh, S. T. (2014). An experimental study of CI Reactive Blue 25 removal from aqueous solution by electrocoagulation using Aluminum sacrificial electrode: kinetics and influence of parameters on electrocoagulation performance. *Desalination and Water Treatment*, 52(13–15), 2634–2642.
39. Song, P., Yang, Z., Zeng, G., Yang, X., Xu, H., Wang, L., Xu, R., Xiong, W., Ahmad, K. (2017). Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review. Chemical Engineering Journal, 317, 707–725.
40. Tang, H., Bian, Z., Peng, Y., Li, S., & Wang, H. (2022). Stepwise dechlorination of chlorinated alkenes on an Fe–Ni/rGO/Ni foam cathode: Product control by one-electron-transfer reactions. Journal of Hazardous Materials, 433, *128744*.
41. Tang, H., Bian, Z., Zhang, L., Ma, B., & Wang, H. (2024*)*. Controlled electrocatalysis of the dechlorination and detoxification of chlorinated ethylenes to avoid production of highly toxic intermediates. Science of The Total Environment, 952, 175959.
42. Tanneru, C. T., Jothikumar, N., Hill, V. R., Chellam, S. (2014). Relative insignificance of virus inactivation during aluminum electrocoagulation of saline waters. Environmental Science & Technology, 48(24), 14590–14598
43. Tones, A. R. M., Eyng, E., Zeferino, C. L., Ferreira, S. d. O., Alves, A. A. d. A., Fagundes-Klen, M. R., Sehn, E. (2020). Spectral deconvolution associated to the Gaussian fit as a tool for the optimization of photovoltaic electrocoagulation applied in the treatment of textile dyes. *Science of the Total Environment*, 713, 136301.
44. Ulu, F., Barışçı, S., Kobya, M., Särkkä, H., & Sillanpää, M. (2014). Removal of humic substances by electrocoagulation (EC) process and characterization of floc size growth mechanism under optimum conditions. *Separation and Purification Technology*, 133, 246–253.

45. Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikum, A.S., Gjessing, E.T., (1984). Electrocoagulation of potable water. *Water Research* 18 (11), 1355–1360.
46. Weiss, S.F., Christensen, M.L., Jørgensen, M.K. (2021). Mechanisms behind pH changes during electrocoagulation. *AIChE Journal,* e17384.
47. Zhang, P., Zhao, F., Li, P., Zheng, J., Yang, W., Li, Q., Yang, Z (2024). Mn-assisted Fe-electrocoagulation strategy for enhanced efficient arsenic removal and its mechanism. Process Safety and Environmental Protection, 186, 1493–1504.
48. Zheng, T. (2017). Treatment of oilfield produced water with electrocoagulation: Improving the process performance by using pulse current. Journal of Water Reuse and Desalination, 7(3), jwrd2016113.
49. Zrnić Tenodi, K., Rončević, S., Tenodi, S., Nikić, J., Šolić, M., Mohora, E., Agbaba, J. (2023). Ispitivanje primene elektrokoagulacionog tretmana za uklanjanje arsena iz podzemnih voda sa teritorije AP Vojvodine. *Voda i sanitarna tehnika*, LIII(4) 21-31.
50. Zrnić Tenodi, K., Tenodi, S., Nikić, J., Mohora, E., Agbaba, J., Rončević, S. (2024). Optimizing arsenic removal from groundwater using continuous flow electrocoagulation with iron and aluminum electrodes: An experimental and modeling approach. *Journal of Water Process Engineering*, 66, 106082.

Grundfos novo otvoreno S-tube® radno kolo

Već dokazana pouzdanost i energetska efikasnost u savremenim uslovima upravljanja otpadnim vodama

Prednosti Open S-tube® radnog kola

- Samoispirajuće radno kolo smanjuje mogućnost zaglavljivanja
- Ukupna efikasnost od 80% i hidraulična efikasnost do 87%
- Efikasno radi u celom opsegu krive, od zatvorenog ventila do maksimalnog protoka
- Može se podrezati za specifične radne tačke i nivoe tolerancije
- Uravnoteženija hidraulika smanjuje vibracije i produžava životni vek ležajeva i zaptivke vratila pumpe

Više detalja pogledajte na www.grundfos.rs

Grundfos Serbia d.o.o.
Omladinskih brigada 90v
RS-11070 Novi Beograd Serbia
Phone: (+381) 11 2258 740
www.grundfos.rs

GRUNDFOS

Possibility in every drop

Insa®

www.insa.rs

Teleoptik

SPOJ PRECIZNOSTI I TRADICIJE

Insa je osnovana1950. godine kao fabrika satova, da bi danas postala značajan proizvođač satova i satnih mehanizama, merila tečnosti kao i sistema za daljinsko očitavanje merila i mnogih drugih proizvoda iz domena merne tehnike i precizne mehanike.

PROIZVODNI PROGRAM:

Satni program
- mehanički budilnici, zidni satovi
- laboratorijski satovi
- šahovski satovi
- vremenski prekidači, električni satni uređaji
- javni satovi (crkveni, fasadni, stanični i dr.)

Merači protoka fluida
- vodomeri kućni i industrijski
- vodomeri za daljinsko očitavanje, dozatori, rotametri

Teleoptik program

Sistem daljinskog očitavanja svih merila i daljinska kontrola protoka

A.D. "INSA" - INDUSTRIJA SATOVA
Tršćanska 21,
11080 Zemun
Republika Srbija

ISO 9001:2015 CESNA

+ 381 (11) 3713 - 600
+ 381 (11) 3713 - 607
Fax: + 381 (11) 2614 - 330
E-mail: office@insa.rs
info@insa.rs

Stručni rad
UDK: 556.33:551.78(497.11)
628.112:556.332.2.04(497.11)
https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.17630942.svg

Aleksandar T. TANASKOVIĆ

UPRAVLJANJE BUNARSKIM POLJIMA: UTICAJ EKSPLOATACIJE I REDOKS USLOVA NA KAPACITET I KVALITET VODE

INTEGRATED MANAGEMENT OF WELL FIELDS: IMPACT OF EXPLOITATION PRACTICES AND REDOX CONDITIONS ON WATER CAPACITY AND QUALITY

IZVOD

Efikasno upravljanje bunarskim poljima zahteva jasno razumevanje hidrogeoloških uslova, redoks procesa i antropogenih uticaja na kvalitet sirove vode. Ovaj rad analizira uticaj nadeksploatacije na kapacitet bunara, degradaciju zone oko bunara i promene u kvalitetu filtrata, sa posebnim osvrtom na uslove obalske infiltracije. Takođe, prikazani su efekti redoks uslova na hemijski sastav vode i neophodne tehnologije prerade u zavisnosti od stepena reduktivnosti u akviferu. Rad ističe značaj održavanja stabilnih uslova eksploatacije, rezervi kapaciteta i kontinuiranog monitoringa radi obezbeđenja dugoročne pouzdanosti vodosnabdevanja.

Ključne reči**:** bunarska polja, obalska infiltracija, nadeksploatacija, redoks uslovi, kvalitet sirove vode

ABSTRACT

Efficient management of well fields requires a clear understanding of hydrogeological conditions, redox processes, and anthropogenic impacts on raw water quality. This paper analyzes the influence of overexploitation on well capacity, aquifer zone degradation, and changes in filtrate quality, with particular focus on riverbank filtration conditions. Furthermore, it outlines the effects of redox conditions on water chemistry and the necessary treatment technologies depending on the degree of reductive processes within the aquifer. The study emphasizes the importance of maintaining stable exploitation regimes, reserve capacities, and continuous monitoring to ensure long-term reliability of water supply.

Keywords**:** well fields, riverbank filtration, overexploitation, redox conditions, raw water quality

1. UVOD

Bunarska polja predstavljaju jedan od najvažnijih izvora vodosnabdevanja velikih gradova. Njihova dugoročna efikasnost i kvalitet vode zavise od pravilne eksploatacije i upravljanja, uz razumevanje kako hidrogeološki i hemijski uslovi u akviferu reaguju na zahvat vode.

Poseban značaj u ovakvom kontekstu ima obalska infiltracija, koja se smatra specifičnim oblikom podzemne vode, jer predstavlja mešavinu infiltrirane površinske vode (najčešće rečne) i lokalne podzemne vode iz zaleđa. Tokom kretanja infiltrirane vode kroz porozni medijum dolazi do prirodnih procesa filtracije, adsorpcije, biološke degradacije i hemijske transformacije. Kvalitet takve vode može biti izuzetno dobar, ali zavisi od brojnih faktora, među kojima su najvažniji: udaljenost bunara od reke, brzina infiltracije, sezonske oscilacije nivoa reka i podzemnih voda, kao i intenzitet eksploatacije.

Značaj obalske infiltracije ogleda se i u tome što omekšava uticaj antropogenih zagađenja iz površinskih voda, produžava vreme retencije i omogućava prirodnu barijeru u zaštiti kvaliteta sirove vode. Ipak, mešanje voda iz različitih pravaca (reka, zaleđe, dublji slojevi) zahteva pažljivo planiranje eksploatacije, praćenje hidrogeoloških i hemijskih pokazatelja i upravljanje radom bunarskih polja u skladu sa promenama koje se javljaju kroz vreme.

Aleksandar T. Tanasković (https://orcid.org/0009-0006-1236-337X)
JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija “, Kneza Miloša 27, 11000 Beograd, R Srbija
aleksandar.tanaskovic@bvk.rs

Ovaj dokument približava osnovne principe koje bi svaki inženjer, operater ili donosioc odluka trebalo da razume u vezi sa eksploatacijom bunara, degradacijom kroz vreme i uticajem redoks uslova na kvalitet filtrata, posebno u uslovima obalske infiltracije.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE NORMALNE EKSPLOATACIJE BUNARA

Normalna eksploatacija bunara podrazumeva rad u okviru projektovanih parametara, uz ravnomerno korišćenje svih bunara na polju, kako bi se izbeglo preopterećenje pojedinih objekata. Kroz takav pristup omogućava se stabilno hidrauličko stanje u akviferu, očuvanje prirodnih uslova infiltracije i ravnoteža između zahvaćene količine i obnavljanja vodonosnika.

Karakteristike pravilne eksploatacije:

- Eksploatacija u okviru dozvoljenog kapaciteta, bez prekoračenja brzine crpljenja.
- Periodično uključivanje i isključivanje bunara radi ravnomerne opterećenosti.
- Obezbeđenje minimalnog protoka čak i kod bunara u režimu mirovanja, kako bi se očuvala hidraulička i biološka stabilnost zone oko bunara.
- Planirano održavanje i praćenje kapaciteta, hemijskih i mikrobioloških parametara vode.

Takvim pristupom se obezbeđuje očuvanje kapaciteta tokom projektovanog veka trajanja bunara, održava visok kvalitet sirove vode i smanjuje potreba za čestim rehabilitacijama. Ovo stanje predstavlja tzv. nultu tačku u odnosu na koju se kasnije mogu pratiti promene usled eventualne nadeksploatacije ili drugih negativnih uticaja.

Kako bi se u potpunosti razumela problematika dugoročnog upravljanja bunarskim poljem, u nastavku su prikazani potencijalni negativni efekti nadeksploatacije i uticaja antropogenih faktora, sa akcentom na degradaciju kapaciteta i kvaliteta sirove vode.

3. KAKO NADEKSPLOATACIJA UTIČE NA RADNI VEK BUNARA

Nadeksploatacija bunara podrazumeva crpljenje koje prelazi projektovani kapacitet, bilo kroz intenzitet crpljenja ili kroz kontinuitet rada bez dovoljnog vremena za oporavak. Takav pristup dovodi do brojnih negativnih posledica koje direktno utiču na radni vek bunara. Najčešće posledice ogledaju se u začepljenju filterskog prostora usled prevelike brzine crpljenja, pri čemu dolazi do povlačenja finih čestica i stvaranja taloga unutar filtera. Dodatno, dolazi do kolmatacije zone oko bunara, što smanjuje propusnost akvifera i povećava depresiju potrebnu za ostvarenje traženog kapaciteta.

Hemijska pasivizacija filtera se ubrzava usled taloženja gvožđa i mangana, kao i formiranja biofilma, što dodatno smanjuje efikasnost crpljenja. Kao posledica svega navedenog dolazi do ubrzanog pada kapaciteta bunara, što generiše povećane troškove održavanja i potrebe za češćim rehabilitacionim zahvatima.

Postoje jasni indikatori koji ukazuju na pojavu nadeksploatacije. Među najvažnijima su primetan pad kapaciteta u odnosu na projektovane ili prethodno stabilne vrednosti, kao i povećanje depresije u bunaru što ukazuje na smanjenu propusnost okolnog prostora. Porast koncentracija rastvorenog gvožđa (Fe^{2+}), mangana (Mn^{2+}) i vodonik-sulfida (H_2S) u filtratu ukazuje na pogoršanje redoks uslova u zoni crpljenja. Pojava zamućenja ili vidljivih čestica u vodi dodatno potvrđuje pogoršanje uslova eksploatacije. Ujedno, povećana učestalost pojave biofilma i potrebe za hemijskim čišćenjem, kao i produženo vreme oporavka nivoa podzemne vode nakon prestanka crpljenja, dodatno potvrđuju narušeno stanje bunara.

Radi očuvanja radnog kapaciteta i kvaliteta filtrata preporučuje se primena odgovarajućih mera rehabilitacije. Neophodno je redovno sprovođenje ispitivanja kapaciteta bunara, praćenje nivoa depresije, kao i hemijske analize sirove vode. U slučajevima smanjenog kapaciteta primenjuje se hidrauličko ispiranje bunara povratnim tokom, dok se mehaničko čišćenje četkanjem sprovodi radi uklanjanja taloga i mehaničkih nečistoća sa filterskog materijala. Hemijsko čišćenje se vrši upotrebom kiselina ili specifičnih sredstava namenjenih uklanjanju taloga gvožđa, mangana, karbonata ili biofilma.

Kao mera prevencije preporučuje se pravovremeno uključivanje rezervnih bunara kako bi se smanjilo opterećenje pojedinih objekata u sistemu. Učestalost rehabilitacije zavisi od intenziteta eksploatacije, ali se okvirno planira u periodu od 6 do 10 godina, uz prilagođavanje konkretnim uslovima i parametrima koji ukazuju na promene u radu bunara.

Da bi se izbegla nadeksploatacija bunara, neophodno je da celokupan sistem vodozahvata bude projektovan i vođen tako da obezbeđuje odgovarajuće rezerve kapaciteta. Preporučuje se da operativni kapacitet bunarskog sistema ne prelazi 70 do 80% ukupnog projektovanog kapaciteta u kontinualnom radu, kako bi se ostavio dovoljan prostor za oporavak svakog pojedinačnog bunara i izbegla njihova prekomerna

eksploatacija. Ovakav pristup omogućava rotaciju bunara, ravnomerno opterećenje sistema i produžava radni vek svih objekata.

Rezervni kapacitet u sistemu treba da pokriva ne samo periodične ispade pojedinih bunara zbog redovnog ili vanrednog održavanja, već i sezonske oscilacije u zahtevu za vodom. Praksa pokazuje da je za pouzdano funkcionisanje sistema optimalno planirati rezerve u rasponu od 20 do 30% iznad prosečnih potreba. Na taj način se obezbeđuje mogućnost privremenog isključenja pojedinih bunara radi regeneracije, bez ugrožavanja stabilnosti isporuke.

Dodatno, režim eksploatacije mora biti vođen na osnovu redovnog praćenja ključnih parametara rada bunara, kao što su nivo podzemne vode, depresija, kapacitet i hemijski sastav vode. Na osnovu ovih podataka neophodno je pravovremeno prilagođavati dinamiku crpljenja i uključivanje rezervnih kapaciteta, kako bi se održali stabilni uslovi u zoni crpljenja i izbegla degradacija bunara.

Dobro upravljanje kapacitetima, uz pravilnu organizaciju rada i redovno praćenje stanja, predstavlja osnovni uslov za dugoročnu pouzdanost bunarskog sistema i očuvanje kvaliteta sirove vode.

4. ANTROPOGENI UTICAJ NA BUNARSKA POLJA

Antropogeni uticaji predstavljaju jedan od ključnih faktora koji oblikuju kvalitet sirove vode u bunarskim poljima, uz hidrogeološke karakteristike terena. Potrebno je praviti jasnu razliku između uticaja koji dolaze preko površinskih voda koje se infiltriraju u zonu zahvata i onih koji potiču iz zaleđa, odnosno iz zone prirodnog hranjenja podzemnih voda.

Kada je reč o površinskim vodama koje se infiltriraju, izvori zagađenja su raznovrsni i najčešće dolaze sa urbanih, poljoprivrednih i industrijskih površina. Poljoprivreda donosi zagađenja u vidu nitrata, pesticida, fosfora i drugih nutrijenata. Industrijski izvori doprinose prisustvu organskih materija, teških metala i mikrozagađivača. Urbane sredine unose mikroorganizme, farmaceutske ostatke i mikroplastiku. Dodatno, regulisanje rečnih tokova utiče na dinamiku protoka, uzrokujući stagnaciju i povećavajući rizik od zagađenja.

Ovakvi uticaji direktno se prenose u infiltracionu zonu, a vreme retencije infiltracione filtracije, koje može trajati od nekoliko dana do nekoliko meseci, omogućava delimičnu neutralizaciju određenih zagađujućih supstanci. Ipak, brojni mikropolutanti, uključujući farmaceutske ostatke i pesticide, mogu dospeti do bunara. Promene u kvalitetu infiltrirane vode brzo se odražavaju na kvalitet zahvaćenog filtrata, što zahteva kontinuirano praćenje ovih parametara.

Vode koje dolaze iz zaleđa izložene su dugotrajnim uticajima poljoprivrednih aktivnosti, industrije i neadekvatne kanalizacije. Poljoprivreda doprinosi akumulaciji nitrata u podzemnim vodama, dok industrijski uticaji ostavljaju dugotrajne tragove u vidu kontaminacije teškim metalima i organskim jedinjenjima. Urbane sredine često dovode do infiltracije neprečišćenih otpadnih voda iz septičkih jama i kanalizacije. Ove podzemne vode sporije dolaze do bunara, ali njihovo hemijsko opterećenje, izraženo kroz prisustvo nitrata, sulfata i arsena, traje decenijama i teško se sanira. Takva voda dodatno opterećuje redoks uslove, podstiče mobilizaciju gvožđa, mangana i arsena, a njen kvalitet ostaje stabilno lošiji, što zahteva dugoročne mere za sanaciju izvora zagađenja.

Kada se uporede uticaji iz infiltracionih i zaleđinskih voda, jasno je da se promene kvaliteta u infiltracionim vodama dešavaju brzo, direktno i često prate sezonske oscilacije. Glavni rizici su prisustvo mikrozagađivača i mikrobioloških kontaminanata. Uticaj na filtrat varira i brzo se uočava, što omogućava pravovremeno reagovanje kroz prilagođavanje režima eksploatacije bunara. Nasuprot tome, podzemne vode iz zaleđa menjaju se sporo, kroz decenijske procese akumulacije zagađujućih supstanci. Glavne pretnje su nitrati, sulfati, teški metali i arsen, a njihov uticaj na filtrat je stabilno negativan i predstavlja dugoročan izazov za sanaciju. Upravljanje ovim rizicima zahteva šire, strateške mere u pogledu upravljanja zemljištem i zaštite izvorišta.

Kvalitet infiltracione površinske vode zahteva fleksibilan, dinamičan i brz pristup u upravljanju eksploatacijom bunara. Nasuprot tome, uticaji iz zaleđa nalažu dugoročnu politiku zaštite resursa, s fokusom na prevenciju daljih zagađenja i postupnu sanaciju postojećih opterećenja. Obe komponente, i površinska i podzemna voda iz zaleđa, zajedno utiču na kvalitet filtrata i moraju biti predmet integrisanog, usklađenog upravljanja (Sifner et al., 2022; Rauch et al., 2017; Sopronyi et al., 2019; Li et al., 2020).

5. REDOKS USLOVI I NJIHOV UTICAJ NA KVALITET FILTRATA

Redoks uslovi u akviferu imaju ključan uticaj na kvalitet filtrata i direktno određuju izbor tehnologije obrade vode. Redoks sekvenca jasno prikazuje kako

se sa gubitkom kiseonika menjaju hemijski procesi u podzemnim vodama, što dovodi do oslobađanja neželjenih komponenti koje mogu značajno narušiti kvalitet sirove vode. Kako se prelazi iz aerobnih u anaerobne uslove, dolazi do progresivnog pogoršanja kvaliteta filtrata, što zahteva sve složenije tehnologije prerade.

