SAVEZ INŽENJERA I TEHNIČARA SRBIJE

46. MEĐUNARODNA KONFERENCIJA

ZBORNIK RADOVA

VODOVOD I KANALIZACIJA '25

Borsko jezero

07 - 10. oktobar 2025.

Kontinuirani protok, bez zastoja.

ACQ580 frekventni pretvarač za industriju voda

ABB frekventni pretvarači za sisteme vodosnabdevanja i sisteme komunalnih otpadnih voda su specijalno napravljeni da osiguraju kontinuirani protok vode. Specijalno razvijene funkcije pretvarača ACQ580 pouzdano održavaju protok u sistemu i štite vašu opremu čak i u najzahtevnijim uslovima. Bez nepredviđenih zastoja, bez obzira na okolnosti.
www.abb.com/drives

SAVEZ INŽENJERA I TEHNIČARA SRBIJE

46. Međunarodna konferencija

VODOVOD I KANALIZACIJA '25

Zbornik radova

Borsko jezero, Hotel „Jezero“
07 – 10. oktobar 2025.

Izdavač:

Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd

Za izdavača:

Mr Bogdan Vlahović, generalni sekretar

Programski odbor:

V. prof. dr Aleksandar Đukić (predsednik), prof. dr Slaviša Trajković, prof. dr Srđan Kolaković, prof. dr Srđan Rončević, prof. dr Jovan Despotović, prof. dr Dragan Milićević, prof. dr Rada Petrović, Vladimir Milojević, Dušan Đurić, Miodrag Popović, Branimir Sević, dr Zorica Lopičić, dr Dragana Ranđelović, prof. dr Goce Taseski, prof. dr Goran Orašanin, prof. dr Darko Vuksanović, prof. dr Goran Sekulić, prof. dr Vaso Novaković, prof. dr Dragica Čamovska, prof. dr Filip Kokalj i dr Olivera Doklestić

Organizacioni odbor:

Mr Bogdan Vlahović (predsednik), Dalibor Joknić, Nebojša Jakovljević, Nikica Ivić, Živorad Petrović, mr Zoran Pendić, dr Tatjana Šoštarić, dr Dušan Milojkov, dr Jelena Petrović, dr Danijela Smiljanić, Aleksandar Jovanović, Mladen Bugarčić, Zoran Nikolić, Milan Đorđević, Olivera Ćosović MSc, Marijana Mihajlović, Olja Jovičić i Svetlana Gorievski

Recenzenti:

Prof. dr Jovan Despotović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet
Prof. dr Dragan Milićević, Univerzitet u Nišu, Građevinsko arhitektonski fakultet
Prof. dr Rada Petrović, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
Prof. dr Srđan Rončević, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno matematički fakultet
V. prof. dr Aleksandar Đukić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Glavni i odgovorni urednik:

V. prof. dr Aleksandar Đukić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd

Lektura i korektura:

Olivera Ćosović, mast. filol.

Tehnički urednik:

Olja Jovičić, dipl. prav.

Štampa:

Akademska izdanja, Zemun

Ova publikacija je otvorenog pristupa koji se distribuira pod uslovima Creative Commons At- tribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Naslovna strana:

Duden vodopadi, Antalija, Turska

Autor fotografije:

Olivera Ćosović

ISBN: 978-86-82563-34-1

Godina izdavanja: 2025.

Tiraž: 200 primeraka

Stavovi izneti u ovoj publikaciji ne odražavaju nužno stavove izdavača i članova Programskog odbora

ORGANIZATOR:

Savez inženjera i tehničara Srbije

SUORGANIZATORI:

ITNMS - Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd

Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

Prirodno-matematički fakultet – Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine, Novi Sad

Tehnološko-metalurški fakultet – Katedra za neogransku hemijsku tehnologiju, Beograd

Inženjerska akademija Srbije, Beograd

IPIN Institut za primjenjenu geologiju i vodoinženjering, Bijeljina

JKP „Vodovod“, Bor

UZ PODRŠKU:

Inženjerske komore Srbije, Beograd

POD POKROVITELJSTVOM:

Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

628.1/.3(082)

МЕЂУНАРОДНА конференција Водовод и канализација (46 ; 2025 ; Борско

језеро)

Zbornik radova / 46. Međunarodna konferencija Vodovod i kanalizacija '25, Borsko

jezero, 07 – 10. oktobar 2025. ; [organizator] Savez inženjera i tehničara Srbije ... [et

al.]] ; [glavni i odgovorni urednik Aleksandar Đukić]. - Beograd : Savez inženjera i

tehničara Srbije, 2025 (Zemun : Akademska izdanja). - 366 str. : ilustr. ; 25 cm

Teskt ćir. i lat. - Tiraž 200. - Napomene uz radove. - Str. 15-16: Predgovor / Aleksandar

Đukić. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-82563-34-1

a) Водовод -- Зборници b) Канализација -- Зборници v) Отпадне воде -- Зборници

COBISS.SR-ID 176161289

СИТС - САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ
ИСТОРИЈАТ И САДРЖАЈ РАДА

ИСТОРИЈАТ

Корени српске техничке цивилизације почињу још у доба Немањића. Зачеци инжењерства су у рударско-металуршким подухватима (Ново брдо) и грађењу величанствених сакралних објеката средњевековне српске државе.

Од Првог (1804), а посебно Другог српског устанка (1815), оживљава српско градитељство које је нарочито од тридесетих година било везано за изградњу саобраћајница, подизање јавних објеката, уређење вароши, и др.

У то време (1834/35. године) из аустријског царства долазе и први државни службеници – "правителствени инџинири" (Франц Јанке и барон Франц Кордон), а у том веку Србијом је прошло око 600 инжењера.

Започињање наставе на Техничком факултету Велике школе 1863. године значило је прекретницу у школовању српских инжењера. Поред школовања у земљи један број инжењера се школовао и у иностранству.

Истовремено са школовањем првих техничких кадрова јавља се и иницијатива за оснивањем стручне, еснафске организације. Тако већ 3. фебруара 1868. године, само годину дана после предаје кључева града Београда од стране турског паше кнезу Михајлу, долази до оснивања „Техничрске дружине", чији је први председник био Емилијан Јосимовић и тај датум је усвојен као година настанка наше организације. Убрзо затим (1869) оснива се и Удружење за пољску привреду, односно Српско пољопривредно друштво.

Године 1890. долази до оснивања Удружења српских инжењера, а од 1896. инжењера и архитеката.

Прво стручно гласило овог Удружења „Српски технички лист“ изашао је 1890. године.

Први почасни члан Удружења српских инжењера био је Никола Тесла, који је то признање добио за време свог кратког и јединог боравка у Београду 1892. године.

За време Првог светског рата у Солуну излазе два броја „Српског техничког листа” где се иначе налазио велики број инжењера који су били и војници. Ту је 1918. године одржана Скупштина са 463 инжењера.

Удружење је 1932/35. године сопственим средствима, кредитима и добровољним прилозима изградило свој дом у улици Кнеза Милоша 7, а Дом инжењера „Никола Тесла“ ул. Кнеза Милоша 9-11, изграђен је у периоду од 1962. до 1969. године. У ова два дома инжењера смештен је и ради Савез инжењера и техничара Србије са својих 26 републичких струковних и мултидисциплинарних друштава, који се самостално финансирају, од укупно 45 чланица Савеза.

Поред **Емијилана Јосимовића**, првог председника, који је био и ректор Лицеја и Велике школе и почасни члан Српске краљевске академије у раду нашег Савеза учествовали су и дали свој допринос и: **Коста Алковић**, проф. Велике школе, министар грађевина, члан Српског ученог друштва и Српске краљевске академије, **Димитрије Стојановић**, професор Техничког факултета и први директор Српских државних железница, члан Српског ученог друштва и Српске краљевске академије, **Милош Савчић**, министар грађевине Србије, председник града Београда, и познати привредник, који је дао највише средстава 1932. године за подизање Дома инжењера Србије, председници САНУ **Јосиф Панчић** и **Јован Жујовић**, **Симо Лозанић, Кирило Савић, Александар Деспић, Никола Хајдин** и многи други познати стручњаци и научни радници.

САДРЖАЈ РАДА

Савез инжењера и техничара Србије је добровољна, невладина, непрофитна, стручно-научна, интересна, професионална и ванстраначка организација инжењера и техничара и њихових организација у Републици Србији, отворена за сарадњу са другим научно-стручним, привредним и осталим организацијама, на бази међусобног уважавања, узајамног поштовања и самосталности у раду.

Савез инжењера и техничара Србије и његове чланице се самостално финансирају и сасостално финансирају своје стручне активности и издавање стручних публикација.

Циљеви и задаци СИТС-а су:

- окупљање и организовање инжењера и техничара Србије ради остваривања њихових интереса, увећања стручног знања, обезбеђења одговарајућег статуса у заједници, на бази њиховог стручног доприноса у привредном, економском, научно-технолошком и укупном развоју Републике Србије;

- обједињавање, јачање и омасовљавање инжењерско-техничарских организа-ција Србије, развијање међусобне сарадње и сарадње са одговарајућим међународним организацијама инжењера и техничара;
- побољшавање статуса, интереса, угледа и заштите чланова инжењерскотех-ничарске организације Србије и пружање помоћи својим члановима и чланицама;
- развијање свих облика сарадње са другим домаћим и иностраним инжењерским организацијама и асоцијацијама
- пружање помоћи инжењерима и техничарима у научном и стручном усавршавању и организовању одговарајућих облика перманентног образовања;
- праћење савременог развоја технике и технологије и указивање на токове збивања и промене у овој области и давање мишљења о оптималности техничких и технолошких решења при привредним, инвестиционим и другим подухватима;
- неговање и развијање етике инжењерско-техничарског позива, људских права и слобода;
- подстицање, организовање научно-стручних скупова, објављивање научних и стручних радова, издавање часописа и других публикација од интереса за инжењерско-техничарску организацију и техничку интелигенцију;
- организовање конгреса од значаја за струку, који је скуп инжењера и техничара Србије, на коме се разматрају најзначајнија питања из делокруга рада инже-њерско-техничарске организације Србије, развоја привреде, науке, технике и образовања. Конгрес се одржава у складу са могућностима и потребама, о чему одлуку доноси Скупштина СИТС;
- организовање скупова, семинара, курсева, стручних обилазака, изложби, округлих столова и јавних расправа од интереса за локалне самоуправе и за привредне, образовне и здравствене институције;
- организовање континуалне едукације за инжењерске, здравствене и образовне организације у сарадњи и у складу са критеријумима меродавних државних и других институција;
- рад на техничкој регулативи (законима, прописима и стандардима), обезбеђујући њену савременост, адекватност, актуелност и функционалност, а посебно на осавремењавању регулативе за локалне самоуправе;
- разматрање и давање стручних мишљења о програмима, плановима, пројектима, анализама и другим актима важним за развој технике, технологије и производње у Републици Србији, као и судско вештачење;
- организација и одржавање стручних испита у складу са Законом;
- подстицање и помагање оних активности и иницијатива усмерених ка очувању животне средине, водних ресурса и уређењу простора, уштеди и рационализацији потрошње свих врста енергије;
- сарадња са одговарајућим стручним, привредним и другим организацијама и органима на реализацији задатака од заједничког интереса;
- неговање сећања на значајне личности и догађаје из историје инжењерско-техничарских струка, науке и дисциплина;

- управљање Домовима и осталом имовином, извршавање општих, административних, стручних, рачуноводствено-финансијских, техничких и других послова преко Стручне службе Савеза инжењера и техничара Србије у свом интересу, интересу чланова, чланица, запослених и друго.

Савез и чланице Савеза имају развијену сарадњу са органима локалне самоуправе, одговарајућим градским и републичким министарствима и другим органима, Српском академијом наука и уметности, Инжењерском комором Србије, Инжењерском академијом Србије, Привредном комором Србије, са многим предузећима, привредним и стручним асоцијацијама, факултетима и универзитетима и многим другим институцијама. Имамо развијену и одговарајућу међународну сарадњу.

Савез већ дуги низ година на основу Закона и уговора са надлежним републичким министарствима организује и спроводи послове одржавања стручних испита из области инжењерских струка у Републици Србији.

Савез инжењера и техничара Србије – СИТС, данас има више хиљада својих чланова, 45 својих чланица у Србији, и то: 27 чланица на републичком нивоу, струковних савеза различитих инжењерских струка, (архитектура, урбанизам, грађевина, машинство, електротехника, рударство, геологија, геодезија, агрономија, шумарство, хемија и др.), 18 колективних чланице савеза на покрајинском, градском и регионалном нивоу.

Савез је оснивач ИАС – Инжењерске академије Србије. У оквиру Савеза формиран је у 2002. години Развојни центар СИТС-а који ангажује наше научнике и стручњаке на решавању многих текућих и развојних садржаја из области привреде Србије.

Поред бројних периодичних публикација, редовно излази више стручних часописа, међу којима: „Техника“, „КГХ“ (Климатизација, грејање, хлађење), „Изградња“, „Процесна техника“, „Пољопривреда“, „Шумарство“, „Текстилна индустрија“, Ecologica“, „Заштита материјала“ и други.

Савез има своју покретну и непокретну имовину (Домове инжењера у Београду), самостално се финансира, редовно измирује своје обавезе према свим надлежним државним органима и својим добављачима и успешно послује.

Савез инжењера и техничара Србије, као национална инжењерска организација Србије, члан је међународних организација, и то ENGINEERS EUROPE – Европске инжењерске федерације која окупља националне инжењерске асоцијације из 33 земље Европског високобразовног подручја и COPISSE – Стална конференција инжењера Југоисточне Европе.

Корени су давно постављени и евидентни су резултати пређашњег рада. Налазећи инспирацију у прошлим временима сагласно многим и великим променама у свету, а посебно у техници и технологији, Савеза инжењера и техничара Србије и његове чланице у континуитету иновирају свој рад, од интереса за своје чланове, своје чланице, грађане и државу Србију.

S A D R Ž A J

PREDGOVOR 15

Tema 1. Organizacioni i ekonomski aspekti snabdevanja vodom i kanalisanja naselja

Dragan Milićević, Marija Milićević, Rastislav Trajković

Pravo na vodu u Srbiji: sadašnje stanje i perspektive 17

Dejan Dimkić, Maja Pražić, Vladimir Lukić, Nenad Milenković

Postojeće stanje regionalnih vodovodnih sistema u Srbiji i potencijalni razvoj 29

Zoran Pendić, Lara Polak, Marina Strižak, Bojana Jakovljević, Ana Milijić, Željko Marković, Dragana Jovanović

Od rezolucije do realnosti: Kako obezbediti dovoljne količine bezbedne vode za piće za stanovništvo Srbije 43

Siniša Gajin

JKP „VIK“ i mediji – saradnici ili suparnici? 57

Tema 2. Izvorišta i priprema vode za piće

Rad po pozivu

Nela Vujović, Jelena Zarić, Nenad Nikolić, Srđan Stanković, Marija Štulović, Dragana Radovanović, Gvozden Jovanović

Distribucija gvožđa u bušotini RB-6/P 5D i značaj integrisanog istraživanja u vodosnabdevanju 67

Rada Petrović

Spori peščani filtri za 21. vek 77

Zorana Radibratović, Nenad Milenković, Biljana Cakić, Milind Hungund, Siniša Petrić

Tehnološki procesi obrade podzemnih voda primenjeni na Postrojenju za preradu vode u Zrenjaninu 83

Matej Čehovin, Alojz Medic

Primena ozona i UV zračenja za pripremu pijaće vode malih vodovoda – primer iz prakse 93

Milica Kolarski, Tatjana Simčin

Sanacija filterskih polja - efekti sprovedenih radova 99

Ivan Stupić

Akumulacija „Gruža“ – izazovi održivog upravljanja ključnim vodnim resursom.....105

Dragoljub Bajić, Milica Stepanović

Analiza rizika i procena ugroženosti podzemnih voda: slučaj izvorišta „Novoselija“ (Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina).....113

Goran Gavrilović, Trajko Stanić, Zoran Milovanović

Rezultati revitalizacije reni bunara na izvorištu „Brzan“: uticaj na kapacitet i kvalitet vode.....119

Nikola Nikolić, Vaso Novaković

Mogućnost zahvatanja većih količina podzemne vode za vodosnabdijevanje naselja i privrede jugozapadnog dijela Brčko Distrikta, Bosna i Hercegovina.....125

Tema 3. Distribucija i potrošnja vode za piće

Mladen Popov, Dragana Tamindžija, Marijana Kragulj Isakovski, Tajana Simetić, Aleksandra Tubić, Dragan Radnović, Jasmina Agbaba

Uticaj doze dezificijensa na odabrane fizičko-hemijske i mikrobiološke parametre kvaliteta vode.....133

Mirjana Ninković-Nikolić, Aleksandar Tanasković

Uticaj mešanja rečne i podzemne vode na korozivne osobine i kvalitet vode u distributivnoj mreži 141

Aleksandra Porjazoska Kujundziski, Dragica Chamovska

Preventing pipeline scale in thermomineral water systems.....149

Olivera Doklestić

Model funkcionisanja i operacionalizacije vodovodnih sistema u uslovima smanjenog dotoka za sisteme u turističkoj regiji 155

Milica Stanišić

Poboljšanje efikasnosti vodosnabdijevanja zamjenom azbestno-cementnih cjevovoda u Crnoj Gori 163

Marko Babić

Unapređenje vodovodne distributivne mreže u Sokobanji 169

Bojan Ećim

Sistem vodosnabdjevanja „Tomašica“ 179

Dragan Marinović, Svetlana Belošević, Zoran Milićević, Dušanka Marinović, Jovana Belošević

Kvalitet bazenske vode grada Kraljeva 189

Aleksandar Stojanović, Slobodan Stojanović

Ostvarivanje prirubničkih veza u komplikovanim uslovima ugradnje 197

Dejan Kubatov

Pozitivna iskustva JKP „Vodovod“ Bezdan u izgradnji fabrika vode i spajanje vikend naselja na sistem vodosnabdevanja 205

Tema 4. Kanalizacioni sistemi

Aleksandar Đukić, Damjan Ivetić, Ognjen Govedarica, Branislav Babić

Uticaji priliva čistih voda u kanalizaciju na prečišćavanje otpadnih voda 215

Ognjen Govedarica, Marina Škondrić, Filip Stanić, Aleksandar Đukić, Branislava Lekić, Vladana Rajaković-Ognjanović

Prirodom inspirisana rešenja u urbanom odvodnjavanju: mogućnosti i izazovi poroznog popločanja 223

Žarko Sretenović, Lazar Radivojević, Marko Ćurčić, Miodrag Popović

Primena matematičkog modeliranja u planiranju atmosferske kanalizacije - naselja severno od kanala Sebeš 231

Ivan Milojković

Nova varijanta metode za višekriterijumsko odlučivanje FAZI-AHP-VIKOR 241

Željka Ostojić, Strahinja Nikolić, Sanja Marčeta, Nemanja Rak

Studija životnog ciklusa sistema za upravljanje kišnim oticajem 247

Tema 5. Prečišćavanje otpadnih voda

Rad po pozivu

Milena Obradović, Danijela Smiljanić, Marija Marković, Milica Ožegović, Aleksandra Daković

Bentoniti modifikovani surfaktantima u uklanjanju nesteroidnih antiinflamatornih lekova iz voda 257

David Mitrinović, Žarko Sretenović, Predrag Vojt, Marija Popović, Miodrag Popović

Metodologija određivanja ulaznih parametara hidrauličkog i organskog opterećenja PPOV 269

Darko Vuksanović, Jelena Šćepanović, Dragan Radonjić

Analiza uticaja otpadnih voda na površinske vode rijeka Zeta i Morača 277

Dragana Božić, Ljiljana Avramović, Vanja Trifunović, Zoran Stevanović, Emina Požega, Vesna Marjanović, Zoran Avramović

Neutralizacija otpadnih voda dobijenih nakon procesa cementacije 285

Bojana Vujović

Razumevanje mikrobiologije aktivnog mulja – ključ za efikasno upravljanje procesom prečišćavanja otpadnih voda 289

Marija Koprivica, Marija Simić, Jelena Petrović, Marija Ercegović, Jelena Dimitrijević, Ivana Mikavica

Uklanjanje jona teških metala iz vodenih rastvora pomoću ugljeničnih materijala dobijenih iz otpadne biomase 297

Jelena Dimitrijević, Jelena Petrović, Marija Koprivica, Marija Simić, Aleksandar Jovanović, Ivana Mikavica, Sanja Jevtić

Funkcionalni ß-zeolit sa -NH_2 grupama kao visokoefikasan adsorbent za tretman voda kontaminiranih kadmijumom i cinkom 303

Aleksandar Jovanović, Milica Mišić, Jelena Dimitrijević, Dimitrije Anđić, Marija Stojanović, Jelena Petrović, Miroslav Sokić

Fotokatalizovano uklanjanje katjonske boje iz otpadnih voda tekstilne industrije 311

Jovana Blagojević, Goran Orašanin, Budimirka Marinović, Stojan Simić

Energetska efikasnost i optimizacija potrošnje energije u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda 317

Ivana Mitrović, Žarko Nestorović

Vlažna zemljišta kao prirodni prečišćivači otpadnih voda i održivi razvoj 327

Tema 6. Digitalizacija

Stanko Stankov

Koncept Voda 4.0 - budućnost vodovodnog sektora 333

Ognjen Ivić

Projekcija i analiza potrošnje električne energije u vodosnabdevanju naselja Bački Vinogradi korišćenjem istorijskih podataka i modela mašinskog učenja (2022–2024) 345

Marina Pešić, Tanja Petrović

Monitoring kvaliteta vode za piće u Javnom komunalnom preduzeću „Vodovod“ Bor 355

Ivana Dunić

Praćenje mikrobiološkog sastava u pijaćoj vodi u realnom vremenu 361

PREDGOVOR

Nastavljajući dugogodišnju tradiciju, Savez inženjera i tehničara Srbije (SITS) organizuje četrdeset i šestu po redu, godišnju konferenciju o aktuelnim temama iz oblasti snabdevanja vodom za piće i kanalisanja i prečišćavanja otpadnih voda, pod nazivom „Vodovod i kanalizacija ’25“. Suorganizatori Konferencije ove godine su ITNMS - Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina (Beograd), Građevinsko-arhitektonski fakultet (Niš), Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (Beograd), Prirodno-matematički fakultet – Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine (Novi Sad), Tehnološko-metalurški fakultet – Katedra za neorgansku hemijsku tehnologiju (Beograd), Inženjerska akademija Srbije (Beograd), IPIN - Institut za primjenjenu geologiju i vodoinženjering (Bijeljina) i JKP „Vodovod“ Bor.

Konferencija se održava pod pokroviteljstvom Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, uz podršku Inženjerske komore Srbije. Cilj Konferencije je razmatranje aktuelnih istraživačkih, razvojnih, tehničko - tehnoloških, ekonomskih, zakonskih i drugih pitanja iz oblasti snabdevanja vodom i kanalizacije, a sve to sa ciljem boljeg informisanja i ubrzanijeg transfera znanja i iskustava u primeni savremenih dostignuća i rešenja, a sve u cilju poboljšanja u sferi usluga vodosnabdevanja i kanalisanja i unapređenja poslovanja komunalnih preduzeća vodovoda i kanalizacije. Pored stručnih i praktičnih apekata navedene problematike, važnu komponentu ove konferencije čini i prezentacija rezultata naučnoistraživačkog rada u oblasti novih tehnologija i primene novih rešenja u snabdevanju vodom za piće, kanalisanju i prečišćavanju otpadnih voda, kao preduslova za kontinuirani i održivi razvoj ovih delatnosti.