U početnoj, aerobnoj fazi, prisustvo rastvorenog kiseonika u koncentracijama iznad 2 mg/L obezbeđuje stabilan kvalitet vode, bez značajnog prisustva neželjenih metala. U fazi denitrifikacije dolazi do smanjenja koncentracije nitrata ispod 1 mg/L, što može dovesti do gubitka azota, ali obično još uvek ne utiče kritično na kvalitet vode. Daljim prelaskom u reduktivne uslove aktivira se rastvorljivost mangana, zatim i gvožđa, što dovodi do pojave taloga, povećane korozivnosti i pogoršanja estetskih karakteristika vode.

U uslovima sulfatne redukcije dolazi do oslobađanja vodonik-sulfid (H_2S), što uzrokuje neprijatan miris i dodatne probleme sa korozijom. Najnepovoljnija faza je metanogeneza, kada se u vodi javlja metan, što dovodi do izrazito nestabilnog kvaliteta filtrata. Poseban izazov predstavlja oslobađanje arsena tokom redukcije Fe(III) hidroksida, jer arsen migrira zajedno sa rastvorenim gvožđem i prelazi u filtrat, čime se znatno povećava zdravstveni rizik.

Sekvencijalne promene u redoks uslovima i njihov uticaj na kvalitet filtrata prikazani su u Tabeli 1.

Kvalitet sirove vode iz bunara neposredno određuje potrebnu tehnologiju prerade. Kada su uslovi u akviferu stabilni i aerobni, a koncentracije gvožđa i mangana niske, moguće je primeniti samo dezinfekciju i direktno uključivanje vode u distributivnu mrežu. U slučajevima blago reduktivnih uslova, gde su prisutni povišeni nivoi gvožđa i mangana, primenjuju se konvencionalne metode prerade kao što su aeracija, filtracija i dezinfekcija. Kada su prisutni anaerobni uslovi sa izraženim koncentracijama H_2S, amonijaka i arsena, neophodna je primena naprednih tehnologija koje uključuju adsorpcione procese, oksidaciju i membranske tehnike.

U zavisnosti od kvaliteta sirove vode i identifikovanih parametara, izbor tehnologije prerade prikazan je u Tabeli 2.

Stabilni aerobni uslovi u akviferu omogućavaju najjednostavnije tehnološko rešenje uz minimalne troškove obrade. Suprotno tome, izraženi reduktivni uslovi zahtevaju primenu kombinovanih i naprednih tehnologija kako bi se osigurao odgovarajući kvalitet vode za piće. Upravljanje kvalitetom sirove vode mora biti zasnovano na kontinuiranom praćenju redoks

Tabela 1. Redoks uslovi i uticaj na kvalitet filtrata

Faza	Očekivani parametri	Uticaj na kvalitet
Aerobna	$O_2 > 2$ mg/L	Stabilan kvalitet
Denitrifikacija	NO_3^- opada < 1 mg/L	Potencijalno gubljenje azota
Redukcija Mn(IV)	$Mn^{2+} > 0{,}05$ mg/L	Povećan mangan
Redukcija Fe(III)	$Fe^{2+} > 0{,}1$ mg/L	Talog, korozija, Fe u vodi
Sulfatna redukcija	$H_2S > 0{,}01$ mg/L	Miris, korozija
Metanogeneza	CH_4 prisutan (> 0,1 mg/L)	Nestabilan kvalitet

Tabela 2. Kvalitet sirove vode i potrebna tehnologija prerade

Kvalitet sirove vode iz bunara	Tipični parametri	Potrebna tehnologija prerade	Napomena
Stabilan, aerobni uslovi, bez Fe, Mn	$O_2 > 2$ mg/L, Fe < 0,1 mg/L, Mn < 0,05 mg/L	Samo dezinfekcija i direktno u mrežu	Kvalitet podzemne vode veoma dobar
Blaga redukcija, povišeni Fe, Mn	Fe do 1 mg/L, Mn do 0,2 mg/L, bez H_2S	Konvencionalna prerada: aeracija, filtracija, dezinfekcija	Klasične tehnologije podzemnih voda
Reduktivni uslovi, H_2S, NH_4^+, As prisutni	Fe > 1 mg/L, Mn > 0,2 mg/L, H_2S prisutan, As > 10 µg/L	Napredne metode: adsorpcija, oksidacija, membranske tehnike	Kompleksan sastav, visok rizik

uslova i pravovremenom prilagođavanju tehnološkog procesa.

6. OBALSKI FILTRAT KAO SPECIJALAN IZVOR - REGULATORNE I TEHNOLOŠKE IMPLIKACIJE

Obalski filtrat predstavlja specifičnu vrstu sirove vode, koja nastaje infiltracijom površinskih voda u porozne slojeve tla uz rečne tokove. Iako se u domaćoj praksi najčešće svrstava u kategoriju podzemnih voda, savremene regulative, posebno u SAD i EU, tretiraju ovakve izvore kao potencijalno rizične zbog njihove hidrološke i mikrobiološke povezanosti sa površinskim vodama.

Koncept Groundwater Under Direct Influence of Surface Water (GWUDI) jasno prepoznaje obalski filtrat kao hibridni izvor, sa obaveznom višestepenom obradom koja uključuje filtraciju i dezinfekciju, ali i monitoring zamućenosti, mikrobioloških pokazatelja i zagađujućih supstanci (Cryptosporidium, Giardia, mikropolutanti). (USEPA, 1991)

Evropska Direktiva o vodi za piće (EU 2020/2184), nacionalne regulative Nemačke i Holandije preciziraju zahteve u pogledu udaljenosti, retencijskog vremena i dodatnih barijera (DIN 2000, 2017), i potvrđuju sličan pristup kroz obavezu sanitarne zaštite, monitoringa uticaja površinskih voda i prilagođene obrade vode (European Union, 2020).

Nasuprot tome, u Srbiji ovakvi izvori se i dalje formalno tretiraju kao podzemne vode, što u praksi znači minimalne zahteve u pogledu obrade, najčešće ograničene na dezinfekciju. Ovakav pristup ne uzima u obzir stvarne rizike koji proizilaze iz sve češće detektovanih povišenih koncentracija nitrata, amonijaka, arsena i mikrobioloških pokazatelja u obalskim bunarima.

7. PREPORUKE ZA UNAPREĐENJE PRAKSE

U cilju zaštite javnog zdravlja i dugoročne održivosti sistema vodosnabdevanja, preporučuje se sledeće:

- Uvođenje formalne kategorizacije obalskog filtrata kao posebne vrste sirove vode u domaću regulativu, po uzoru na GWUDI pristup. (USEPA, 1991)
- Primena principa procene rizika, uz obavezno usklađivanje zahteva za tretman sa stvarnim karakteristikama izvora. (European Union, 2020)
- Uspostavljanje obaveznog monitoringa zamućenosti, mikrobioloških pokazatelja i ključnih parametara koji ukazuju na prisustvo infiltracije površinskih voda.
- Primena višestepenih tehnologija obrade (filtracija, UV, GAU, ozonizacija) na svim sistemima sa utvrđenim uticajem površinskih voda.
- Javna dostupnost podataka, edukacija operatera i lokalnih samouprava u cilju bolje zaštite izvorišta.
- Upravljanje bunarskim poljima, posebno u uslovima obalske infiltracije, ne može se zasnivati samo na tehničkim merama eksploatacije. Potrebno je integrisati regulatorne zahteve, monitoring sistema rizika i savremene tehnologije prerade kako bi se obezbedio dugoročno siguran kvalitet vode za piće.

8. ZAKLJUČAK

Održivo upravljanje bunarskim poljima, posebno u uslovima obalske infiltracije, zahteva integrisani inženjerski pristup koji povezuje hidrogeološke karakteristike, redoks uslove i antropogene uticaje na kvalitet sirove vode. Takav pristup je u skladu sa savremenim regulativama i preporukama koje prepoznaju specifičnost obalskog filtrata (USEPA, 1991; European Union, 2020).

Za očuvanje kapaciteta i kvaliteta filtrata neophodno je primenjivati sledeće principe:

- Eksploatacija mora biti u okviru projektovanih kapaciteta, uz ravnomerno raspoređivanje opterećenja i obavezno uključivanje rezervnih kapaciteta radi sprečavanja nadeksploatacije i degradacije bunarskog sistema.
- Redovno praćenje kapaciteta, nivoa depresije i ključnih hidrohemijskih parametara predstavlja osnovu za pravovremeno prepoznavanje negativnih trendova.
- Uticaji infiltracionih i zaleđinskih voda moraju biti jasno razgraničeni i praćeni kroz kontinuirani monitoring, uz preventivne mere zaštite izvorišta.
- Redoks uslovi su ključni indikator hemijske stabilnosti akvifera. Neophodno je kontinuirano praćenje parametara koji ukazuju na prelazak iz aerobnih u anaerobne režime, sa akcentom na kontrolu migracije Fe, Mn, As i H_2S.
- Tehnološki proces prerade mora biti prilagođen identifikovanim uslovima u akviferu, čime se obezbeđuje optimalan balans između troškova i kvaliteta isporučene vode.

Integrisanim pristupom zasnovanim na praćenju, analizi i planskoj rehabilitaciji obezbeđuje se dugoročan i pouzdan rad bunarskih polja, očuvanje kapaciteta i stabilan kvalitet vode u skladu sa savremenim standardima zaštite javnog zdravlja.

LITERATURA

1. DIN 2000 (2017). *Zentrale Trinkwasserversorgung – Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlagen.*
2. European Union (2020). *Directive (EU) 2020/2184 on the Quality of Water Intended for Human Consumption (Drinking Water Directive).* Official Journal of the European Union, L 435/1.
3. Li, T., Li, J., & Zheng, Y. (2020). *Riverbank Filtration for Drinking Water Production: A Review on Nutrient Removal.* Environmental Science and Pollution Research, 27(24), 29553–29566.
4. Rauch, W. et al. (2017). *Impact of Well Operation on Quality Parameters in Riverbank Filtration.*
5. Sifner et al. (2022). *Management of Riverbank Filtration Sites under Changing Boundary Conditions.*
6. Sopronyi, I. et al. (2019). *Operating Experiences of the Bank Filtration System in Budapest.*
7. USEPA (1991). *Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources.* U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.

SLOVARM

Člen Energy Group

ARMATURA I SANITARIJA IZ SLOVAČKE

Pronađi inspiraciju!

VEDIR IMPEX
Tradicija • Kvalitet • Pouzdanost
TRI DECENIJE
uspešnog poslovanja
VEDIR-IMPEXA
Ekskluzivno zastupanje kompanija Tsurumi, Grindex, Ebara, Dragflow, Varisco, Weda Atlas Copco, BBA i još nekoliko desetina najuglednijih svetskih proizvođača pumpi, ventila i prateće opreme.
Najpouzdanija podrška građevinskim, rudničkim, prerađivačkim i drugim kompanijama, kao i individualnim korisnicima u Srbiji, Bosni i Hercegovini, Crnoj Gori i Severnoj Makedoniji.
VEDIR IMPEX
VEDIR IMPEX DOO, Ljermontova 13, 11050 Beograd, 011/347-31-77, office@vedirimpex.rs, www.vedirimpex.rs
TSURUMI PUMP
grindex
EBARA
DRAGFLOW

Stručni rad
UDK: 628.212-79(497.11)
532.575:628.2(497.11)
https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.17630846.svg

Damjan IVETIĆ, Dušan PRODANOVIĆ, Robert LJUBIČIĆ, Miloš STANIĆ, Miloš MILAŠINOVIĆ, Branislav BABIĆ

KLJUČNI ELEMENTI ZA REALIZACIJU POUZDANIH MERENJA PROTOKA U KANALIZACIONIM SISTEMIMA: ISKUSTVA STEČENA NA NOVOM BEOGRADU

KEY ELEMENTS FOR RELIABLE FLOW MEASUREMENTS IN SEWER AND URBAN DRAINAGE SYSTEMS: EXPERIENCE ACQUIRED IN NOVI BEOGRAD

IZVOD

Kontinualna merenja protoka u okviru kanalizacionih sistema za atmosferske i upotrebljene vode predstavljaju jedan od obaveznih segmenata efikasnog upravljanja ovom komunalnom hidrotehničkom infrastrukturom. Nažalost, u domaćoj praksi pouzdani podaci o protocima, kako u suvom tako i u kišnom periodu, na karakterističnim deonicama mreža (glavni kolektori, ispusti, crpne stanice, itd.) u većini slučajeva su veoma skromnog obima. Ograničeni budžeti javnih komunalnih preduzeća, nedovoljno razumevanje potencijalnih prednosti monitoringa, visoke cene formiranja mernih mesta i potreba za redovnim održavanjem, su samo neki od faktora koji su uticali na ovakvu situaciju. Dodatan problem predstavlja i činjenica da se, usled prirode ovih komunalnih sistema, javljaju kompleksni uslovi tečenja i rada koji negativno utiču na pouzdanost izmerenih podataka, odnosno značajno povećavaju njihovu mernu nesigurnost. Zato pri formiranju stalnih mernih mesta u kanalizacionim sistemima, kao i naknadnoj realizaciji privremenih merenja protoka, posebnu pažnju treba posvetiti aspektima kao što su makro i mikro lokacija mernog mesta, odabir merne metode, kontroli pouzdanosti merenja kroz rezultate matematičkog modela i primenu redudantne merne metode, hidraulički uslovi (dinamika i opseg vrednosti merene veličine), održavanje mernog mesta analiza merne nesigurnosti, itd. U ovom radu su analizirani upravo ovi ključni elementi, potrebni za pouzdano merenje protoka. Kao primer, korišćena su merenja u kanalizacionim sistemima za atmosferske i upotrebljene vode na opštini Novi Beograd sprovedena tokom 2024.

Ključne reči: Kanalizacioni sistemi, Merenje protoka, Analiza merne nesigurnosti, Merne lokacije

ABSTRACT

Continuous flow measurements in sewer and urban drainage systems are a requirement for efficient management of these communal hydraulic infrastructure systems. Unfortunately, in the Republic of Serbia, reliable flow data in both dry and wet periods for characteristic network segments (main collectors, outlets, pump stations, etc.) are scarce in most of the cases. Limited public utility budgets, insufficient understanding of the monitoring potential, high costs for the establishment and maintenance of the measurement location, are just some of the factors affecting the current situation. Additionally, due to the nature of sewer and urban drainage systems, commonly occurring adverse flow and operating conditions negatively impact the reliability of the measured data and increase the overall measurement uncertainty. Thus, when permanent measurement locations are established and/or temporary measurement campaigns are being carried out in the sewer and urban drainage systems, additional care should be given to the aspects like macro and micro measurement location, selection of the measurement method, reliability control through modeling results and redundant measurement method, hydraulic conditions (dynamics and value ranges of the measurands), maintanance activities and measurement uncertainty analysis. Here, these key elements for the reliable flow measurements are thoroughly analyzed. Particular details are given to the measurement campaign executed in the sewer and urban drainage network of the Novi Beograd municipality during the 2024.

Key words: Sewer systems, Flow measurement, Measurement uncertainty analysis, Measurement locations

Damjan Ivetić[1*] (https://orcid.org/0000-0001-7475-6108), Dušan Prodanović[1] (https://orcid.org/0000-0003-0156-7271), Robert Ljubičić[1] (https://orcid.org/0000-0002-0218-2843), Miloš Stanić[1] (https://orcid.org/0000-0002-3410-2393), Miloš Milašinović[1] (https://orcid.org/0000-0002-3296-5224), Branislav Babić[1] (https://orcid.org/0000-0003-1224-6297)
[1]Građevinski fakultet – Univerzitet u Beogradu, Beograd
[*]Corresponding author: divetic@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Kanalizacioni sistemi su deo komunalne infrastrukture, koja radi 24 sata dnevno, svaki dan u nedelji, bez prekida. U Republici Srbiji, odgovarajuća lokalna Javna Komunalna Preduzeća (JKP) su zadužena da obezbede i održe zadovoljavajući nivo funkcionalnosti ovih sistema, omogućavajući bezbedno prikupljanje i transport upotrebljenih i atmosferskih voda sa urbanih slivova u obližnji recipijent. Da bi se uspešno sprovodio ovaj odgovorni zadatak, ali i omogućilo identifikovanje slabih tačaka sistema, kao i predviđanje i planiranje koraka za unapređenje i dalji razvoj, neophodne su opsežne i detaljne analize, koje moraju da se zasnivaju na izmerenim podacima o relevantnim hidrauličkim veličinama na merodavnim lokacijama unutar sistema.

Ključne hidrauličke veličine su protok i dubina. Dok je merenje dubine u kanalizacionim sistemima izvesno zahtevan posao, za merenje protoka se može reći da je za red veličine kompleksniji i teži zadatak kojem se mora pristupiti sa posebnom pažnjom (Bertrand-Krajewski i sar., 2021a; Campisano i sar., 2013; Ivetić i sar., 2024, 2025).

U domaćoj praksi, nažalost, pouzdani izmereni podaci o protocima, dnevnoj i nedeljnoj neravnomernosti, u suvom i u kišnom periodu na karakterističnim deonicama mreža (glavni kolektori, ispusti, crpne stanice, itd.) u većini slučajeva su veoma skromnog obima. Na ovu situaciju su uticale specifične istorijsko-sociološke okolnosti, koje su ograničile budžete i mogućnosti JKP poslednjih decenija, u kombinaciji sa visokim cenama formiranja mernih mesta. Takođe, problem predstavlja i potreba za redovnim održavanjem (čišćenjem) mernih mesta i rekalibracijom merne opreme, pa se tako neretko može unutar domaćih kanalizacionih sistema naći instalirana merna oprema koja godinama nije u funkciji (i upitno je da li može da se reparira i osposobi) ili oprema koja još uvek radi ali su merno mesto i proticajni profil zatrpani nanosom. Na skromne metrološke aktivnosti u kanalizacionim sistemima, pored ekonomskih faktora, značajan uticaj ima i nedovoljno razumevanje potencijalnih prednosti, odnosno koristi koji se mogu ostvariti sa dobro projektovanim sistemom za monitoring. Konačno, tu su i tehnički faktori, odnosno činjenica da se, usled prirode ovih komunalnih sistema, javljaju kompleksni uslovi tečenja i rada koji negativno utiču na pouzdanost izmerenih podataka, odnosno značajno povećavaju njihovu mernu nesigurnost. Ovakvih slučajeva, gde instalirana merna oprema ne beleži pouzdane podatke, takođe ima značajan broj, a posebno je izražen kod sprovođenja mernih kampanja ograničenog trajanja. Fokus ovog rada je upravo na analizi ključnih tehničkih aspekata koji mogu pomoći izvođačima u sprovođenju pouzdanih merenja protoka u kanalizacionim sistemima.

Uobičajeno je da se u stručnoj metrološkoj literaturi, kada se projektuje merno mesto, akcenat postavlja na izbor optimalne merne metode (Godley, 2002). Prema mišljenju autora, pitanje merenja protoka u kanalizacionim sistemima sa tehničke strane treba posmatrati u širem kontekstu. Neophodno je voditi računa o makro i mikro lokaciji mernog mesta, odabiru merne metode, kontroli pouzdanosti merenja kroz primenu matematičkog modela i redudantne merne metode, hidrauličkim uslovima na mernom mestu, održavanju mernog mesta i analizi merne nesigurnosti. U ovom radu su pojedinačno analizirani ovi elementi, a njihov uticaj na proces projektovanja i formiranja mernih mesta je ilustrovan kroz primer sprovedene merne kampanje u kanalizacionim sistemima za upotrebljene i kišne vode na teritoriji opštine Novi Beograd.

2. O FORMIRANJU MERNOG MESTA U KANALIZACIONOM SISTEMU

Merenja hidrauličkih parametara, kao što su protok i dubina, u kanalizacionim sistemima treba da se sprovode sa određenim ciljem, da bi se ostvarila jasna korist za naručioca i/ili rukovaoca sistema. Koliko god ovo logično zvučalo, u većini praktičnih slučajeva, cilj nije ili je samo „maglovito“ definisan (Bertrand-Krajewski i sar., 2021a). Primera radi, neretko se za cilj merenja koristi krilatica „prikupljanje informacija o radu sistema“, koja je prilično subjektivna ali, sa druge strane, ostavlja „izlaz“ da se određena merna kampanja nazove uspešnom (jer su prikupljenje „neke“ informacije). Pre započinjanja merne kampanje treba da se definiše i usaglasi jasan, nedvosmislen i ostvariv cilj. Na primer, ako je cilj merenja da se prikupe podaci za kalibrisanje matematičkog modela onda se on prevodi u zahtev: koji konkretno parametri treba da se mere, na koliko mernih mesta, sa kojom frekvencijom uzorkovanja i sa kojom dopuštenom mernom nesigurnošću (ne tačnošću korišćenih mernih uređaja).