Zbornik radova konferencije „Vodovod i kanalizacija `25“ sadrži ukupno 42 rada, koje je nakon recenzije Programski odbor prihvatio za izlaganje na Konferenciji i štampanje u Zborniku radova. Najveći broj autora radova je iz Srbije a zastupljeni su i radovi autora iz regiona. Radovi su grupisani po sledećim tematskim grupama:

1. ORGANIZACIONI I EKONOMSKI ASPEKTI JAVNIH KOMUNALNIH PREDUZEĆA VODOVODA I KANALIZACIJE

2. IZVORIŠTA I PRIPREMA VODE ZA PIĆE
3. UPRAVLJANJE SISTEMIMA VODOVODA
4. UPRAVLJANJE SISTEMIMA KANALIZACIJE
5. PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA
6. DIGITALIZACIJA

U temi 2 i temi 5 postoje uvodni radovi po pozivu, kako je naznačeno u ovom Zborniku. Kod preostalih radova, po ustaljenom običaju, autori su se sami opredeljivali za teme o kojima će pisati, tako da radovi u ovom Zborniku odslikavaju trenutno stanje i fokus rada i istraživanja u oblastima snabdevanja vodom za piće, kanalisanja i prečišćavanja otpadnih voda u Srbiji i regionu. Od aktuelnih tema koje su našle svoje mesto u radovima ovog Zbornika posebno ističemo problematiku prava na vodu, razvoj regionalnih vodovoda, monitoring kvaliteta vode za piće, ekonomske i tehničke aspekte planiranja i eksplotacije vodovoda i kanalizacije, odvođenje kišnih voda sa saobraćajnica i naselja, nove tehnologije u pripremi vode za piće i prečišćavanju otpadnih voda, merenja u vodovodnim i kanalizacionim sistemima i primenu digitalnih tehnologija i metoda mašinskog učenja u upravljanju sistemima.

Struktura stručnih profila autora je, kao i uvek, raznolika, što odgovara posebnoj težnji SITS da se problemi snabdevanja naselja vodom i kanalisanja i prečišćavanja otpadnih voda posmatraju multidisciplinarno, čime se doprinosi poboljšanju sagledavanja i rešavanja problema. SITS zahvaljuje ovim putem preduzećima i institucijama koje su pomogle održavanje ove Konferencije, recenzentima, članovima Programskog i Organizacionog odbora, kao i autorima radova na uloženom trudu i njihovom stvaralačkom radu u pripremi radova.

Nadamo se i želimo da ovogodišnja konferencija bude plodonosna i da se svi učesnici vrate u svoju sredinu obogaćeni novim saznanjima i kolegijalnim poznanstvima.

UREDNIK
Beograd, septembar 2025. Dr Aleksandar Đukić

Драган Милићевић[1], Марија Милићевић[2]
Растислав Трајковић[3]

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25017M

ПРАВО НА ВОДУ У СРБИЈИ: САДАШЊЕ СТАЊЕ И ПЕРСПЕКТИВЕ

Резиме: Приступ води и санитацији су признати од стране Уједињених нација као људска права фундаментална за здравље, достојанство и просперитет сваког човека и обухваћена су Агендом 2030. Као потписница Агенде 2030 Србија се обавезала на спровођење овог стратешки важног документа, међутим, на основу расположивих података евидентно је да неће испунити зацртане циљеве у погледу доступности и одрживог управљање водом и санитацијом. У овом раду дат је кратак приказ садашњег стања права на воду у Србији и основне активности које би Србија требала да спроведе како би побољшала веома лоше стање у овој области и обезбедила право на воду и санитацију свим својим грађанима.
Кључне речи: водоснабдевање, санитација, право на воду, Агенда 2030, интегрално управљање водним ресурсима.

THE RIGHT TO WATER IN SERBIA: CURRENT STATUS AND PERSPECTIVES

Abstract: Access to water and sanitation have been recognized by the United Nations as human rights fundamental to the health, dignity and prosperity of every person and are included in the 2030 Agenda. As a signatory to the 2030 Agenda, Serbia has committed to implementing this strategically important document, however, based on available data, it is evident that it will not meet the set goals in terms of accessibility and sustainable management of water and sanitation. This paper provides a brief overview of the current state of the right to water in Serbia and the basic activities that Serbia should implement in order to improve the very poor situation in this area and ensure the right to water and sanitation for all its citizens.
Key Words: water supply, sanitation, right to water, Agenda 2030, integrated water resources management.

1. Увод

Приступ води и санитацији су признати од стране Уједињених нација као људска права фундаментална за здравље, достојанство и просперитет сваког човека. Право на

[1] *Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш, dragan.milicevic@-gaf.-ni.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0617-2682:*
[2] *Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш, marija.milicevic@gaf.-ni.ac.rs, ORCID: 0009-0000-8886-2200*
[3] *Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш, rastislav.trajkovic@gaf.-ni.ac.rs, ORCID: 0009-0001-0929-0468:*

воду даје свима право на приступ довољној, безбедној, прихватљивој, физички доступној и приступачној води за личну и кућну употребу. Право на санитацију даје свима право на физички доступан и прихватљив приступ санитацији, у свим сферама живота, која је безбедна, хигијенска, сигурна и друштвено и културно прихватљива и која пружа приватност и осигурава достојанство.

Физичко присуство инфраструктуре није исто што и приступ води и санитацији. Услуга водоснабдевања или санитације не служи целој заједници ако је прескупа, непоуздана, нехигијенска, небезбедно лоцирана, неприлагођена мање способним групама или деци, или није родно сегрегирана, у случају тоалета и умиваоника.

Право на воду и санитацију је обухваћено детаљно и свеобухватно у Агенди за одрживи развој до 2030. године. Циљ одрживог развоја 6 (COR 6) позива на доступност и одрживо управљање водом и санитацијом за све и обухвата 8 подциљева који се прате у односу на 11 индикатора [1].

Као потписница Агенде 2030 и држава чланица Уједињених нација, Србија се обавезала на спровођење овог стратешки важног документа. Међутим, ни скоро десет година откако је Агенда 2030 ступила на снагу у Србији није учињено много у правцу остварења циљева, посебно када је у питању Циљ одрживог развоја 6. На основу расположивих података евидентно је да Србија неће испунити зацртане циљеве у погледу доступности и одрживог управљање водом и санитацијом.

У овом раду дат је кратак приказ садашњег стања права на воду у Србији и основне активности које би Србија требала да спроведе како би побољшала веома лоше стање у овој области и обезбедила право на воду и санитацију свим својим грађанима, као основно људско право.

2. Право на воду

Дефиницију људског права на воду, као једног од кључних права које има огроман значаја за одржавање живота сваке особе Уједињене нације су дале у Међународном пакту о економским, социјалним и културним правима (ICESCR) у Општем коментару 15 (Чл. 11 и 12 Пакта) из 2002. године [2]. У Општем коментару је наведено да „Људско право на воду даје свима право на довољну, безбедну, прихватљиву, физички доступну и приступачну воду за личну и кућну употребу“. [3]

Према Општем коментару 15 право на воду спада у категорију права која гарантују и основа су за обезбеђивање одговарајућег животног стандарда, нарочито због тога што је оно основни услов опстанка и уско је повезано са правом на најбољи могући стандард здравља који је могуће постићи и са правом на одговорајуће становање и исхрану. Такође га треба посматрати у вези са другим правима обезбеђеним Међународном повељом о људским правима, пре свега правом на живот и људско достојанство [3]. У Општем коментару 15 је наведено да обавеза испуњења намеће државама чланицама да усвоје неопходне мере усмерене на потпуно остварење права на воду. Ова обавеза обухвата, између осталог, признање овог права у оквиру домаћег законодавног и политичког система, по могућству имплементације кроз домаће законодавство, усвајајући националну стратегију и акциони план за остварење

овог права; обезбедити да је вода финасијски доступна свима; и и да су системи за воду одрживи и унапређени, посебно у руралним и угроженим урбаним срединама [3].

Тумачења дата у Општем коментару 15 су необавезујућа, али су веома значајна јер су, између осталог дала дефиницију права на воду, нормативни садржај и права и обавезе при његовој имплементацији.

Генерална скупштина Уједињених нација је 2010. године усвојила Резолуцију 64/292 којом се експлицитно препознаје да је право на воду и санитацију основно људско право и исказује да је обезбеђивање воде за пиће од суштинског значаја у остваривању свих људских права [4]. Неки коментари сматрају да је постојање универзалног људског права на воду у Резолуцији Генералне скупштине из 2010. године засновано на основама постављеним у Општем коментару 15. Овом резолуцијом обавезују се земље чланице и међународне организације да обезбеде финансијска средства, људске ресурсе и технологију у обезбеђивању исправне воде за пиће свим земљама, а нарочито онима у развоју [4].

Према препорукама Уједињених нација право на воду за пиће, подразумева неколико аспеката [2]:

- водоснабдевање треба континуирано да обезбеди довољну количину воде по становнику, и то не само воду за пиће, већ и воду за сталне потребе у домаћинству, укључујући припрему хране, прање веша и одржавање личне хигијене,
- право на воду подразумева право на хигијенски исправну воду за пиће, што значи да вода мора да испуњава националне или друге прописане стандарде у погледу микробиолошких, физичких, хемијских и радиолошких особина како би могла да се користи за пиће,
- вода мора да буде прихватљива за корисника у погледу органолептичких особина (мириса, укуса и боје), а и сви објекти за водоснабдевање (од извора, преко цевовода, цистерни и слично) морају бити прихватљиви у погледу изгледа како би се корисници охрабрили да користе воду са њих
- вода мора бити физички лако доступна потрошачима, односно мора бити доступна у непосредној околини, у домаћинству, на радном месту, у образовним, здравственим и другим установама, при чему се такође мора водити рачуна о доступности особама са посебним потребама, деци, старима или женама,
- право на воду подразумева и право на приуштивост, што значи да трошкови водоснабдевања морају бити такви да омогућавају доступност воде и најсиромашнијем становништву, као и да ником не сме бити ускраћен приступ води за пиће чак и ако не поседује средства да је плати [2].

У сусрет новом миленијуму, Уједињене нације су, са жељом да дефинишу фундаменталне вредности на којима треба да почивају међународни односи у 21. веку, у септембру 2000. године усвојиле, Миленијумску декларацију, којом је на основу вредности као што су слобода, једнакост, солидарност, толеранција, поштовање природе и подела одговорности, дефинисано осам циљева за развој читавог света у наредних 15 година, односно до 2015. године [5].

Након истека 15 година, постигнути су значајни резултати на глобалном нивоу и остварен је напредак када су у питању бројни миленијумски циљеви, али ниједан није у потпуности испуњен. Такође, бројни проблеми су остали нерешени јер уопште нису били обухваћени Декларацијом, а у међувремену су настали и многи нови изазови за човечанство [5].

Постало је јасно да је нови стратешки оквир потребан свим земљама света, а не само земљама у развоју и да се економски напредак, благостање људи и очување животне средине убудуће морају ускладити како би се остварио одрживи развој за све. Због тога су лидери земаља чланица Уједињених нација приступили изради свеобухватног документа који је назван „Трансформација нашег света: Агенда за одрживи развој до 2030. године“. Агенда 2030 је усвојена у септембру 2015. године на Самиту о одрживом развоју у Њујорку и сматра се најцеловитијим планом до сада за уклањање екстремног сиромаштва, смањење неједнакости и заштиту планете, узимајући у обзир различите нивое националног развоја и капацитета појединачних земаља [5]. Садржи 17 циљева одрживог развоја (COR) и 169 индикатора који треба да се остваре до 2030. године. Агенда наглашава важност промоције универзалног поштовања људских права и људског достојанства и темељи се на водећим начелима Повеље Уједињених нација и међународног права.

Право на воду у Миленијумској декларацији је обухваћено индиректно и само делимично. У оквиру трећег миленијумског циља: Развој и искорењивање сиромаштва захтева се да се до 2015. године преполови проценат становништва које или нема приступ или не може да приушти исправну пијаћу воду. Глобално гледано, овај циљ је делом испуњен, односно, проценат становништва без одрживог приступа безбедним изворима пијаће воде је преполовљен, међутим део који се односи на смањење пропорције оних који немају приступ основним санитарним условима није достигнут.

За разлику од Миленијумске декларације право на воду је у Агенди 2030 обухваћено детаљно и свеобухватно. Циљ одрживог развоја 6 (COR 6) позива на доступност и одрживо управљање водом и санитацијом за све и обухвата 8 подциљева (6.1 безбедна и приуштива пијаћа вода, 6.2 окончати праксу дефекацију на отвореном и обезбедити санитарне и хигијенске услове, 6.3 унапредити квалитет воде, обраду отпадних вода и безбедну поновну употребу, 6.4 повећати ефикасност коришћења воде и обезбедити снабдевање слатком водом, 6.5 спровести интегрисано управљање водним ресурсима, 6.6. заштитити и обновити водно повезане екосистеме, 6.а проширити подршку земљама у развоју у области водоснабдевања и санитације, 6.б подржати локално учешће у управљању водоснабдевањем и санитацијом) који се прате у односу на 11 индикатора [1].

Слоган Светског дана вода 2019. „Leaving no one Behind“, је адаптација централног обећања Агенде 2030 за одрживи развој: сви морају имати користи од напретка одрживог развоја и мора се настојати да користи прво досегну најзаосталији. Незанемаривање никога укључује значајно смањење броја људи који се суочавају са несташицом воде, како је предвиђено у Циљу одрживог развоја 6.4.

„Вода за све“ промовише право сваког човека на воду и потребу солидарности са људима и друштвима која су маргинализована или игнорисана и имају проблем са

приступом чистој води. Сви људи треба да имају право на приступ чистој води за пиће, за употребу у домаћинству и личну хигијену, чиме се унапређује јавно здравље, стандард становништва и добробит и развој заједница, што је од кључног значаја за одрживи развој и напредак човечанства. Глобално друштво не може даље да напредује док велики број људи широм света живи без чисте воде.

3. Стање Права на воду у Србији

Право на воду и санитацију имплицитно је препознато Уставом Републике Србије, као право на здраву животну средину и на благовремено и потпуно обавештавање о њеном стању [6].

Република Србија подржава, учествује и спроводи заједничке иницијативе Уједињених нација и Светске здравствене организације у областима водоснабдевања, каналисања и промоције хигијене и заштите здравља становништва у вези са водоснабдевањем.

Република Србија је, уз друге државе, допринела креирању Агенде 2030 и развојних приоритета учешћем у националној кампањи Србија какву желим, која је била део глобалне кампање под називом Свет какав желим [5].

Као потписница Агенде 2030 и држава чланица Уједињених нација, Србија се обавезала на спровођење овог стратешки важног документа. Међутим, ни скоро десет година откако је Агенда 2030 ступила на снагу није начинила ни основне кораке у том правцу. Почетни корак ка спровођењу Агенде представља одређивање приоритета за Србију од датих 17 циљева одрживог развоја, у складу с националним контекстом, кроз консултације с великим бројем представника различитих заинтересованих. Тако одређени приоритети треба да се нађу у националном Плану развоја, који Србија још није усвојила. [5] Влада Републике Србије је јуна 2023. године, усвојила Уредбу о поступку припреме Нацрта плана развоја Републике Србије, којом је предвиђено да се посебна пажња посвети равномерном регионалном развоју, као и планирању развоја у складу са Агендом 2030, али Нацрт плана још увек није усвојен.

Да би Србија била у стању да напредује у интегрисању циљева одрживог развоја у најважнија планска документа и документа јавних политика, као и у спровођењу Агенде 2030 и њених циљева, као и мерењу напретка и извештавању о њему, неопходни су стратешки и институционални оквир и институционални капацитети, које Србија не поседује како на националном тако и на локалном нивоу. [5]

Када је у питању ЦОП 6: Обезбеђени санитарни услови и приступ пијаћој води за све кључни стратешки документ у овој области, а који се нарочито односи на спровођење циљане вредности ЦОР 6.3: Унапредити квалитет воде (УН индикатор 6.3.1), ЦОР 6.4: Повећати ефикасност коришћења воде у свим секторима (УН индикатор 6.4.1), и ЦОР 6.5 на свим нивоима је Стратегија управљања водама на територији Републике Србије за период од 2016. до 2034. године. У Стратегији је као главни циљ дефинисано постизање интегралног управљања водама, односно усклађеног водног режима на целој територији Републике Србије и обезбеђење таквог управљања водама којим се постижу максимални економски и социјални ефекти на

правичан и одржив начин и уз уважавање међународних споразума (УН индикатор 6.5.2). Према процени, за развој и ефикасно управљање у сектору вода у наредних 20. година потребно је издвојити 21,7 милијарди евра, од чега улагања за потребе каналисања и заштите вода износе 43% (7,7 млрд. евра) (УН индикатор 6.5.1 и УН индикатор 6.a.1) [7].

У Извештају о напретку у спровођењу Циљева одрживог развоја до 2030. године за 2021. годину [8] и 2023. годину [9] се тврди да је у односу на подциљ 6.1 којим се предвиђа универзалан и једнак приступ безбедној и приуштивој пијаћој води за све остварен умерен напредак до 2021. године, а надаље се бележи стагнација. У погледу коришћења услуга санитације којима се безбедно управља региструје се стагнација у краткорочном оквиру, а негативан тренд у дугорочном и умерено удаљавање од циља. Значајан напредак остварен је код подциља 6.3 којим се предвиђа унапређење квалитета воде смањењем загађења и повећањем удела водних тела која имају добар статус воде, као и смањењем удела непречишћених отпадних вода из домаћинстава и индустрије мерено повећањем популације која је прикључена на третман урбаних отпадних вода са најмање секундарним третманом и у погледу ефикасног коришћења воде, код подциља 6.4.

Расположиви подаци и стање на терену потврђују релативно спор напредак, стагнацију и удаљавање од већине подциљева циља ЦОП 6 Анекса 2030. На основу података Статистичког завода Србије када је у питању подциљ 6.1 којим се предвиђа универзалан и једнак приступ безбедној и приуштивој пијаћој води за све, проценат становништва прикључен на водовод 2015. године био је 84.9% (6,023,980 становника од укупно 7,095,383), а 2023. године 93.7% (6,244,589 становника од укупно 6,664,449). Међутим релативно велики напредак процента становништва прикљученог на водовод од 2015. до 2023. године од 8.8% је нереалан јер су проценти становништва прикљученог на водовод рачунати са актуелним укупним бројем становника, а укупни број становника се у међувремену смањио за око 430,000 хиљада, односно за 6.1% у односу на 2015. годину. Ако се прерачунају проценти становништва прикљученог на водовод за исту основу (укупан број становника 2023. године) добија се знатно скромнији напредак процента становништва прикљученог на водовод од 3.3% [10,11].

Глобалне бројке често прикривају значајне неједнакости међу регионима и између заједница. Тако је проценат становништва прикључен на систем јавног водоснабдевања највећи у Граду Београду у Јужно Бачком, Средње Банатском и Северно Банатском округу, а значајно мањи у Топличком и Браничевском, а затим Поморавском, Златиборском Моравичком, Колубарском, Мачванском и Западно Бачком округу [12].

Као што је већ речено физичко присуство инфраструктуре није исто што и приступ води и санитацији, односно физичка прикљученост становништва на јавне или сеоске водоводе не значи и да становништво има приступ довољној, безбедној, прихватљивој, физички доступној и приступачној води за личну и кућну употребу.

Када је у питању квалитет воде, истраживања показују да значајан број узорака воде узетих из градских и сеоских водоводних система и индивидуалних довода није у складу са Националним стандардима о хигијенској исправности воде за пиће, а најче-

шћи проблем су физичке и хемијске карактеристике воде. Према резултати испитивања исправности воде за пиће из јавних водовода и водних објеката које је извршио Институт за јавно здравље Србије „Др Милан Јовановић Батут” у 2022. у Републици Србији у 25 области укупно је контролисано 2188 јавних водовода и водних објеката (156 јавних водовода градских насеља, 768 јавних водовода сеоских насеља и 1264 водна објекта). На физичко-хемијску исправност укупно је контролисано 93.594 узорка воде за пиће, од којих је 16,9% било неисправно, а на микробиолошку исправност 95.643 узорка воде, од којих је 5,5% било неисправно [13].

Када је у питању приступ води, из године у годину се констатује проблем недостатка воде у летњим месецима у Чачку, Пожеги, Горњем Милановцу, Бору, Пожаревцу, Великом Градишту, Лучанима, Лазаревцу, док је у Кикинди, Зрењанину, Тополи, Лајковцу, Краљеву, Ћуприји и још неким насељима оскудица у води праћена и неодговарајућим квалитетом воде. Проблем несташице воде у летњем периоду имају чак и неки велики градови, у периферним деловима [12]. Иницијатива „Право на воду“ упозорава да је и овог лета Србија жедна. Велика суша, све мањи водостаји и занемарена водна инфраструктура која је у све лошијем стању оставили су десетине градова и села без основног услова за живот – чисте пијаће воде. „Праву на воду“ током јуна, јула и августа 2025. пријављено је 108 локација из свих крајева земље – од севера Војводине до југа Србије. Многи крајеви уопште немају воде, а други већ недељама уводе рестрикције. Грађани јављају о пресушеним бунарима, мутној води, хаваријама на цевоводима и неправди која се осећа приликом сваког одвртања славине и од државе захтевају мере, али се ништа ново не догађа [14].

На основу података Статистичког завода Србије када је у питању подциљ 6.2 којим се предвиђа приступ становништва услугама санитације проценат становништва повезан на канализациони систем 2015. године био је 60.1% (4,264,325 становника од укупно 7,095,383), а 2023. године 69.4% (4,625,128 становника од укупно 6,664,449). Као и код процента становништва прикљученог на водовод релативно велики напредак процента становништва повезан на канализациони систем од 2015. до 2023. године од 9.3% је нереалан због смањења укупног броја становника 2023. године, за око 430,000 хиљада, односно за 6.1% у односу на 2015. годину. Ако се прерачунају проценти становништва повезан на канализациони систем за исту основу (укупан број становника 2023. године) добија се знатно скромнији напредак процента становништва повезаног на канализациони систем од 5.4% [10,11].

Као што је већ речено физичко присуство инфраструктуре није исто што и приступ води и санитацији, односно физичка прикљученост становништва на канализационе системе не значи и да становништво има безбедној, прихватљивој, физички доступној санитацији. Канализациони системи у насељима су грађени пре више десетина година углавном по општем систему и због повећања броја становника и рапидне урбанизације, не могу да задовоље потребе насеља, тако да у великом броју насеља при иоле већим падавинама долази до изливања отпадних вода и плављења објеката уз велике материјалне штете и опасности по здравље грађана.

На основу података Статистичког завода Србије када је у питању подциљ 6.3 којим се предвиђа унапређење квалитета воде смањењем загађења и повећањем удела

водних тела која имају добар статус воде, као и смањењем удела непречишћених отпадних вода из домаћинстава и индустрије проценат становништа обухваћен третманом за пречишћавање отпадних вода 2015. године био је 12.1% (858.541 становника од укупно 7.095.383), а 2023. године 16.4% (1.092.970 становника од укупно 6.664.449). Као и претходно скроман напредак процента становништа обухваћеног третманом за пречишћавање отпадних вода од 2015. до 2023. године од 4.3% је нереалан због смањења укупног броја становника 2023. године, за око 430.000 хиљада, односно за 6.1% у односу на 2015. годину. Ако се прерачунају проценти становништа обухваћеног третманом за пречишћавање отпадних вода за исту основу (укупан број становника 2023. године) добија се још скромнији напредак процента становништа обухваћеног третманом за пречишћавање отпадних вода од 3.5% [10, 11].

Као што је већ речено, на основу расположивих података евидентно је да Србија неће испунити циљеве зацртане Агендом 2030 у погледу доступности и одрживог управљање водом и санитацијом. Поражавајуће је да Србија, уместо да се бар приближи остварењу зацртаних циљева, чак и према Извештајима о напретку у спровођењу Циљева одрживог развоја до 2030. године бележи стагнацију и “умерено” удаљавање од већине подциљева.

4. Пут напред

О узроцима лошег стања у Србији у области снабдевања водом, санитације, заштите водних ресурса и управљању водним ресурсима уопште и активностима за побољшање оваквог стања је много писано, па се овде наводе само неки узроци и активности које аутори сматрају веома значајним:

- Интегрално и одрживо управљање водним ресурсима, које треба да се базира на интегрисању свих расположивих водних ресурса и њиховом рационалном коришћењу за различите кориснике/намене (водоснабдевање становништва, индустрије, наводњавање и др), што је од кључног значаја имајући у виду чињеницу да је Србија једна од водом најсиромашнијих држава Европе, са изузетно неповољним, неравномерним водним режимима. У складу са овом чињеницом сви морају друкчије да се понашају и према води и према простору који је неопходан за развој водопривредних система. На жалост један од кључних проблема Србије, који све више отежава њен развој, али и доводи у питање опстанак у неким подручјима земље, је чињеница да већина становника, планера и доносилаца инвестиционих одлука не схвата ову егистенцијално најважнију чињеницу [15].
- Стварање институционалног и законског оквира за интегрално решавање проблема снабдевања водом, санитације, заштите вода и управљање водним ресурсима уопште усклађено са променама и кретањима у друштву, као и са савременим приступима управљању водама на принципу одрживог развоја. Чињеница да систем у коме је водопривредна делатност била раздељена између неколико министарстава, јавних предузећа и државних агенција, није функционисао и да је довео до катастрофалних резултата у водопривреди, указује на то да би требало формирати јединствено министарство, које би се бавило водопривредом и интегралним управљањем

водних ресурса и јавна предузећа и агенције који ће се бавити стручним а не административним пословима. Од кључног значаја је обезбеђење и рад стручних кадрова у водопривреди, јер су до сада главну реч у институционалном систему водопривреде најчешће водили људи неодговарајућег професионалног профила који недовољно познају водопривредну проблематику, а малобројан стручни кадар је сведен на чиновнике канцеларијског типа. Не мање важно је стварање услова да јавност и сви заинтересовани имају утицај на рад министарства и пратећих предузећа и агенција и увид у њихове активности и последице тих активности.