Uzimajući cilj merenja kao polaznu tačku, definišu se potrebe za podacima, koje dalje određuju nekoliko ključnih aspekata merne kampanje: koje veličine se mere, koliko dugo (ili koliki broj kišnih događaja i kog intenziteta treba zabeležiti), broj i okvirne lokacije mernih mesta. Sa ovim informacijama može se odrediti okvirna cena sprovođenja određene merne kampanje. Ovde se naručilac radova, susreće

sa dilemom da li je cena sprovođenja merenja ili formiranja mernog mesta opravdana u poređenju sa potencijalno ostvarenom koristi, koja može biti monetarna ali ima i svoju nemonetarnu komponentu. Ako se ispostavi da jeste, pristupa se operativnoj fazi odnosno projektovanju, formiranju i održavanju određenog mernog mesta. Treba jasno naglasiti da je cela operativna faza zapravo jedan iterativan proces, gde su, najčešće u svim etapama, potrebne određene modifikacije i adaptacije kako bi se obezbedio zadovoljavajući kvalitet podataka i ispunjavanje ciljeva merenja. Održavanje mernog mesta je veoma bitan detalj, pogotovo kod dugotrajnih mernih kampanja, gde se periodičnim čišćenjem, proverom pouzdanosti merila sa redudantnom mernom metodom, analizom izmerenih podataka i rekalibracijom uređaja održava traženi nivo kvaliteta izmerenih podataka. Svakako je bitno imati na umu da ne postoji univerzalno rešenje, „srebrni metak“ ili „glogov kolac“ koji se uvek i svuda može primeniti, već je neophodno „ukrajati“ i optimizovati rešenja prema datim okolnostima.

Da bi se operativna faza merne kampanje uspešno sprovela, izvođač merenja mora da razume ciljeve merne kampanje, poseduje znanje hidraulike tečenja u kanalizacionom sistemu, kao i operativno znanje o načinu rada ovih sistema, treba da raspolaže adekvatnim podacima o sistemu u kojem se sprovode merenja, poseduje odgovarajuću mernu opremu, razume principe rada opreme i odgovarajuća ograničenja, ali i poštuje pravila dobre metrološke prakse. U nastavku ovog rada analizirani su aspekti dobre metrološke prakse u kanalizacionim sistemima, za koje autori smatraju da su ključni za uspešno sprovođenje mernih kampanja. Primeri sa merne kampanje održane tokom 2024. godine na Novom Beogradu, sa ciljem prikupljanja podataka za kalibraciju matematičkog modela, su korišćeni u odgovarajućim poglavljima, kako bi se upotpunio opis (Ivetić i sar., 2024).

3. FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA KANALIZACIONOG SISTEMA

Kao polazna tačka operativne faze merne kampanje, u ovom radu se predlaže formiranje inicijalnog matematičkog modela analiziranog kanalizacionog sistema (koristeći besplatne softverske alate kao što su EPA-SWMM, 3DNet i dr.), odnosno dela sistema koji pripada slivu unutar kog će se sprovesti merna kampanja. Model ne mora biti kalibrisan, dovoljno je da verno predstavlja strukturu i povezanost mreže (odnosno, topologiju) i da radi sa očekivanim, pretpostavljenim parametrima.

Čest je slučaj da su poslovi sprovođenja merne kampanje i formiranja novog ili nadogradnja postojećeg hidrauličkog modela kanalizacione mreže odvojeni, odnosno nisu obuhvaćeni istim ugovorom. Ovde je svrsishodno ukazati na mišljenje autora da bi ovi poslovi trebali biti uvezani, gde su u nastavku ukazane neke od potencijalnih koristi koje se mogu na ovaj način ostvariti.

Matematički modeli tečenja u kanalizacionim sistemima su veoma koristan alat, koji omogućavaju analizu kako postojećeg stanja tako i budućih, projektovanih stanja pri redovnim, vanrednim ili nekim hipotetičkim scenarijima. U opštem slučaju, matematički model je skup matematičkih relacija, kojima se predstavlja stvarnost, odnosno tečenje u kanalizacionoj mreži za zadate granične i početne uslove. Formiranje matematičkog modela je opsežan zadatak koji pored stručnosti modelara, zahteva i značajnu količinu relevantnih, ulaznih podataka. Ovde se prvenstveno misli na podatke o topologiji mreže, geometrijske/geodetske podatke o elementima mreže (šahtovi, cevi, kolektori itd.) i karakteristike aktivnih elemenata (crpne stanice, zatvarači, ustave itd.). Verodostojnost matematičkog modela se postiže njegovom kalibracijom, odnosno prilagođavanjem parametara modela, tako da se rezultati simulacija slažu sa izmerenim podacima.

Dok se o kalibraciji može govoriti tek nakon sprovedene merne kampanje, ovde se govori o upotrebi inicijalnog, nekalibrisanog modela, koji ako je formiran na adekvatan način može dati odgovor o očekivanim rasponima vrednosti hidrauličkih parametara koje treba izmeriti. Adekvatno formiran model, podrazumeva da je topologija mreže verno reprodukovana kao i slivno područje. Primera radi, za potrebe sprovođenja merne kampanje na Novom Beogradu, formiran je inicijalni matematički model u softverskom okruženju 3DNet, na osnovu raspoloživih podataka o mreži (topologija, kote, dimenzije…) iz GIS-a Beogradskog Vodovoda i Kanalizacije. Upravo su rezultati simulacija dobijenim primenom inicijalnog modela, korišćeni kao podrška za određivanje makro lokacije (tražene su tačke u sistemu sa značajnim opterećenjem) ali i za definisanja očekivanih opsega dubina i protoka. Ove vrednosti su korišćene kao početna kontrola pouzdanosti merenja – odnosno ako bi rezultati merenja odstupali izvan sračunatog opsega, to je signal da postoji problem sa izmerenim podacima ili sa topologijom mreže u modelu. Tokom merne kampanje na Novom Beogradu, javljala su se oba slučaja: dešavalo se da je odstupanje merenih rezultata izvan očekivanog opsega uzrokovano problemima sa mikro lokacijom mernog mesta, kao i da je pogrešno protumačena topologija mreže

(greška u zvaničnoj GIS bazi podataka). Međutim, dešavalo se i da uzrok odstupanja nije u merenim rezultatima (mikro lokacija) niti u modelu (topologiji), već da se kroz analizu identifikuje da postoji problem u samoj kanalizacionog mreži (zagušenja, nelegalni priključci). Upravo imajući u vidu ovu vezu između GIS-a, matematičkog modela i merenja, uočava se ključna korist povezivanja poslova modeliranja i merenja – mogućnost uzajamne kontrole i unapređenja ova tri bitna alata u rukama rukovodioca odgovarajućih JKP, ali i detekcije problema u samom kanalizacionim sistemima.

4. IZBOR MAKRO LOKACIJE MERNOG MESTA

Dok su u inicijalnoj fazi, pod uticajem ciljeva merenja, određene grube lokacije mernih mesta – odnosno očekivani delovi mreže/sistema gde se željeni podaci mogu prikupiti, u operativnoj fazi je neophodno odrediti makro lokaciju mernog mesta, odnosno konkretnu deonicu, šaht, crpnu stanicu gde će se formirati merno mesto. Uslove koje ta određena makro lokacija treba da ispuni su: da se na njoj može izmeriti željena veličina sa zadovoljavajućom mernom nesigurnosti i da se lokaciji može bezbedno pristupiti. Preporučuje se da se lokacija prvo izvidi od strane izvođača, odnosno da se prikupe sve relevantne informacije sa terena pre nego što se donese konačna odluka. Prvi predlozi se obično definišu na osnovu raspoloživih informacija iz Geografskog Informacionog Sistema (GIS-a), projektne dokumentacije, rezultata inicijalnih analiza na matematičkom modelu sistema i razgovora sa zaposlenima iz nadležnog JKP (pogotovo sa rejonskim rukovodiocima i tehničarima koji neretko imaju ključne informacije o lokalitetu). Nakon obilaska terena, prikupljene informacije mogu podstaknuti promenu odnosno potragu za drugom makro lokacijom. Svakako, u ovaj iterativan proces, treba da bude uključen pored izvođača i naručilac merenja kako bi pomogao u obezbeđivanju potrebnih uslova za sprovođenje merenja (čišćenje prilaza revizionim silazima, čišćenje mreže, obezbeđenje lokacije itd.) kao i ekspert koji radi na matematičkom modelu sistema (on će takođe koristiti podatke).

Postupak određivanja makro lokacije za merno mesto na Fekalnoj Crpnoj Stanici (FCS) Galovica, tokom realizacije merne kampanje na teritoriji Novog Beograda, je bio iterativnog karaktera i rezultirao je nestandardnim rešenjem. Naime, cilj je bio zabeležiti dinamiku rada FCS Galovica, učestalost paljenja pumpi kao i zapreminu prepumpane vode tokom karakterističnih dana. Odabrana makro lokacija je šaht nizvodno od FCS Galovica, koji se nalazi na krivini od 90°, uprkos činjenici da se ovde javlja zakrivljene strujnica koje negativno utiču na pouzdanost izmerenih podataka (slika 1). Inicijalna ideja je bila da se merna oprema postavi na samim potisima agregata FCS, odnosno da se primeni tzv. „Clamp-on" ultrazvučna metoda. Međutim, dispozicija potisnih cevovoda i ograničen pristup (ali i ograničen broj komada opreme) je onemogućio primenu ovu metode za zadovoljavajućom mernom nesigurnošću. Nakon pregleda GIS-a, krenulo se u potragu za prvim nizvodnim šahtom, gde bi se primenila drugačija metoda „brzina – proticajni presek" kako bi se merio zbirni protok na potisu FCS. Prvi nizvodni šaht, u praksi nije dostupan jer je poklopac zavaren tokom

Slika 1. Nestandardne makro lokacije mernog mesta na potisu FCS Galovica
Figure 1. Non-conventional macro measurment location downstream of the FPS Galovica

nekih od prethodnih havarija. Naredni nizvodni šaht, na krivini od 90°, isprva nije bio opcija ali nakon što se obilaskom terena utvrdilo da nijedan od nizvodnijih šahtova nije dostupan ili se nalazi unutar „divljih“ mikro naselja gde je rizik po bezbednost opreme previsok, odluka je doneta da se usvoji nestandardno rešenje pod obavezom da se primene dodatne mere kako bi se osigurala pouzdanost izmerenih podataka (više detalja u narednim poglavljima).

5. IZBOR MIKRO LOKACIJE MERNOG MESTA

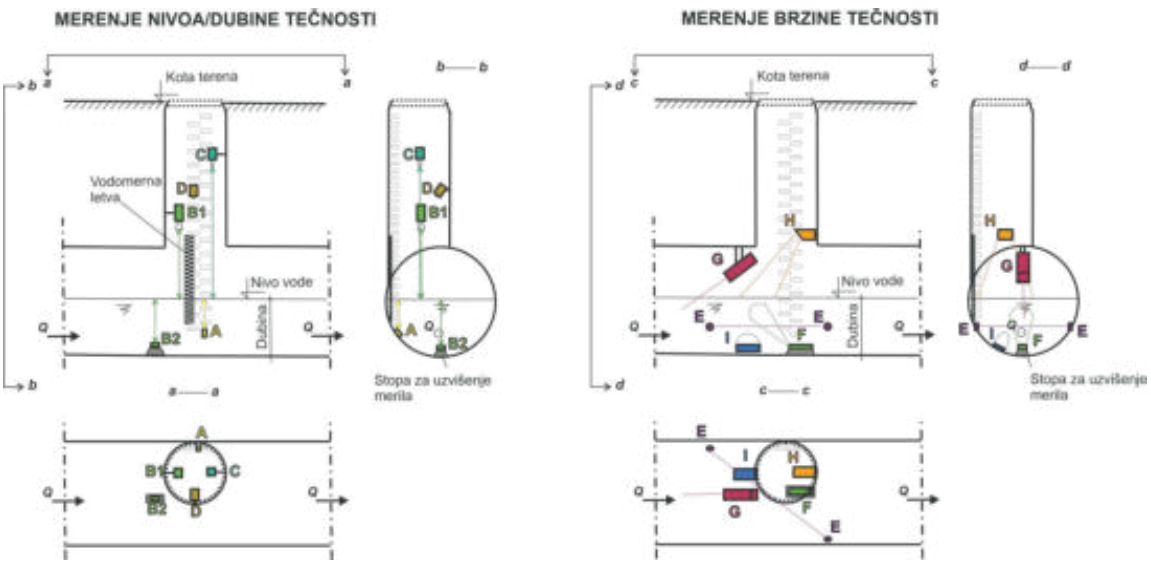
Određivanjem makro lokacije, stupa se u naredni korak kada treba u samom kolektoru ili crpnoj stanici definisati precizno položaj merne opreme. Odabir merne metode i hidraulički uslovi diktiraju mikro lokaciju mernog mesta. Svaka merna metoda ima svoj radni princip (Ivetić i sar., 2025; Larrarte i sar., 2021). Pristup „brzina – proticajni presek“ podrazumeva upotrebu merila brzine (najčešće unutar toka) i merila nivoa za paralelno merenje brzine i nivoa (i posredno površine proticajnog preseka). Merila brzine mogu biti potopoljena (ultrazvučna, elektromagnetna itd.) ili nepotopljena (radarska, laserska itd.). Za merila koja se potapaju u vodu, proizvođači preporučuju osno simetričnu montažu na dno kolektora. Međutim, merilo treba „podići“ ili na „platformu/stopu“ ili na bok kolektora kako bi se izbegao problem taloženja otpada preko merila.

Na Slici 2. su prikazani primeri dobre prakse u montaži merila za merenje nivoa/dubine tečnosti (slika 2 levo) i brzine u kanalizacionim kolektorima (slika 2 desno). Od merila nivoa ilustrovani su primeri upotrebe merila pritisaka potopljenih u vodu (A), ultrazvučnih merila u suvom (B1) i potopljenih u vodu (B2), radarskih merila (C) i primene kamere koja snima vodomernu letvu (D). Od merila brzine tečnosti prikazana su ultrazvučna merila koja mere razliku vremena putovanja talasa između dve primopredajničke glave (E), Dopler merila na stopi za uzvišenje (F), elektromagnetnog merila podignutog na bok kolektora (I), Laser Dopler merila (G) i radarskog merila (H).

Takođe, prema opštim pravilima hidrometrije, treba tražiti što pravilnije deonice kolektora, gde je razumno pretpostaviti da su strujnice paralelne, ili barem bliske paralelnim. Izbegavati „zavetrine“ odnosno postavljanje merila brzine iza izbočenja, stepenika ili krivina.

6. PRIMENA REDUDANTNOG MERENJA – TERENSKA PROVERA POUZDANOSTI

Postavljanjem, odnosno instaliranjem merne opreme, prikupljaju se prvi mereni podaci o analiziranoj hidrauličkoj veličini. Dok se primenom inicijalnog matematičkog modela, odnosno rezultata puštenih simulacija, može steći osećaj u „red veličine“ koji se očekuju za mernu veličinu, treba imati u vidu da to nije garant pouzdanosti merenja. Čak i ako se dobijeni podaci uklapaju u opseg očekivanih vrednosti (red veličine), svrsishodno je izvršiti proveru primenom redudantne merne metoda. Na ovaj način sprovodi se terenska provera pouzdanosti merenja, odnosno dobija se prva potvrda o kvalitetu izmerenih podataka koja daje garanciju da je uspešno formirano merno mesto.



Slika 2. Shematski prikaz primera dobre prakse u montaži merila nivoa (levo) i brzine (desno) tečnosti u kanalizacionim sistemima
Figure 2. Schematic display of good installation practice examples for water level (left) and velocity (right) sensors in urban drainage systems.

Prethodno je prikazan primer odabira nestandardne makro lokacija mernog mesta u šahtu gde se javlja krivina od 90°. Sa metrološke strane, bolja situacija za postavljanje opreme je uzvodno od krivine (strujnice su pravilnije) nego nizvodno (iako je najbolje izbegavati ovakve lokacije kad god je moguće!). Takođe, treba pokušati postavljanje senzora što uzvodnije od krivine, odnosno onoliko koliko je izvođaču dostupno i koliko su kablovi uređaja dugački (preporuka je da se napajanje i računska jedinica drže što bliže poklopcu šahta). U konkretnom slučaju, udaljenost merne opreme od šahta je bila oko 3 m (slika 3). Međutim, zbog opravdane sumnje da se na ovoj mikro lokaciji i dalje ne može sa sigurnošću tvrditi da su strujnice približno paralelne, pored primarnog mernog mesta formirano je i sekundarno, redudantno merno mesto sa drugom mernom metodom. Naime, blizu dna kolektora postavljeno je merilo brzine i protoka na bazi Doplerovog principa (primarno) a 0.5 m uzvodnije merilo brzine i protoka na bazi elektromagnetnog principa (sekundarno). Cilj redudantnog mernog mesta je potvrda pouzdanosti merenja primarnog uređaja. Potrebno je da se rezultati merenja sa dve različite merne metode poklapaju u opsezima merne nesigurnosti, što je ovde postignuto sa prosečnim odstupanjem na dnevnom nivou od 8,7%.

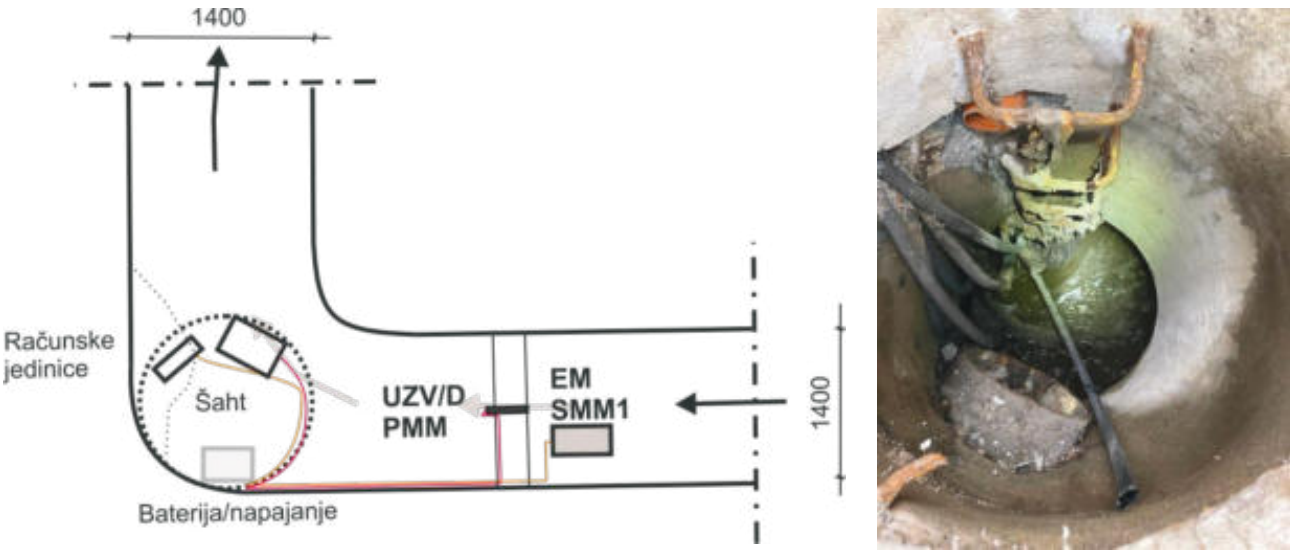
7. ODABIR MERNE METODE

U opštem slučaju u kanalizacionim mrežama se ostvaruje tečenje sa slobodnom površinom, dok se na potisima crpnih stanica i nekim posebnim rešenjima kanalisanja može javiti tečenje pod pritiskom. U slučaju tečenja pod pritiskom, za merenje protoka se mogu koristiti konvencionalna EM merila koja se „ugrađuju“ kao deo cevovoda ili montažno-demontažna „Clamp-on“ ultrazvučna merila protoka. Sa druge strane, kod tečenja sa slobodnom površinom mogu se razlikovati dve situacije:

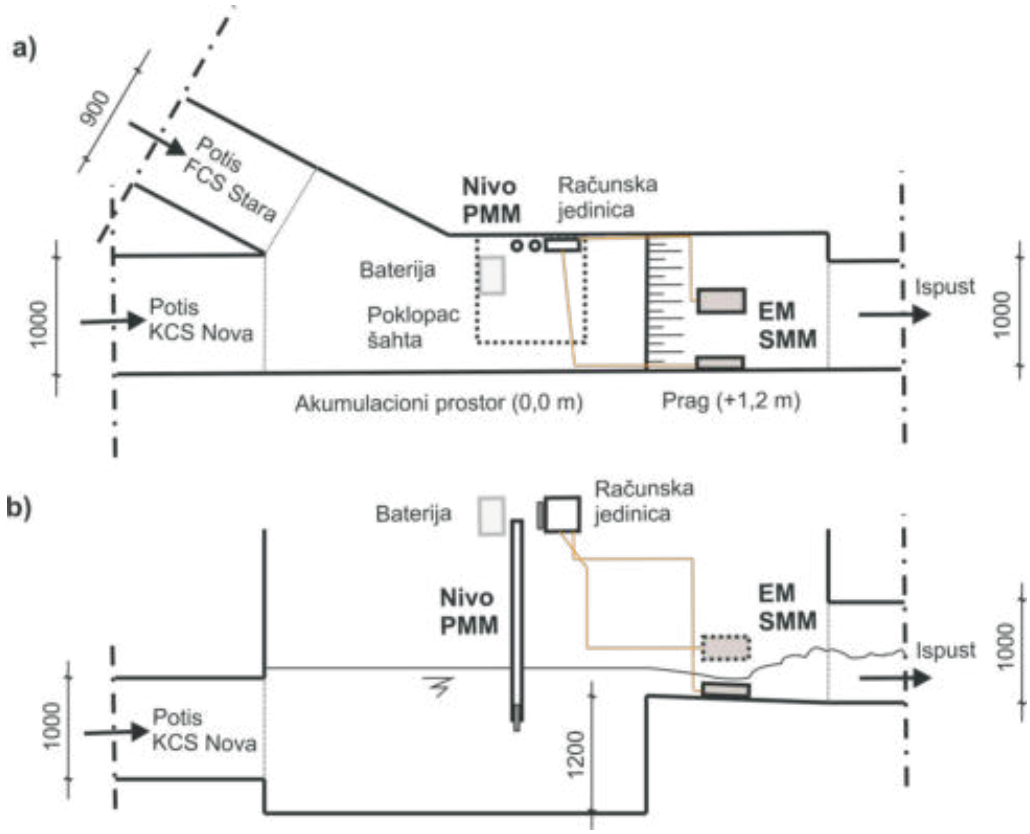
1. Na mernom mestu su hidraulički uslovi takvi da *postoji jednoznačna veza* $Q = f(H)$ - nakon definisanja ove relacije, merenjem samo dubine H posredno se može meriti protok Q (dok god važi navedena relacija).
2. Na mernom mestu su uslovi takvi da *ne postoji jednoznačna veza* $Q = f(H)$ – neophodno je primeniti pristup „brzina – proticajni presek“ gde se paralelnim merenjem brzine V i dubine H (da bi se odredila površina proticajnog preseka A) i njihovim množenjem dobija protok $Q = V \cdot A$.

Slučaj 1., je povoljniji i omogućava pouzdano i stabilno merenje protoka sa manjim troškovima formiranja i naknadnog održavanja mernog mesta. Po pravilu je, za dobro definisanu vezu $Q = f(H)$ i merna nesigurnost u merenju protoka značajno niža nego u Slučaju 2. Jednoznačna veza $Q = f(H)$ se može javiti usled postavljenog mernog objekta (suženja, praga ili preliva) ali može i usled specifičnih hidrauličkih uslova nastalih usled dispozicije kolektora ili nekog konstruktivnog detalja.

Kao primer Slučaja 1, dosta interesantna situacija se javila u sabirnoj građevini potisa FCS Stara i KCS Nova na Novom Beogradu. Sabirna građevina je izgrađena preko postojećeg starog Zemunskog kolektora, tako



Slika 3. Merno mesto nizvodno od FCS Galovica. Levo: Shema mernog mesta, Desno: fotografija unutrašnosti revizionog silaza pre montaže opreme
Figure 3. Measurement location downstream of the FPS Galovica. Left: Measurement location scheme, Right: Photo inside the manhole prior to the equipment installation



Slika 4. Merenje protoka korišćenjem jednoznačne definisane veze Q = f(H)
Figure 4. Flow measurements utilizing defined univocal relation Q = f(H)

da betonirani kolektor formira stepenik visine 1.2 m (slika 4). Voda, po svojoj prirodi, kada naiđe na prepreku teži da je savlada sa minimumom specifične energije, formiranjući kritičnu dubinu, odnosno prelaz iz mirnog u buran režim tečenja. Praktično, javlja se situacija kao da je konstruisan merni prag ili merno suženje, odnosno dolazi do formiranja jednoznačne veze $Q = f(H)$. Ova činjenica je iskorišćena, pa su na ovom lokalitetu formirana dva merna mesta: primarno sa merilom nivoa i sekundarno sa merilom brzine i dubine za definisanje veze $Q = f(H)$. Nakon što je veza određena, sekundarno merno mesto je demontirano, dok je primarno narednih šest meseci uspešno i pouzdano merilo protok, posredno preko nivoa.

U Slučaju 2., koji je dosta složeniji, ključno je adekvatno odabrati mernu metodu/opremu i za merenje dubine i za merenje brzine. Više faktora utiču na odabir, među kojima su najbitniji: hidraulički uslovi na mernom mestu, fizičke karakteristike vode, karakteristike kolektora, trajanje merenja, uslovi sredine i konačno cena merenja (Godley, 2002). Svakako, bilo koja merna oprema koja se koristi u kanalizaciji mora da zadovolji posebne uslove u pogledu robusnosti i izdržljivosti (Campisano i sar., 2013; Ivetić i sar., 2025).

8. ODRŽAVANJE MERNOG MESTA

U periodu između montaže i demontaže mernog mesta, obavezna aktivnost izvođača je redovno održavanje mernog mesta. Kanalizacioni sistemi su u opštem slučaju veoma nepovoljne sredine za rad merne opreme. Svaki tip kanalizacionog sistema nosi određene specifičnosti u ovom pogledu. Kod sistema za upotrebljene vode ključni problemi su vezani za taloženje/gomilanje otpada nad kućištima potopljenih merila, agresivne i korozivne gasove i isparenja koja nepovoljno utiču na opremu koja se nalazi na suvom (nepotopljena merila, računske jedinice i baterije), oštećivanje kablova itd. Sa druge strane sistemi za odvođenje kišnih voda, su (ili bi trebalo da budu) u većini vremena suvi ili sa malim dotokom od infiltracije, dok u periodima padavina pri nailasku površinskog oticaja dolazi do unosa čvrstog materijala u sam sistem (Despotović i sar., 2016) koji kretajući se velikom brzinom sa vodom može da ošteti potopljenu mernu opremu i kablove. Daljinski prenos podataka, omogućava da izvođač u skoro realnom vremenu uoči problem sa merenim podacima, koji bi ukazao da je neophodno obići merno mesto. Međutim, preporučuje se i vizuelna inspekcija ugrađene merne opreme u redovnim

intervalima – jednom nedeljno ili jednom u dve nedelje (ako postoji daljinski prenos podataka).

Pored fizičkog dela posla, koji obuhvata obilazak mernog mesta, čišćenje i prepodešavanje merne opreme, u kontekst održavanja se mogu podvesti i aktivnosti vezane za povremenu proveru pouzdanosti pomoću redudantnog merila, analiza prikupljenih podataka (tokom trajanja merne kampanje) i eventualna rekalibracija merila na samom mernom mestu. Primena redudantnog merila je opisana prethodno u kontekstu formiranja mernog mesta, dok se ovde podrazumeva da se prilikom obilaska mernog mesta prikupi nekoliko merenja sa merilom koje se može primeniti bez vršenja posebne montaže. Primera radi, tokom sprovođenja merne kampanje na Novom Beogradu, za ovakav tip aktivnosti je korišćeno Dopler merilo protoka koje se instalira na teleskopski nosač i koje se minimum 5 minuta potopi u tok pored formiranog mernog mesta (slika 5).

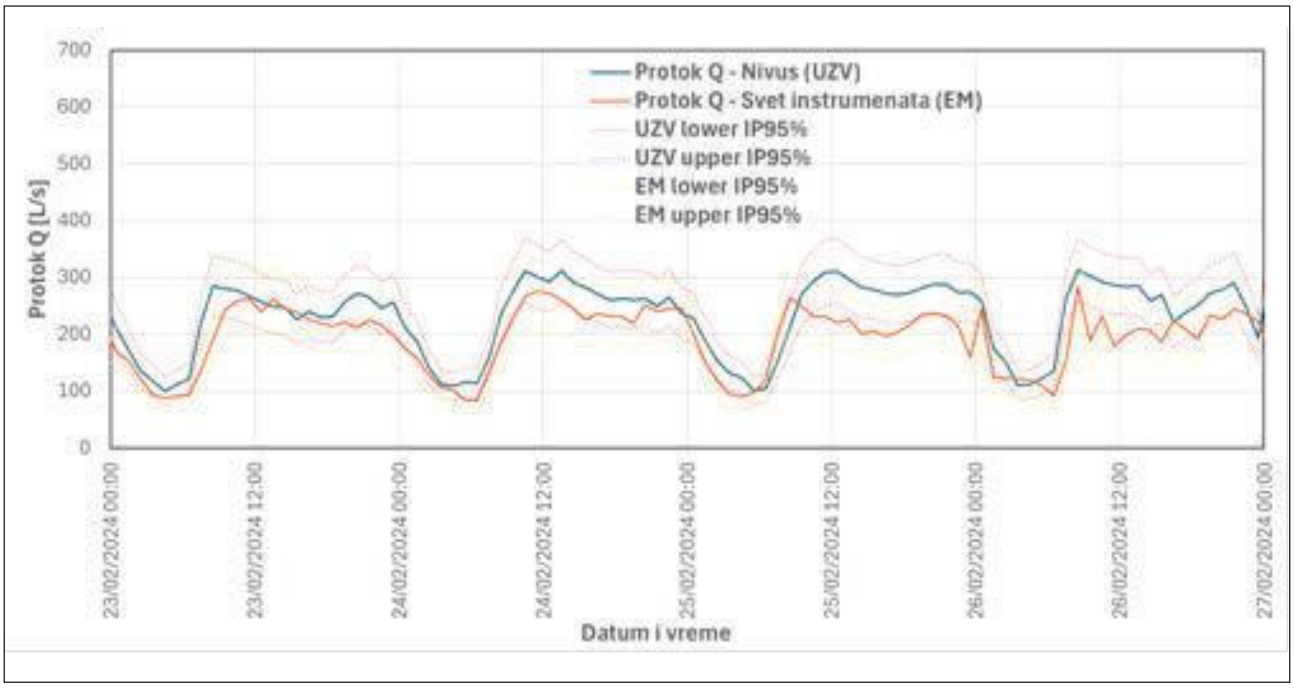
Preporučuje se da se analiza prikupljenih podataka vrši u hodu, odnosno tokom trajanja merne kampanje. Indikatori koji mogu ukazati na problem su prvenstveno pojave neočekivanih padova ili skokova u mernim vrednostima, pojava izraženog šuma, fizički neobjašnjivih pikova, ako dinamika promene merne veličine ne odgovara očekivanoj, ili ako merne vrednosti odstupaju od matematičkim modelom definisanih opsega. Identifikovanje ovakvih fenomena je moguće samo kroz temeljnu analizu podataka, koja ukoliko se prekasno sprovede može dovesti u pitanje uspešnost merne kampanje. Samim tim, ovu aktivnost izvođač vrši tokom merenja, kako bi promptno i efikasno mogao da reaguje i minimizuje posledice po kvalitet sprovedene merne kampanje.

Slika 5. Kontrola rada pouzdanosti merenja primenom Dopler merila protoka na teleskopskom nosaču
Figure 5. Using the Doppler flowmeter mounted on the telescopic rod for the flow measurement reliability control

9. ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Jedan od aspekata u merenjima protoka, kojem se prema mišljenju autora ne daje dovoljno pažnje u domaćoj stručnoj javnosti, je sprovođenje analize koja može da da kvantitativnu procenu merne nesigurnosti protoka. Imajući u vidu složene uslove rada merne opreme unutar kanalizacione mreže, autori ovog rada smatraju analizu merne nesigurnosti obaveznim elementom operativne faze sprovođenja merenja. Takođe, vide je i kao mehanizam (ili barem jedan od mehanizama) za kontrolu ispunjenosti ciljeva i kvaliteta sprovedenih mernih kampanja, od strane naručioca (nažalost često ne postoji nikakva kontrola). Prema referentnim metrološkim organizacijama (JCGM, 2008), kvantitativan parametar koji opisuje pouzdanost izmerenih podataka je merna nesigurnost (a ne merna greška). Uobičajeno, za merenja protoka u kanalizacionim sistemima se prihvatljivom nesigurnošću smatraju vrednosti visoke čak do 10% (u posebnim slučajevima i više).

Procenu merne nesigurnosti sprovodi sam izvođač merenja, koristeći raspoložive podatke o mernoj lokaciji, radu korišćenih instrumenata u kontrolisanim uslovima, pravila proračuna i propagacije merne nesigurnosti kod merenja složenih veličina i samih izmerenih podataka (Bertrand-Krajewski i sar., 2021b). U poglavlju „Primena redudantnog merenja – terenska provera pouzdanosti“ opisano je kako su na potisu FCS Galovica formirana dva merna mesta, odnosno primenjene su dve različite merne metode za merenje protoka sa ciljem provere hipoteze da su strujnice dovoljno pravilne, odnosno da se merenja na toj mikro lokaciji mogu smatrati pouzdanim. Kriterijum za proveru hipoteze je upravo dobijen kao rezultat analize merne nesigurnosti: ako se izmereni protoci poklapaju sa pripadajućim opsegom intervala poverenja od 95%, rezultati merenja su validni (dva uređaja imaju različite merne zapremine i postavljeni su na različitim tačkama unutar okvašenog obima kolektora). Na Slici 6. je prikazan deo rezultata merenja (osrednjenih na časovnom nivou) gde se može vizuelno uočiti navedeno preklapanje – prosečno odstupanje na dnevnom nivou od 8,7%.



Slika 6. Izmereni protoci na potisu FCS Galovica, osrednjeni na časovnom nivou, pomoću dve merne metode sa pripadajućim intervalima poverenja od 95%
Figure 6. Hourly flow measurements with corresponding 95% confidence intervals downstream of FPS Galovica, obtained with two measurement methods

10. ZAKLJUČAK

Merenja protoka u kanalizacionim sistemima su ključni preduslov za uspešno upravljanje ovom vitalnom komunalnom infrastrukturom. Merenja su kompleksan zadatak i moraju se sprovoditi sa jasnim, usaglašenim i nedvosmislenim ciljem, prema kojem se u inicijalnoj fazi definiše obim posla. U operativnoj fazi, neophodno je vršiti projektovanje, formiranje i redovno održavanje mernih mesta, dok se u fazi obrade rezultata merenja mora sprovesti i analiza postignute pouzdanosti, pre svega na osnovu dodatnih, redundantnih merenja.

U radu su analizirani svi elementi operativne faze i faze obrade rezultata, koji imaju dominantan uticaj na obezbeđivanje kvaliteta i pouzdanosti izmerenih podataka: određivanje makro i mikro lokacije mernih mesta, odabir merne metode, kontrola pouzdanosti merenja kroz primenu matematičkog modela i redudantne merne metode, analiza hidrauličkih uslova na mernom mestu, održavanje mernog mesta i analiza merne nesigurnosti. Primeri iz merne kampanje sprovedene 2024. godine na opštini Novi Beograd su iskorišćeni za ilustraciju i detaljnija objašnjenja.

Predstavljena analiza može poslužiti kao podrška domaćim JKP pri definisanju tehničkih uslova za projektovanje, formiranje i održavanje mernih mesta u kanalizacionim sistemima. Mišljenje je autora da skup tehničkih uslova koji detaljno opisuju ove aktivnosti, odnosno smernice i pravila kojih se projektanti i izvođači moraju pridržavati u njihovoj realizaciji, treba pretočiti u interne tehničke pravilnike (nadležnih JKP) za formiranje mernih mesta u kanalizacionim sistemima. Definisanjem, i adekvatnom primenom, takvih pravilnika značajno bi se unapredila kako metrološka praksa u kanalizacionim sistemima, tako i samo funkcionisanje ovih vitalnih infrastrukturnih komunalnih sistema.

LITERATURA

1. Bertrand-Krajewski, J.L., Clemens-Meyer, F. Lepot, M. (2021a). *Metrology in urban drainage and stormwater management: Plug and pray*. IWA Publishing.
2. Bertrand-Krajewski, J.L., Uhl, M. Clemens-Meyer, F.H. (2021b). Uncertainty assessment. *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management*, *263*.
3. Campisano, A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M., Vanrolleghem, P.A. (2013). Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. *Urban Water Journal*, *10*(5), pp.300-311.
4. Despotović, J., Plavšić, J., Todorović, A., Pavlović, D., Prodanović, D., Janković, Lj., Stanić, M., Đukić, A., Jaćimović, N., Ivetić, M. (2016). Upravljanje kišnim oticajem u 7 koraka. In *Prvi BiH kongres o vodama – zbornik radova*, Sarajevo. BiH.
5. Godley, A. (2002). Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, *13*(5-6), pp.197-201.
6. Ivetić, D., Ljubičić, R., Lakičević, J., Brajović, Lj., Milašinović, M. (2025). Senzori kao deo digitalnih blizanaca kanalizacionih sistema: specifičnosti mernih metoda i mogućnosti primene pristupačnih rešenja. In 68. *Konferencija ETRAN*, Čačak, Srbija.
7. Ivetić, D., Prodanović, D., Stanić, M., Babić, B., Ljubičić, R. (2024). Discharge measurements in Belgrade sewer systems: Forensic hydraulics. In *45. Međunarodna konferencija" Vodovod i kanalizacija'24"-zbornik radova*
8. Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), (2008). Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization.
9. Larrarte, F., Lepot, M., Clemens-Meyer, F.H., Bertrand-Krajewski, J.L., Ivetić, D., Prodanović, D., Stegeman, B. (2021). Water level and discharge measurements. *Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management*, p.35.

Vrhunska oprema
koja povećava nivo
sigurnosti i pouzdanosti

Rešenja po meri *prilagođena konkretnim zahtevima klijenata.*

Inovacije *koje svakodnevni posao čine lakšim.*

- *Inženjering*
- *Procesna merenja i regulacija*
- *Sistemi upravljanja i nadzora*
- *PLC / RTU / Data Loggeri*
- *Pumpe za industriju, pitke i otpadne vode*
- *Proizvodnja kompaktnih crpnih stanica*
- *Izrada mašinskih instalacija i opreme*
- *Proizvodnja profilisanih mernih suženja*

Badger Meter
Honeywell
s::can A Badger Meter® Brand
LACROIX
Dinel® industrial electronics
FLOW-TRONIC
katronic
ATi A Badger Meter® Brand
PENTAIR JUNG PUMPEN

www.o2ps.rs

O2 PROCESS SOLUTIONS
pouzdan partner

Jurija Gagarina 179
11073 Beograd, Srbija
Tel: +381 65 8665 722
Tel/fax: +381 11 22 898 15
E-Mail: o2ps@o2ps.rs

Sistemska rešenja

ZA VODOVOD I KANALIZACIJU

MERIS

pouzdano
efikasno
standardizovano
profesionalno

Sa više od sedamnaest godina iskustva u oblastima primene industrijske automatizacije, prerade pitkih i otpadnih voda, regulacije i automatskog vođenja tehnoloških procesa, firma MERIS d.o.o. pozicionirala se kao lider na tržištu. Standardizovanjem svojih procesa rada, dovođenjem mladih i perspektivnih kadrova u tim, na čijem čelu su neki od najboljih inženjera u svojim oblastima ekspertize, stvorena je snažna profesionalna baza znanja i iskustva.
Kreirajući rešenja prema potrebama klijenata, njihovim ciljevima, MERIS primenjuje svetski priznate tehnologije, servisira i savetuje, imajući uvek na umu pre svega poslovne uspehe korisnika, optimizaciju njihovih resursa, kao i uštede novca i energije.
MERIS je stvorio bazu klijenata koji mu veruju. Tim MERIS-a, gradi partnerske odnose sa svojim klijentima, optimizujući njihove procese i unapređujući njihove rezultate.