- Када је у питању стварање законског оквира хитно треба донети нови Закона о водама, као базни документ и пратећа подзаконска акта којима би се дефинисале све делатности у водопривреди и усмеравале активности органа извршне власти и других друштвених субјеката.
- Веома је важно системско превазилажење „централистичког“ одлучивања код планирања и градње крупних инфраструктурних објеката, као и успостављање механизама објективног информисања јавности: шта се и зашто гради, по којој цени, шта су алтернативе, какви су ризици и др. и њеног суштинског ушешћа у процесу одлучивања [15].
- Монополски положај водопривреде пренет је и у сферу одлучивања, тако да су одлуке од стратешког значаја доношене у уском кругу људи, најчешће недовољно стручних и са површним познавањем водопривредне проблематике, а појединци су истовремено ангажовани на више нивоа, па чак и на местима која се међусобно искључују [16]. Проблем су и непотпуно дефинисани стандарди везани за израду и процедуре излагања и оцењивања студија оправданости градње и студија утицаја на животну средину. Досадашњи обим и ефекти реализације водопривредних објеката и система далеко су испод очекиваних, а показало се да су послови градње дуги и скупи, како због нереалних финансијских пројекција, тако и због проблема недефинисаних надлежности и обавеза учесника у градњи и управљању овим системима [15].
- Мониторинг систем и водопривредни информациони систем морају бити функционални, сигурни, једноставни за коришћење и морају обезбедити међусобну комуникацију, као и комуникацију са информационим системима из других области, чиме се стварају услови за доношење адекватних одлука у реалном времену.
- Хаотичном стању у водопривреди значајно је допринело неорганизовано и неодговорно приступање прикупљању, обради и коришћењу података о водним ресурсима и водопривредним објектима. Прикупљање података је сведено на минимум, али су и ти подаци углавном некомплетни или неупотребљиви због недефинисаног методолошког приступа и нивоа обраде, а такође су и недоступни јавности, стручним кадровима и свим другим заинтересованим.
- Реализација јединственог Водопривреног информационог система Србије, који би требао значајно да унапреди прикупљање података и њихову обраду, како би се створили информациони предуслови да се може на оптималан начин управљати свим сегментима водопривредне инфраструктуре, уз извлачење максималних

перформанси из њених интегралних система, већ тридесет година је практично на почетку.

- Треба напоменути да без адекватних података и информатичке подршке и без реализације модула мониторинга и информационог система неће моћи да се оствари оптимално дугорочно планирање и управљање водним ресурсима Србије уз извлачење максималних перформанси из сложених интегралних система.
- Израда стратешких и других докумената на бази реалних података и детаљних анализа природних чинилаца, постојећег и будућег стања у делу коришћења, заштите вода и заштите од воде, процени потреба, креирању приступа, мера и метода за добијање најповољнијих решења, анализи и дефинисању приоритета реализације, итд.
- У претходном периоду стратешки и други документи су рађени на бази непотпуних или претпостављених података, углавном без икаквих озбиљнијих анализа, а њихова израда је поверавана истим институцијама и пројектним тимовима, што је резултирало веома сличним документима препуним теоријских разматрања, дефиниција и образложења, чији је најчешће једини циљ, да замагле лоша понуђена решења и површно познавање водопривредне проблематике. Истовремено кадар, који за ову област постоји, обухвата многе струке и веома уско је специјализован, у потпуности је маргинализован и углавном ван водопривреде.
- Паралелно са претходним активностима неопходно је јачати институције, водопривредна и комунална предузећа на локалном нивоу које се баве водоснабдевањем и санитацијом у смислу развоја кадра, опреме и усаглашавања са европском праксом.
- Усмеравање финансијских средстава на реконструкцију, ревитализацију и доградњу комуналних водоводних мрежа и канализационих система, изградњу постројења за пречишћавање отпадних вода и др.
- Губици у водоводним системима су огромни (просечно на нивоу Србије 40-50%), па би се и само њиховим свођењем у границе стандарда (до 20%), услови водоснабдевања осетно побољшали [15].
- Свуда где постоје повољне могућности, радити на развоју водоводне мреже којом би биле раздвојене пијаћа вода и вода за техничку употребу, чиме би се, на средњи рок, обезбедиле значајне уштеде.
- Имплементација мера штедње воде, примене штедљивих технолиогија и опреме, поновног коришћења воде, сакупљање и коришћење, где год је то могуће, атмосферских вода као техничке воде за заливање, прање површина и слично.

Као потписница Агенде 2030 и држава чланица Уједињених нација држава Србија као носилац дужности треба да обезбеди услуге приступа води и санитацији људима, који су носиоци права. Држава Србија треба да усвоји приступ заснован на људским правима и да гарантује права на воду и санитацију подједнако и без дискриминације.

Приступ заснован на људским правима захтева од држава као носилаца дужности да развију своје капацитете да испуне своје обавезе. Такође ствара оквир за учешће носилаца права и за позивање носилаца дужности на одговорност.

Да би, као носилац дужности, остварила циљеве везане за услуге приступа води и санитацији својим грађанима, држава Србија мора да превазиђене све препреке и да хитно предузме све потребне активности како би остварила значајан напредак у овој области.

У супротном Србији у овој области прети прилично мрачна перспектива. „Криза воде“ која је у Србија већ увелико присутна ће се продубљивати због климатских промена и све чешћих суша, прекомерног загађења водних ресурса, старења водоводних и канализационих система, све чешћих хаварија, повећања губитака итд., тако да ће све већем броју грађана бити ускраћено право на воду и санитацију као основно људско право, а Србија ће бити суочена са драматичним застојем у даљем одрживом развоју у свим областима.

5. Закључак

Приступ води и санитацији су признати од стране Уједињених нација као људска права фундаментална за здравље, достојанство и просперитет сваког човека и обухваћена су Агендом 2030. Као потписница Агенде 2030 и држава чланица Уједињених нација држава Србија се обавезала на спровођење овог стратешки важног документа и треба да обезбеди услуге приступа води и санитацији својим грађанима. Међутим на основу расположивих података евидентно је да Србија неће испунити циљеве зацртане Агендом 2030 у погледу доступности и одрживог управљање водом и санитацијом. Поражавајуће је да Србија, уместо да се бар приближи остварењу зацртаних циљева, чак и према Извештајима о напретку у спровођењу Циљева одрживог развоја до 2030. године бележи стагнацију и „умерено“ удаљавање од већине подциљева.

Ако Србија хитно не предузме мере на решавању проблема снабдевања водом и санитације, не само да велики број грађана неће имати приступ води за личну и кућну употребу и адекватној санитацији и да ће им бити ускраћено прво на воду и санитацију, као основно људско право, већ ће бити угрожен комплетан даљи одрживи развој Србије у свим областима.

Захвалница

Ово истраживање је подржано од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, у оквиру Споразума о финансирању научно-истраживачког рада наставног особља на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу - Регистарски број: 451-03-137/2025-03/200095 од 02.04.2025.

Литература

[1] Čista pijaća voda i bolji sanitarni uslovi, https://sdgs4all.rs/topics/cista-voda-sanitarni-uslovi/

[2] Булат П. Значај обезбеђивања хигијенски исправне воде за пиће. *Водоснабдевање становника брдско-планинских предела,* Српска академија наука и уметности, Београд. 2018:11-8.

[3] Међународни пакт о економским, социјалним и културним правима (ICESCR) у Општем коментару 15 (Чл. 11 и 12 Пакта), https://cref.pars.rs/ujedinjene-nacije/115-un-pakt-esk-prava/opsti-komentari/854-ok-pakt-icescr-15, Приступљено 20.08.2025.

[4] „International Decade for Action 'Water for Life' 2005-2015. Focus Areas: The human right to water and sanitation”. United Nations (на језику: енглески). Приступљено 18.08.2025.

[5] Kako međunarodne organizacije i države oblikuju živote građana?, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

[6] „Resolution 64/292: The human right to water and sanitation”. United Nations. август 2010. Приступљено 18.08.2025.

[7] Србија и Агенда 2030. Мапирање националног стратешког оквира у односу на циљеве одрживог развоја, Влада Републике Србије

[8] Извештај о напретку у остваривању Циљева одрживог развоја до 2030. године у Републици Србији - Извештај за 2021. годину, РГЗ Србије

[9] Извештај о напретку у остваривању Циљева одрживог развоја до 2030. године у Републици Србији - Извештај за 2023. годину, РГЗ Србије

[10] Статистички годишњак Републике Србије 2017., Републички завод за статистику Србије, Београд 2017.

[11] Статистички годишњак Републике Србије 2024., Републички завод за статистику Србије, Београд 2024.

[12] Воде Србије - У времену прилагођавања на климатске промене, Министарство пољопривреде и заштите животне средине, Агенција за заштиту животне средине, 2015.

[13] Извештај о здравственој исправности воде за пиће јавних водовода и водних објеката у републици Србији за 2022. годину, Институт за јавно здравље Србије „Др Милан Јовановић Батут”, Београд, 2023.

[14] Inicijativa Pravo na vodu: Rastuća humanitarna kriza u Srbiji – više od 100 mesta bez vode, https://www.danubeogradu.rs/2025/08/inicijativa-pravo-na-vodu-rastuca-humanitarna-kriza-u-srbiji-vise-od-100-mesta-bez-vode/, Приступљено 22.08.2025. године

[15] Докмановић Петар Б, Никић Зоран Н, Анализа (не)одрживости актуелне стратегије водоснабдевања у Србији, *Техника* вол. 70, бр. 3, 2015, стр. 433-441

[16] Milićević D, Milićević S, Osnovni elementi nove politike voda u Srbiji, *Međunarodna konferencija Pravni aspekti održivog upravljanja vodnim resursima*, Internatioanal Association for Water Law, Center for Energy Petroleum and Mineral Law and Policy - Program for Water Law and Policy, Jugoslovensko udruženje za vodno pravo, Institut za vode Republike Srpske, Teslić, 14-18. maj 2001, Republika Srpska, Collected Papers pp. 319-332, 2001.

Дејан Димкић[1], Маја Пражић[2]
Владимир Лукић[3], Ненад Миленковић[4]

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25029D

ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ РЕГИОНАЛНИХ ВОДОВОДНИХ СИСТЕМА У СРБИЈИ И ПОТЕНЦИЈАЛНИ РАЗВОЈ

Резиме: Водопривредна основа Србије (ВОС) је базни плански документ (усвојен 2002), који је имао за циљ да резервише просторе потенцијалне за будућа значајна изворишта, и који је предвидео 18 Регионалних водоводних система (РВС). Стратегијом управљања водама на територији Републике Србије до 2034. (Стратегија), су поједина решења предложена ВОС-ом, у складу са развојем РВС и новим сазнањима, новелирана. Рад даје приказ постојећег стања РВС и сагледава могуће правце развоја у наредних 20-25 година. За све њих се дају и оквирни економски параметри. Подразумева се да се сва дата решења могућег развоја неће остварити (па вероватно и већина њих у датом периоду), као и да дати списак није коначан, тј. да ће се наметнути и решења која у овом тренутку не фигурирају. Основна идеја рада је да покаже да било која опција развоја РВС није непремостив проблем уз адекватну примену институционално - организационих промена у држави.
Кључне речи: регионални водоводни систем, развој, инвестиција, годишњи трошак

CURRENT STATUS OF REGIONAL WATER SUPPLY SYSTEMS IN SERBIA AND POTENTIAL DEVELOPMENT

Abstract: The Water Master Plan (WMP) of Serbia is a basic planning document (adopted in 2002), which aimed to reserve areas with potential for future significant sources, and which envisaged 18 regional water supply system (RWS). The Water Management Strategy for the Territory of the Republic of Serbia until 2034, amended some of the solutions proposed by the WMP, in accordance with the development and new knowledge. The paper provides an overview of the current state of the RWS and examines possible directions of development in the next 20-25 years. For all of them, approximate economic parameters are also given. It is understood that not all of the given solutions for possible development will be realized (and probably most of them in the given period), and that the given list is not final, i.e. that solutions that are not currently in the picture will also be imposed. The main idea of the paper is to show that any option for developing the RWS is not an insurmountable problem with the adequate implementation of institutional and organizational changes in the State.
Key Words: regional water supply system, development, investment, annual cost

[1] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, dejan.dimkic@jcerni.rs, ORCID: 0000-0003-4994-2683*
[2] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, maja.prazic@jcerni.rs*
[3] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, vladimir.lukic@jcerni.rs*
[4] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ Београд, nenad.milenkovic@jcerni.rs*

1. Увод

Регионални водоводни систем (РВС) је систем који снабдева водом за пиће по једно или више насеља из бар две различите општине.

Падавине су просторно и временски неравномерно распоређене у Србији. Просечно износе 734 mm, годишња евапотранспирација 553 mm, па за отицаје преостаје само 181 mm (око 16 x 10^9 m^3). Најоскудније падавине се бележе у зонама са најквалитетнијим земљишним ресурсима, а најмање су у периодима највећих потреба за водом [1], које су стално и значајно расле до средине '90-их.

Акумулације су један од одговора за унутар годишњу прерасподелу вода, а РВС за просторну, па је значајан број акумулација и РВС изграђено у претходних 60ак година. Климатске промене углавном доприносе повећању присутних водопривредних проблема. Иако потребе за водом у водоснабдевању стагнирају већ 30-ак година, има индиција да ће се укупне потребе за водом, можда и значајно, повећавати, пре свега због повећања потреба за наводњавањем [5].

У таквим условима се јавља потреба за повећаном бригом о заштити и очувању садашњих и потенцијалних изворишта. И у условима потпуне успешности очувања изворишта (што на жалост не ретко није случај), РВС су били и биће неопходни за поједине општине са недовољним водним капацитетима на својим територијама. То је посебно случај за делове земље где је квалитет вода упитан, и где постоји притисак на заузеће појединих изворишта од других (не)привредних субјеката. Са друге стране, услед пре свега демографског негативног тренда, негде се (привремено?) и смањује потреба за РВС [3].

Ови системи су инвестиционо и оперативно захтевни, па је потребно добро, као и до сада углавном, испланирати сваки од њих. Без обзира на потребне инвестиције (већина њих су преузете из пројеката, али се неке у недостатку пројеката дају и релативно грубо), рад претендује да покаже да је изградња РВС могућа и са сопственим средствима у земљи, и не претендује да превише улази у проблематику приоритета или оптимизације између више варијантних решења. Адекватне промене у сектору вода би помогле таквим остварењима. Треба нагласити да и по изградњи РВС, локална изворишта треба задржати барем као резерву и одржавати их у функционалном стању.

2. Приказ планираних и постојећих РВС

Могуће правце развоја РВС дефинисаних у ВОС-у приказује слика 1. Од усвајања ВОС-а прошло је више од 20 година, и данас се сагледава још један број додатних могућности, а већина њих је и дефинисана у Стратегији управљања водама на територији РС до 2034.

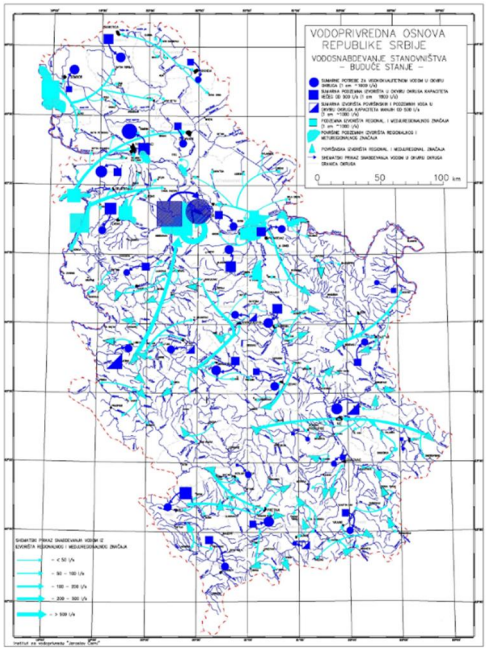
Сви постојећи РВС (слика 2), са својим изворištима, су делови (подсистеми) овако дефинисаних РВС. Поменутих 18 РВС [1] обухватају следеће садашње или потенцијалне системе, реке или акумулације и изворишта подземних вода већа од 50 l/s, као и начелно припадајуће општине (неке могу бити снабдеване и са више РВС):

1. Горње – јужноморавски РВС

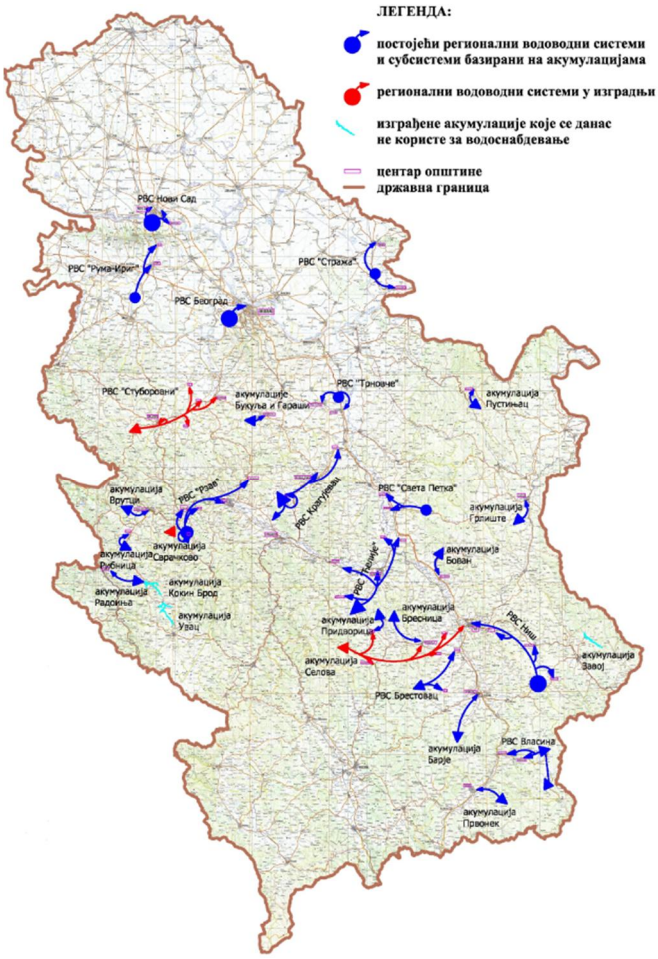
Реке Јужна Морава до Грделице, Пчиња, Јелашница, Божичка, Масурица, Романовска, акумулације „Првонек“ и „Власина“. Обухвата општине: Врање, Бујановац, Прешево, Владичин Хан, Сурдулица, Трговиште и Босилеград. Зачетак овог РВС представља изграђена акумулација „Првонек“ на Бањштици, која за сада снабдева само Врање.

2. Доње - јужноморавски РВС

Река Јужна Морава од Грделице, Моравица, Пуста река, Бресница, Шуманка и Придворичка, акумулације „Бован“, „Селова“, „Ћелије“, „Завој“, „Власина“ и „Барје“, карстна врела Градиште, Крупац и Кавак (Пирот), Студена, Дивљана, Мокра, Крупац и Љуберађа и извориште Медиана. Обухвата општине: Власотинце, Бабушница, Црна Трава, Лесковац, Лебане, Медвеђа, Бојник, Куршумлија, Блаце, Прокупље, Житорађа, Мерошина, Дољевац, Ниш, Нишка Бања, Димитровград, Пирот, Бела Паланка, Гаџин Хан, Алексинац, Сокобања и Ражањ. У оквиру овог РВС изграђене су бројне акумулације: из Власине се стално или повремено снабдевају Сурдулица и Владичин Хан, „Барје“ снабдева Лесковац, са Пусте реке се снабдевају Бојник и Дољевац, а са Бовна Алексинац. При крају је изградња Селове за Топличке општине и Ниш. Велика акумулација „Завој“ на Височици се за сада користи искључиво за производњу струје. Ниш, Бабушнива и делом Бела Паланка добијају воду из РВС кога чине група врела: Љуберађа, Дивљана, Мокра и Крупац.



Слика 1. Планирани РВС (ВОС)
Figure 1. Planned RWS (WMP)



Слика 2. Карта постојећих РВС у Србији
Figure 2. Map of existing RWS in Serbia

3. Западноморавско – рзавски РВС

РВС Рзав, акумулације „Врутци“, „Радоиња“, „Златар“, „Увац“ и „Рибница“, реке Дрина, Пилица, Сеча река, Сељашница, Сопотница, Милелешевка, Грабовица, Турица, Моравица и Ношница, изворишта Скрапешко поље и Бељина, врела Таорско, Сушичко и Зарудине. Обухвата општине: Нова Варош, Прибој, Пријепоље, Сјеница, Ужице, Чајетина, Бајина Башта, Ариље, Пожега, Лучани, Чачак, Горњи Милановац, Ивањица и Косјерић. Из акумулација на Ђетињи и Црном Рзаву се снабдевају Ужице и Чајетина. Фаза I РВС Рзав са преградом на Шевељу и ППВ у Ариљу дистрибуира воду до општина Ариље, Пожега, Лучани, Чачак и Горњи Милановац. У току је изградња бране „Сврачково“.

4. Ибарско – шумадијски РВС

РВС Рзав и Колубара, акумулације „Гружа“, „Гараши“, „Букуља“, „Гоч“, „Градац“ и „Грошница“, реке Студеница, Ресава, Млава, Лопатница, Људска река, Самоковка, Брвеница и Видрењак, алувијално изворište Брзан, Жичко поље и Конарево, алувијон Западне Мораве, врело Рашке. Обухвата општине: Крагујевац, Кнић, Баточина, Лапово, Рача, Топола, Аранђеловац, Краљево, Врњачка Бања, Рашка, Нови Пазар и Тутин. Ово је централни РВС у Србији. Он се граничи са неколико других, и многе од општина овог система могу бити и део неког од суседних РВС. Окосница је данашњи Крагујевачки систем, који снабдева општине Крагујевац, Кнић и Баточина. Лапово и Рача су граничне општине према Млавско-моравском РВС, док су Топола и Аранђеловац на северу овог подручја, као и општине Краљево, Врњачка Бања, Рашка, Нови Пазар и Тутин на југу овог подручја, општине које се могу бити и део Западноморавско-Рзавског РВС. Трстеник је гранична општина према Расинско-Поморавском РВС.

5. Расинско – поморавски РВС

РВС Ћелије, Крагујевац, Ресава и Црница, акумулација „Бован“, алувијална изворишта Звездан, Старо корито, Прњавор, Перкићево и Рибаре, карстни извор Света Петка. Обухвата општине: Крушевац, Александровац, Брус, Трстеник, Ћићевац, Варварин, Јагодина, Ћуприја, Параћин, Деспотовац, Свилајнац и Рековац. Из акумулације Ћелије се снабдевају насеља у општинама Крушевац, Александровац, Ћићевац, а потенцијално и Варварин и Трстеник, док се са извора Света Петка снабдевају Параћин и Ћуприја.

6. Тимочки РВС

РВС Боговина, акумулација „Грлиште“, врело Мрљиш и Сињи вир, алувијална изворишта Коначе, Царине и изворište Песак, Злотска, Околишка и Алдиначка река. Обухвата снабдевање општина: Бор, Зајечар, Бољевац, Неготин, Књажевац, Сврљиг и Кладово. Изграђена је акумулација „Грлиште“, која се може сматрати почетком Тимочког РВС, која за сада снабдева само Зајечар са водом. Касније су урађени бунари на Мрљишу одакле се снабдевају насеља у општинама Бор и Бољевац. Разматрана је пројектно и акумулација „Боговина“ на Црном Тимоку.

7. Млавско – моравски РВС

Изворишта Трновче, Шалинац и Кључ, врело Шетоње, акумулација „Пустињац“, реке Дунав, Млава, Пек, Морава, Ресава и Буковска река. Обухвата снабдевање општина: Петровац, Мало Црниће, Пожаревац, Жабари, Велика Плана, Смедеревска Паланка, Смедерево, Гроцка, Велико Градиште, Голубац, Кучево, Жагубица и Мајданпек. Општине Велика Плана и Смедеревска Паланка се снабдевају са изворишта Трновче, и то представља почетак Млавско-моравског РВС.

8. Колубарски РВС

РВС Рзав и Колубара, акумулација „Орловача“, изворишта Пештан и Непричава, врело Пакље и река Градац. Обухвата општине: Ваљево, Мионица, Лајковац, Лазаревац, Уб, и Љиг. Лазаревац и Лајковац се снабдевају са изворишта Непричава, и то се

може сматрати почетком Колубарског РВС. Изграђена је брана Стуборовни, али не и регионални систем.

9. Савско – београдски РВС

РВС БВК, извориште Виђ баре, акумулација „Орловача“, реке Дунав, Сава и Дрина, група изворишта (Младеновац). Обухвата снабдевање града Београда: БВК (општине Барајево, Вождовац, Врачар, Звездара, Земун, Нови Београд, Палилула, Раковица, Савски Венац, Стари Град, Сурчин, Чукарица), Сопот, Младеновац и Обреновац. Поред данас прикључених општина (језгро града + пар периферних општина/насеља), предвиђено је прикључење и делова општина Гроцка, Младеновац, Обреновац и Сопот на РВС БВК.

10. Мачвански РВС

Мачвански и Колубарски РВС, алувијална изворишта Зеленица, Горње поље, Табановић и Мали Забран, извориште у моћном алувијону Дрине, реке Дрина и Љубовиђа. Обухвата општине: Шабац, Богатић, Лозница, Мали Зворник, Крупањ, Осечина, Љубовија, Владимирци и Коцељева. Већина општина задовољава своје потребе на локалу, али повезивање појединих насеља већ постоји, и развијаће се. Дрински алувијон је „златна резерва“ за велике потрошаче на ширем подручју (град Београд, делови Војводине).

11. Сремски РВС

РВС Источни Срем, Западни Срем и Рума-Ириг, БВК, изворишта Сава I, Фишеров салаш, Стара Пазова, Шид, Сремска Митровица, Инђија и Јамена-Лаћарак, реке Дунав и Дрина. Обухвата општине: Шид, Сремска Митровица, Рума, Ириг, Пећинци, Инђија и Стара Пазова. Зачетак Сремског РВС је подсистем Рума – Ириг. Мимо њега ВС Сремске Митровице већ прелази општинске границе, а пројектно је у више наврата разматран и подсистем Источни Срем за општине Пећинци, Инђија, Стара Пазова и град Београд.

12. Новосадски РВС

РВС Новог Сада, Западнобачки и Банатски, изворишта Ратно острво, Штранд, Петроварадинска ада, Јамена-Лаћарак и Книћанин-Чента, реке Дунав, Дрина и Тиса. Обухвата општине: Бачка Паланка, Бачки Петровац, Беочин, град Нови Сад, Сремски Карловац, Жабаљ, Темерин, и Тител. Новосадски РВС данас обухвата град Нови Сад са Петроварадином и општину Сремске Карловце.

13. Бачки РВС

РВС Новог Сада и Западнобачки, изворишта Апатин, Водозахват I и II, Јамена-Лаћарак, Јарош, Кула, Книћанин-Чента, Водозахват и Врбас, реке Дунав и Тиса, источни обод Телечке. Обухвата општине: Апатин, Сомбор, Оџаци, Бач, Кула, Мали Иђош, Бачка Топола, Врбас, Србобран, Бечеј и Нови Бечеј. Водоводни системи су још у општинским границама. Али овај регион има и потребе и потенцијал за формирање РВС.

14. Горње – тишки РВС

РВС Банатски и Западнобачки, алувијално изворište Книћанин-Чента, реке Дунав и Тиса, источни обод Телечке. Обухвата општине: Суботица, Кањижа, Нови Кнежевац, Сента, Чока, Ада, Кикинда и Нова Црња. Данас су то системи појединачних насеља, који се понегде проширују на општински ниво. Временом ће се можда повезивати у РВС.

15. Јужнобанатски РВС

РВС Новог Сада и Банатски, БВК, изворište Книћанин-Чента, Михајловачка, Стража, Шумице, Павлиш, Ковин, Панчевачки рит, Сибница и Градска шума, реке Дунав, Дрина и Тиса, Порпорањ, југоисточни Банат. Обухвата општине: Ковин, Панчево, Опово, Ковачица, Алибунар, Вршац, Пландиште, Бела Црква, Зрењанин, Житиште и Сечањ. Овај потенцијални РВС би могао обухватити општине Кикинда, Нова Црња, Нови Бечеј, Зрењанин, Житиште, Сечањ, Опово, Ковачица, Алибунар, Пландиште, Вршац, Бела Црква, Ковин и Панчево. Укупан број становника у општинама које би могао да обухвата овај РВС је до око 500.000, зависно од броја општина. Обзиром на форсирање ППВ за општине Зрењанин и Кикинда, питање је како ће се развијати овај систем. Већина места овог подручја има сирову воду која не задовољава МДК воде за пиће.

16. Метохијски РВС

Пруе-Д. Бистрица, Шарске воде, река Бели Дрим и Призренска Бистрица.

17. Приштинско-митровачки РВС

Реке Ибар, Бели Дрим, Грачанка и акумулација Батлава.

18. Јужнокосовско-биначки РВС

Река Лепенац, Крива и Прилепница.

Ниједан РВС није комплетиран (неки нису ни започети), из више разлога (стагнација у потребама за водом, економски разлози, инсистирање на локалним решењима, …). До сада изграђени РВС су делови неког од предвиђених 18 регионалних система. Списак припадајућих општина једном РВС није обавезно исти са управним окрузима (иако у већини случајева јесте), а сходно околностима на терену и расположивости изворишта вода. Један, не мали број општина које су сврстане у неки од назначених РВС (као вероватно/могуће дугорочно решење) могу у стварности и постати део другог-суседног РВС, или бити снабдевене са две стране (припадати у два РВС).

3. Приказ садашњих проблема у снабдевању водом чије решавање на општинском нивоу је дискутабилно

Генерално говорећи, недостатак воде се највише осећа у Шумадији и југоисточним деловима Србије, док је проблем квалитета најизраженији у Војводини и Поморављу. Мањак воде је најчешће узрокован природном ограниченошћу ресурса подземних вода и неизграђености адекватних алтернативних решења на површинским

водама, уз понегде и повећаним потребама за водом. Додатно се јавља и проблем опадања капацитета ресурса услед климатских промена, што се највише осећа у источној и југоисточној Србији. Код неких општина са недовољним количинама воде у појединим деловима године узрок мањка воде је и у коришћењу (или посредном утицају) истог ресурса између различитих корисника (примери Сурдулице и Владичиног Хана где се за водоснабдевање користе објекти примарно изграђени за потребе енергетског система, или смањење капацитета једног броја алувијалних изворишта у долини Велике Мораве услед претеране експлоатације шљунка, или тежња ка заузећу/угрожавању делова изворишног простора – пример делова БВК), док је код неких других неоправдано висок степен губитака у систему (посебно проблематични поједини главни доводи воде – примери Алексинца, Бојника, Бољевца, пре санације и Књажевца).

Општине са недостатком воде за пиће услед наведених разлога, поред осталих, су: Нови Сад, Инђија, Стара Пазова, Младеновац, Лазаревац, Лајковац, Коцељево, пет општина Рзавског РВС, Љиг, Топола, Лапово, Рача, Ћуприја, Сокобања, Ражањ, Ниш, Лебане, Медвеђа, Сурдулица, Владичин Хан, Прешево, Пријепоље, Нови Пазар, Тутин, Краљево, Врњачка Бања, и пар других. Списак општина са недовољним количинама воде за пиће данас би био осетно обимнији да није (на жалост) негативног демографског тренда, који утиче да потребе за водом у домену водоснабдевања углавном стагнирају или се смањују.

Проблем недостатка ресурса услед лошег квалитета сирове воде се дешава услед антропогеног утицаја или природног квалитета сирове воде. Антропогени утицај се осећа највише кроз присуство азотне компоненте (нитрати и нитрити) у већини алувијалних изворишта са екстензивном пољопривредном производњом у непосредној близини. То су подручја у долини Велике Мораве, Мачве и на пар других локалитета. Еутрофикација вештачких језера је други значајан вид доминантно антропогеног утицаја који се јавља када се стекну потребни услови у акумулацији. Проблем природно лошег квалитета сирове воде је најизраженији у Војводини, у централном и северном Банату и у већем делу Бачке. Решавање питања снабдевања овог, северног дела наше земље је посебно сложено – чак и у стручним круговима постоје различита виђења, а на локалном нивоу преовлађују (не оправдане?) жеље ка локалним решењима.

Имајући у виду постојање неколико значајних квалитетних обновљивих локалитета у алувијонима Дунава и Саве, и да у Војводини на многим местима постоји озбиљан проблем опадања нивоа подземних вода на локалним изворištима, као и да ће се захватање вода за потребе наводњавања повећавати, решења са РВС у Војводини су извесно добра. Као главни аргумент против њих може се чути да су то високе инвестиције. Међутим, детаљна анализа такве инвестиције и суме инвестиција за решавање на локалном нивоу, показује да су оне сличне. Притом, сведоци смо да је за неке сирове воде овог подручја било потребно јако пуно времена да се нађе одговарајућа технологија за довођење сирове воде до квалитета воде за пиће. Сигурност у погледу трајнијег решавања питања вода овог подручја извесно фаворизује изградњу регионалних водоводних система. То се, у овом тренутку (након вероватно решавања

пречишћавања вода у већим Банатским општинама), посебно односи на Бачку, а онда и у значајној мери и на (источни) Срем и делове Баната.

4. Приказ потенцијалних РВС у ближој будућности

Табела 1 даје приказ оцене могућег развоја РВС (подразумева доградњу постојећих и изградњу нових) у Србији без КиМ у ближој будућности (наредних 20-25 година), кроз оцену опције која се чини максималном за овај период. Притом, поред система или доградње регионалних система који снабдевају две или више општина, списку је придодат и један број решења који су ширег општинског – потенцијално и регионалног карактера (писани *Italic* фонтом).

Јасно је да се сва ова потенцијална решења неће реализовати, поготову не сва у наредних 20-25 година. Нека од њих имају врло велику вероватноћу остварења, док друга имају средњу или малу. Иако је вероватно изостављено у горњем списку понеко регионално решење за којим ће се јавити потреба у ближој будућности, извесно је да ће потребна укупна инвестиција бити мања од сумарне у табели 1 – процена је да ће бити у границама ⅓ ÷ ½ од исказане за овај ближи наредни период (до 25 година).

Табела 1. Потенцијални развој РВС у Србији у ближој будућности
Table 1. Potential development of RWS in Serbia in near future

РВС	Опис предвиђене активности	Општине које овим решењем могу добити додатну воду	Инвестиција (мил. €)	Напомена
1. Горње Јужно-Моравски	*Нови цевовод акумулација Првонек – ППВ Кумаревска Чука*	Врање, посредно и Бујановац и Прешево	7.0	8 km цевовода DN 800
	Продужетак система Првонек – Врање до Прешева	Бујановац и Прешево	20	Уз претпоставку договора општина
	Захватање из тока Јелашничке реке и допремање воде до ППВ Влад. Хана	Владичин Хан	5.0	
	Захватање из тока Романовске реке и допремање воде до ППВ Сурдулица	Сурдулица	3.0	Процена
2. Доње Јужно-Моравски	Изградња подсистема акумулација Бован – Сокобања са ППВ	Сокобања	8.0	
	Замена цевовода акумулација Бован – ППВ Бресје	Алексинац	5.0	
	Продужетак РВС Бован – Алексинац до неких насеља општине Ражањ	Ражањ	2.0	

	Изградња РВС Селова за Топлички округ и град Ниш	Куршумлија, Блаце, Прокупље, Житорађа, Мерошина, Дољевац, град Ниш	90	Уз претпоставку завршене бране и договора општина
	Изградња подсистема акумулације Завој – град Ниш	град Ниш	50	Уз договор свих корисника
	Замена цевовода акумулација Пуста река – ППВ Бојник	Бојник и Дољевац	4.0	
	Снабдевање Лебана и Медвеђе са акумулације Барје	Лебане и Медвеђа	6.0	
3. Западно Моравско Рзавски	Цевовод сирове воде од бране Сврачково до ППВ Рзав	Садашње и будуће општине корисници овог РВС	6.0	Уз претпоставку завршене бране
	Проширење РВС Рзав на нека насеља постојећих 5 општина корисника	Ариље, Пожега, Лучани, Чачак, Горњи Милановац	7.0	Процена
	Каптирање извора Сопотница и изградња доводних цевовода	Пријепоље	2.0	Процена
4. Ибарско – Шумадијски	Проширење изворишта Брзан, и продужетак РВС Крагујевац до општина Лапово и Рача	Баточина, Лапово, Рача	10	Уз претпоставку договора општина
	Проширење РВС Рзав на нове општине	Топола, Аранђеловац и нека насеља општина Љиг и Кнић.	35	Боље искоришће-ње овог РВС
	Ново изворише – Лопатница живи ток, са ППВ и главним доводом	Краљево	20	
	По изградњи Сврачкова, повезивање резервоара Љубић и Дракчићи	Чачак и Краљево	18	Процена
	Повезивање резервоара Шумари и Врњачке Бање	Врњачка Бања	7.0	По обезбеђењу додатних вода за Краљево
	Живи ток Људске реке	Нови Пазар, Рашка	9.0	Процена
5. Расинско Поморавски	Проширење РВС Ћелије на нека од насеља садашњих општина корисника	Крушевац, Александровац, Трстеник, Ћићевац, Варварин	4.0	Процена
	Реконструкција и замена дела постојећег РВС Света Петка	Параћин и Ћуприја	7.0	Могуће прикључење извора Грза и Топлик
	Изградња РВС Црница (ако се буде градила брана за друге кориснике)	Параћин, Ћуприја и Јагодина	27	Инвестиција само за водоснабдевање

	РВС Ресава, извори + захват из реке.	Деспотовац и Свилајнац, уз разматрање и других општина	18	Процена
6. Тимочки	*Замена цев. Мировштица - Бољевац*	Бољевац	1.3	Велики губици
	Замена цевовода са врела Тупижница	Зајечар	3.7	Ако није замењен
	Изградња РВС Боговина (ако се буде градила брана за друге кориснике)	Бор, Бољевац и Неготин	50	Инвестиција само за водоснабдевање
	Повезивање општина Књажевац и Зајечар	Књажевац и Зајечар	7.0	По договору две општине
7. Млавско-Моравски	Реконструкција довода од ППВ Трновче до В. Плане и См. Паланке	Велика Плана и Смедеревска Паланка	2.5	Ако није већ реконструисан
	Снабдевање са изворишта Јагодица	Костолац, Пожаревац	14	I фаза, процена
8. Колубарски	Формирање РВС Стуборовни	Ваљево?, Мионица, Лајковац, Лазаревац, Уб, Љиг?	45	Инвестиција без Ваљева и Љига
	Обезбеђење нових количина вода за насеља у општини Љиг из РВС Рзав	Љиг	7.0	Процена
9. Савско-Београд.	Завршетак примарних објеката система Макиш - Младеновац	Град Београд (БВК), Младеновац, Сопот	70	
	Повећање капацитета изворишта БВК	Град Београд (БВК)	40	Процена
	Проширење БВК на нека периферна Бгд насеља	Град Београд (БВК)	35	Процена
10. Мачвански	Повезивање ППВ Пећина - Коцељева	Коцељева	4.5	По конципирању РВС Стуборовни
	Проширење изворишта Мачвански Прњавор и снабдевање гравитирајућих насеља у општинама Шабац и Лозница	Шабац и Лозница	5.0	
	Повезивање општ. Лозница и Крупањ	Крупањ	2.0	Уз договор општина
11.Сремски	Проширење РВС Рума - Ириг на један број насеља ове две општине	Рума и Ириг	4.0	Процена
	Изградња РВС Источни Срем	Пећинци, Инђија, Стара Пазова, и град Београд	140	По договору општина и града

12.Новосадски	Повезивање Новосадског РВС са околним општинама	Нови Сад и општине: Б. Паланка, Б. Петровац, Темерин и Жабаљ	15.0	Процена
13. Бачки	Изградња Бачког РВС и повезивање са Новосадским РВС	Апатин, Сомбор, Б. Топола, Мали Иђош, Кула, Врбас, Србобран, Бечеј, Нови Бечеј, Оџаци и Бач	390	Већина општина су изразиле заинтере-сованост за РВС
14. Горње Тишки	Изградња већег дела РВС Горња Тиса	Потенцијалне општ.: Суботица, Кањижа, Нови Кнежевац, Сента, Чока, Ада, Кикинда и Н. Црња	100	По евентуалном договору неких од ових општина
15. Јужно Банатски	Велики РВС Банатски, заснован на потенц. изворишту Ковин-Дубовац-Банат. Паланка или пар мањих РВС	Потенцијалне општине: Део Банатских општина + део Бачких на Тиси, и можда делом Београд	370	Врло неизвестан даљи развој на овом подручју
	УКУПНО		$\approx 1{,}6 \div 1{,}7 \cdot 10^9$ €	

Иако се овај рад не бави дефинисањем приоритета код реализације наведених решења, ипак неколико принципа треба поменути (којих би се требало држати):

- Принцип усаглашености са планским документима: Решења треба да су у складу са стратегијским документима (ВОС, а посебно Стратегија). То се нарочито односи на просторе који обухватају велики број општина, и где се са неоправданим форсирањем локалних решења могу озбиљно компромитовати боља регионална решења.
- Принцип угрожености са аспекта квалитета: Системи у којима се потрошачима испоручује константно вода која не одговара квалитету воде за пиће - што је квалитет потенцијално опаснији по здравље такви системи су и приоритетнији за решавање.
- Принцип угрожености са аспекта количина: Што је већи број становника без јавног водоснабдевања, такве општине (системи) су и хитније за решавање.
- Принцип иницијативности: Треба подржати оне групе општина које (уз услов поштовања претходних принципа) желе активно да учествују у реализацији РВС.

- Принцип рационалности: Одређени приоритет треба да имају она регионална решења која су економски најповољнија (са мање средстава се постиже већи учинак).
- Принцип солидарности: При слично испуњеним претходним принципима, одређени приоритет (од стране државе) треба да имају социјално угроженије групе општина.

5. Претпоставке за доступност реализацији ових система

Већина назначених потенцијалних инвестиција би утицала на економску цену воде за припадајући конзум у границама 0.1 ÷ 0.5 €/m^3 [2, 4, 5]. Повећање цене воде за дати износ не би утицало на економску стабилност домаћинстава ни најсиромашнијих општина по свим важећим критеријумима приуштивости (колико крајњи корисници могу да плате за услуге добијања воде за пиће и одвођења отпадних вода). Овај начин обезбеђења инвестиције (путем економске цене воде) је и најповољнији са техно-економског аспекта, а претпоставка његовој реализацији је подизање свести у народу о томе да допремање воде до славина потрошача има своју цену и да је корисност такве регулације апсолутно на добробит свих слојева друштва. Затим је потребно извршити и адаптацију законске и институционалне регулативе и повећати ефикасност/-рационалност у комуналним фирмама. И у одсуству таквог приступа, исказана укупна инвестиција, која је реда 1,65 • 10^9 €, је доступна садашњем економском стању у земљи, путем буџетског финансирања, поготову имајући у виду да ће потреба за реалним развојем РВС бити реда ⅓ ÷ ½ исказане укупне инвестиције у ближем наредном периоду од 25 година (0,5 • 10^9 € ÷ 0,9 • 10^9 €). То би, грубо рачунато, било око 100 € / становнику укупно за наредних 25 година.

Уз регионални развој, у развојну компоненту економске цене воде улази и локални развој водоснабдевања (општински ниво), и развој у домену каналисања и пречишћавања отпадних вода. Оне су збирно осетно веће од потребних инвестиција само за РВС, а по доступним анализама [2, 5], укупан удео развоја водовода и канализације (са третманом отпадних вода) на просечну економску цену воде, на нивоу државе, је пре 15-ак година био око 0.6 €/m^3, док би данас, обзиром на све веће захтеве (домаћи, затим и кроз EU Директиву 2020/2184), повећања свих материјалних, као и нематеријалних трошкова, био око 1.0 €/m^3 произведене воде за пиће. Са амортизацијом и оперативним трошковима добија се укупна просечна економска цена воде око 2.5 €/m^3 (за највећи број комуналних система у границама 2.0÷3.0 €/m^3). Како је просечна потрошња једне 4-чланe породице реда 15-20 m^3/mes, и са економском ценом воде су трошкови приуштиви за све или скоро све општине у Србији по важећим критеријумима. Узгред, и такви трошкови би били осетно мањи него што та породица данас издваја за плаћање рачуна за мобилне телефоне.

6. Закључна разматрања

Општине које немају довољно квалитетног водног ресурса на својим територијама су принуђене да решења траже кроз регионалне системе. Додатно овај проблем

често увећавају и други фактори - климатске промене, погоршање квалитета ресурса, као и притисак који постоји на заузеће појединих изворишта од других (не)привредних субјеката. Услед вишедеценијског малог улагања у сектор вода, а посебно у област комуналне хидротехнике, влада мишљење (чак и у стручним круговима) да су РВС „скупи“ и инвестиција у њих за земљу недоступна. Наведена потенцијална регионална решења су од мало до врло вероватних за изградњу у ближој будућности, али свако од њих је могуће реализовати, чак и без помоћи са стране. То показују саме вредности тих инвестиција, а још више њихов удео на цену воде (најчешће реда 0.2 ÷ 0.3 €/m^3) или трошак по становнику за наредних 25 година (реда 100 €/стан.). Рад није претендовао да се бави приоритетима у реализацији РВС, али је навео неке принципе, за које мислимо да их се држава треба држати приликом издвајања средстава за финансирање РВС.

Може се извући закључак да је питање реализације потребних РВС, или шире, стања у комуналним фирмама, много више питање давања на значају запостављеног сектора вода (посебно комуналног), и боље организованости ове области у земљи, него саме економске доступности. Подразумева се и да мора постојати одређена стабилност у држави, и жеља/воља да се ово не баш (политички) лако питање почне решавати. Извесно је најбољи начин путем постепеног увођења цене воде, и истовремено повећања ефикасности комуналних предузећа. Одлагање решавања води ка даљој девастацији водоводних система – поменимо да се губици просечно повећавају 1% / 3 године [4].

Још једном се наглашава да је списак наведених регионалних решења само потенцијалан (и да се вероватно већина њих неће остварити у ближој будућности), а да ће се јавити и мањи број других решења која у списку нису наведена.

7. Литература

[1] Водопривредна основа Србије, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ (ИЈЧ), наручилац: Министарство за пољопривреду и заштиту животне средине – Републичка дирекција за воде (РДВ), Београд, 2001.

[2] Стратегија управљања водама на територији Републике Србије до 2034. године, ИЈЧ, Наручилац: РДВ, Београд 2016.

[3] Студија Анализа развоја Регионалних водоводних система у Републици Србији, ИЈЧ, Наручилац: РДВ, Београд 2018.

[4] Димкић Д, Ивић Н, Унапређење рада неких ВиК система и цена воде, Зборник радова 45 *међународне конференције „Водовод и канализација '24*, SITS, str. 19-38, 2024.