Ekskluzivni zastupnik, distributer i serviser

Endress+Hauser People for Process Automation
FLYGT a xylem brand
SANITAIRE a xylem brand
AVK
BIOKUBE

Dunavska 78A, 11158 Beograd, Srbija • Tel: (+381 11) 314 88 00, Faks: (+381 11) 314 88 11 • E-mail:meris@meris.rs
www.meris.rs

Stručni rad
UDK: 628.351(497.11)
https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.17630924.svg

Dušan OTAŠEVIĆ, Dejan OTAŠEVIĆ

ZNAČAJ PRIMENE AUTOMATSKIH ANALIZATORSKIH STANICA ZA KONTINUALNO PRAĆENJE KVALITETA I KVANTITETA KOMUNALNIH OTPADNIH VODA NA DOVODNOM KOLEKTORU PRE ULASKA NA POSTROJENJE ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA I NAJNOVIJA REŠENJA U OVOJ OBLASTI

THE SIGNIFICANCE OF THE APPLICATION OF AUTOMATIC ANALYZING STATIONS FOR CONTINUOUS MONITORING OF THE QUALITY AND QUANTITY OF MUNICIPAL WASTEWATER AT THE INLET COLLECTOR BEFORE ENTERING THE WASTEWATER TREATMENT PLANT AND THE LATEST SOLUTIONS IN THIS FIELD

IZVOD

Kontinualno „on-line“ praćenje parametara kvaliteta i kvantiteta otpadnih voda pre ulaska na postrojenje za tretman otpadnih voda donosi značajne kratkoročne i dugoročne koristi i omogućava postizanje veće pouzdanosti, sigurnosti i efikasnosti u radu postrojenja. Primena najnovijih tehnologija u oblastima: multiparametarskog merenja kvaliteta vode, merenja protoka putem beskontaktnih radarskih sistema, komunikacije, vizuelizacije, aplikacija za analizu i obradu dobijenih podataka, mašinskog učenja i naprednog upravljanja procesom, omogućava značajnu optimizaciju procesa prerade otpadnih voda. U radu se opisuje primena ovih tehnologija u praksi na automatskim analizatorskim stanicama za kontinualno praćenje kvaliteta i kvantiteta, koje rade autonomno i obezbeđuju dobijanje preciznih, pouzdanih i korisnih podataka i parametara u realnom vremenu. Primenom navedenih tehnologija u analizatorskim stanicama, operaterima postaju vidljive sve promene u stanju otpadnih voda, čim se one dogode, a sistem automatski ukazuje na sve karakteristične pojave, generiše upozorenja i alarme. Na osnovu dobijenih parametara, operater ručno ili upravljački sistem na postrojenju automatski, preduzima mere za optimizaciju rada kao i preventivne i korektivne mere za izbegavanje incidenata i sprečavanje štete velikih razmera. Dugoročno beleženje i analiza podataka predstavljaju osnov za primenu naprednih, digitalnih tehnologija koje omogućavaju dodatnu optimizaciju i unapređenje rada postrojenja a samim tim i njihovu dugoročnu održivost.
Ključne reči: automatske analizatorske stanice, multiparametarski procesni analizatori, spektralna analiza, spektralni alarmi, radarska merila protoka, profilisana merna suženja, procesni kontroleri, sistem upravljanja, optimizacija rada postrojenja

ABSTRACT

Continuous "on-line" monitoring of wastewater quality and quantity parameters before entering the wastewater treatment plant brings significant short-term and long-term benefits and enables the achievement of greater reliability, safety and efficiency in plant operation. Application of the latest technologies in the areas of: multi-parameter water quality measurement, non-contact radar flow measurement systems, communication, visualization, applications for analysis and processing of acquired data, machine learning and advanced process control, enables significant optimization of the wastewater treatment process. The paper describes the application of these technologies in practice on automatic analyzer stations for continuous monitoring of quality and quantity, which work autonomously and provide accurate, reliable and useful data and parameters in real time. By applying mentioned technologies in the analyzer stations, all changes in the state of wastewater become visible to the operators as soon as they occur, and the system automatically indicates all characteristic events, generates warnings and alarms. Based on the obtained parameters, the operator manually or the plant control system automatically takes measures to optimize work as well as preventive and corrective measures to avoid incidents and prevent large-scale damage. Long-term data recording and analysis are the basis for the application of advanced, digital technologies that enable additional optimization and improvement of plant operation and thus their long-term sustainability.
Keywords: Automatic Analyzer Stations, Multi-Parameter Process Analyzers, Spectral Analysis, Spectral Alarms, Radar Flow Meters, Profiled Measuring Flumes, Process Controllers, Control System, Plant Operation Optimization

Dušan Otašević[1]* (https://orcid.org/0009-0003-6008-9094), Dejan Otašević[2] (https://orcid.org/0009-0005-4978-7654)
[1] Honeywell d.o.o., Zrmanjska 27, Beograd
[2] O2 Process Solutions d.o.o., Jurija Gagarina 179, Beograd
*e-mail: dusan.otasevic@honeywell.com; e-mail: o2ps@o2ps.rs

1. UVOD

Postrojenja za tretman otpadnih voda imaju veliki značaj u očuvanju životne sredine i prirodnih resursa. Kontinualan i održiv rad ovih postrojenja je u opštem interesu i stoga je potrebno obezbediti dugoročno i održivo funkcionisanje ovih postrojenja. Ono što se često sreće na terenu je situacija da se na novim postrojenjima za tretman otpadnih voda ugrađuje oprema dobrog kvaliteta i performansi i da ona u početnom periodu eksploatacije daje dobre rezultate. Problemi nastaju tokom životnog ciklusa, kada javna preduzeća koja upravljaju ovim objektima u većini slučajeva nemaju adekvatne budžete za preventivno i korektivno održavanje ovih postrojenja, koje je u skladu sa dobrom inženjerskom praksom. Sva rešenja i oprema koja se koriste u ovoj oblasti moraju biti robusni, sa što manjom potrebom za intervencijama zaposlenih i da dugoročno budu održiva. Ukoliko postoji želja da postrojenja zadrže ili unaprede svoju funkcionalnost u toku životnog ciklusa, potrebno je primeniti najnovije tehnologije i rešenja u oblasti merenja, upravljanja i optimizacije procesa, koja bi olakšala rad operatera i unapredila i povećala efikasnost rada postrojenja.

Zakonima i uredbama je propisan kvalitet otpadnih voda, tj. granične vrednosti emisije za određene kategorije zagađujućih supstanci, kako za tehnološke otpadne vode pre njihovog ispuštanja u javnu kanalizaciju tako i za vode koje se posle prečišćavanja ispuštaju iz sistema javne kanalizacije u recipijent:

- Zakon o zaštiti životne sredine ("Sl. glasnik RS", br. 135/2004, 36/2009, 36/2009 - dr. zakon, 72/2009 - dr. zakon, 43/2011 - odluka US, 14/2016, 76/2018, 95/2018 - dr. zakon, 95/2018 - dr. zakon i 94/2024 - dr. zakon)
- Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine („Sl. glasnik RS", br. 135/2004, 25/2015 i 109/2021) i
- Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje („Sl. glasnik RS", br. 67/11, 48/12 i 01/2016).

Na osnovu ovih zakona i uredbe o graničnim vrednostima određenih parametara (koja verovatno ima najširu praktičnu primenu u procesima odlučivanja i praćenja kvaliteta otpadnih voda), kao i na osnovu pravilnika gradskih i lokalnih uprava, tačno je propisan kvalitet vode i maksimalne dozvoljene vrednosti zagađujućih materija koje mogu doći na postrojenje.

Postrojenja za preradu otpadnih voda su projektovana da rade u skladu sa projektovanim parametrima kvaliteta. Problem nastaje kada se na postrojenjima pojavi otpadna voda koja ima značajno povišene vrednosti određenih zagađujućih supstanci u odnosu na projektovane uslove rada. U praksi se pokazalo da se velika većina incidentnih događaja (sa ekstremno velikim parametrima zagađujućih supstanci), dešavala izuzetno brzo i u kratkom vremenskom intervalu i da je zbog toga bilo lako da prođu neotkriveno sve do trenutka dok se ne pojave problemi u radu postrojenja. Obično se na postrojenjima za tretman otpadnih voda u određenim intervalima rade laboratorijski testovi na uzorcima uzetim na samom ulasku u postrojenje. Operateri na postrojenjima su uvideli da diskontinualno uzimanje uzoraka u određenim

Slika 1. Pojava pene i mrkog obojenja u primarnim taložnicima

Slika 2. Pojava zelenog obojenja u primarnim taložnicima

Slika 3. Pojava pene na finim rešetkama

Slika 4. Neovlašćen izliv iz klanice 01. april, 2022. godine

Slika 5. Uzorci zgrudvane masti na finoj rešetki 07. april, 2022. godine

intervalima ne pruža sigurnost u radu postrojenja, jer ne pruža pravovremenu informaciju koja bi im pomogla da spreče incidentne situacije i nastanak šteta. Na slikama 1-3 se vide neke od posledica pojave vode sa značajno većim parametrima zagađujućih materija na Postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV) Kruševac.

Nakon puštanja u rad automatskih analizatorskih stanica i integracije svih parametara na upravljački SCADA („Supervisory Control and Data Acquisition") i/ili DCS („Distributed Control System") sistem postrojenja ili na nezavistan upravljačko-nadzorni sistem, operateri u realnom vremenu počinju da dobijaju sve parametre sa analizatorskih stanica, alarme i upozorenja u trenutku kada nedozvoljeno hemijsko i biološko zagađenje počne da se događa. Po parametrima koji se dobijaju sa analizatorske stanice, lako se može utvrditi koja industrija je glavni uzročnik prekoračenja dozvoljenih vrednosti zagađujućih materija. Kao primer navodimo situaciju kada su operateri na SCADA sistemu PPOV Kruševac, nakon početka primene ovog sistema, na osnovu parametara dobijenih sa analizatorske stanice, utvrdili da trenutno ekstremno prekoračenje dozvoljenih vrednosti biološkog zagađenja dolazi najverovatnije od strane neke prehrambene industrije, mlekare ili klanice. Inspekcijom šahtova na nekoliko lokacija su utvrdili da je uzročnik klanica (slika 4).

Da bi sistem bio efektivan, neophodno je propisati procedure za reagovanje kada dođe do alarmnih situacija. Kada se detektuje povišeno biološko i hemijsko zagađenje, eventualno i locira konkretan izvor ili izvori koji su doveli do incidenta, sistem upravljanja na postrojenju i operateri moraju imati spreman odgovor kako da reaguju, kako bi mogli da preduprede neželjene efekte na rad postrojenja. Nakon puštanja u rad analizatorske stanice, potrebno je definisati algoritme upravljanja, i to do kojih vrednosti određenih parametara je moguće izvršiti i koje korektivne akcije, a u kom trenutku je neophodno presumeriti tok u retenziju. Sama činjenica da se zna tačan trenutak nastanka prekoračenja parametara i vreme trajanja daju veoma dragocene podatke koji se mogu iskoristiti za optimizaciju rada postrojenja. Dugoročnim skladišenjem ovih podataka i primenom softvera za analizu i optimizaciju moguće je, nakon određenog perioda, primeniti softverska rešenja koja rade predikcije događaja i na taj način mogu dodatno unaprediti odgovor na neželjene događaje. Cilj je da se dugoročno smanje incidentne situacije i troškovi a da se poveća efikasnost i pouzdanost rada postrojenja.

2. AUTOMATSKA ANALIZATORSKA STANICA ZA KONTINUALNO PRAĆENJE KVALITETA I KVANTITETA

Implementacija automatskih analizatorskih stanica za kontinualno praćenje kvaliteta i kvantiteta komunalnih otpadnih voda, postavljene na dovodnom kolektoru pre ulaska na postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda, su jedan od načina da se unapredi rad PPOV. Njihova osnovna funkcija

Slika 6. Automatska analizatorska stanica i merilo protoka ispred PPOV Kruševac

je da mere i beleže analitičke parametre i protok i da prosleđuju ove podatke na upravljački sistem, čime omogućavaju bolje upravljanje i zaštitu postrojenja za tretman otpadnih voda od akcidentnih situacija, kao što su ekstremno hemijsko zagađenje, biološko zagađenje i naleti mulja i peska. Ovi podaci omogućavaju operaterima i upravljačkom sistemu na postrojenju da izvrše preventivne i korektivne radnje, zaštite vitalne funkcije sistema i obezbede normalno funkcionisanje.

Osnovne osobine koje moraju da ispune automatske analizatorske stanice su:

- ROBUSNOST: Sva oprema mora da bude u takvoj izvedbi da može da radi u teškim uslovima koji vladaju u kolektoru (sistem za merenje protoka i sistem za automatsko uzorkovanje), a da analizatorska kućica poseduje pomoćne sisteme, koji mogu da neutrališu negativne spoljašnje uticaje (temperatura, vetar, padavine,..). Iz tog razloga je neophodno da budu implementirani sistemi za održavanje radnih uslova unutar stanice, sistemi za automatsko uzimanje uzoraka i automatsko čišćenje analizatora.
- AUTOMATSKI RAD I SLANJE PODATAKA: Stanice moraju imati mogućnost da rade u automatskom režimu i bez ljudske posade i da imaju vezu sa upravljačkim sistemom na postrojenju.
- AUTOMATSKO ČIŠĆENJE: U zavisnosti od toga koji tip instalacije se odabere (uzimanje uzoraka ili direktno uranjanje u kolektor), mora se pravilno izabrati oprema i pomoćni sistemi za čišćenje i održavanje procesnih analizatora.
- MINIMALNA POTREBA ZA INTERVENCIJAMA OPERATERA: I pored činjenice da se za merenje kvaliteta otpadne vode koriste veoma sofisticirana analizatorska oprema i pomoćni sistemi za održavanje, nemoguće je u potpunosti izbeći osnovne servisne aktivnosti. Sama činjenica da se za merenja najbitnijih parametara koristi procesni spektrofotometarski analizator, zahteva da se obično u periodu od mesec dana ručno očisti fini film koji se stvori na samom senzoru. U zavisnosti od potrošnje elektrolita u fizičkim elektrodama koje se koriste: pH, amonijak, redox i/ili druge, potrebno je obično u periodu od 1 do 3 godine izvršiti zamenu ovih elektroda.

Merni sistemi za merenje protoka su predviđeni da rade u dužim vremenskim intervalima od nekoliko godina bez bilo kakvih intervencija operatera. Uzimajući u obzir koje sve parametre dobijamo sa analizatorske stanice, može se zaključiti da je ovaj nivo servisnih aktivnosti minimalan u odnosu na benefite koji se dobijaju primenom ovog rešenja.

3. OSNOVNI DELOVI AUTOMATSKE ANALIZATORSKE STANICE

Osnovni delovi Automatske analizatorske stanice su

- Multiparametarski procesni analizator,
- Analizatori koji koriste fizičke elektrode (pH, provodnost, NH_4-N, NO_3-N, ORP,…),
- Sistem za merenje protoka,
- Industrijski računar – Terminal,
- Oprema za komunikaciju,
- Analizatorske kućice sa svim neophodnim podsistemima,
- RTU („Remote Terminal Unit“)/PLC („Programmable Logic Controller“) - opciono,
- SCADA - opciono.

4. MULTIPARAMETARSKI PROCESNI ANALIZATOR

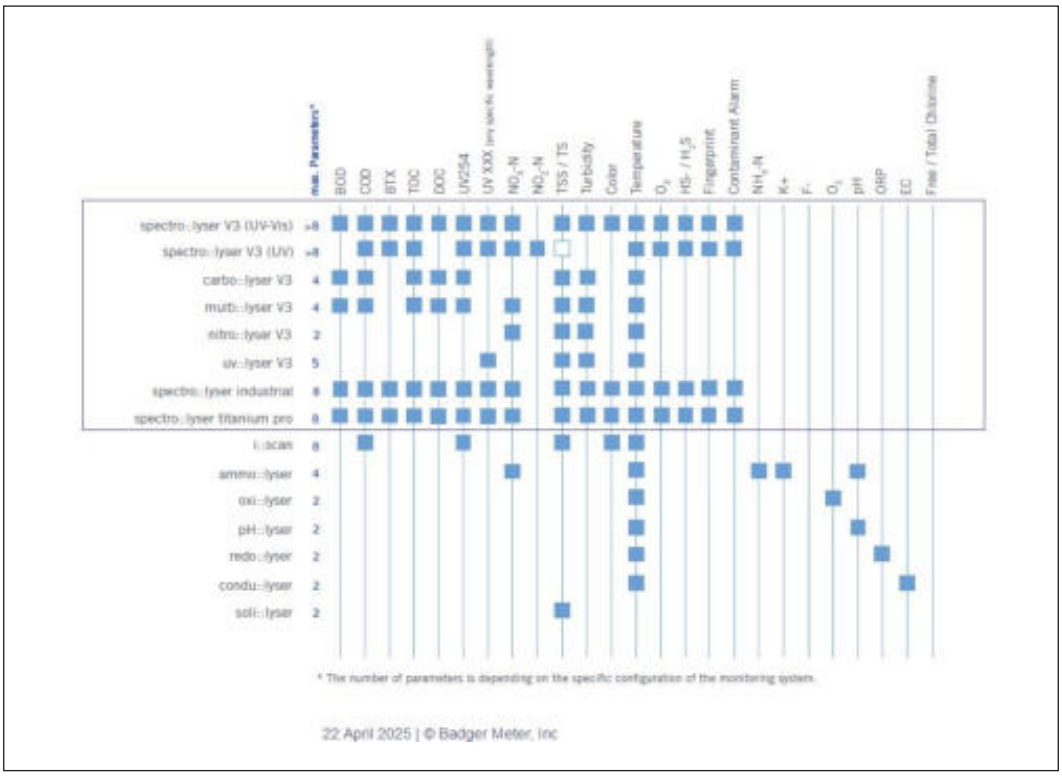
Procesni spektrofotometarski multiparametarski analizator predstavlja najbitniji deo ovog sistema i koristi se za merenje parametara kvaliteta vode. Najbitniji parametri za rad postrojenja su hemijska potrošnja kiseonika (HPK), biohemijska potrošnja kiseonika (BPK), ukupne suspendovane materije (TSS), nitrati (NO_3-N), mutnoća, ukupni organski ugljenik (TOC), sulfidi (HS), vrednost apsorpcije na talasnoj dužini od 254 nm (UV_{254}), boja i drugi. Ovakvi analizatori mogu da mere veliki broj parametara, a posebna pogodnost prilikom korišćenja je kreiranje „novih parametara“ po izboru korisnika uz primenu „slobodne formule“ na terminalu. Na slici 7 se može videti procesni spektrofotometar Spectro::lyser V3 proizveden od strane Badgermeter brand-a S::CAN, senzor za optička merenja apsorpcije putem UV-VIS spektra u celom opsegu od 190-750nm.