[5] Бројна остала документација из и ван Института „Јарослав Черни“, Београд

Zoran Pendić[1], Lara Polak[2]
Marina Strižak[3], Bojana Jakovljević[4]
Ana Milijić[5], Željko Marković[6], Dragana Jovanović[7]

Pregledni stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25043P

OD REZOLUCIJE DO REALNOSTI: KAKO OBEZBEDITI DOVOLJNE KOLIČINE BEZBEDNE VODE ZA PIĆE ZA STANOVNIŠTVO SRBIJE

Rezime: Rezolucijom Generalne skupštine UN 64/292 iz 2010. godine pravo na vodu i sanitaciju je priznato kao osnovno ljudsko pravo. Drugim rečima, svi stanovnici vaseljene imaju pravo na bezbednu, kvalitetnu, dostupnu i pristupačnu vodu za piće i osnovnu sanitaciju. Doista, voda je temelj za zdravlje, ishranu, higijenu i dostojanstven život. Ali realnost je drugačija: Prema podacima Svetske zdravstvene organizacije (WHO), blizu milijardu ljudi nema pristup bezbednoj vodi za piće (BVP), a preko 2,5 milijarde – nema osnovne sanitarne uslove, dok svaka četvrta osnovna škola u svetu nema pristup BVP, što ima dramatičan uticaj na zdravlje dece. A kakvo je stanje u Srbiji? Prema istraživanju organizacije „Pravo na vodu“, preko milion stanovnika Srbije povremeno ili stalno nema pristup BVP. U Srbiji gotovo polovina gradskih vodovoda proizvodi neispravnu vodu, a u Vojvodini preko 600.000 stanovnika koristi vodu zagađenu arsenom. Zrenjanin je eklatantan primer nebrige o BVP u Srbiji. Davne 20.01.2004. godine u Zrenjaninu je „privremeno“ proglašeno da je voda za piće nebezbedna zbog nedozvoljenog nivoa arsena. Evidentno, i pre toga voda nije bila za piće, samo je to tada zvanično saopšteno. Ovo „privremeno“ traje već preko 20 godina. Generalno, u Srbiji od deset stanovnika četiri ne piju potpuno bezbednu vodu za piće, što je pogubno za zdravlje. BVP je ključna za ljudsko zdravlje, jer: održava ravnotežu telesnih tečnosti; podstiče detoksikaciju; podmazuje zglobove i tkiva; reguliše telesnu temperaturu; pomaže varenje i sprečava zatvor. Preporučeni dnevni unos tečnosti, prema Klinici Mayo, je: oko 3.7 litara (muškarci), oko 2.7 litara (žene). Ove vrednosti uključuju ukupan unos tečnosti, što znači ne samo vodu koju pijemo, već i tečnost iz drugih pića (npr. čaj, kafa, sokovi) i iz hrane bogate vodom (npr. voće, povrće). S obzirom na iznete činjenice, dostupnost dovoljne količine BVP je od ključne važnosti za zdravlje stanovništva i ekonomiju Srbije. Zbog toga će osnovne teme rada biti: Kako modernizovati postojeće vodovodne sisteme i unaprediti upravljanje u vodovodnim organizacijama u Srbiji, i obezbediti dovoljne količine BVP u svim vremenskim uslovima.

Ključne reči: vodovodni sistemi, vodovodne organizacije, modernizacija, upravljanje, nove tehnologije

[1] *RC SITS, Beograd, razvojni.centar@sits.rs, ORCID: 0000-0002-8320-9154*
[2] *IE University (Business & Management), Madrid, larapolak400@gmail.com, ORCID: 0009-0005-0139-267X*
[3] *JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Beograd, marina.strizak@gmail.com, ORCID: 0009-0000-1414-1494*
[4] *Telekom Srbija, Beograd, bojanaja@telekom.rs, ORCID: 0009-0009-5663-2676*
[5] *Ministarstvo zdravlja RS, Beograd, ana.milijic@zdravlje.gov.rs, ORCID: 0009-0005-1188-7879*
[6] *Ekoenergetika, Beograd, zeljko.m.markovic@gmail.com, ORCID: 0009-0000-2925-159X*
[7] *Institut za javno zdravlje Srbije „Dr Milan Jovanović Batut“, Beograd, ORCID: 0000-0001-6799-970X*

FROM RESOLUTION TO REALITY: HOW TO ENSURE SUFFICIENT QUANTITIES OF SAFE DRINKING WATER FOR THE POPULATION OF SERBIA

Abstract: The UN General Assembly Resolution 64/292 from 2010 recognized the right to water and sanitation as a basic human right. In other words, all inhabitants of the planet have the right to safe, high-quality, available and affordable drinking water and basic sanitation. Indeed, water is the foundation for health, nutrition, hygiene and a dignified life. But the reality is different: According to the World Health Organization (WHO), close to a billion people do not have access to safe drinking water (SDW), and over 2.5 billion do not have access to basic sanitation, while every fourth primary school in the world does not have access to SDW, which has a dramatic impact on children's health. And what is the situation in Serbia? According to research by the „Right to Water“ organization, more than a million inhabitants of Serbia occasionally or permanently do not have access to SDW. In Serbia, almost half of the city's water supply systems produce defective water, and in Vojvodina, over 600,000 inhabitants use water contaminated with arsenic. Zrenjanin is a glaring example of the lack of SDW in Serbia. Long ago on January 20, 2004. in Zrenjanin, it was „temporarily“ declared that the drinking water is unsafe due to the illegal level of arsenic. Evidently, even before that, the water was not drinkable, only that was officially announced then. This „temporary“ has been going on for over 20 years. In general, in Serbia, four out of ten inhabitants do not drink completely safe drinking water, which is disastrous for health. SDW is crucial for human health, because it: maintains the balance of body fluids; promotes detoxification; lubricates joints and tissues; regulates body temperature; helps digestion and prevents constipation. Recommended daily fluid intake, according to the Mayo Clinic, is: about 3.7 liters (men), about 2.7 liters (women). These values include total fluid intake, which means not only the water we drink, but also fluid from other drinks (eg tea, coffee, juices) and from foods rich in water (eg fruit, vegetables). Considering the above facts, the availability of a sufficient amount of SDW is of key importance for the health of the population and the economy of Serbia. Therefore, the main topics of this paper will be: How to modernize existing water supply systems and improve management in water supply organizations in Serbia, and ensure sufficient amounts of SDW in all weather conditions.
Key Words: Water supply systems, water supply organizations, modernization, management, new technologies

Uvod

Autori ovog rada se već duži period vremena bave problemima bezbedne vode za piće (BVP) u Srbiji [1-22] i raspolažu obiljem validnog materijala koji se odnosi na problem vodosnabdevanja u Srbiji.

BVP predstavlja osnovni uslov za dostojanstven i zdrav život ljudi. U svakoj državi, pa i u Srbiji, dostupnost BVP za svakog stanovnika mora da bude zakonima/ustavom zagarantovano pravo, a ne privilegija.

Ali realnost je drugačija, milioni ljudi širom sveta suočavaju se sa nedostatkom, često katastrofalnim, bezbedne vode za piće. Ni Srbija nije izuzetak. Problem nedostatka dovoljne količine BVP u Srbiji prisutan je decenijama, što se posebno ispoljava danas kada klimatske promene, bez obzira na različite teorije o njihovom nastanku, drastično utiču na dostupnost dovoljnih količina BVP posebno u letnjim mesecima. A uticaj klimatskih promena ne ide na bolje, naprotiv.

U Ref. [19] je istaknuto da je „Generalna skupština UN priznala pravo svakog čoveka da ima pristup dovoljnoj količini vode za ličnu i kućnu upotrebu (između 50 i 100 litara dnevno), koja mora da bude bezbedna, prihvatljivog kvaliteta, pristupačna po ceni (troškovi vode ne bi smeli da premaše 3% prihoda domaćinstva) i fizički dostupna (izvor vode ne sme biti udaljen više od 1.000 metara od kuće, a vreme zahvatanja vode ne bi trebalo da prelazi 30 minuta)“.

Fama da je Srbija bogata vodom za piće je samo delimično tačna. Srbija raspolaže značajnim rezervama podzemnih voda, posebno u Vojvodini. Ima i veliki broj prirodnih i veštačkih jezera. Ima i veliki broj vodotokova (preko 1.600), ali mnogi nisu pogodni za direktnu preradu u vodu za piće bez ozbiljnije prerade. Iako su mnoge reke u Srbiji zagađene, postoje vodotokovi koji se ističu po dobrom ili čak visokom kvalitetu vode. Da pomenemo neke: Studenica (planinski izvor), Vlasina (visok kvalitet), Veliki i Mali Rzav (izuzetno čist), Moravica (gornji tok), Toplica (gornji tok), Lim (gornji tok), Jablanica (gornji tok), Kozaračka reka (jedna od najčistijih reka)… Njihova zajednička karakteristika je da se nalaze u planinskim ili šumskim predelima.

Da bi se Srbija opravdano smatrala „bogatom vodom pogodnom za piće“ neophodne su: značajne investicije u infrastrukturu vodovodnih sistema, zatim: adekvatna i stroga zaštita izvorišta vode, primena modernih tehnologija Industrije 4.0 i veštačke inteligencije u upravljanju vodovodnim sistemima, i, ono što je, pored značajnih investicija, najvažnije, postojanje adekvatanog menadžmenta u javnim komunalnim preduzećima koja snabdevaju stanovništvo pijaćom vodom, kada se adekvatnost posmatra kroz prizmu znanja, upravljačkih kapaciteta i primene savremenih tehnologija**.**

A menadžment u većini vodovodnih organizacija u Srbiji nije na zavidnoj visini. A zašto je to tako? Osnovni razlog je nepostojanje odgovarajuće neprekidne obuke za sve zaposlene i validnog testiranja znanja, uključujući i top menadžment. Većina vodovodnih organizacija koristi zastarale metode upravljanja (zasnovane na neefikasnoj vertikalnoj umesto na efikasnoj horizontalnoj strukturi), bez integrisanih softverskih rešenja za monitoring, analitiku i prediktivno održavanje. Integrisani menadžment sistemi (IMS) i HACCP su retkost. Iako pojedine vodovodne organizacije imaju sertifikate za IMS i HACCP sistem, ti sertifikati si često samo formalnost, jer veliki broj zaposlenih i ne zna za njihovo postojanje, a kamoli da se ponaša u skladu sa zahtevima ovih sistema. Takođe, nedovoljna je saradnja sa fakultetima, institutima i međunarodnim organizacijama koje bi mogle da pomognu u transferu znanja i tehnologija. Pored toga, zaposlenima je često onemogućeno da prisustvuju raznim naučnim i stručnim konferencijama, čak i ako imaju prihvaćene radove, jer nisu u milosti menadžmenta zbog „dugačkog jezika“ i, zamislite, prilježnosti u sticanju novih znanja. Rešenje za ovo je depolitizacija upravljanja i profesionalizacija kadra. I: jačanje saradnje sa akademskom zajednicom i merodavnim državnim institucijama, sistematsko uvođenje novih tehnologija u cilju digitalizacije organizacije, primena savremenih menadžment alata, primena postulata organizacije koja uči…

Grad Zrenjanin, u kome voda zvanično nije za piće već više od dve decenije, postao je simbol sistemske nebrige i neadekvatnog reagovanja merodavnih institucija. U maju ove godine Zavod za javno zdravlje Zrenjanina saopštio je „da su rezultati analiza vode za piće na izlazu iz postrojenja za prečišćavanje vode u Zrenjaninu u okviru maksimalno dopuštenih

vrednosti ili koncentracija, ali voda je i dalje zabranjena za piće i pripremu hrane“. Proverili smo kod naših kolega u Zrenjaninu da li je u međuvremenu dozvoljena upotreba vode za piće. Samo su se gorko nasmejali.

Slični problemi prisutni su i u drugim delovima zemlje, posebno u Vojvodini, gde hiljade građana koriste vodu zagađenu arsenom.

Što pre država Srbija ovo shvati i podrži i bude posmatrala obezbeđivanje dovoljnih količina BVP za svoje stanovništvo kao prioritet broj jedan - ne samo deklarativno, već kroz konkretne sistemske poteze, strateške investicije i institucionalnu podršku - lakše ćemo se uhvatiti u koštac sa rešavanjem problema evidentnog nedostatka BVP u Srbiji. Vreme za reakciju države nije sutra, već danas.

Ovaj rad ima za cilj da analizira stanje vodovodnih sistema u Srbiji, identifikuje ključne izazove u obezbeđivanju dovoljne količine bezbedne vode za piće, i predloži konkretne mere za unapređenje infrastrukture, upravljanja i zakonodavnog okvira. Poseban fokus biće stavljen na održivost rešenja, otpornost sistema na klimatske promene, i uključivanje lokalnih zajednica u procese donošenja odluka.

2. Upravljanje vodama u regionu

Pregled upravljanja vodama u regionu dat je u tabeli 1. Napominjemo da smo ovu tabelu sačinili u saradnji sa veštačkom inteligencijom (Microsoft COPILOT, DeepSeek, ChatGPT). Mi smo definisali zemlje u regionu i zaglavlje tabele. Tabela je sačinjena u nekoliko koraka, pošto su početne vrednosti u tabeli bile suviše optimistične. Posle naše intervencije (dali smo neke validne podatke sa kojima smo raspolagali), došlo smo do sadašnjih vrednosti. Može da se posumnja i u nihovu validnost, jer izveštaji merodavnih institucija koje se bave vodama bilo koje države uvek pomalo ulepšavaju realnu sliku.

Tabela 1. Upravljanje vodama u regionu
Table 1. Water management in the region

Zemlja	Pristup pijaćoj vodi (%)	Kanalizacija (%)	Postrojenja za preradu otpadnih voda (PPOV)	Glavni izazovi	Usaglašenost sa EU direktivama
Srbija	85–88%	65–70%	~50 aktivnih, mnoga neefikasna	Zagađenje izvora, gubici u mreži, nedostatak ruralne pokrivenosti	Delimična – harmonizacija u toku
Hrvatska	98–99%	93–95%	Više od 150 PPOV	Održavanje EU standarda, pokrivenost ostrva i ruralnih zona	Potpuno usaglašena – članica EU
Mađarska	99–100%	92–94%	Više od 700 PPOV	Zaštita podzemnih voda, nitrati, troškovi održavanja	Potpuno usaglašena – članica EU
Bugarska	97–98%	75–78%	~90 PPOV	Neravnomerna pokrivenost, zagađenje reka, ruralna infrastruktura	Potpuno usaglašena – članica EU

Zemlja	Pristup pijaćoj vodi (%)	Kanalizacija (%)	Postrojenja za preradu otpadnih voda (PPOV)	Glavni izazovi	Usaglašenost sa EU direktivama
BiH	85–90%	45–55%	~30 PPOV, većinom u urbanim zonama	Fragmentisana uprava, nedostatak sredstava, niska pokrivenost ruralnih zona	Delimična – uz podršku IPA fondova
Crna Gora	90–92%	55–60%	~20 PPOV	Sezonski pritisak, mali kapaciteti, nedovoljna pokrivenost	Delimična – u procesu harmonizacije
Slovenija	99–100%	95%	Više od 200 PPOV	Upravljanje muljem, klimatska otpornost, visoki standardi	Potpuno usaglašena – članica EU
Severna Makedonija	90–93%	60–65%	~25 PPOV	Stari sistemi, nedovoljna ruralna pokrivenost, potreba za investicijama	Delimična – u procesu usklađivanja
Albanija	85–88%	50–55%	~40 PPOV	Zagađenje obalnih voda, loša ruralna pokrivenost, nedostatak kapaciteta	Delimična – uz podršku EU fondova

Usaglašenost sa EU direktivama daje stepen primene Okvirne direktive o vodama [30], koja zahteva: planove upravljanja slivovima; neprekidno praćenje kvaliteta voda; zaštitu zaštićenih područja; povraćaj troškova za vodne usluge; učešće javnosti u planiranju.

Navedene vrednosti za Srbiju su upozoravajuće, jer stanje BVP u Srbiji karakteriše izražena neujednačenost u dostupnosti i kvalitetu [28, 29]. Dok pojedini gradovi (npr. Beograd) imaju relativno stabilan sistem vodosnabdevanja, mnoge lokalne zajednice, naročito u Vojvodini i ruralnim područjima, suočavaju se sa ozbiljnim problemima.

Posebno ističemo da škole u pojedinim oblastima Srbije, posebno ruralnim, nemaju stabilan pristup BVP, što direktno ugrožava zdravlje dece. A što se tiče ukupne obnovljive količine slatke vode, ona u Srbiji iznosi 162,2 km^3 (procene za 2011. godinu).

Neke nama susedene države imaju sledeće količine slatke vode: Severna Makedonija (6,4 km^3), Bugarska (21,3 km^3), Mađarska (104 km^3), Hrvatska (105,5 km^3), Bosna i Hercegovina(37,5 km^3), Albanija (41,7 km^3) [19].

Međutim, analiza vodosnabdevanja [28, 29] pokazuje da Srbija ima ozbiljne probleme u vodosnabdevanju (zastarelu infrastrukturu, neredovnu i neobuhvatnu kontrolu kvaliteta voda, nedefinisanu koordinaciju između nadležnih institucija…), a posledice su evidentne: ugroženo zdravlje stanovništva i narušeno poverenje u merodavne institucije.

Srbija mora iz faze konstatacije problema nedostatka u odnosu na BVP da pređe u fazu rešavanja ovog problema, jer svaki dan bez BVP u bilo kom delu Srbije je dan izgubljen za zdravlje i dostojanstvo njenih stanovnika.

3. Stanje BVP u Srbiji – uzroci problema

Izveštaj o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće javnih vodovoda i vodnih objekata u Republici Srbiji jednom godišnje objavljuje Institut za javno zdravlje Srbije „Dr Milan Jovanović Batut“.

Poslednji javno dostupan izveštaj objavljen je za 2022. godinu [34], u kojem se navodi da: „u oko 10% vodovodnih sistema voda nije bila fizičko-hemijski ispravna, što u najvećem broju slučajeva, prema analizi Instituta „Batut“, znači da je povećana mutnoća i boja vode, ili su povišene koncentracije gvožđa, mangana, amonijaka i slično; u oko 9% gradskih vodovodnih sistema u Srbiji zabeležena je mikrobiološka neispravnost, odnosno prisustvo određenih bakterija u vodi; oko 20% vodovodnih sistema ima neispravnu vodu i u fizičko-hemijskom pogledu i mikrobiološki“.

Problem dostupnosti vode za piće postaje udarna vest tokom sušnih perioda bez padavina kada vladaju velike vrućine, dok problem bezbednosti vode za piće (zdravstvene ispravnosti vode za piće) postoji tokom čitave godine. U ovom radu ćemo za zdravstveno ispravnu vodu za piće uglavnom da koristimo pojam „bezbedna voda za piće - BZP“, a ne „kvalitetna voda za piće“.

Stanje BVP u Srbiji karakteriše izražena neujednačenost u dostupnost i u odnosu na to gde se pije, jer postoje velike razlike između gradskih i ruralnih područja. Generalno, može se reći [28, 29, 31-34] da oko 60% stanovnika u Srbiji pije bezbednu vodu za piće, a oko 40% – nebezbednu, mada ove procente ne treba uzeti „zdravo za gotovo“. Gradski vodovodi u mnogim opštinama u Srbiji povremeno isporučuju mikrobiološki i/ili hemijski neispravnu vodu, a kontrola zdravstvene ispravnosti je često neredovna.

Uzroci problema sa obezbeđivanjem BVP u Srbiji su [28-34]:

- Zastarela infrastruktura vodovodnih sistema (većina je izgrađena tokom 20. veka; potrebne su značajne investicije za modernizaciju, koje prelaze iznos od milijardu evra);
- Zagađenje izvorišta vode (industrijski otpad, hemikalije koje se koriste u poljoprivredi i neadekvtna prerada otpadnih voda značajno doprinose zagađenju površinskih i podzemnih izvora vode; procena je da se manje od 10% otpadnih voda u Srbiji prerađuje; Beograd je jedina prestonica Evrope koja nema izgrađeno postrojenje za preradu kanalizacionih voda; ulivanje neprečišćenih kanalizacionih voda u velike reke poput Save i Dunava nije veliki problem, ali kada su u pitanju manje reke poput Borske reke i Velikog bačkog kanala, to je onda stravično zagađenje; prisustvo arsena u vodi u Vojvodini je direktna posledica geoloških karakteristika zemljišta, ali i neadekvatne prerade sirove vode);
- Nedostatak investicija (vodovodne organizacije najčešće nemaju dovoljno sredstava za adekvatno održavanje i modernizaciju vodovodnih sistema; merodavne državne institucije ne uključiju investicije u vodosnabdevanje u strateške prioritete);

- Neadekvatna institucionalna koordinacija (između merodavnih institucija, a to su odgovarajuća ministarstva, lokalne samouprave i javna komunalna preduzeća, ne postoji efikasna koordinacija, transparentnost i odgovornost zasnovana na jasno definisanim pravilima; kontrola zdravstvene ispravnosti vode za piće je često sporadična i nedovoljno transparentna);
- Nedovoljno uključivanje stanovništva u rešavanju problema vodosnabdevanja (stanovnici Srbije najčešće nisu informisani o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće koju koriste, kao i o svojim pravima da budu snabdeveni zdravstveno ispravnom vodom za piće; nedostatak javnog pritiska od strane stanovnika dodatno usporava neophodne reforme u vodosnabdevanju).

Ovde moramo da ukažemo na još jedan problem vezan za BVP, koji smo često isticali u nekim od naših radova [1-22], posebno u radovima [20-22]. U srcu svake komercijalne ili stambene zgrade (ili mešovite komercijalno-stambene zgrade) bilo koje veličine nalazi se sofisticirana vodovodna i kanalizaciona instalacija projektovana i izvedena tako da obezbeđuje nesmetano snabdevanje kvalitetnom i bezbednom vodom za piće, odvođenje otpadnih voda i zaštitu zdravlja zaposlenih/posetilaca/stanara. Izbor cevi koje se ugrađuju u vodovodne instalacije ovih zgrada je izuzetno važan proces, jer od kvaliteta izabranih cevi zavisi bezbednost vode za piće koja sa koristi u ovim zgradama. Izbor cevi od neadekvatnog materijala je jedan od glavnih izvora potencijalne kontaminacije vode za piće u komercijalnim i stambenim zgradama. Posebno je u Srbiji teška situacija sa vodovodnim instalacijama koje se ugrađuju u komercijalne/stambene objekte, jer o njima odlučuje samo investitor, koji najčešće teži da prođe što jeftinije. Odgovornost vodovodne organizacije važi samo do priključnog mesta na vodovodnu instalaciju komercijalnog/stambenog objekta.

Ovo nas dovodi do isticanja značaja posedovanje validnog znaka kvaliteta za ugrađeni cevni materijal. Kod nas je situacija na tržištu proizvoda koji se koriste u vodovodnim sistemima komercijalnih/stambenih zgrada haotična. Često se nabavljaju proizvodi koji ne zadovoljavaju ni osnovne kriterijume kvaliteta [23]. Zbog toga je od izuzetne važnosti da se u Srbiji donesu obavezujući propisi da investitori mogu da nabavljaju proizvode koji se koriste u vodovodnim sistemima u komercijalnim/stambenim zgradama sa verifikovanim znakom kvaliteta, kao što se to radi u npr. u Austiji, Finskoj, Nemačkoj, Holandiji, Hrvatskoj… [23, 24]. Normalno, cevni proizvodi moraju da zadovoljavaju i odgovarajuće standarde [25, 26].

A šta kaže Evropska komisija? Evropska komisija je usvojila nove minimalne higijenske standarde za vodu za piće [27]. Do kraja 2026. godine, standardi će se primenjivati na materijale i proizvode namenjene za upotrebu u novim instalacijama – ili renoviranjima ili popravkama starijih instalacija – za zahvatanje, prečišćavanje, skladištenje ili distribuciju vode. Standard se takođe primenjuje na dovodne cevi, ventile, pumpe, vodomere, fitinge i slavine.

4. Zdravstvene posledice nebezbedne vode vode za piće

Srbija je 2012. pristupila Protokolu o vodi i zdravlju [9, 14], a u sklopu Poglavlja 27 u procesu pregovora o članstvu u Evropskoj uniji obavezala se da se usaglasi sa standardima evropske Direktive o kvalitetu vode za piće [6]. Međutim, prema poslednjem izveštaju

Evropske unije o pristupanju iz 2023, Srbija se umereno uskladila sa standardima EU kada je u pitanju bezbednost i kvalitet vode za piće. U izveštaju se posebno ističe zabrinutost zbog neusklađivanja sa standardima Evropske unije, naročito u područjima u kojima je u vodi prisutan arsen.

Metodologija kontrole bezbednosti i kvaliteta vode za piće u Srbiji je u principu dobra, ali suština monitoringa bezbednosti i kvaliteta vode za piće ne treba da bude da se samo saopšti procenat uzoraka vode za piće koji su kontaminirani, već i koliki je to rizik po zdravlje ukoliko stanovnici piju tu vodu i kako taj rizik može da se smanji.