Ovi uređaji su se u praksi pokazali kao veoma pouzdani. Pružaju značajne prednosti u odnosu na jednostavnije fotometarske sonde:

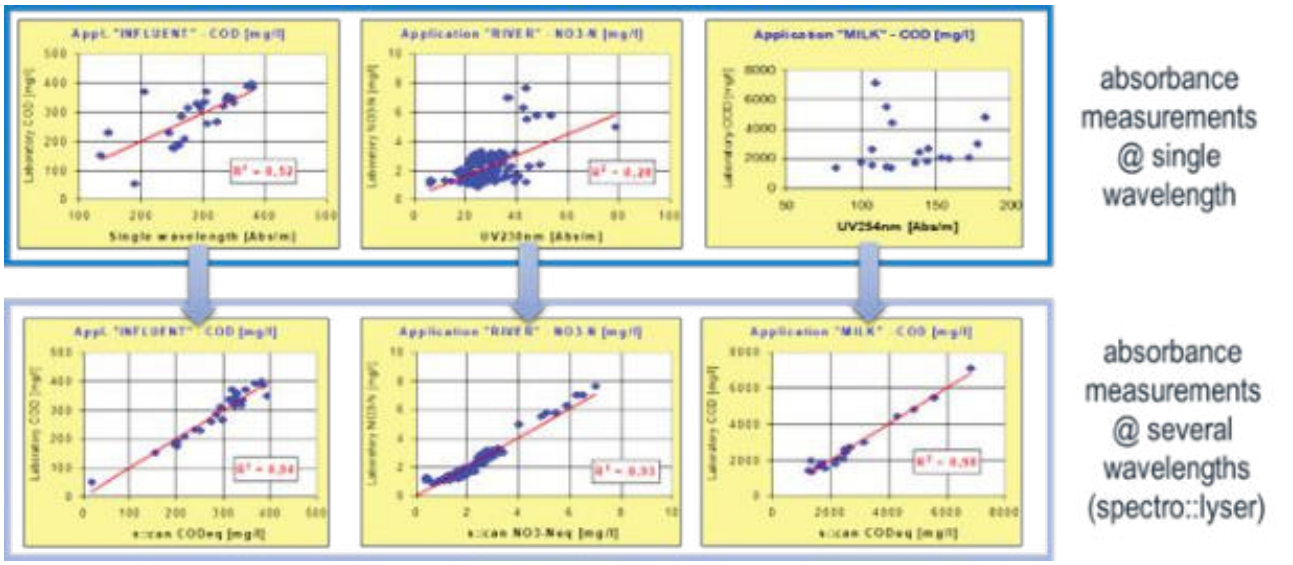
1) MERENJE VELIKOG BROJA PARAMETARA

Veliki broj parametara može se meriti istovremeno, jednom sondom. Ova fleksibilnost takođe omogućava proširenje opsega parametara za buduće primene koje nisu razmatrane u ranoj fazi. Na slici 8 (zaokruženo) su prikazani parametri koji mogu da se mere sa samo jednim Spectro::lyser procesnim analizatorom.

Slika 7. Spektrofotometarski analizator Spectro::lyser V3, S::CAN, Badgermeter



Slika 8. Parametri merenja primenom različitih tipova uređaja Spectro::lyser



Slika 9. Uporedni prikaz rezultata merenja primenom jedne i više talasnih dužina

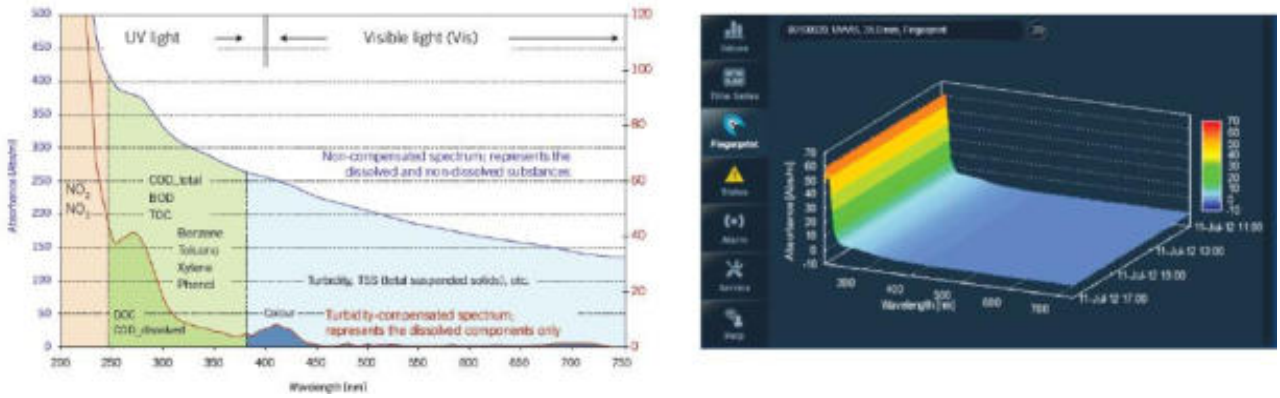
2) STABILNOST MERENJA

Merenje je stabilno i u posebno teškim uslovima i na izazovnim mernim mestima, naročito kod unakrsnih osetljivosti i značajno je preciznije u odnosu na fotometarske sonde. Ponovljivost i stabilnost su neuporedivo bolji u odnosu na uređaje koji imaju detekciju na samo jednoj talasnoj dužini spektra i zbog toga imaju značajno manje rasipanje izmerenih vrednosti parametara (slika 9).

3) DOBIJANJE SPEKTRALNIH PODATKA

Dobijanje spektralnih podatka je moguće i na teškim aplikacijama, koji se dobro poklapaju sa supstancama od interesa. U slučaju velikih promena u sastavu vode, potrebno je samo izvršiti novu kalibraciju. Uređaj Spectro::lyser snima kompletan spektar apsorpcije između 190 i 720 nm (UV-Vis) i razlaže ga na 256 talasnih dužina. Kao rezultat dobijamo specifičan „otisak prsta“ (spektar apsorpcije, slika 10). Koristeći informacije sadržane u „otisku prsta“, prati se više parametara istovremeno i kompenzuju se parametri koji stvaraju potencijalne unakrsne osetljivosti. Uređaj u sebi ima fabrički integrisanu globalnu kalibraciju. Globalna kalibracija je fabrički razvijen kalibracioni model koji se zasniva na velikoj bazi podataka merenja iz različitih lokacija i uzoraka. Ona omogućava da uređaj meri koncentracije parametara (npr. HPK, BPK, TSS, NO_3-N, mutnoća, TOC, HS...) bez potrebe za lokalnim kalibrisanjem (na terenu). Globalne kalibracije izračunavaju koncentracije više parametara iz otiska prsta i dostupne su kao fabrička podešavanja specifična za određenu aplikaciju. Kroz globalne kalibracije svaki korisnik ima koristi od dugogodišnjeg iskustva u aplikacijama sličnim njegovoj i u većini slučajeva nije potrebna lokalna kalibracija na licu mesta.

Korelacijom rezultata merenja dobijenih od strane fabrički kalibrisanog procesnog analizatora sa



Slika 10. Apsorpcioni spektar „otisak prsta“ i prikaz kroz vreme na terminal

laboratorijskim rezultatima, koji se sa SCADA/DCS ili ručno šalju u industrijski računar – terminal koji se nalazi u analizatorskoj stanici i obrađuje signale i kontroliše rad svih procesnih analizatora, u svakoj narednoj iteraciji se postiže značajno unapređena preciznost procesnih merenja. Kvalitet, pouzdanost i ponovljivost procesnih merenja koji se dobijaju primenom ovakvog koncepta je bilo nemoguće postići prethodno dostupnim metodama procesnih merenja.

4) IDENTIFIKACIJA I KVANTIFIKACIJA

Mnoge pojedinačne supstance mogu se identifikovati u odnosu na fluktuirajuće promene u vodenom matriksu i potom kvantifikovati hemometrijskim alatima koji se uopšte ne mogu koristiti sa jednostavnim fotometarskim sondama.

5) RAZLIKOVANJE UKUPNIH I RASTVORENIH SUPSTANCI

Spectro::lyser koristi sofisticirani matematički algoritam koji omogućava razlikovanje ukupnih i rastvorenih supstanci. Ovaj algoritam se takođe može prilagoditi konkretnim potrebama i primenama.

6) SPEKTRALNI ALARM

Spektralni alarm predstavlja sofisticirano rešenje koje omogućava detekciju odstupanja od normalnog sastava vode i obezbeđuje povezani alarmni signal. Ova metoda je priznata i koristi se širom sveta na aplikacijama kao što su alarmiranje na: sistemima za proizvodnju i distribuciju vode za piće, rečnoj vodi i u praćenju industrijskog ispuštanja, što je slučaj na ovom tipu aplikacija.

Slika 11. Analizatorska sonda sa elektrodama za merenje NH4-N i pH – Ammo::lyser, proizvođača S::CAN, Badgermeter

5. ANALIZATORI KVALITETA VODE KOJI KORISTE FIZIČKE ELEKTRODE

Pored spektrofotometarske sonde na analizatorskoj stanici se ugrađuju i fizičke elektrode gde spadaju sve elektrode koje koriste jon senzitivne membrane i elektrohemijski princip merenja. Od fizičkih elektroda na ovoj aplikaciji se najčešće koriste analizatori za merenje pH, elektro-provodnosti i amonijaka. Mogu se koristiti i druge elektrode (kiseonik, redox i druge) u slučaju specifičnih uslova. Merenja sa fizičkim elektrodama predstavljaju standardne metode i primenjuju se veoma dugo. Osnovna prednost sistema koje smo mi primenjivali je to da se sve elektrode povezuju na samo jedan industrijski računar – terminal.

6. SISTEM ZA MERENJE PROTOKA

Za merenje kvantiteta, tj. količine vode koja dolazi na postrojenje, na dolaznim kolektorima se najčešće koriste dva tipa merenja protoka: 1) Protokomeri koji koriste profilisana merna suženja i beskontaktno merenja nivoa i 2) Radarski beskontaktni protokomeri.

6.1. Protokomeri koji koriste profilisana merna suženja i beskontaktno merenje nivoa

Protokomeri koji koriste profilisana merna suženja vrednost protoka dobijaju posredno, putem merenja nivoa i zavisnosti protoka i visine (Q-h kriva) koji su karakteristični za svaki tip profila i nazivne veličine. Merenje protoka putem profilisanih mernih suženja je veoma pouzdano, pod uslovom da su ispoštovani hidraulički uslovi, tj. da su ispoštovane ugradne deonice (minimalno 10D ispred suženja), nagib (od 0,5% do 2% u zavisnosti od tipa mernog suženja) i u slučaju redukcije ili prilikom prelaza sa cevi na pravougaoni profil i dodatne prilazne i izlazne deonice (3D ispred i 2D iza prelaznih deonica), a sve ovo u cilju da bi se obezbedila laminaranost toka, što predstavlja osnovni uslov da bi ova merenja davala dobre rezultate. U praksi često možemo zateći ugrađena profilisana merna suženja gde nisu ispoštovani svi definisani hidraulički uslovi, zbog čega ta merenja daju nepouzdane rezultate i veliku nepreciznost merenja. Osnovni izazov za primenu ovog tipa merenja predstavlja činjenica da je potrebno napraviti objekat – mernu šahtu, što često nije moguće izvesti na terenu, naročito u slučajevima velikih kolektora prečnika od 1m do 5m i kada je već izgrađena kompletna infrastruktura. Pošto je većina kolektora standardno cilindrična ili 2r/3r ovalnog profila, na takvim aplikacijama je najbolje ugraditi Palmer-Bowlus tip profilisanog mernog suženja i to iz dva osnovna razloga: 1)

Slika 12. Palmer-Bowlus profilisano merno suženje integrisano u plastičnu mernu šahtu

Slika 13. Palmer-Bowlus na cevovodu DN300 ugrađeno u betonski prsten prečnika 1000m

Nekada je moguće ugraditi prilagođeno profilisano Palmer-Bowlus merno suženje u već postojeću šahtu, čime se izbegava izgradnja nove merne šahte. 2) U slučaju da se mora napraviti nova merna šahta, na standardnoj cilindričnoj ili 2r/3r ovoidnoj cevi kolektora, Palmer-Bowlus profilisano merno suženje smanjuje ugradbenu deonicu, a samim tim i ceo objekat, za 3 do 5 puta.

Na slici 13 je prikazan primer ugradnje u betonsku šahtu sa baterijskim data logger-om. Slika je napravljena nakon 3 godine od instalacije na lokaciji Grdelica gde merni sistem radi bez napajanja i bilo kakvih intervencija i bezkontktno šalje rezultate merenja nivoa i protoka. Na slikama 12 i 14 su prefabrikovane PEHD merne šahte sa standardnim transmiterima protoka.

Pošto je Palmer-Bowlus profilisano suženje cilindričnog oblika, nije potrebno obezbediti prelazne komade i dodatne prilazne deonice (3D ispred i 2D iza) kao kada se koriste Venturi i Parshall, ili neki drugi pravougaoni tip profilisanog mernog suženja na cilindrićnim ili ovodnim cevima. Dodatni razlozi za primenu Palmer-Bowlus mernih profila leže u činjenici da, zbog svog dizajna, za iste nazivne prečnike imaju veću propusnu moć u odnosu na Venturi i Parshall profile, nemaju problema sa zagušenjima i mogu da mere veoma male (bliske nuli) i veoma velike protoke. Dozvoljajavju od 2 do 4 puta veći nagib ispred mernog mesta u odnosu na pravougaone profile.

Ukoliko je kolektor pravougaonog oblika i ako se ide na merenje protoka putem profilisanog mernog suženja i merenja visine, primenjuje se neko od standardnih pravougaonih mernih suženja a najčešće je to neko od standardnih Venturi ili Parshall profilisanih mernih suženja.

Slika 14. Palmer-Bowlus profilisano merno suženje ugrađeno u prefabrikovanu PEHD mernu šahtu

6.2. Radarski bezkontaktni protokomeri

U praksi se pokazalo da su na dovodnom kolektoru uslovi najčešće takvi da ipak nije moguća ugradnja profilisanih mernih suženja i iz tog razloga se za aplikaciju kontinualnog praćenja kvantiteta otpadnih voda ipak najčešće koristi merni sistemi za beskontaktno merenje protoka i to radarsko dopler merilo protoka. Beskontaktno radarsko merilo protoka se pokazalo izuzetno pouzdano u uslovima rada u kanalizacionim kolektorima. Osnovne prednosti upotrebe ovog tipa merenja su sledeće:

- Ugradnja u postojećim revizionim šahtama: ne mora se praviti novi objekat.
- Pouzdanost: kada se pravilno ugradi i podesi, dugoročno daje izuzetno pouzdane i precizne podatke.
- Robustnost: poseduje potpuno hermetički zaliveno kućište u IP68 zaštiti, što je veoma bitno za rad u uslovima kanalizacionog kolektora i poseduje sistem samodijagnostike sa senzorima pritiska, vlage i temperature unutar kućišta koji šalju alarm u slučaju da bilo koji parametar ima nedozvoljene vrednosti i na taj način štite senzor. Po našem dosadašnjem iskustvu ovi uređaji su se pokazali odlično. Danas imamo značajan broj radarskih merila protoka koje smo ugradili i koji rade bez bilo kakvih problema više od 10 godina u najtežim mogućim uslovima, koji se mogu pojaviti u kanalizacionim kolektorima.
- Samokalibracija: uređaj poseduje funkciju samokalibracije koja eliminiše potrebu za stalnim održavanjem i kalibracijom na terenu. Kontinuirano merenje se vrši pomoću dopler tehnologije, što znači da senzori ne moraju biti potopljeni, što dodatno smanjuje potrebu za stalnim održavanjem jer se uklanja opasnost od zaprljanja senzora i nakupljanja sedimenata.

Na slici 15 je prikazan uređaj Raven-Eye 2, Flowtronic, kao i sam proces ugradnje u oktobru 2025., na dovodnom kolekturu na lokaciji Trg Zemun, Beogradski vodovod i kanalizacija. Ovaj uređaj ima opseg merenja brzina u oba smera od: +/- 0,08m/s do +/- 15m/s, i tačnost merenja od: +/- 0,5% uz nultu stabilnost („*zero stability*“) +/- 0,02m/s u opsegu od 0 do 9m/s u oba smera. Ovaj radar meri protok i na laminarnim i na turbulentnim režimima tečenja. Pri ugradnji ovih uređaja je veoma važno obratiti pažnju na nekada veoma teške uslove ugradnje. Ugradnja ovih tipova merila na velikim kolektorima predstavlja veoma visok rizik u oblasti zdravlja, bezbednosti i zaštite životne sredine („Health, Safety & Environment“ - HSE rizik) i u najvećem broju slučajeva zahteva angažovanje specijalno obučenih radnika za rad na visini (alpinista), kao i primenu sigurnosnih procedura i svih neophodnih mera lične zaštite.

7. INDUSTRIJSKI RAČUNAR - TERMINAL

Osnovna uloga industrijskog računara je da prihvati i obradi sve signale sa procesnih analizatorskih sondi, kako sa procesnog spektrofotometra, tako i sa svih drugih fizičkih elektroda, da prihvati sve podatke sa sistema za merenje protoka (protok, visinu i brzinu) i

Slika 15. Raven-Eye 2. Instalacija na prilaznom kolektoru ispred crpne stanice „Trg“ Zemun, BVK.

sve statuse. Mi na našim projektima koristimo uređaj Con::cube proizvođača S::CAN, Badgermeter. Ovaj uređaj ima veoma napredne performanse i funkcije a ovo su neke od njih:

- Pravljenje vremenskih serija,
- Funkcija spektralne analize,
- Funkcija spektralnih alarma,
- Funkcija „event“ alarma,
- Funkcija validacije merenja (detekcija pogrešnih očitavanja),
- Mogućnost upravljanja i komunikacije do 64 procesna parametra,
- Funkcije automatskog čišćenja elektroda i analizatora,
- Evidentiranje podataka,
- Uzimanje uzoraka i kalibracija uključujući istoriju i kalibraciju u više tačaka,
- Provera funkcije senzora,
- Upravljanje nalozima,
- Ekran u boji, osetljiv na dodir („*touch screen*“),
- IP65 zaštita,
- Odlična funkcionalnost integracije uređaja i senzora putem 0/4-20mA, Modbus RTU/TCP protokola, digitalnih kontakata i releja. Ovo je izuzetno važna funkcionalnost koja omugućava različite načine izvođenja i integracije na različite nadzorne i upravljačke sisteme ili na samostalno funkcionisanje uz IoT funkcionalnosti slanja podataka i alarma.
- Mogućnost prenosa podataka putem USB-a („Universal Serial Bus”),
- Mala potrošnja energije (manje od 3W na mernom intervalu od 15 min) što je veoma bitno u slučaju da ne postoji mogućnost povezivanja na električnu mrežu i kada se napajanje vrši putem solarnih panela.

Slika 16. Industrijski računar – Terminal: Con::cube V3 IoT

- IoT (*Internet of Things*) i M2M (*Machine to Machine*) funkcionalnosti,
- Mogućnost lakog proširenja i nadgradnje ili modifikacije.

Sve navedene funkcije su veoma korisne, a većina njih je i neophodna, naročito na aplikacijama, kada analizatorska stanica radi u automatskom režimu na udaljenoj lokaciji i bez posade. Neophodno je imati sve ove funkcionalnosti da bi proces merenja, slanja podataka na nezavistan ili postojeći SCADA/DCS sistem tekao glatko i sa minimalnim angažovanjem operatera i da bi analizatorska stanica ispunjavala svoju ulogu kontinualnog merenja i slanja alarma i upozorenja.

8. OPREMA ZA KOMUNIKACIJU

Ukoliko postoji kablovska veza između automatske analizatorske stanice i nadzorno upravljačkog sistema to je najbolja opcija i tada se terminal direktno povezuje sa SCADA/DCS. U slučaju da ne postoji kablovska komunikacija neophodno je ostvariti vezu sa nadzornim sistemom, najčešće putem modema. U našoj praksi najviše upotrebljavamo modeme koji podržavaju 4G, 3G i 2G mreže, direktnu vezu između mobilnog ISP-a („*Internet Service Provider*“) i uređaja na LAN-u („*Local Area Network*“), koji imaju mogućnost SMS („*Short Message Service*”) statusa, „SMS” konfiguracije i pozivanja. Modemi se moraju ugraditi sa obe strane tj. i u analizatorskoj stanici i kod servera nadzorno upravljačkog sistema (DCS/SCADA). Pre povezivanja na server upravljačkog sistema, potrebno je instalirati i „*Ethernet Switch*“ čije su glavne funkcije povezivanje različitih uređaja u lokalnoj mreži (u našem slučaju terminal ili RTU/PLC u analizatorskoj stanici direktno ili preko modema sa SCADA/DCS serverom na postrojenju) i omogućavanje međusobne komunikacije, kao i deljenje resursa inteligentnim prosleđivanjem paketa podataka samo na njihovo predviđeno odredište koristeći MAC („*Media Access Control*”) adrese. „*Ethernet Switch*“ pruža brzu i bezbednu lokalnu mrežu, eliminiše kolizije podataka i omogućava istovremenu, dupleks komunikaciju između uređaja.

9. ANALIZATORSKE KUĆICE SA SVIM NEOPHODNIM PODSISTEMIMA

Analizatorska kućica služi da: zaštiti opremu od nepovoljnih vremenskih uslova (kiša, sneg, mraz, hladnoća, vetar, toplota, sunčevo zračenje, …) i od ulaska neovlašćenih lica, obezbedi napajanje svih mernih, upravljačkih i komunikacionih uređaja i pomoćnih sistema koji su neophodni za funkcionisanje procesnih analizatora i merila protoka.