Profesor hemijske tehnologije na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu Božo Dalmacija smatra da zdravstveno neispravna voda za piće značajno utiče na zdravlje ljudi, posebno dece i starijih osoba slabijeg imuniteta [28]. „Ako u vodi imate gvožđe, stvara se gvožđe hidroksid, tu se mogu sakriti mikroogranizmi, hlor ne može to da uništi i dobijete mutnu vodu koju ljudi neće da piju“, kaže on. On smatra da bi Institut „Batut“ trebalo da analizira i kako takva voda utiče dugoročno na zdravlje. On dalje navodi, da kada se u uzorku vode pronađu teški metali (arsen, cijanidi…) mora da se obavesti javnost da voda nije za piće i da „vlast tada mora da obezbedi alternativne izvore vode za piće“.

Generalno, nebezbedna voda za piće ima direktne i dugoročne posledice po zdravlje stanovništva. Npr. hronična izloženost arsenu povezana je sa povećanim rizikom od karcinoma kože, pluća i mokraćne bešike, dok prisustvo nitrata u vodi može izazvati methemoglobinemiju (to je bolest kod koje je hemoglobin u oksidisanom obliku i ne može da vezuje kiseonik) kod beba (sindrom „plava beba“).

Mikrobiološka kontaminacija vode za piće (npr. sa E. coli) dovodi do akutnih infekcija, dijareje, povraćanja i dehidracije. Ne treba zaboraviti ni psihološke efekte na ljude koji žive bez pouzdanog izvora bezbedne i kvalitetne vode za piće (stres, osećaj manje vrednosti, značajno smanjeno poverenje u merodavne institucije…). Takođe, što je vrlo važno, zbog povećanog broja obolelih usled konzumiranja nebezbedne i nekvalitetne vode za piće u pojedinim rizičnim oblastima (kao što je npr. Vojvodina), zdravstveni sistem može biti značajno preopterećen.

5. Kako unaprediti vodosnabdevanje – tehnička i institucionalna rešenja

Rešavanje problema sa obezbeđivanjem BVP u dovoljnim količinama za stanovništvo Srbije zahteva kombinaciju tehničkih inovacija i institucionalnih reformi. Ključne mere uključuju [12, 17, 19, 20, 35-58]:

Tehničku modernizaciju vodovodnih sistema, što obuhvata:

- Modernizaciju infrastrukture (zamena dotrajalih cevi, rekonstrukcija rezervoara, uvođenje automatizovanih sistema za praćenje kvaliteta vode);
- Uvođenje savremenih tehnologija za preradu vode; digitalizaciju vodovodnih sistema i vodovodnih organizacija (uvođenje senzora, automatizacije i softverskih rešenja zasnovanih na tehnologijama Industrije 4.0 i veštačkoj inteligenciji omogućava praćenje protoka, detekciju curenja i optimizaciju potrošnje);
- Primena GIS sistema (korišćenje geografskih informacionih sistema za mapiranje mreže, planiranje intervencija i upravljanje resursima);

- Korišćenje obnovljivih izvora energije (integracija solarnih pumpi i energetski efikasnih tehnologija u postrojenja za prečišćavanje vode).

Unapređenje menadžmenta vodovodnim organizacijama, što obuhvata: obuku kadrova i profesionalizaciju (ulaganje u obrazovanje i stalna obuka zaposlenih u vodovodnim organizacijama, posebno u oblasti digitalnih tehnologija i upravljanja rizicima); transparentnost i javnu odgovornost (uvođenje sistema za praćenje performansi vodovodnih sistema i javno izveštavanje o kvalitetu vode, gubicima i investicijama); regionalizacija i saradnja (manje vodovodne organizacije mogu se udruživati radi efikasnijeg upravljanja i zajedničkog korišćenja resursa); privatno-javno partnerstvo (uključivanje privatnog sektora u finansiranje projekata modernizacije vodovodnih organizacija, uz strogo definisana pravila saradnje).

Edukaciju i uključivanje građana, što obuhvata: kampanje o važnosti bezbedne vode; obuka za korišćenje filtera i testiranje vode u domaćinstvima; uključivanje građana u savetodavna tela i javne rasprave.

Ekološke i strateške aspekte, što obuhvata: zaštitu izvorišta i podzemnih voda (podzemne vode su strateški resurs za Srbiju, pa je potrebno unaprediti monitoring i zaštitu od zagađenja); pristup EU fondovima i međunarodnim projektima (Srbija može koristiti sredstva iz IPA fondova i sarađivati sa organizacijama poput RCDN+ (Regional Capacity Development Network) na projektima bezbednosti vode za piće.

6. Održivost i otpornost sistema vodosnabdevanja u Srbiji

Dugoročno obezbeđivanje BVP zahteva sistem vodosnabdevanja koji je održiv i otporan na različite spoljne uticaje, što obuhvata: otpornost na klimatske promene (suše, poplave i ekstremni vremenski uslovi ugrožavaju izvorišta i utiču na količinu i kvalitet vodnih resursa); zaštitu izvorišta (to je prioritet, koji uključuje zone sanitarne zaštite, monitoring i zabranu aktivnosti koje mogu dovesti do kontaminacije izvorišta); održivo upravljanje vodom (podrazumeva racionalnu potrošnju, reciklažu i korišćenje alternativnih izvora, kao što su kišnica ili prečišćena otpadna voda); uključivanje lokalnih zajednica u donošenje odluka (građani kao partneri, a ne samo korisnici, što povećava odgovornost i efikasnost); primere dobre prakse iz sveta (decentralizovani sistemi, participativno upravljanje, zelene tehnologije).

7. Zaključak

Bezbedna voda za piće nije samo tehnički izazov – ona je ogledalo društvene odgovornosti, političke volje i institucionalne efikasnosti. Analiza pokazuje da Srbija ima ozbiljne strukturne probleme u sektoru vodosnabdevanja, uključujući zastarelu infrastrukturu, nedovoljnu kontrolu kvaliteta, i slabu koordinaciju između nadležnih institucija. Posledice su direktne i merljive: ugroženo zdravlje građana, narušeno poverenje u javne institucije, i otežan lokalni razvoj.

Rešenja postoje i dostupna su: modernizacija (digitalizacija) vodovodnih sistema, uvođenje savremenih tehnologija za prečišćavanje vode, jačanje kapaciteta lokalnih vodovodnih organizacija, da se obezbeđivanje dovoljne količine BVP za snabdevanje stanovništva u Srbiji postavi kao prioritet broj jedan javne politike, profesionalizacija top menadžmenta

vodovodnih organizacija, jasno definisanje saradnje između države, lokalnih samouprava, naučnih institucija i građana u skladu sa zahtevima ISO menadžment standarda.

Ako želi prosperitet i zadovoljstvo stanovništva stanjem u vodosnabdevanju, Srbija mora pod hitno da počne da rešava postojeće probleme u vodosnabdevanju. A to pre svega zahteva znanje i poštenje onih koji donose odluke. I, normalno, obezbeđivanje potrebnih investicija.

8. Literatura

[1] Pendić Z, Tašin Biljana, Jovanović Ljiljana, Lačnjevac Č, Pendić R, Milivojević Z. Primena Codex Alimentarius HACCP sistema u vodovodnim organizacijama radi snabdevanja stanovništva bezbednom pijaćom vodom, *Tehnika*, No.5, pp.1-6, 2011.

[2] Pendić Z, Tašin Biljana, Jovanović Ljiljana, Pendić R. *Primena Codex Alimentarius HACCP sistema u vodovodnim organizacijama – lak ili težak zadatak?*, Zbornik radova *32. Međunarodnog stručno-naučnog skupa "Vodovod i kanalizacija '13"*, Kladovo, 04-07. oktobar 2011, str. 9-18, 2011.

[3] Pendić Z i dr. Primena codex alimentarius HACCP sistema u vodovodnim organizacijama. in: Zbornik radova *XII Međunarodne konferencije „Vodovodni i kanalizacioni sistemi"*, Jahorina, Pale, 23-25. maja, str. 293-300, 2012.

[4] Pendić Z, Lačnjevac Č, Tašin B, Polak S, Milivojević Z, Pendić R, Reljić-Ćurić V, Jovanović Lj.. Primena generalisanog HACCP sistema u vodovodnim organizacijama – predlog metodologije, Zbornik radova *33. Međunarodnog stručno-naučnog skupa "Vodovod i kanalizacija '12"*, Vršac, str. 171-180, 09-12. oktobar 2012.

[5] Pendić Z, Lačnjevac Č, Marković Ž, Jovanović Lj, Makuc Z, Pendić R, Ćosović O, Zašto je potrebno uspostaviti generalizovani HACCP sistem u vodovodnim organizacijama?, Zbornik radova *34. Međunarodnog stručno-naučnog skupa "Vodovod i kanalizacija '13"*, Tara, str. 124-132, 15-18. oktobar 2013.

[6] Pendić Z. i dr, Obaveze i zadaci u postupku prijema Srbije u EU koji se odnose na kvalitet i bezbednost vode za piće i upravljanje otpadnim vodama, Zbornik radova *35. Međunarodnog stručno-naučnog skupa „Vodovod i kanalizacija '14"*, Kladovo, str. 238-246, 07-10.10.2014.

[7] Pendić Z, Lačnjevac Č, Jovanović D, Jovanović Lj, Makuc Z, Mioljević V, Beriša H, Zlatanović Tomašević V. Održivi razvoj i voda – kako sačuvati resurse i povisiti bezbednost i kvalitet vode za piće, u Zbornik radova *36. Međunarodnog stručno-naučnog skupa Vodovod i kanalizacija '15*, Vršac, Srbija, pp. 262-275, 13-16. oktobar 2015.

[8] Pendić Z, Strižak M, Jakovljević B, Polak S, i dr. *Zaštita vodovodnih sistema – bezbednosni aspekt*, u Zbornik radova *VIII Naučno-stručne konferencije Zakoni i propisi u svetu i kod nas u oblasti planiranja, uređenja, izgradnje i zaštite prostora*, Beograd, Srbija, pp. 168-181, 27. maj 2016.

[9] Jovanović Lj, Pendić Z, Jovanović D, Veljković N. Protokol o vodi i zdravlju - mogućnosti primene i unapređenja u oblasti procesa životne sredine i zdravlja i ograničavajući faktori u njegovom sprovođenju, u Zbornik radova *37. Međunarodnog stručno-naučnog skupa Vodovod i kanalizacija '16*, Vrdnik, Srbija, pp. 330-347, 11-14. oktobar 2016.

[10] Pendić Z, Strižak M, Milovanović V, Jakovljević B, i dr. Ranjivosti vodovodnih sistema za javno snabdevanje stanovništva – bezbednosni aspekt, u Zbornik radova *37. Međunarodnog stručno-naučnog skupa Vodovod i kanalizacija '16*, Vrdnik, Srbija, pp. 338-337, 11-14. oktobar 2016.

[11] Strižak M, Kolarović D, Pendić Z, Jakovljević B, Makuc Z, Lačnjevac Č, Urošević S, Jovanović Lj, Jovanović D. Terorističke pretnje vodovodnim sistemima i pristupi njihovoj zaštiti, u Zbornik radova *37. Međunarodnog stručno-naučnog skupa Vodovod i kanalizacija '16*, Vrdnik, Srbija, pp. 348-357, 11-14. oktobar 2016.

[12] Pendić Z, i dr. Pristupi za dobijanje bezbedne vode za piće bazirani na upravljanju rizikom (Risk management-based approaches to providing safe drinking water), Zbornik radova *IX Naučno-stručne konferencije sa međunarodnim učešćem Saobraćajni i infra-strukturni sistemi, prirodni resursi i ekološki aspekt zaštite životne sredine*, Beograd, str. 102-121, 2017.

[13] Pendić Z, Pendić-Polak Sanja, Jakovljević Bojana, Strižak Marina i dr. Analiza primene različitih pristupa za obezbeđenje bezbedne vode za piće, *Tehnika*, Vol. 72, No.1, pp.147-155, 2017.

[14] Jovanović Lj, Pendić Z, i dr. Sprovođenje Protokola o vodi i zdravlju – dokle smo stigli?, Zbornik radova *38. Međunarodnog stručno-naučnog skupa Vodovod i kanalizacija '17*, Kragujevac, str. 363-370, 10-13. oktobar 2017.

[15] Pendić Z, i dr. O nacrtu Zakona o vodi za ljudsku upotrebu, Zbornik radova *39. Međunarodnog stručno naučnog skupa "Vodovod i kanalizacija '18*, Valjevo, str. 307-318, 09-12. oktobar 2018.

[16] Strižak M, Pendić Z, Janjušević Z. Prevencija rizika i ušteda vode za piće preko održivog upravljanja otpadnim produktima iz procesa prerade sirove vode, isto, str. 262-263.

[17] Pendić Z, Polak Sanja, Jakovljević Bojana, Polak M, Marković Ž, Aleksandar Žjak, Jovanović Ljiljana, Vujotić Ljiljana, Petruševska Sonja. Šta nagoveštavaju atributi 4.0/5.0 u nekim terminima? U Zbornik radova *XII naučno – stručna konferencija sa međunarodnim učešćem "Upravljanje urbanim razvojem, prilagodljiv grad i zaštita prostora i životne sredine"*, BEOGRAD, septembar 2020.

[18] Pendić Z, Polak S, Jovanović D, Jakovljević B, Lačnjevac Č, Strižak M, Jovanović Lj. *Vodovod i kanalizacija u okruženju virusa SARS-CoV-2, u* Zbornik radova *41. Međunarodna konferencija „Vodovod i kanalizacija `20“*, str. 15-24, Kraljevo, oktobar 2020.

[19] Pendić Z, Polak S, Jakovljević B, Polak M, Dimitrijević Z, Jovanović D, Strižak M, Jovanović Lj, Marković Ž. Šta pojam voda 4.0 znači za javna komunalna preduzeća koja se bave vodovodom? u Zbornik radova *42. Međunarodna konferencija „Vodovod i kanalizacija `21*“, Vrnjačka Banja, str. 124-137, oktobar 2021.

[20] Pendić Z i dr. Pametna (digitalna) voda za piće za pametni (digitalni) grad, U Zborniku radova *XIV Naučno-stručne konferencije sa međunarodnim učešćem "Pametni gradovi i integracija tehnologija Četvrte industrijske revolucije 4.0"*, Beograd, str. 132-144, 27. maj 2022.

[21] Pendić Z, Polak L, Jakovljević B, Marković Ž, Polak M, Jovanović D, Milijić A, Ivošević S, Marković Ž, Reljić Ćurić V, Jovanović DStrižak M, Vukčević Z. O kvalitetu i bezbednosti vodovodnih sistema sa posebnim osvrtom na kvalitet cevi, u Zborniku radova *44. Međunarodna konferencija „Vodovod i kanalizacija `23“*, str. 113-125, Zlatibor, oktobar 2023.

[22] Pendić Z, Polak L, Jakovljević B, Milijić A, Marković Ž, Pendić R, Dimitrijević Z, Marković Ž, Jovanović D, Strižak M. O posebnostima i kvalitetu vodovodnih instalacija u stambenim i

komercijalnim zgradama, u Zborniku radova *45. Međunarodna konferencija „Vodovod i kanalizacija `24“*, str. 55-70, Brzeće, 8-11. oktobar 2024.

[23] Dimitrijević Z. Potreba za neprekidnim praćenjem kvaliteta proizvoda u vodosnabdevanju sa osvrtom na iskustva iz Austrije, *Tehnika*, Vol. 72, No. 4, str. 617-620, 2017.

[24] FI Mark Drinking Water Approval, Kiwa Inspecta Finland, [Internet], Dostupno na: https://-www.kiwa.com/en/service2/certification/fimarkdrinkingwaterapproval/

[25] 91.140.60 Water supply systems Including water meters in buildings, ISO, [Internet], Dostupno na: https://www.iso.org/ics/91.140.60/x/

[26] NSF/ANSI 61 – 2016 International Standard/American National Standard for Drinking Water Additives: Drinking water system components — Health effects, NSF International

[27] Kightlinger Diana. Hygiene Standards Make Drinking Water Safer in the European Union, Currents, Jul 23, 2024, [Internet], Dostupno na: https://www.idexxcurrents.com/en/latest/hygiene-standards-make-drinking-water-safer-in-the-european-union/

[28] Gočanin Sonja, Kakav je kvalitet vode za piće u Srbiji? *Radio Slobodna Evropa*, 26. avgust/kolovoz, 2024.

[29] Voda za piće u Srbiji – tokom leta mnogima nedostupna, a u ostatku godine i nekvalitetna, *INSAJDER*, 11.08.2024, [Internet], Dostupno na: https://www.insajder.net/teme/voda-za-pice-u-srbiji-tokom-leta-mnogima-nedostupna-a-u-ostatku-godine-i-nekvalitetna

[30] Directive 2000/60/ec of the european Parliament and of the Council of 23 October 2000, Official Journal of the European Communities, 22.12.2000.

[31] Zdravstveno-statistički godišnjak Republike Srbije 2023, Institut za javno zdravlje Srbije „Dr Milan Jovanović Batut“, Beograd, 2024.

[32] Ilić Mirković M. Šokantan izveštaj Batuta o česmovači: U ovim gradovima voda nije za piće, a u 15 mesta je čist otrov, NOVA.RS, 17. oktobar 2022.

[33] M. R. Istraživanje Batuta: Trećina Srbije nema ispravnu vodu za piće, Dnevni list *Danas*, 18.10.2022.

[34] *Izveštaj o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće javnih vodovoda i vodnih objekata u Republici Srbiji za 2022. godinu*, Institut za javno zdravlje Srbije „Dr Milan Jovanović Batut“, Beograd, 2023.

[35] Five key areas in which Artificial Intelligence is set to transform water management in 2025, IDRICA, March 21, 2025.

[36] Team DigitalDefynd. 10 Ways AI Is Being Used in Water ResourceManagement [2025], DigitalDefynd, 2025.

[37] The Role of AI in Plumbing: SmartDiagnostics and Predictive Maintenance, PLUMB, [Internet], Dostupno na: https://plumbacademy.com/

[38] Smart Plumbing Systems: The Future of Leak Detection and Water Efficiency, May 15, 2025.

[39] Maroju RG et al. Application of Artificial Intelligence in the Management of Drinking Water: *A Narrative Review*, CUREUS, 15(11):e49344, Nov 24, 2023.

[40] Morain A et al. Artificial Intelligence for Water Consumption Assessment: State of the Art Review, *Water Resources Management*, 38, pp. 3113–3134, 25 April 2024.

[41] Steven. 5 Best Methods to Detect Underground Pipe Leaks, Big Stuff 3 Plumbers, September 15, 2024.

[42] Jenny H et al. Using Artificial Intelligence for Smart Water Management Systems, ADB BRIEFS No. 143, June 2020.

[43] Kamyab H et al. *The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management*, Results in Engineering, 20, 2023.

[44] Infant SS et al. *Explainable artificial intelligence for sustainable urban water systems engineering Results in Engineering*, 25, 2025.

[45] Caraan G. Using AI and IoT in Plumbing Systems, InvoiceASAP, November 26 2024.

[46] Truong T. P. *Towards an IoT-Based System for Monitoring of Pipeline Leakage in Clean Water Distribution Networks*, EAI Endorsed Transactions on Smart Cities, 31 March 2022.

[47] Rapaka R. The Role of Artificial Intelligence in Modern Water Leak Detection, LinkedIn, Nov 4 2024.

[48] Yussof NAM. Review of Water Leak Detection Metho buildingsds in Smart Building Applications, *Buildings*, 26 September 2022.

[49] How AI and Smart Sensors Are Changing Leak Detection in 2025, Magnificent Plumbing & Rooter, February 12, 2025.

[50] Islam MR. An Intelligent IoT and ML-Based Water Leakage Detection System, IEEE Access, pp. 123625-123649, Vol. 11, 2023.

[51] Fu G et al. The role of deep learning in urban water management: A critical review, Water Research 223, 11 August 2022.

[52] Every drop counts: The case for Water 4.0, *Global water intelligence, Sponsored content: SIEMENS*, 1 April 2020, [Internet], Dostupno na: https://www.globalwaterintel.com/-sponsored-content/every-drop-counts-the-case-for-water-4-0-siemens

[53] The digital water utility, White paper on the potential of smart metering, *KAMSTRUP A/S*, 15 p., [Internet], Dostupno na: https://www.kamstrup.com/en-en/-/media/files/pdf/white-papers/digital-water-utility/en_kamstrup_digitalwater_whitepaper_tryk.pdf

[54] Wartinger H. *Smart Water and Wastewater Plants: How a Digitized Workforce Drives Higher OpEx Reductions*, White paper, Schneider Electric, [Internet], Dostupno na: https://-down-load.schneider-electric.com/-files?p_enDocType=-White+Paper&p_File_Name=WWW+-digitized+workforce_998-20553562_GMA-US.pdf&p_Doc_Ref=998-20553562_GMA-US

[55] *Profile of the german water sector 2020*, 68 p., Version: January 2021, ATT, BDEW, DBVW, DVGW, DWA, and VKU, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, [Internet], Dostupno na: https://www.bdew.de-/media/documents/-6000_Sector_profile_of_-the_German_water_sector_published_in_English.pdf

[56] Müller-Czygan G. *Smart Water—How to Master the Future Challenges of Water Management*, IntechOpen, 16 p., Published: February 13th 2020, [Internet], Dostupno na: https://www.-intechopen.com/chapters/70825

[57] Olsson G. Urban water supply automation – today and tomorrow, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70 (4): 420–437, [Internet], Dostupno na: https://-iwapon-line.com-/aqua/article/70/4/420/78365/Urban-water-supply-automation-today-and-tomorrow, 2021.

[58] Figueiredo I, Esteves P, Cabrit P. Water wise – a digital water solution for smart cities and water management entities, *Procedia Computer Science* 181, pp. 897–904, 2021.

Синиша Гајин[1]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25057G

ЈКП „ВИК“ И МЕДИЈИ – САРАДНИЦИ ИЛИ СУПАРНИЦИ?

Резиме: Водоводна предузећа и медији су природно упућени једни на друге. Због свог значаја у друштву, рад водоводних предузећа често је предмет интересовања медија. Медији су потребни водоводним предузећима како би информације о раду дошле до што већег броја корисника услуга и како би градили свој имиџ у јавности. И поред заједничког интереса да јавност буде информисана, оптужбе за несарадњу често долазе с обе стране. Ко је због тога крив, медији или предузећа? ПР менаџери или новинари? Или можда неко трећи? Да ли могу бити сарадници и шта је потребно да би то постали?
Кључне речи: водоводна предузећа, медији, сарадници, супарници, односи с јавношћу

WATER COMPANIES AND MEDIA – ASSOCIATES OR RIVALS?

Abstract: Water companies and the media are naturally referred to each other. Due to its importance in society, the work of water companies is often the subject of the media interes. The media are needed to water companies so that information about the work has reached as many users of services as well as to build their image in public. Despite the common interest that the public be informed accusations of uncooperative often come from both sides. Who is the guilty media or the company because of that? PR Managers or journalists? Or maybe someone third? Can they be associates and what it takes to make it?
Key Words: water companies, media, associates, rivals, public relations

1. Увод

Због свог значаја који водоводна предузећа имају у друштву, монополског положаја и чињенице да је целокупна јавност са територије коју покривају и корисник њихових услуга, разумљиво је да је иста та јавност заинтересована за њихов рад. Предузећа имају законску, а због поменутих разлога и моралну обавезу да јавност редовно информишу о свом раду.

Комуникацију предузећа спроводе односи с јавношћу (ОСЈ, ПР) стратешки, плански и континуирано пласирајући информације путем медија масовне комуникације и сопствених интернет медија, са циљем да јачају имиџ предузећа у јавности.

Медији представљају чуваре јавног интереса, задатак им је да благовремено и тачно информишу јавност о свим релевантним информацијама и посредник су између предузећа и јавности. Предузеће им обезбеђује квалитетне информације и изворе.

[1] *ЈКП „Водовод и канализација“ Зрењанин, sinisa.gajin@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9875-9053*

Дакле, циљеви водоводних предузећа и медија су исти – информисање јавности, за реализацију тог циља су неопходни једни другима, међусобно се помажу и природни су савезници, али су ипак присутне честе оптужбе обе стране о лошој сарадњи и неразумевању. Узрок неразумевања лежи у чињеници да наступају са различитих позиција, имају различите интересе и начине рада. Не сме се занемарити ни чињеница о власничким односима, док су предузећа у власништву локалних самоуправа, медији се финансирају из државног буџета и приватног капитала, што се деценијама често користи у дневно политиче сврхе. Политичка подела медија на подобне и неподобне, па чак и међусобни напади између медија, несумњиво се рефлектују и на сарадњу водоводних предузећа и медија.

Жеља аутора, који двадесет година сарађује и ради са медијима, је да укаже да је и поред свих разлика међусобна сарадња на обострано задовољство и корист ипак могућа. За то је потребо да предузеће односе са медијима повери односима с јавношћу који ће градити дугорочне односе с медијима засноване на међусобном поверењу, уважавању и поштовању. У том циљу су презентовани резултати истраживања у ком су учествовали ПР практичари из јавних предузећа и установа и новинари, а које указује на њихове међусобне односе и узрочнике проблема у међусобној сарадњи.

2. Предузеће и медији

Водоводна предузећа оснива локална самоуправа, која има два од три представника у надзорном одбору предузећа, спроводи конкурс за избор директора, одлучује о надлежностима предузећа, ценама комуналних услуга, кроз субвенције омогућује средства за веће инфраструктурне радове, машине и опрему. Успех водоводног предузећа се не огледа само кроз ефикасност испуњавања обавеза из своје надлежности, већ како и на који начин комуницира са јавношћу и информише је о свим важним активностима.

Циљеви комуникације предузећа су: информисање јавности, промена или утемељење начина њеног размишљања и деловања и повећање имиџа у јавности. Ка испуњењу наведених циљева користи и главне сараднике има у медијима масовне комуникације, којима пласира жељене или тражене информације и путем којих те информације на брз и ефикасан начин долазе до великог броја корисника услуга.

Извештавајући јавност предузеће пре свега жели да истакне и промовише своје добре пословне резултате, унапређење инфраструктуре и услуга, допринос локалној заједници, добар рад са корисницима, добру сарадњу са оснивачем и пружи сервисне информације. Предузеће са медијима комуницира стратешки, плански и континуирано путем односа с јавношћу којима су поверени односи с медијима.

Медији се сматрају једном од најјачих друштвених сила, тзв. „седма сила“ која има задатак да одговорно и објективно извештава јавност о свим релевантним догађајима и темама. Они делују на промену ставова, изградњу или промену мишљења јавности. Масовни медији обухватају медије који досежу до великог броја људи и деле се на традиционалне у које спадају штампа, телевизија и радио и нове медије где су интернет и друштвене мреже. Медији могу бити локални, регионални и национални.

Финансирају се од стране државе (јавни сервиси), приватног капитала, оглашавања и из буџета путем конкурса државе, покрајине и локалних самоуправа.

Новинарство мора да се темељи на истинитости, тачности, објективности, непристрасности и уравнотеженом извештавању.

Циљеви медија: информисање јавности, повећање удела у укупној гледаности или читаности и на тај начин повећање прихода. Медији користе информације које пласира водоводно предузеће као основ за израду вести, коју ће путем сопствених канала дистрибуирати јавности. Иако имају заједничи циљ – обавештавање јавности, иако су природно ослоњени једни на друге и међусобну сарадњу, постоје одређене несугласице између водоводних предузећа и медија.

Оно што медији замерају водоводним предузећима, али генерално и целом јавном сектору: да су спремни на сарадњу само када је она у њиховом интересу; да не желе да одговарају на сва питања која им се доставе и да сарадњу условљавају бирањем тема разговора; да немају организоване односе с јавношћу или представнике задужене за сарадњу са медијима; да тамо где постоје односи с јавношћу исти немају слободу у комуникацији и да су под контролом директора; да не познају начин рада и функционисање медија; да су често недоступни или не желе да одговоре на позиве новинара; да су под великим утицајем оснивача и политичких носиоца власти; да из политичких разлога новинаре деле на подобне и неподобне; да прикривају чињенице које би наштетиле угледу предузећа или оснивача и слично.

С друге стране, водоводна предузећа медијима замерају; да су превише и неосновано критички настројени; да теже сензационализму; да су непријатељски расположени и фокусирани само на проналажење мана у пословању; да изврћу чињенице и износе неистине у циљу узнемиравања јавности и наношења штете угледу предузећа из политичких разлога; да су често сујетни, непрофесионални, нападни и нестрпљиви; да желе да сарађују само када је то њима у интересу.

Иако су неке од наведених међусобних оптужби тачне и делују као озбиљне препреке у сарадњи, у пракси су неспоразуми често испади појединаца и резултат притиска које обе стране имају у постизању својих циљева и могу се предупредити уколико у предузећима постоје добро организовани односи с јавношћу и постоји изражена добра воља, разумевање и уважавање с обе стране.

На основу општих карактеристика водоводних предузећа и медија и међусобних оптужби могу се дефинисати неки од потенцијалних проблема у међусобној комуникацији: власничка структура и политички утицај; наступање са различитих позиција – предузеће промовише свој рад и јача имиџ, а новинари трагају за вестима које ће привући веће интересовање јавности; одбијање предузећа да одговори на сва питања и сензационализам медија; непостојање односа с јавношћу у предузећу или особе задужене за медије; непознавање рада медија и предузећа – предузеће не поштује рокове, а медији се понашају као да је сарадња са њима једини посао предузећа или односа с јавношћу; недовољна компетентност ПР менаџера и новинара; несамосталност у раду ПР менаџера и новинара – превелик утицај директора предузећа и уредника медија.

3. Односи с јавношћу као носиоци односа са медијима

Односи с јавношћу (ОСЈ, ПР) јесу менаџерска функција која идентификује, успоставља и одржава обострано корисне релације између предузећа и различитих јавности (где спадају и медији) од којих зависи успех или неуспех предузећа [1].

Битно је нагласити да односи с медијима, иако су једна од важнијих активности ОСЈ није једина, већ напротив, у активности спадају и рад са корисницима, брига о имиџу и идентитету организације, саветовање менаџмента, интерна и екстерна комуникација чији су медији део, управљање кризним ситуацијама, организовање специјалних догађаја, публикације, спонзорства и слично.

Да би све наведене активности, а нарочито односи с медијима, биле успешно реализоване неопходно је да предузеће има организоване ОСЈ у виду службе или сектора, пожељно је да ПР менаџер, односно руководилац сектора за комукације предузећа или службе ОСЈ, буде део менаџмента јер се активности ОСЈ прожимају кроз цело предузеће, а што у пракси у водоводним предузећима није случај, и обавезно да ПР менаџер има од стране директора предузећа слободу и самосталност у раду.

Због специфичности посла и његовог значаја за предузеће, од кључне важности је да особа која је постављена за ПР менаџера има потребне компетенције и лични и професионални интегритет за обављање тог посла, као и пуну подршку директора и свих нивоа менаџмента у реализацији активности ОСЈ.

ОСЈ стратешки, плански и континуирано граде односе с медијима на основу међусобног поверења, уважавања и поштовања, достављајући медијима жељене или тражене информације које ће они пласирати путем сопствених канала комуникације јавности, а са циљем да информишу јавност, утичу на њене ставове и понашање и граде имиџ предузећа у јавности.

Коректан и професионалан однос са медијима, доступност медијима, редовно обавештавање јавности о свим кључним активностима и транспарентност свих пословних резултата, редовно и брзо одговарање на сва питања медија, брзе и тачне информације и потпуна отвореност према јавности гарант су јачања имиџа предузећа.

Посебно је битна брзина и начин реаговања у кризним ситуацијама (велике хаварије, технички проблеми, финансијски проблеми, смена директора и слично) од чега умногоме зависи и имиџ предузећа у јавности. Информације морају бити правовремене и тачне. Од искрености комуникације зависиће и расположење јавности за време, а нарочито након завршетка кризе.

Један од кључних услова за успешне односе с медијима је тај да у предузећу мора да буде добро развијена интерна комуникација која омогућава ОСЈ прилив свих потребних информација да их плански и на време дистрибуирају медијима или одговоре на њихова питања.

ОСЈ са медијима комуницирају путем саопштења за јавност, конференција за медије, давањем изјава, интервјуа и гостовањем у емисијама, слањем одговора на постављена питања, објављивањем садржаја на веб страници и друштвеним мрежама предузећа и друго.

У свом раду ОСЈ користе све расположиве врсте медија (телевизију, штампу, радио, интернет медије), локалне, регионалне и националне, јер само на тај начин могу да обезбеде да што шира јавност добије потребну информацију.

4. ПР менаџери и новинари

У пракси је најчешћи случај да се комуникација између предузећа и медија одвија преко њихових представника – ПР менаџера и новинара. У западној стручној литератури о ОСЈ преовладава мишљење и став, а који су преузели и бројни аутори у земљи и региону, да су ПР менаџери и новинари вечити непријатељи и супарници, који, између осталог, сумњају у међусобне компетенције, оптужују се за непрофесионализам, сујету, несарадњу и лоше обављање посла, да су њихови односи главни разлог за лошу сарадњу предузећа и медија, да се не препоручује ПР менаџерима да граде пријатељске односе с новинарима и да буду пажљиви и током неформалне комуникације, јер изречене информације могу бити злоупотребљене од стране новинара.

Задатак ПР менаџера је да прати и анализира медије, да се упозна са њиховим радом, односно када дистрибуирају вести, да припрема саопштења за јавност са пропратним фотографијама или одговоре на питања, у складу са начином на који медији извештавају, и да их доставља у дефинисаном року. Саопштења за јавност морају бити без правописних грешака и тако конципирана да одговоре на пет основних новинарских питања: ко, шта, кад, где и зашто, да садрже чињенице без претераних дотеривања и улепшавања садржаја и дужине текста прилагођеног начину извештавања медија, како не би долазило до измена текста и његовог скраћивања од стране уредника. ПР менаџер мора бити спреман да достављене информације, на захтев новинара, допуни.

ПР менаџер мора да увек буде доступан медијима, спреман да пружи тражени одговор, који никада не сме бити „немам коментар“. Такав одговор, нарочито у кризним ситуацијама, као и игнорисање достављених питања новинара, може само негативно утицати на имиџ предузећа, јер ствара сумњу јавности да се нешто крије, а и на сарадњу са новинаром, јер га одбијање може подстаћи на још већи притисак да до њега дође и на негативно извештавање о предузећу. С друге стране, новинар треба да поштује, од стране ПР менаџера дефинисане начине за достављање питања или заказивања интервјуа, да зна да ПР менаџеру сарадња са медијима није једина активност којом се бави у свом послу и да не може увек „сад и одмах“ да буде доступан за разговор и достављање информација, као и да мора да му пружи разумно време да прибави све потребне информације од надлежних служби предузећа и сачини одговор или припреми одговор за усмену изјаву.

Истицање улоге оснивача или виших органа власти у обезбеђивању средстава за инвестиције или набавку опреме је обавеза ПР менаџера у циљу објективног информисања јавности и није нужно циљ промоције политичких доносиоца одлука, што треба да буде прихватљиво новинару, без обзира на његов лични или став медијске куће којој припада, као и што ПР менаџеру треба да буде прихватљив, уколико тачно пренесу његову изјаву, критички однос новинара према теми или критички, па чак и

сензационалистички, наслов за пренету вест. Интервенисање ПР менаџера у том случају сматрало би се мешањем у уређивачку политику медија, што се не препоручује, као ни упорно инсистирање новинара на теми за коју је предузеће аргументовано објаснило зашто није у прилици да о њој јавно разговара. На основу наведеног може се увидети да већина потенцијалних несугласица између ПР менаџера и новинара може бити превазиђена међусобним разумевањем и уважавањем и професионалним односом према супротној страни. Поред тога, кључну улогу у превазилажењу несугласица и остваривању заједничког циља – информисања јавности и то на обострано задовољство може, супротно наведеном мишљењу теоретичара ОСЈ, да обезбеди развијање пријатељских односа између ПР практичара и новинара. Природно су упућени једни на друге у остваривању својих циљева, врло често су у контакту и управо развијени пријатељски односи помажу да се боље схвате међусобне обавезе, разумеју проблеми са којима се суочавају у свом раду и да се много лакше пронађе компромис, који ће омогућити обема странама да успешно изврше своје обавезе. Дакле, уколико обе стране поседују компетенције, имају изграђен професионални и лични интегритет и пријатељске односе, то ће омогућити да се превазиђу све несугласице и створе међусобни односи засновани на уважавању, поверењу и поштовању.

Да би информације дошле до што већег броја корисника, ПР менаџер у свом раду користи подједнако, без обзира на њихову власничку и уређивачку политику, све масовне медије са локалном, регионалном и националном покривеношћу. Због чињенице да водоводно предузеће послује на локалном нивоу, а да су информације о локалним дешавањима слабо заступљене на медијима који имају националну покривеност, акценат треба да буде на сарадњи са регионалним, а нарочито са локалним медијима. Због значаја за становништво које живи на територији на којој послује водоводно предузеће за рад истог, а нарочито за сервисне информације, постоји природна заинтересованост медија. Управо та чињеница може да буде добра полазна основа за добру сарадњу са медијима, али и камен спотицања уколико се не искористи на прави начин. Уколико ПР менаџер редовно и брзо доставља све сервисне информације медијима и покаже отвореност и спремност за сарадњу у кризним ситуацијама, може да очекује да медији касније покажу спремност да на основу публицитета (без плаћеног оглашавања) објаве текстове који су од значаја за предузеће, у супротном то се тешко може очекивати. То се исто односи и на редовно одговарање на достављена питања од стране новинара.

Простор у медијима је сужен и до њега се тешко долази. Из тог разлога ПР менаџер треба увек да има спремну причу или информацију коју може да понуди новинару у случају да му из неких разлога хитно треба вест да попуни простор на свом медију који је изненада настао. На тај начин ПР менаџер обезбеђује предузећу додатни бесплатни простор у медијима, шаље новинару поруку да се на њега увек може ослонити у таквим ситуацијама, развија добре међусобне односе и потенцијално отвара простор за објављивање текстова који су значајни предузећу.

Предузећа треба да негују проактиван приступ, односно да сами иницирају контакте са медијима и нуде информације за објављивање, а не да се понашају пасивно и чекају да добију питања од медија и да реагују само када треба да се бране.

5. Истраживање

У наставку ће бити презентован део резултата истраживања које је спровео аутор за потребе увида у стање односа с јавношћу у локалним јавним предузећима и установама и давање мера за њихово унапређење, а који се односе на међусобне односе новинара и ПР менаџера, као и на проблеме у њиховој сарадњи и генерално у сарадњи новинара и предузећа. Због ограниченог простора, наводе се само описно најважнији ставови и мишљења ПР менаџера и новинара око којих се највећи број истих изјаснио, без навођења свих питања и предложених опција за одговоре [2].

У истраживању, које је обухватало анонимно попуњавање анкентног листа, је учествовало 12 ПР менаџера, ПР практичара или особа задужених за контакт са медијима из 11 од 19 јавних предузећа и установа у Граду Зрењанину и из кабинета градоначелника и 19 новинара из 18 медија, колико их је и регистровано на територији Града Зрењанина. Резултати се могу сматрати релевантним јер се проблеми у односима с медијима водоводних предузећа не разликују значајно од осталих локалних предузећа и установа, и могу се посматрати у ширем контексту јер у великој мери осликавају генерално стање у јавном сектору. Запослене особе које се баве пословима везаним за односе с јавношћу, а да исти нису директори или припадници најужег руководства организација, има само половина јавних организација чији је оснивач Град Зрењанин, и градска управа у оквиру кабинета градоначелника.

У само две организације постоје службе које се баве пословима везаним за ОСЈ, док се у осталим ПР практичари углавном налазе у оквиру неких других служби предузећа и у највећој мери сами обављају активности односа с јавношћу. 9 ПР практичара, од 12 анкетираних, нису директно подређени директору. Буџет за активности односа с јавношћу не постоји у 66,7% анкетираних организација, а тамо где постоји ПР практичари не учествују у његовој изради. Да менаџмент организација у потпуности схвата значај односа с јавношћу не мисли ни један анкетирани из обе групе испитаника. Што се тиче самосталности ПР практичара, код обе групе испитаника доминира заједнички став да менаџмент организација има велики, па и потпуни утицај на рад ОСЈ, и да је тренутно излишно говорити о њиховој самосталности у раду. ПР практичари су своју самосталност у раду, на скали од 1 до 4, оценили оценом 2,2 док су новинари самосталност у раду ПР практичара оценили оценом 1,8 што је и најнижа оцена дата од стране новинара током оцењивања.

Да би односи с јавношћу требали да буду део управљачког менаџмента организација сматра 75% анкетираних ПР практичара. Да ОСЈ треба да утиче на стратешке одлуке организација зато што комуникацијске и стратешке организационе одлуке имају међусобног утицаја, сматра 11 од 12 анкетираних ПР практичара, док је истог мишљења и 73,7% анкетираних новинара. Састанцима Надзорног одбора предузећа не присуствује чак 75%, док колегијумима предузећа редовно присуствује само трећина ПР практичара.

Упоређујући добијене резултате ПР практичара и новинара издвајају се две врсте претходног образовања које су најповољније за посао ПР практичара – менаџмент и журналистика.

Половина код обе групе анкетираних је навела да им се у послу ПР практичара не допадају политички притисци.

Да је посао ПР практичара изузетно и врло значајан сматра 83,3% ПР практичара, док је код новинара тај број 100%. Своју стручност у обављању посла ПР практичари доста високо позиционирају јер више од половине њих сматра да су високе и изузетне стручности, док исти број новинара сматра да су ПР практичари просечне стручности. Половина ПР практичара је просечно мотивисано за посао који обавља што сматра исти број новинара. Код ПР практичара доминира став да ПР практичари у јавном сектору задовољавајуће квалитетно раде свој посао, за шта се изјаснило 67% анкетираних, док код половине новинара преовладава став да ПР практичари просечно квалитетно раде свој посао. Да ПР активности имају изузетан допринос на имиџ организација у јавности сматра 83,4% ПР практичара и 73,7% новинара. Да постоје примери у локалном јавном сектору где су резултати рада ОСЈ организације на много вишем нивоу од резултата рада саме организације потврдила је половина анкетираних новинара, колико и мисли да постоје примери да је добар рад ПР практичара допринео видном побољшању комуникације организације са медијима и имиџу организације у јавности.

Оцена редовности одговора предузећа на питања, на скали од 1 до 5, од стране ПР практичара износи 4,6 а од стране новинара 4,1. 78,9% новинара сматра да предузећа одговарају на постављена питања углавном брзо, осим на питања која им не одговарају. Највећи број новинара, нешто више од половине и верује и не верује у тачност достављених информација. Да саопштења за медије шаљу редовно свим медијима на територији Града Зрењанина потврдили су сви анкетирани ПР практичари, и то без обзира да ли медији пишу позитивно или не о раду организације. За преношење информација широј јавности ПР практичари у великој мери користе све врсте медија и не искључују ни један медиј у свом раду, а највише користе локалне интернет информативне портале.

Квалитет достављених саопштења од стране ПР практичара новинари су оценили, од 1 до 5, оценом 3,4 док су ПР практичари дали за квалитет својих саопштења оцену 4,5. Доступност медијима ПР практичари су оценили, од 1 до 5, највећом оценом датом у оквиру истраживања и то са 4,9 док су новинари доступност ПР практичара оценили са такође високом оценом 4,3.

Да иницијатива у комуникацији између ПР практичара и новинара долази подједнако са обе стране сматра већина и новинара и ПР практичара. Готово половина новинара тврди да не постоје притисци од стране ПР практичара на уређивачку политику и начин преношења вести, а део сматра да ако постоје притисци они долазе од стране менаџмента организација. Највећи број ПР практичара је углавном задовољно сарадњом са новинарима, док је највећи број новинара углавном задовољно сарадњом са ПР практичарима. ПР практичари су највише задовољни сарадњом са новинарима због следећих ствари: јер имају проактиван приступ, интересују се и траже информације; зато што су увек заинтересовани за сарадњу; јер одговорно и професионално обављају свој посао и зато што стварају пријатељску атмосферу. Новинари су највише задовољни сарадњом са ПР практичарима због следећих ствари:

стварају пријатељску атмосферу, искрени су у комуникацији, јер одговорно и професионално обављају свој посао и зато што су увек доступни медијима.

Половина ПР практичара нема ни један посебан разлог за незадовољство сарадњом са новинарима. Остали ПР практичари су истакли следеће разлоге незадовољства сарадњом: нису довољно стручни нити информисани, заинтересовани су за сарадњу само када је она у њиховом интересу, непрофесионално и неодговорно обављају свој посао. Петина анкетираних новинара нема ни један посебан разлог за незадовољство сарадњом са ПР практичарима, док су остали као разлоге незадовољства истакли: не познају начин функционисања медија, заинтересовани су за сарадњу само када је она у њиховом интересу, недовољно су мотивисани за свој посао, и игноришу осетљива питања.

На основу резултата испитивања могу се уочити главни проблеми у комуникацији између предузећа и медија, а то су пре свега: непрепознавање значаја који ОСЈ имају за предузеће од стране менаџмента, лоше организовани ОСЈ у предузећима или непостојање истих, да тамо где постоје су лоше позиционирани у хијерархији и не припадају менаџменту, да највећи број ПР менаџера није директно подређен директору, да већина предузећа нема планиран буџет за њихове активности а тамо где он постоји да ПР менаџери не учествују у његовој изради. Такође, од значаја је податак да мали број ПР менаџера присуствује састанцима Надзорног одбора и колегијумима предузећа и да су ПР менаџери под великим утицајем директора и немају самосталност у раду. Све наведено указује да ПР менаџери имају озбиљних проблема у реализацији својих активности, а одсуство са састанака на којима се одлучује о пословању и активностима предузећа онемогућује им непосредно прикупљање информација неопходних за квалитетан рад са медијима. Као проблем у раду ПР менаџера обе стране виде политичке притиске, а новинари наводе и неодговарање предузећа на за њих осетљива питања.

Резултати испитивања указују да они који су у литератури ОСЈ означени као „вечити непријатељи и супарници“, ПР менаџери и новинари, нису велика сметња доброј комуникацији предузећа и медија. Напротив, показали су висок степен разумевања послова који обе стране обављају, препознају значај који ОСЈ имају за рад предузећа и његов имиџ у јавности и њихово место у хијерархији предузећа. Једни друге сматрају довољно стручним за обављање посла, углавном су задовољни сарадњом коју имају и већина нема посебне разлоге за незадовољство том сарадњом, немају већих замерки на рад друге стране, на располагању су једни другима, имају подједнаку иницијативу за сарадњу и оно што је битно нагласити и једни и други као разлог задовољства међусобном сарадњом високо котирају – стварање пријатељске атмосфере и одговорно и професионално обављање посла.

6. Закључак

Иако предузећа и медији имају исти циљ – информисање јавности и за реализацију тог циља су неопходни једни другима, ипак постоје честе међусобне оптужбе о лошој сарадњи.

Проблем лежи у чињеници да наступају са различитих позиција, да имају различите интересе и начине рада, а проблеми настају и због власничке структуре, политичке поделе медија на подобне и неподобне и коришћење активности водоводних предузећа у дневно политичке сврхе.

Наизглед озбиљне препреке у сарадњи могу се предупредити уколико у предузећу постоје добро организовани ОСЈ и постоји изражена добра воља, разумевање и уважавање с обе стране.

ОСЈ су носиоци активности односа с медијима у предузећу и представљају њихову кључну активност. Пожељно је да буду део управљачког менаџмента и да имају самосталност у раду са медијима. У свом раду користе све масовне медије, чиме постижу да порука коју шаљу допре до што већег броја корисника.

Иако су у стручној литератури означени као вечити непријатељи, супарници и главна сметња доброј комуникацији између предузећа и медија, пракса и резултати истраживања показују управо супротно, тј. да ПР менаџери и новинари имају довољно висок степен међусобног разумевања и поштовања да створе солидне или чак добре услове за међусобну сарадњу.

Уколико обе поменуте стране поседују компетенције, имају изграђен професионални и лични интегритет и развијен пријатељски однос, стварају се услови да се превазиђу несугласице и створе међусобни односи засновани на уважавању поверењу и поштовању.

Истраживање је показало да су главни проблеми у комуникацији између предузећа и медија то што се не препознаје значај ОСЈ од стране менаџмента предузећа, што предузећа немају развијене ОСЈ, што ПР менаџери немају самосталност у раду са медијима и што су под великим утицајем директора. Као проблеме треба навести и политичке притиске, као и чињеницу да предузећа избегавају одговоре на за њих осетљива питања.

ПР менаџери и новинари могу развити пријатељске односе, а предузећа и медији могу бити добри сарадници на обострано задовољство и корист.

7. Литература

[1] Катлип С. М, Сентер А. Х, Брум Г. М, *Успешни односи с јавношћу*, девето издање, Службени гласник, Београд, 2006.

[2] Гајин С, *Стање и унапређење односа с јавношћу у локалним јавним предузећима и установама*, магистарска теза, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, 2019.