Slika 17. Analizatorskih kućice

Mora biti toplotno izolovana i fizički obezbeđena. Sastavni deo kućice predstavlja elektro-orman koji služi za napajanje uređaja i komunikaciju sa nadzorno-upravljačkim sistemom. Na slici 17 se mogu videti opcije analizatorskih kućica, sa implementiranim mernim suženjima Palmer-Bowlus i sa transmiterima protoka I-SONIC4000, Badgermeter (slika 17, levo i desno gore) i sa Radarskim doplerom Raven-Eye (slika 17, desno gore).

U slučaju kada se primenjuje ugradnja analizatorskih sondi direktno na kolektoru, potrebno je obezbedti njihovu zaštitu od bujičnih nanosa i čvrstih predmeta putem specijalnih zaštitnih rešetki. Pomoćni sistemi koji se koriste u analizatorskoj kućici su sistemi za:

- automatsko čišćenje sondi putem komprimovanog vazduha,
- automatsko mehaničko čišćenje,
- automatsku manipulaciju ventilima za uzorkovanje,
- uzimanje i mehaničku filtraciju uzoraka sa potapajućom muljnom pumpom i
- grejanje i ventilaciju.

10. RTU/PLC (OPCIONO)

Ukoliko postoji zahtev da se na analizatorskoj stanici izvrše određene radnje upravljanja (kao što su otvaranje/zatvaranje tablastih zatvarača ili uključenje/isključenje pumpnih agregata) ili ukoliko je potrebno integrisati opremu kao što su grube rešetke, merila nivoa i protoka na prilaznim kolektorima i drugu oprema, u analizatorsku stanicu je potrebno implementirati i RTU/PLC. Analizatorske stanice komuniciraju sa SCADA/DCS sistemom najčešće preko 2/3/4 G modema i iz tog razloga veoma je bitno da PLC/RTU uređaji, pored standardnih protokola (Modbus, Hart, Fieldbus, Profibus,…), podržavaju i DNP3 protokol, koji predstavlja standard u oblasti daljinskog upravljanja, jer obezbeđuje da u slučaju gubitka komunikacije svi podaci ostanu sačuvani na samom PLC/RTU-u, koji nakon ponovnog uspostavljanja komunikacije sve podatke prosleđuje na SCADA/DCS. Bitne osobine PLC/RTU su i robusnost u pogledu izdržavanja visokih i niskih temperatura, mala potrošnja energije koja dolazi do izražaja ukoliko na lokaciji nema napajanja električnom energijom sa mreže (što je često slučaj) već se vrši preko solarnih panela, kompaktan dizajn, mogućnost daljinske dijagnostike, mogućnost daljinskog programiranja i podešavanja i integrisan „Cybersecurity“ (praksa zaštite sistema, mreža i podataka povezanih na internet od digitalnih napada, neovlašćenog pristupa ili oštećenja). Ovo se postiže primenom autentifikacije, enkripcije komunikacije i VPN („Virtual Private Network“) „tuneller“-a. Na našim projektima najviše koristimo dva tipa RTU/PLC-a koji zadovoljavaju gore navedene funkcionalnosti: 1. ControlEdge 2020 (slika 18), proizvođača Honeywell i 2. Sofrel S4W (slika 19), proizvođača Lacroix Sofrel.

Slika 18. PLC/RTU ControlEdge 2020, Honeywell

ControlEdge 2020 se odlikuje izuzetno kompaktnim dizajnom sa 28 mix IO (Ulazno izlaznih) signala i može se proširivati sa dodatnim karticama sa istim brojem signala. Poseduje sve standardne komunikacione protokole, ima moćan procesor i izdržava temperature od: -45 °C do 75°C. Može raditi u redundantnom režimu (slika 18 desno izgled redundantne izvedbe). RTU/PLC ControlEdge 2020 ima sledeći broj ulaza i izlaza:

- Analogni ulazi: 8
- Analogni izlazi: 2
- Digitalni ulazi: 10
- Digitalni izlazi: 6
- Impulsni ulazi: 2

ControlEdge 2020 se po potrebi može proširiti dodatnim slotovima koji imaju istu konfiguraciju, od 28 mix IO signala, kao i osnovna jedinica.

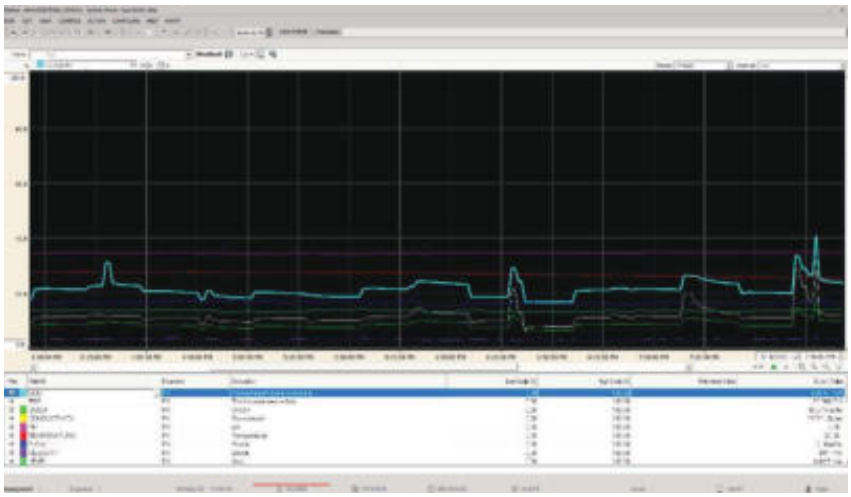
PLC/RTU Sofrel S4W poseduje sve prethodno navedene funkcionalnosti. Često se primenjuje na aplikacijama gde je potrebno da se podaci šalju direktno (i često samo) u „Cloud" (čuvanje, upravljanje i pristupanje podacima preko interneta na udaljenim serverima, umesto na lokalnim računarima ili fizičkim uređajima za skladištenje). Pored toga poseduje funkcionalnosti koje su bitne za telemetriju, sa akcentom na „Cybersecurity" zaštitu podataka i veliki broj predefinisanih blokova za aplikacije u oblasti voda i otpadnih voda. Druga bitna aplikacija kada koristimo Sofrel S4W je onda kada je potrebno integrisati veliki broj signala (do 1000), a da pri tome kontroler zadrži sve funkcionalnosti RTU-a.

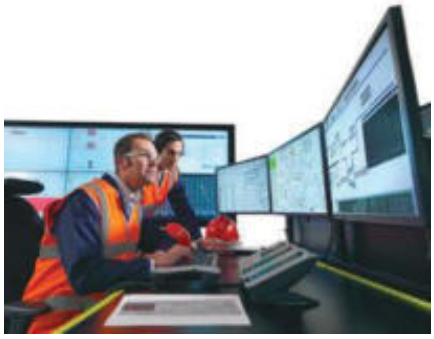
Slika 19. PLC/RTU Sofrel S4W

11. SCADA (OPCIONO)

Obično na postrojenjima za tretman otpadnih voda postoji funkcionalan DCS ili SCADA sistem koji predstavlja poslednji deo sistema za praćenje kvaliteta i kvantiteta otpadnih voda. Svi podaci, koji se dobijaju merenjem i koji se generišu na analizatorskoj stanici, treba da budu vidljivi na stanicama DCS/SCADA sistema na postrojenju, na lokaciji odakle se upravlja procesom ili na „Cloud" aplikaciji tj. na WEB SCADA aplikaciji. Na slici 20 se vidi jedan prikaz trenda podataka sa automatske analizatorske stanice na PPOV Kruševac na SCADA Experion, Honeywell.
Zajedno sa korisnicima je potrebno definisati upravljački narativ kao odgovor na određene ulazne parametre dobijene sa analizatorske stanice. U slučaju upozorenja ili alarma, potrebno je preduzeti korektivne mere na samom postrojenju. U slučaju ekstremnog prekoračenja parametara, potrebno je da se tok skrene u retenzioni bazen i na taj način sačuva oprema i biologija na postrojenju. Proces je moguće automatizovati tako što bi upravljački sistem, nakon dobijanja alarma sa analizatorske stanice, automatski preduzeo sve predefinisane korektivne mere koje je moguće odraditi automatski. Korisnik treba da propiše i interne procedure, kako reagovati kada se dobiju određeni alarmi i/ili upozorenja sa analizatorske stanice. Na projektima na kojima smo implementirali Experion SCADA sistem, na aplikacijama praćenja analizatorskih stanica, mi smo pružali korisnicima i dodatnu funkcionalnost unapređenja energetske efikasnosti - EMS („*Energy Management System*"), jer podaci sa analizatorskih stanica, pored toga što mogu generalno unaprediti rad postrojenja, integracijom na EMS mogu povećati i energetsku efikasnost na PPOV. Da bi funkcionalnost EMS-a na postrojenju bila potpuna, neophodno je da se na sistem integrišu svi bitni parametri sa postrojenja, iz perspektive potrošnje energije a pre svega: proces aeracije, duvaljke, pumpne stanice, automatske rešetke, proizvodnja biogasa i doziranja hemikalija.

Veoma je bitno da implementirani SCADA sistem poseduje „*History Backfill*" (proces popunjavanja istorijskih podataka koji su prethodno nedostajali ili nisu bili dostupni) funkcionalnost, kada ne postoji kablovska veza sa udaljenim stanicama, RTU-ovima i PLC-ovima. „*History Backfill*" funkcionalnost omogućava da se sačuvaju svi podaci, čak i kada dođe





Slika 20. SCADA/EMS Experion, Honeywell - Prikaz trenda podataka sa automatske analizatorske stanice na PPOV Kruševac

do gubitka komunikacije sa udaljenim lokacijama, a što se u praksi često dešava, najčešće zbog problema koji su vezani sa uslugom telekomunikacije.

Dugoročnim beleženjem podataka se ostvaruju preduslovi i za implementaciju softverskih rešenja za dodatno unapređenje rada postrojenja, kao što su: Napredno upravljanje procesom - APC („*Advanced Process Control*“), upravljanje resursima - AM („*Asset Management*“), mašinsko učenje sa predikcijama otkaza i predikcijama nepovoljnih događaja. Ove aplikacije su nekada bile dostupne samo u takozvanim „premijum“ industrijama, kao što su rafinerije ili farmaceutska industrija, ali su napretkom digitalnih tehnologija danas postale dostupne i u oblasti tretmana pitkih i prečišćavanja otpadnih voda.

12. ZAKLJUČAK

Primena automatskih analizatorskih stanica može značajno unaprediti rad PPOV. Njihov rad je potpuno automatizovan i zahteva minimalno angažovanje od strane operatera na postrojenju, koje se pre svega odnosi na povremeno čišćenje finog filma na senzoru multiparametarskog analizatora, što je obično jednom u mesec dana. Osnovna korist koja se postiže primenom automatskih analizatorskih stanica je kontinulano dobijanje parametra kvaliteta i kvantiteta vode u kolektoru u realnom vremenu, pre nego što ona dodje na PPOV, kao i to što implementirano rešenje (sistem) automatski ukazuje na sva prekoračenja parametara od interesa. Sa automatskih analizatorskih stanica dobijamo veliki broj merenih veličina parametara kvaliteta vode, pri čemu su primenom najnovih tehnologija merenja i implementiranog sistema mašinskog učenja u samom mernom sistemu, izmereni parametri postali značajno precizniji, i što je bitnije, pouzdaniji u odnosu na merenja dobijena sa uređaja prethodnih generacija. Multiparametarski analizator ima mnoge prednosti u odnosu na slične uređaje starije generacije kao što su funkcije: spektralne analize, spektralnih alarma, „event“ alarma, validacije merenja i dr. Primenom najnovijih tehnologija u oblasti merenja protoka dobijamo veoma pouzdane i tačne podatke o kvantitetu tj. o protoku, bez obzira na to da li je u kolektoru laminaran ili turbulenti režim tečenja. Kada imamo precizne i pouzdane podatke o kvalitetu i kvantitetu to nam omogućava pravilno sagledavanje uticaja na rad postrojenja, i na osnovu toga preduzimanje mera za optimizaciju rada i preduzimanje preventivnih i korektivnih mera. Implementirano rešenje automatski ukazuje na sve promene u stanju otpadnih voda, čim se one dogode, ukazuje na sve karakteristične pojave i generiše upozorenja i alarme. Ove funkcionalnosti pored toga što omogućavaju da se optimizuje rad PPOV, omogućavaju i da se izbegnu akcidentne situacije. Navedene funkcionalnosti predstavljaju osnovnu kratkoročnu korist primene ovog rešenja koja se dobija odmah nakon implementacije. Kada se uradi integracija na upravljački sistem, tada se proces optimizacije rada postrojenja i preduzimenje preventivnih i korektivnih mera može u velikoj meri automatizovati. Za sve mere, za koje je neophodno angažovanje operatera na postrojenju, potrebno je da korisnik definiše procedure reakcije u slučaju dobijenja određenih tipova alarma i upozorenja sa analizatorske stanice. Za sva preduzeća, koja upravljaju radom PPOV, ali i generalno, veoma je bitno da kada implementiraju upravljačko nadzorni sistem na svojim postrojenjima, obrate posebnu pažnju na to da SCADA ili DCS za koji se odluče budu „otvoreni“ za rad, eventualne izmene i da imaju

dobre mogućnosti integracije sa drugim sistemima i aplikacijama.

Dugoročni benefiti se postižu primenom naprednih softverskih aplikacija koje unapređuju rad postrojenja i koje se nalaze na nivou upravljanja iznad nivoa SCADA-e a kojima je za postizanje odgovarajućih benefita veoma bitno da kontinulano dobijaju podatke sa automatskih analizatorskih stanca. Za primenu ovih aplikacija je veoma bitno da postoji dugoročno beleženje procesnih parametara sa analizatorskih stanica, kao i bitnih procesnih parametara sa postrojenja tj. postojanje „Data Historian" aplikacije koja dugoročno čuva sve procesne podatke i omogućava pristup drugim aplikacijama bez direktne veze sa SCADA-om i potencijalnog uticaja na proces upravljanja. Ovde bismo želeli da istaknemo nekoliko aplikacija za koje smatramo da mogu najbrže da povrate uložena sredstva i da nakon toga donose dugoročnu korist a koje su već implementirane na aplikacijama PPOV: 1) Prediktivno upravljanje i napredna optimizacija procesa APC („Advanced Process Control"). Ovo rešenje se u velikoj meri oslanja na podatake koji se dobijaju sa automtskih analizatorskih stanica. Činjenica je da ovo rešenje zvuči egzotično sa aspekta implementacije u oblasti tretmana pitkih i otpadnih voda, ali pre 10 godina je ovo rešenje bilo egzotično i u oblastima naftne, hemijske, petrohemijske i drugih industrija, da bismo danas došli do toga da teško možemo naći rafineriju ili petrohemiju koja nema implemntirani APC na svim svojim postrojenjima. Naša predikcija je da će se slično desiti i u oblasti tretmana pitkih i otpadnih voda. 2) EMS (Sistem energetskog menadžmenta). Ova je aplikacija koja prati glavne energetske potrošače, različite režima rada u zavisnosti od doba godine i procesnih parametra dobijenih sa postrojenja i automatske analizatorske stanice. Može automatski raditi optimizacije i uštede ili samo davati preporuke. Ovo je dokazano rešenje i može se primeniti u svim oblastima. Mi smo na našim projektima gde smo implementirali EMS koristili podatke sa analizatorskih stanica koji mogu značajno doprineti efikasnom radu ovog rešenja. 3) Planiranje i upravljanje resursima i mašinsko učenje sa predikcijom otkaza ključnih komponenti sistema. Ovde pre svega mislimo na primenu statističkog, odnosno modela učenja iz iskustva. Za sve tri aplikacije su podaci koji se dobijaju sa automatskih analizatorskih stanica veoma bitni za stvaranje modela i postizanje očekivanih rezultata. Za sve tri aplikacije je karakteristično da ne komuniciraju direktno sa upravljačkim sistemom već sa „Data Historian" aplikacijom i zbog toga nema rizika što se tiče potencijalnog negativnog uticaja na upravljanje radom postrojenja. Upravljački sistem eventualno može dobiti određene preporuke i unapred dogovorene ulazne parametere za finu optimizaciju rada postrojenja, koje ne utiču na sigurnost i pouzdanost rada postrojenja. U slučaju eventualne kolizije u upravljačkom narativu SCADA/DCS uvak imaju prednost u odnosu na aplikacije koje rade optimizacije.

Pre implementacije automatskih analizatorskih stanica potrebno je pažljivo sagledati postojeće stanje, razmotriti prednosti i mane potencijalnih lokacije za ugradnju, dobro proceniti i izvršiti pravilan odabir parametara koji će se meriti, tip protokomera i način komunikacije sa nadzorno-upravljačkim sistemom. Sama implementacija zahteva znanja i veštine iz nekoliko raznordnih oblasti, ali kao rezultat se dobija veoma korisno rešenje koje na osnovu do sada dobijenih analiza veoma brzo vraća uložena sredstva korisniku, povećava sigurnost i omogućava optimizaciju rada postrojenja, sprečava akcidentne situacije, smanjuje HSE rizike i negativne uticaje na okolinu.

13. LITERATURA:

1. Badgermeter, Dynasonics. (2025). IS-4000 Open-Channel Flow Meter. Retrived October 10, 2025, from https://badgermeter.widen.net/content/gw15pgfwez/original?download=false&x.app=api
2. Badgermeter, S::can. (2023). Waste Water, Quality Online. Retrived October 10, 2025, from https://badgermeter.widen.net/content/zvezxe5go5/original?download=false&x.app=api
3. Flow-Tronic. (2021). Raven-Eye 2 Non-Contact Radar Flow Measuring System. Retrived October 10, 2025, from https://www.flow-tronic.com/products/downloads/brochures/2021-raven-eye-2-brochure-en-a4.pdf/view
4. Grandić, D. (2024). Postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda, JKP „Vodovod Kruševac". Preuzeto 10. oktobra 2025. sa https://utvsi.com/wp-content/uploads/2024/11/Dragana-Grandic-Aleksic-PPOV-Krusevac-30.10.2024-min.pdf

5. Grandić, D. (2023). *Benefit instalacije analizatorske stanice Kruševac*. Kruševac. JKP „Vodovod Kruševac".
6. Honeywell. (2022). ControlEdge RTU Specification Sheet. Retrived October 10, 2025, from https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/pmt/hps/products/pmc/modular-systems/total-care-remote-services/pmt-hps-ControlEdge-RTU-Specifications-CE03-100-R174.pdf?download=false
7. Honeywell. (2023). Experion HS, Proven and open SCADA platform for operational excellence. Retrived October 10, 2025, from https://process.honeywell.com/content/dam/process/en/documents/downloads/Expeion-HS-03.pdf
8. Lacroix-Sofrel. (2024). SOFREL S4W Range, Telemetry and SCADA 4.0 Remote Terminal Units for Connected and Cybersecured Water Networks. Retrived October 10, 2025, from https://www.lacroix-environment.com/wp-content/uploads/3/2025/02/25/dc68-brochure-sofrel-s4w-en-2024-04-2.pdf
9. O2 Proces Solutions. (2017). Merenje protoka na delimično ispunjenom cevovodu. Preuzeto 10. oktobra 2025. sa https://www.o2ps.rs/wp-content/uploads/2025/10/16.02.2017-palmer-bowlus-rev.01.pdf
10. O2 Proces Solutions. (2017). Merenje protoka na delimično ispunjenom ovoidnom - „Eggshape Pipe" cevovodu. Preuzeto 10. oktobra 2025. sa https://www.o2ps.rs/wp-content/uploads/2025/10/02.03.2017-palmer-bowlus-OVOID.pdf
11. Otašević, D. (2023). *Combining Flow Measurement and Water Quality Monitoring*. Vienna. O2 Process Solutions.
12. Otašević, D. (2023). *Rešenja u industriji - Processing*. Beograd. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Honeywell.
13. Otašević, D. (2020). *Energy Management System*. Beograd. PKS. Honeywell.
14. Otašević, D. (2004). Najnovija dostignuća u merenju protoka na otvorenim kanalima i delimično ispunjenim cevima. *Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad. Zlatibor.* Honeywell.
15. Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje („Sl. glasnik RS", br. 67/11, 48/12 i 01/2016).
16. Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine („Sl. glasnik RS", br. 135/2004, 25/2015 i 109/2021).
17. Zakon o zaštiti životne sredine („Sl. glasnik RS", br. 135/2004, 36/2009, 36/2009 – dr. zakon, 72/2009 - dr. zakon, 43/2011 – odluka US, 14/2016, 76/2018 i 95/2018 – dr. Zakon).

HAWLE Armaturen GmbH

VALMAN d.o.o.
Tel/fax: +381 11 744 6094, +381 11 744 5449, +381 11 744 6684

Bojana VRANEŠEVIĆ

PROGRAMI OBUKE I RAZVOJA KAPACITETA UTVSI

Razmena znanja i sastanak Zajednice praktičara u Subotici

U hotelu „Vila Majur“ u Kelebiji – Subotica, 10. i 11. septembra 2025, uspešno je održana razmena znanja „Jačanje tehničkih kapaciteta JVP/JKP za rad i održavanje sistema otpadnih voda“, u okviru projekta Regionalne mreže za razvoj kapaciteta (RCDN). Događaj je okupio 16 učesnika iz 10 javnih vodovodnih i komunalnih preduzeća iz Srbije: JKP „Raška“ Raška, JKP „Vodovod i kanalizacija“ Kruševac, JKP „Vodovod i kanalizacija“ Kragujevac, JKP „Napredak“ Sokobanja, JKP „Drugi oktobar“ Vršac, JKP „Vodovod“ Leskovac, JP „Standard“ Jagodina, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“ Beograd, JKP „Vodovod“ Valjevo i JKP „Vodovod i kanalizacija“ Subotica. Na skupu su takođe učestvovali predstavnici Švajcarske asocijacije za vode (VSA) – Lukas Bouman, Michael Steiner i Ivan Cammarere, kao i predstavnici GIZ-a (Nemačka organizacija za međunarodnu saradnju) i RCDN-a – Aida Jusufhodžić i Hari Šutoski. Moderator skupa bio je Petar Pižurica, a u ime UTVSI, kao koordinator za obuke Bojana Vranešević.

Dvodnevna razmena znanja bila je posvećena identifikaciji i rešavanju operativnih izazova na postrojenjima za preradu otpadnih voda (PPOV), sa fokusom na tri ključne teme:

- predimenzionisanost postrojenja,
- udari opterećenja industrijskog dotoka i
- optimizacija energetske efikasnosti.

Bojana Vranešević, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo - UTVSI, office@utvsi.com

Događaj je započeo studijskom posetom PPOV Subotica, gde su učesnici imali priliku da razmene iskustva i analiziraju realne izazove u radu postrojenja. Rad je nastavljen u konferencijskoj sali hotela, kroz interaktivne sesije i grupni rad. Drugog dana učesnici su, uz podršku švajcarskih eksperata, analizirali primere dobre prakse i pripremali akcione planove za unapređenje rada sopstvenih postrojenja. Sprovođenje planova, kao što je dogovoreno, učesnici će aktivno pratiti, čime će se obezbediti kontinuitet i odgovornost u radu.

Tokom dva dana učesnici su prošli kroz četiri sesije koje su obuhvatile razmenu iskustava i praktičan rad. Na prvoj sesiji predstavljeno je stanje u sektoru tretmana otpadnih voda u Švajcarskoj, sa fokusom na postrojenje ARAOKT. Razmatrani su izazovi predimenzionisanih postrojenja i značaj prilagođavanja tehnologije sve većim industrijskim opterećenjima. Poseban akcenat stavljen je na obaveze švajcarskih operatera u pogledu uklanjanja mikropolutanata i smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Druga sesija bila je posvećena detaljnom upoznavanju sa radom PPOV Subotica, koji je predstavljen kao primer dobre prakse u Srbiji. Pored tehničkog pregleda svih faza procesa i upravljanja muljem, diskutovalo se o racionalizaciji potrošnje električne energije, izazovima tokom niskih hidrauličkih opterećenja i potrebi za dodatnim smanjenjem koncentracije fosfora zbog osetljivosti jezera Palić.

U nastavku su, kroz rad po grupama, obrađene tri ključne oblasti: energetska efikasnost, udari opterećenja industrijskog dotoka i predimenzionisanost postrojenja. Učesnici su identifikovali probleme poput nedostatka monitoringa, ograničenih kapaciteta laboratorija i nedovoljno razvijene kanalizacione mreže, što u praksi često onemogućava da postrojenja dostignu projektovane performanse.

Završna sesija bila je posvećena izradi akcionih planova za pojedinačna postrojenja. Učesnici su zajedničkim radom definisali kratkoročne i dugoročne mere, uključujući planove za uvođenje solarnih panela u cilju smanjenja potrošnje električne energije, nabavku i zamenu opreme, kao i unapređenje monitoringa industrijskih voda u kolektorima.

Učesnici su posebno bili zadovoljni kvalitetom razmene i znanjem resursnih osoba, kao i mogućnošću da kroz otvorene diskusije svoja iskustva prenesu u podsticajnoj i saradničkoj atmosferi. Kao preporuke za buduće aktivnosti naveli su uključivanje većeg broja operatera, obezbeđivanje više vremena za diskusije, dostupnost dodatnih materijala sa protokolima za postupanje u vanrednim situacijama i nastavak organizovanja razmena i u drugim tematskim oblastima rada i održavanja PPOV.

Zajednica praktičara – oslonac za RAZVOJ SEKTORA

Razmena znanja u Kelebiji realizovana je u okviru redovnih aktivnosti Zajednice praktičara operatera PPOV, koja deluje pri UTVSI. Ideja o formiranju Zajednice razvila se tokom pripreme projekta *Poboljšanje usluga članstva* podržanog od strane RCDN-a, oslanjajući se na iskustva i znanja partnerskih udruženja – Švajcarskog udruženja voda (VSA) i Nemačkog udruženja za vodoprivredu, otpadne vode i otpad (DWA).

Zajednica praktičara predstavlja slobodnu formu udruživanja tehničkih kadrova zaposlenih na PPOV, koji kroz interaktivnu saradnju razmenjuju iskustva, definišu izazove i planiraju aktivnosti. Kroz obuke, mentorski rad i razmenu primera dobre prakse, Zajednica doprinosi unapređenju znanja, donošenju novih rešenja i podizanju kapaciteta sektora.

Od svog osnivanja u januaru 2025. godine, Zajednica praktičara beleži intenzivan rad. Na osnivačkom sastanku, održanom u Privrednoj komori Srbije, izabran je Radni odbor od pet članova predstavnika JKP ViK Kragujevac, JKP BVK - Beograd, JKP ViK Kruševac, JKP „Drugi oktobar" Vršac i JKP Vodovod Leskovac. Na drugom sastanku, održanom u aprilu iste godine u Sokobanji, pripremljen je Akcioni plan Zajednice praktičara za period 2025/2026, a definisane su i teme za napredne razmene znanja među operaterima. Treći sastanak održan je upravo u okviru razmene u Subotici, gde je dodatno potvrđen značaj ovog mehanizma za unapređenje stručnog rada i jačanje profesionalne zajednice.

Zajednički doprinos i budući koraci

Osim što je obezbedila prostor za stručnu diskusiju i razmenu iskustava, ova Razmena znanja dala je značajan doprinos i jačanju kapaciteta UTVSI kao udruženja. Organizacijom događaja prema standardima kvaliteta RCDN-a, Udruženje potvrđuje svoju posvećenost kontinuiranom unapređenju usluga i pružanju podrške članstvu. Učesnici su naglasili da im ovakav format rada omogućava da sagledaju probleme iz različitih perspektiva i pronađu rešenja primenljiva u praksi. Istovremeno, uključivanje međunarodnih partnera dodatno doprinosi osnaživanju sektora, jer iskustva iz Švajcarske i drugih evropskih zemalja služe kao dragoceni orijentir za dalji razvoj.

Održana Razmena znanja i sastanak Zajednice praktičara u Subotici potvrdili su da su zajednički rad, razmena znanja i iskustava, kao i međunarodna saradnja najbolji način da se pronađu održiva i primenljiva rešenja za izazove sa kojima se suočava sektor upravljanja otpadnim vodama.

engineering for
a better world

Dekanter centrifuge GEA...

...Mobilni sistem za tretman mulja

GEA EEC Serbia
Konstantina Jovanovića 10
11080 Beograd, Srbija
Tel : +381 11 4053 722 ,fax :+381 11 4053 618
www.gea.com

UPUTSTVO ZA PRIPREMU RADA
GUIDELINES FOR PREPARING YOUR MANUSCRIPT

1. TEHNIČKA FORMA RADA

Gornju i donju marginu podesiti na 2,0 cm, a levu i desnu marginu na 2,5 cm od ivice lista formata A4. Obim rada je najviše 15 strana. Primenjivati samo jedinice SI sistema. Rezultate prikazivati tabelarno ili grafički, a ne na oba načina. U radu ne treba koristiti zadebljana slova (**bold**).

2. TEKST RADA

Za pripremu teksta koristiti računarski program za obradu teksta MS Word, font Times New Roman sa poravnatom levom i desnom ivicom (*justified*), *Line spacing: single* prored.

- Naslov rada na srpskom jeziku VELIKIM SLOVIMA, font veličine 14 pt
- Navesti puna imena svih autora, font veličine 12 pt. Koristiti * za označavanje autora za korespondenciju.
- Institucije autora navesti ispod spiska imena, font veličine 12 pt. Institucija autora treba biti označena arapskim brojem koji se stavlja kao superskript iza imena, kao i ispred naziva ustanove. Kod autora za korespondenciju, osim institucije, navesti i poštansku adresu i e-mail adresu.
- Rezime na srpskom i engleskom jeziku i ključne reči, font veličine 11 pt
- Naslov rada na engleskom jeziku VELIKIM SLOVIMA, font veličine 12 pt
- Tekst rada, font veličine 12 pt
- Naslovi poglavlja u radu VELIKIM SLOVIMA, font veličine 12 pt
- Naslovi podpoglavlja u radu malim slovima, font veličine 12 pt
- Naslovi slika, tabela i grafikona centrirano, font veličine 12 pt
- Spisak literature, font veličine 12 pt

Između pasusa, teksta i slika, teksta ili tabela ostavljati po jedan prazan red. Naslove poglavlja i podpoglavlja numerisati (1. UVOD, ..., 5. ZAKLJUČAK, 1.1. Primer, itd.)

3. TABELE, SLIKE, DIJAGRAMI

Slike, dijagrami i tabele treba da budu uklopljene u tekst.
Tabele numerisati i dati naslov iznad tabele, Tabela 1. ...
Slike i dijagrame numerisati i dati naslov ispod slike, Slika 1. ...
Ako su u tekstu uklopljene fotografije ili slike ne treba da budu sa rezolucijom manjom od 300 dpi. Kod grafikona (crno belih) na kojima postoje osenčene ili šrafirane površine voditi računa o tome da one moraju biti sa jasnim kontrastima.

4. LITERATURA

U tekstu rada pozivati se na literaturu navođenjem u zagradi prezimena prvog autora rada i godine izdavanja. Na primer: u slučaju da citirani izvor ima samo jednog autora (Milić, 2012), u slučaju citirani izvor ima više autora (Perić i et al., 2018). Na kraju rada navesti spisak citirane literature. Spisak citirane literature dati po abecednom redu prezimena prvog autora. Ako je rad objavila organizacija ili vladina institucija umesto imena autora navesti ime institucije. U popisu literature treba da se nalaze samo izvori koji su korišćeni (citirani) u radu.

4.1 Primer za autorsku knjigu, publikaciju ili monografiju

Ako je referenca na srpskom jeziku:

Dalmacija, B. et al. (2009) *Savremene metode u pripremi vode za piće*. Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet. ISBN 978- 86-7031-222-7

Ako je referenca na engleskom jeziku:

Savić, D. et al. (2005). *Sustainable Water Management Solutions for Large Cities*. International Association of Hydrological Sciences. ISBN 190150297X

4.2 Primer za stručni i naučni rad

Ako je rad na srpskom jeziku:

Tanasković, A. i Ninković-Nikolić, M. (2022) Uticaj mešanja vode iz različitih izvora snabdevanja na oblikovanje buduće strategije upravljanja kvalitetom vode u distributivnom sistemu. *Voda i sanitarna tehnika*, LXII(1), 41-52.

Ako je rad na engleskom jeziku:

Sahu, O. et al. (2014) Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review, *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2397–2413.

4.3 Primer za elektronske reference sa interneta

Ako je referenca na srpskom jeziku:

Živković, B. (2018) Bopal – mic po mic do katastrofe [EKOBLOG]. Preuzeto 1. juna 2021. sa http://ekoblog.info/bopal/?pismo=lat

Ako je referenca na engleskom jeziku:

EPA (2023) Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) - Proposed PFAS National Primary Drinking Water Regulation. Retrived 17. March 2023 from https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas

UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO
UDRUŽENJE VODOVODA I KANALIZACIJE SRBIJE
u saradnji sa
PRIVREDNOM KOMOROM SRBIJE
OPŠTINOM VRNJAČKA BANJA i JP BELIMARKOVAC VRNJAČKA BANJA

55

KONFERENCIJA OTPADNE VODE, KOMUNALNI ČVRSTI OTPAD I OPASAN OTPAD

PRVO OBAVEŠTENJE I POZIV ZA PRIJAVU RADOVA

TEMATSKE OBLASTI

OTPADNE VODE

Upravljanje otpadnim vodama
- Nacionalna regulativa i regulativa EU
- Ekonomski aspekti održivog upravljanja otpadnim vodama
- Monitoring i informacioni sistemi u zaštiti voda
- Resursni pristup u upravljanju otpadnim vodama
- Digitalizacija u održivom tretmanu otpadnih voda

Kvalitet otpadnih voda
- Kvalitet industrijskih otpadnih voda
- Kvalitet komunalnih otpadnih voda
- Organski mikropolutanti u otpadnim vodama
- Uticaj difuznih izvora zagađivanja na kvalitet otpadnih voda

Prečišćavanje otpadnih voda
- Projektovanje i izbor optimalnog rešenja sistema prečišćavanja otpadnih voda
- Fizički, hemijski i biološki procesi u tretmanu otpadnih voda
- Prirodni sistemi prečišćavanja otpadnih voda
- Tretman mulja i rekuperacija resursa
- Upotreba prečišćenih otpadnih voda: zatvaranje ciklusa voda
- Inovativni procesi tretmana
- Ugljenična i energetska neutralnost i emisija gasova staklene bašte

Zajednica praktičara u oblasti otpadnih voda

KOMUNALNI ČVRSTI OTPAD

Integrisano upravljanje otpadom
- Nacionalna regulativa i regulativa EU
- Prevencija, sakupljanje, transport, skladištenje i tretman otpada
- Metode odlaganja, reciklaže i ponovno korišćenje otpada i iskorišćenje energije
- Savremene tehnike tretmana čvrstog otpada
- Sanacija nesanitarnih deponija
- Sanitarne deponije, izgradnja, korišćenje i monitoring
- Cirkularna ekonomija

Upravljanje posebnim tokovima otpada
- Upravljanje otpadnim uljima
- Upravljanje otpadnim gumama
- Upravljanje otpadom od električnih i elektronskih proizvoda
- Upravljanje ambalažom i ambalažnim otpadom

INDUSTRIJSKI I OPASAN OTPAD

- Nacionalna regulativa i regulativa EU
- Industrijski opasan i neopasan otpad
- Valorizacija otpada
- Medicinski i farmaceutski otpad
- Kućni opasan otpad
- Otpad sa perzistentnim zagađujućim materijama (POPs)
- Metode odlaganja i ponovnog iskorišćavanja opasnog otpada
- Označavanje, pakovanje i transport hemikalija i opasnog otpada

01-03. april 2026. **Vrnjačka Banja -Hotel Fontana-** **www.utvsi.com** **office@utvsi.com**

Obaveštenje o prihvatanju apstrakta
29.12.2025.

16.12.2025.
Prijem apstrakata

20.01.2026.
Dostavljanje radova u celini

UPUTSTVO ZA APSTRAKTE

- Apstrakt treba da sadrži do 300 reči i treba da bude pripremljen na srpskom i engleskom jeziku.
- Dodatno apstrakt treba da sadrži imena i prezimena svih autora, institucije autora, e-mail adresu prvog autora i 4-5 ključnih reči.
- Redakcioni odbor Konferencije izvršiće izbor apstrakata i uputiti na pripremu celih radova.
- Ostale informacije biće dostavljene u drugom obaveštenju (visina kotizacije, redosled izlaganja radova, uslovi smeštaja i program stručnih i turističkih ekskurzija).
- Sve dodatne informacije možete dobiti od organizatora Konferencije.

ORGANIZACIONI ODBOR

1. Dušan Stevanović, dipl.inž.tehnol, predsednik o.o, Opština Vrnjačka Banja
2. Dalibor Joknić, dipl. menadž, PKS
3. Dragana Mehandžić, dipl.inž.tehnol, MZŽS
4. Predrag Bogdanović, dipl.inž.građ, UTVSI
5. Dragana Bjeletić Antić, dipl.inž. građ, VIK Pirot
6. Dr Marija Mihajlović – Kostić, dipl.inž.tehnol, JKP BVK
7. Milica Stojković, asistent, TMF Beograd
8. Zorana Petrović, dipl.inž.građ, UTVSI
9. Sonja Milovanović, dipl.ecc, UTVSI

IZVRŠNO-REDAKCIONI ODBOR

1. Prof. dr Milena Bečelić-Tomin, dipl.hem, predsednik, PMF NS
2. Prof. dr Vladana Rajaković-Ognjanović, dipl.inž.tehnol, GF, BG
3. Prof. dr Đurđa Kerkez, dipl.hem, PMF NS
4. Prof dr Vladimir Pavićević, dipl.inž.tehnol, TMF BG
5. Dr Radmila Šerović, dipl.inž.tehnol, SRBATOM
6. Prof. dr Gordana Stefanović, dipl.inž.tehnol, MAŠ. FAK. Niš
7. Prof. dr Ana Popović, dipl.inž.tehnol, POLITEHNIKA BG

Konferencija je namenjena okupljanju i povezivanju operatera, projektanata i konsultanata sa jedne strane sa naučnim istraživačima, proizvođačima i distributerima opreme sa druge strane. Pružiće prostor za ideje i razmenu mišljenja i praktičnih iskustava. Imajući u vidu nove nacionalne programe finansiranja i izgradnje uređaja za prečišćavanje otpadnih voda, programe aktivnosti upravljanja otpadom koji se sprovode na lokalnom i regionalnom nivou u Republici Srbiji, tehnološke opcije i dostignuća koja pronalaze mesto na tržištu kao i nacionalne programe podrške razvoju nauke u oblastima kojima je konferencija posvećena, pozivate se da uzmete učešće u njenom radu i doprinesete još jednom koraku u postizanju održivog razvoja društva u celini.

UDRUŽENJE ZA TEHNOLOGIJU VODE I SANITARNO INŽENJERSTVO
11000 Beograd, Simina 3
Tel. 011/ 322-17-72
Mob.: Svetlana Đurica 064/165 85 79,
Bojana Vranešević 060/606 99 22
e-mail: office@utvsi.com

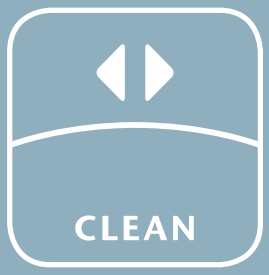
Vidimo se u Vrnjačkoj Banji !

Profesionalna rešenja za održivo upravljanje vodama

ACO. we care for water

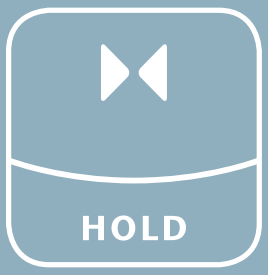
prikupljanje i sprovođenje

- linijsko i tačkasto odvodnjavanje
- poklopci za okna
- odvodnjavanje sportskih objekata
- sanitarno odvodnjavanje
- odvodnjavanje u industriji



upravljanje i prečišćavanje

- separatori naftnih derivata
- separatori masti i skroba
- separatori teških metala
- ostali uređaji za tretman otpadnih voda



zadržavanje i kontrolisanje

- infiltracija
- retenzija
- ventilska okna

odgovorno ispuštanje i ponovna upotreba vode

- prepumpna okna
- prepumpna postrojenja
- regulisanje protoka

ACO građevinski elementi d.o.o.
III Industrijska zona bb, 22314 Krnješevci, Stara Pazova
Tel. +381 22 811 580, Fax +381 22 811 590
Mail: aco@aco.rs, **www.aco.rs**