Нела Вујовић[1], Јелена Зарић[2], Ненад Николић[3]
Срђан Станковић[4], Марија Штуловић[5]
Драгана Радовановић[6], Гвозден Јовановић[7]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK25067V

ДИСТРИБУЦИЈА ГВОЖЂА У БУШОТИНИ РБ-6/П 5Д И ЗНАЧАЈ ИНТЕГРИСАНОГ ИСТРАЖИВАЊА У ВОДОСНАБДЕВАЊУ

Резиме: Велики проблем водоснабдевања јесте процес старења водозахватних објеката, као последица колмирања и корозије, који се дешава услед великог броја фактора на терену. Широк спектар фактора и озбиљан проблем захтевају мултидисциплинаран приступ у истраживању. Овај рад обухвата утврђивање садржаја гвожђа у издвојеним литостратиграфским јединицама као и дистрибуцију садржаја гвожђа по литолошком стубу, нарочито у делу издани, као потенцијалног извора гвожђа и узрочника стварања колматација на филтру бунара, и предлог могућих даљих активности на дефинисању механизма транспорта гвожђа из примарне литолошке средине, као и механизма депоновања минерала гвожђа на филтерској конструкцији.
Кључне речи: изворište, колмирање, синергија, заштита

IRON DISTRIBUTION IN BOREHOLE RB-6/P 5D AND THE IMPORTANCE OF INTEGRATED RESEARCH IN WATER SUPPLY

Abstract: One key challenge in water supply systems is the aging of groundwater wells, due to clogging and corrosion, driven by complex site conditions which require a multidisciplinary approach. This paper focuses on determing the content of iron in lithostratigraphic units, and its distribution along the lithological profile, particularly in aquifre, as a potential source of iron and the causative agent for the clogging on the well screen. This paper also indicates on the activities on the definition of mechanism of transport of iron from primary lithological medium and the processes by which iron minerals are deposited onto the filter structure.
Key words: iron content, colmatation, bacteria, integrated research

[1] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, n.petronijevic@itnms.ac.rs, ORCID: 0009-0004-7451-8897*

[2] *Рударски институт, Београд, jelena.zaric@ribeograd.ac.rs, ORCID: 0000-0003-2066-2418*

[3] *Институт за мултидисциплинарна истраживања, nnikolic@imsi.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-5730-7391*

[4] *Универзитет у Београду, Биолошки факултет, Београд, srdjan.stankovic@bio.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-2034-456X*

[5] *Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета, Београд, mstulovic@tmf.bg.ac.rs; ORCID: 0000-0002-7647-999X,*

[6] *Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета, Београд, divsic@tmf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-2935-7711,*

[7] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, g.jovanovic@itnms.ac.rs, ORCID 0000-0002-9754-2230*

1. Увод

Водоснабдевање градова квалитетном пијаћом водом сваким даном постаје све сложеније и актуелније. Услед повећаног броја становника, интензивнијих периода суша и повећаних захтева пољопривреде, као и пораста великих потрошача попут индустрије, расте и потрошња воде по становнику. За многе градове, међу њима и за Београд, главни извор воде су још увек подземне воде. На београдском изворишту каптирају се подземне воде из издани формиране у оквиру алувијалних наслага реке Саве и слојева плеистоценске старости [1], формираних од бујичних токова отопљених ледника [2]. Током експлоатације бунара долази до смањења издашности бунара услед старења бунара, као последица корозије и/или колматације. Проблем корозије се може решити уградњом материјала отпорних на корозију али процес колматације је доста сложенији и може, осим филтерске конструкције, да се прошири и на прифилтерску зону водоносне средине [3].

Опадање издашности бунара се дешава услед комбинованих хидрогеолошких, хидролошких, хидрауличких фактора, као и физичко-хемијских, механичких и биолошких процеса који се одигравају у издани. Интеракцијом наведених чинилаца долази до формирања колматација, које запушавају отворе на филтерским конструкцијама, чиме се смањује издашност бунара. На београдском изворишту спроведена су опсежна истраживања проблема старења бунара и оно што је заједничко за сва истраживања јесте регистровано присуство садржаја гвожђа у бунарима са колмираним филтерима [4]. Идеја овог рада јесте да се услед великог броја различитих фактора који утичу на проблем старења бунара, укаже на значај мултидисциплинарног приступа у испитивању овог проблема.

Наиме, решавање питања смањења издашности бунара захтева сарадњу више научних и стручних дисциплина. Хидрогеолози се примарно баве капацитетом изворишта, пројектовањем и мониторингом ефеката експлоатације, заштитом подземних вода од прекомерног коришћења и загађења. Биолози анализирају утицај бактерија на стварање биофилмова и наслага у зони филтера, чије је присуство и доказано претходним истраживањима [5]. Са друге стране, инжењери технологије ову проблематику сагледавају кроз дефинисање механизама депоновања минерала гвожђа и услове који доприносе таложењу чврстих материја на филтерској конструкцији, а такође геохемичари спроводе симулације геохемијских процеса у циљу разумевања механизама депоновања гвожђа у воденој средини издани. А свима је заједнички циљ очувања ресурса одговарајућег квалитета и квантитета за будуће генерације. Управо та синергија знања из више области је кључна за разумевање и ефикасно управљање процесима који доводе до колматације и старења бунара.

Истраживање у предметном раду је започето прегледом литературе и конципирањем истраживања. Претходно спроведеним истраживањима је утврђено одређивање садржаја гвожђа у издвојеним литостратиграфским јединицама као и дистрибуција садржаја гвожђа по вертикалном профилу, нарочито у делу издани, као потенцијалног извора гвожђа и узрочника стварања колматација на филтру бунара, на основу чега су конципирана даља истраживања и активности предложене у тексту. Предложене су активности дефинисања механизма транспорта гвожђа из примарне

литолошке средине, као и механизма депоновања гвожђа односно минерала гвожђа на филтерској конструкцији.

2. Методе

Истраживање хидрогеолошких услова београдског изворишта је започето под руководством професора Милана Димкића, чији допринос у овој области остаје од великог значаја. Објављено је више научних радова на међународном нивоу који се баве анализом локалних хидрауличких губитака, као и везом између хидрохемијских и микробиолошких услова у зони бунара и пораста хидрауличких отпора [6-8]. Посебно се истиче публикација из 2011. године [6], у којем је предложена методологија за одређивање критичних улазних брзина протока на основу гранулометријског састава средине, вредности редокс-потенцијала, концентрације укупног и раствореног гвожђа, као и броја активних бактеријских ћелија способних да доведу до колматације.

Истраживања улога бактерија у циклусима кружења гвожђа и мангана у природи датирају још од почетка 20. века. Један од првих који се бавио гвожђевитим бактеријама био је Elis [9], затим Colmer и сар. [10], док је Harder [11], проучавао зависност између бактерија које депонују гвожђе и геолошке средине. Проблеми берлинског водовода и комлирања бунара, су представљени у раду Hesselbarth и Ludemann-а док је Бабић [12], упоредио те налазе са проблемима на београдском изворишту.

Истраживачи Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина (ИТНМС) и сарадници из Иновационог центра Технолошко-металуршког факултета и Института за мултидисциплинарна истраживања, су такође спроводили истраживања везана за популацију гвожђевитих и манганских бактерија у изданским водама београдског изворишта [13] као и истраживања везана за кинетику таложења гвожђевитих јона [14], [15]. У кабинетским условима извршена је анализа и синтеза претходних резултата. Такође је спроведена и рачунарска симулација на основу расположивих података из литературе, како би се потврдиле претпоставке везане за ове компликоване услове на терену и добиле смернице за даља испитивања. За потребе ранијих истраживања урађено је више истражних бушотина, од којих је бушотина Rb-6/P-5d одабрана за даља детаљна истраживања. Ова бушотина је урађена у зони дренова бунара са хоризонталним дреновима (рени бунара) на београдском изворишту.

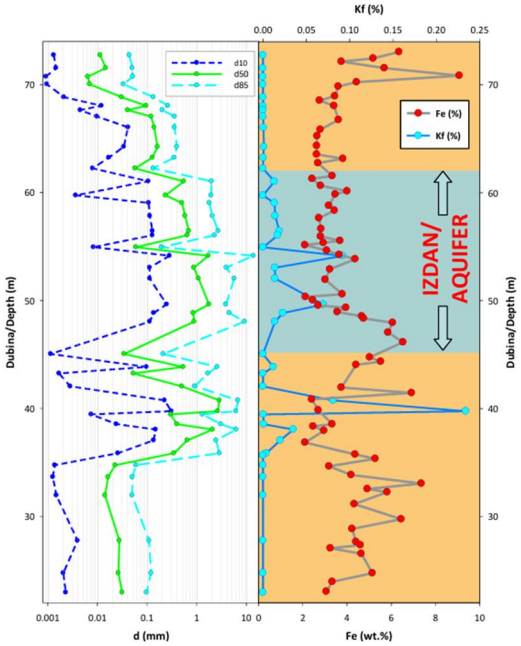
Током бушења рађено је континуирано узорковање, а затим картирање језгра бушотине Rb-6/P-5d. На основу састава седимента као и боје, селектовани су репрезентативни узорци из свих литолошки специфичних интервала и извршено је узорковање за одређивање гранулометријског састава и класификацију кластичних седимената селектованих узорака. Након одабира репрезентативних узорака урађена је припрема за анализу портабилним XRF уређајем. Потребно је напоменути да је боја узета и као потенцијални индикатор за садржај гвожђа, што је касније и потврђено. На основу ових резултата, хемијских анализа подземне воде из ове бушотине, настављено је са кабинетским радом и симулацијом могућих процеса.

Истраживачки тим је, на основу добијених резултата о садржају гвожђа и мангана [4, 13, 16], као и параметара Eh/pH и температуре, спровео моделирање у софтверу

PHREEQC (верзија 2.0), у циљу симулације услова и процеса таложења у зони филтера. PHREEQC је софтверски алат намењен симулацији геохемијских процеса, као што су растварање и депоновање минерала минерала као и моделовање транспорта метала у геолошкој средини. Софтвер иначе није намењен за моделовање утицаја бактерија у формирању минералних фаза, механизам и кинетику реакција. Базиран је на моделовању јонских равнотежа у воденој средини и омогућава бројне калкулације, укључујући: формирање хемијских једињења, услова таложења односно индекса засићења (SI)[17].

3. Резултати

На основу картирања језгра бушотине Rb-6/P-5d, израђен је прелиминарни литолошки профил наслага у близини рени бунара. Све издвојене литостратиграфске јединице подвргнуте су гранулометријској анализи, којом је утврђена величина и дистрибуција величине зрна, што је послужило за класификацију кластичних седимената и израду литолошког стуба (слика 1). На одабраним, уситњеним узорцима одређен је и садржај гвожђа, који је затим приказан као дистрибуција по дубини у односу на теренску коту (слика 1б). Поред тога, на основу гранулометријских података, за све јединице израчунати су и коефицијенти филтрације (слика 1б).



Слика 1. а) Дистрибуција величине зрна у седиментима у литолошком стубу на локацији бушитине Рб-6/П-5д, б) Садржај гвожђа и израчунати коефицијенти филтрације у седиментима у литолошком стубу [4]

Figure 1. a) Grain size distribution in sediments in stratigraphic column at well site Rb-6/P-5d, b) Fe contents and calculated filtration coefficients in stratigraphic column [4]

Резултати симулације на основу хемијских анализа из истражне бушотине Rb-6/P-5d приказани су у оквиру табеле 1. Софтверском анализом симулирани су утицај промене оксидо-редукционих услова на депоновање минерала, нарочито асоцијацију минерала гвожђа на основу доступних података хемијских анализа воде за бушотину Rb-6/P-5d. Иницијално симулација је рађена за теренски мерену вредност редокс потенцијала Eh од 115 mV, али је у обзир узета и могућност повећања потенцијала услед интеракције узорковане воде са кисеоником из атмосфере током узорковања.

Табела 1. Резултати симулације PHREEQC софтвера
Table 1. PHREEQC software simulation results

Element	Mineral	Eh	60	90	115
		Formula	Indeks zasićenja		
Ca	Kalcit	$CaCO_3$	0.77	0.75	0.73
SiO_2	Kalcedon	SiO_2	0.37	0.37	0.37
Fe	$Fe(OH)_3$	$Fe(OH)_3$	0.68	1	1.18
	Getit	FeOOH	5.95	6.28	6.46
	Hematit	Fe_2O_3	12.85	13.5	13.5
	Siderit	$FeCO_3$	0.49	0.49	0.33
Ni	Ni_2SiO_4	Ni_2SiO_4	4.93	4.93	4.84

Стога је извршена и анализа при нижим вредностима Eh (до 60 mV) као потенцијално најнижа за средине као што су издани, како би се испитала стабилност и услови таложења минералних фаза, пре свега гетита и ферихидроксида. Резултати модела показали су да се гетит и ферихидрит таложе у целом распону испитиваних вредности Eh, од 60 до 115 mV, са индексом засићења у опсегу од 0,7 до 1,2. То указује да би услови за њихово таложење били остварљиви и при нижим вредностима редокс потенцијала.

Вредност од 60 mV, коју смо симулирали као доњу границу, приближно одговара просечним условима у киселим рудничким водама. Стога се може закључити да је процес таложења гетита у великој мери независан од промена Eh у овом опсегу. Међутим, како софтвер не узима у обзир биохемијске утицаје, додатни допринос бактерија у процесу преципитације гвожђа није укључен у модел. Постоји могућност да је у стварности присутна и компонента биолошке оксидације, те би будућа истраживања требало усмерити ка прецизнијем раздвајању геохемијских и биохемијских процеса.

Такође познато је да на вредностима pH изнад 3, гвожђе исталожено у облику аморфног хидроксида или/и оксихидроксида, има велике адсорпционе површине и може да веже и део сулфата [19, 20] или може бити повољна површина за копреципитацију других метала. Ово би требало да буде предмет детаљних истраживања од стране мултидисциплинарног тима, јер може значајно да утиче на квалитет водоснабдевања. Када је реч о калциту и калцедону, моделирање је показало њихову стабилност током целог распона Eh вредности, што је у складу са очекивањима јер њихово таложење није осетљиво на редокс услове. Исто важи и за Ni_2SiO_4. Модел је

указао на потенцијалну могућност формирања хематита и сидерита, али у реалним теренским условима [18], где време рекристализације и кинетика играју значајну улогу, овај процес је мало вероватан. Стога се њихово присуство сматра теоретски могућим, али практично ограниченим.

4. Дискусија

На основу литолошке грађе и вредности коефицијената филтрације добијених из гранулометријске анализе, процењује се да се зона издани, коју захвата рени бунар у близини бушотине [/P-5d, пружа у интервалу од приближно 12,2 до 27 метара дубине. У овом интервалу доминирају седименти са најмањим уделом фине фракције, што указује на њихову добру пропустљивост [4].

Подину водоносног слоја чине тзв. „шарене глине“ еоплеистоценске старости, за које не постоје тачни палеонтолошки подаци, али се претпостављају као најстарије јединице јер леже испод плеистоценских наслага. Издану зону чине полициклични плеистоценски слојеви у којима се смењују шљунковито-песковити и глиновити седименти, таложени током смењивања глацијала и интерглацијала. Најпропуснији шљунковити слојеви, смештени директно изнад „шарених глина“, представљају кључну дренажну зону рени бунара. Повлату део водоносног слоја сачињавају млађи, холоценски седименти — црвено-мрке глине (фација поводња) и песковите глине (фација речног корита). Минералошке анализе узорака из бушотине Rb-6/P-5d нису урађене, али су коришћени упоредиви подаци из бушотине РБ-6/П-3д, удаљене око 50 метара. Узорци са дубина од 16 и 21 метар, у близини дренажне зоне рени бунара, показали су присуство минерала гвожђа као што су хематит, магнетит, лимонит, хромит, илменит, пироксени и амфиболи, у укупном уделу од око 2 wt.%. Подаци добијени XRF анализом указују да се садржај гвожђа у водоносном слоју (издани) креће од 2 до 4,5 wt.%, док је у покровним глинама тај садржај значајно виши – од 3 до 9 wt.%, што у сагласности са израженијом црвено-мрком бојом глина.

У подинским седиментима (испод 27 метра), садржај гвожђа такође варира у распону од 2 до 7 wt.%. Ове разлике указују на процес осиромашења издани у гвожђу, услед растварања минерала и миграције раствореног гвожђа. Највиши садржај гвожђа у водоносном слоју забележен је у његовом доњем делу, што указује да је део раствореног гвожђа депонован у тим дубљим зонама. Анализа гранулометрије показује позитивну корелацију садржаја гвожђа и глинене фракције, што указује на адсорпцију гвожђа на честицама глине и/или директно таложење као аморфно Fe, што би указивало на његову колоидну природу. С обзиром да је укупни садржај гвожђа знатно већи од количине гвожђа везаног за идентификоване минерале (до 2 wt.%), претпоставља се да значајан део гвожђа постоји у колоидном облику. Резултати симулације указују на услове засићења у појединим зонама и потенцијалну појаву талога окси-хидроксида гвожђа, што може довести до постепеног или потпуног смањења пропустљивости филтерског простора. Такође су подаци указали на потребе даљих истраживања механизма реакција као и испитивања биохемијских процеса. Ови подаци су од значаја за разумевање механизама колматирања и за планирање мера превенције и санације старења бунара.

Што се тиче таложења минерала калцијума и силиката они остају стабилни током промене оксидо-редукционих услова са тенденцијом таложења

5. Предлог даљих истраживања

Што се тиче теренских радова предложена је израда истражних бушотина на одговарајућим локацијама за које се зна да се на бунарима у непосредној близини јављају наслаге које садрже гвожђе, са картирањем језгра бушотине са узимањем проба тј. непоремећених узорака из језгра бушотине на одређеним интервалима, тестом црпења и мерењем нивоа подземне воде. Такође је неопходно мерење pH/Eh у бушотини дуж вертикалног литолошког профила и узимање узорака порне воде. Пожељно је узети узорке наслага са дна речног корита реке Саве, како би могла да се направи што боља корелација са узорцима воде из бушотина, јер речна вода која прихрањује издан Рени бунара, филтрирањем до бунара пролази одређене сложене промене, а јако је тешко дефинисати услове у геолошкој средини пре него што се поремети бушењем и каптирањем. Компаративна анализа састава колматација и наслага са дна речног корита потребна је и у циљу утврђивања да ли колматације претстављају суспензије истог састава као наслаге на речном дну, механички слепљене на филтерској конструкцији које су транспортоване водом у виду суспендованих честица или су последица геои биохемијских процеса.

У лабораторијским условима ради детаљне анализе проблема пожељно је на селектованим узорцима урадити следеће:

- Прелиминарно одређивање садржаја гвожђа портабилним XPF (енгл. *X-ray fluorescence*) уређајем дуж језгра бушотине.
- Гранулометријска анализа (дистрибуција величине зрна – гранулометријска крива).
- Одређивање петролошко-минералошког састава (седиментолошка анализа).
- Издвајање металичне фракције као потенцијалног носиоца гвожђа.
- Одређивање састава свих фракција и микрохемијска анализа појединачних минерала на SEM-EDS систему.
- Одређивање квалитативног састава глиновите фракције XRD анализом.
- Одређивање адсорбованих и структурно везаних катјона на ICP/AAS методама.
- Барел тест у колонама (утрвђивање процедних параметара).

У лабораторијским условима ради детаљне анализе проблема пожељно је да на колматацијама тј. узетим узорцима наслага са филтерске конструкције урадити следеће:

- Портабилним XRF одређивање садржаја гвожђа и пратећих елемената.
- XRD анализа у циљу одређивања квалитативног састава.
- SEM-EDS – одређивање микроструктуре наслага и микрохемијска анализа утврђених присутних фаза.
- IR/Раман спектроскопија (уколико XRD се утврди присуство аморфне фазе у наслагама).

- TOC (укупни органски угљеник) за утврђивање присуства бактерија.

На узорцима воде из бушотине, из оближњих рени бунара и реке неопходно је мерити pH/Eh, електропроводљивост, температуру, мирис, мутноћу, TOC/DOC одвајање суспензија, хемијски састав воде и суспензија (главни катјони и анјони, микроелементи) и садржај слободног кисеоника, као и микробиолошке анализе (утврђивање сојева бактерија у циљу детерминисања физичко хемијских услова средине).

Након прикупљених података, пожељно је урадити модел транспорта честице и обраду података коришћењем софтвера и конструкција ph/Eh дијаграма, као и симулацију услова постанка наслага. И у испитиваним бунарима и бушотинама постављати плочице за обрастање бактеријама како би се спровели детаљни бактеријолошки тестови у одређеним временским интервалима.

6. Закључак

Услови у подземној средини између зоне прихрањивања и самог бунара често се знатно разликују од оних у околини филтерске конструкције. На могуће услове таложења гвожђа на филтерској конструкцији утичу локалне промене у брзини филтрације и оперативни режим рада бунара, што може довести до хемијске неравнотеже која у комбинацији са осталим хидрогеолошким, хидрауличким, хидродинамичким факторима и биолошким, физичко-хемијским и механичким процесима долази до смањења капацитета бунара колмирањем перфорација на филтерима. Након анализе и синтезе података, прелиминарни резултати нашег истраживања показали су да је у интервалу издани укупни садржај гвожђа нижи него у подини и повлати слојевима, а да се концентрације гвожђа унутар самог водоносног слоја крећу у уском распону. То указује на постојање процеса који доводе до миграције гвожђа из матичног геолошког материјала, вероватно услед растварања минерала гвожђа током дуготрајне циркулације подземних вода — делом кроз геолошки временски период, а делом током самог коришћења издани.

Иако су делимично осиромашени, седименти издани и даље представљају значајан извор гвожђа, што потврђује и појава савремених наслага гвожђа (колматација) на отворима филтера рени бунара. На основу ових податка урађене су софтверске симулације које су показале јасно присуство гвожђа у виду гетита и ферихидроксида. Симулације спроведене на основу постојећих хемијских анализа у опсегу редокс услова 115 до 60 mV указује на погодне услове таложења оксида и хидроксида гвожђа што индицира на даља испитивања биохемијских процеса у издани и њиховог утицаја на стварање колматација.

Осим што ови подаци указују на сложеност проблема смањења издашности бунара и на потребу за континуираним праћењем хидрохемијских параметара и контролу режима рада бунара, такође указују и на потребу формирања стручног тима за анализу проблема. Хидрогеолози имају кључну улогу у разумевању капацитета изворишта, динамике подземних токова и у дефинисању мера заштите подземних вода. Истовремено, биолог доприноси анализом микробиолошких фактора, пре свега утицаја гвожђевитих бакетрија на формирање колматација, док инжењер технолошке

струке је неопходан за разумевање и контролу хемијских услова, механизама таложења и избора адекватних мера санације. Незаобилазну улогу у процесу симулирања и тумачењу резултата неопходан је геохемичар.

Тек синергијом ових дисциплина могуће је доћи до целовитих и ефикасних решења за продужетак радног века бунара и очување њихове издашности. Мултидисциплинарни приступ није само препорука – он је предуслов за разумевање узрочно-последичних веза и дугорочно управљање водом као ресурсом од стратешког значаја.

Захвалница

Овај рад је финансијски подржан од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Уговор бр. 451-03-136/2025-03/200023, 451-03-136/2025-03/200287, 451-03-136/2025-03/200053)

7. Литература

[1] Папић П, Пушић М, Тодоровић М, Квалитет воде као показатељ хидрогеолошких услова – студија случаја београдског изворишта (подручје ушћа Саве у Дунав), *Water Science & Technology*, Vol. 65, No. 12, стр. 2265–2271. DOI: 10.2166/wst.2012.219, 2012.

[2] Димкић М. (ур.): *Alluvial Aquifer Processes*, IWA Publishing, Лондон, DOI: 10.2166/-9781789060904, 2021.

[3] Мајкић Б. Л, *Старење бунара у алувијалним срединама различитог степена оксичности*, докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2013.

[4] Петронијевић Н, Николић Н, Зарић Ј, Митриновић Д, Камберовић Ж, Димкић М, Садржај и дистрибуција гвожђа у седиментима у бушотини РБ-6/П-5Д на београдском изворишту, *17. српски геолошки конгрес*, ур: Ганић М, Цветков В, Вулић П, Ђурић Д, Ђурић У, Врњачка Бања, стр. 63–69, 17–20. мај 2018.

[5] Мајкић-Дурсун Б, Нумеричка процена старења радијалних бунара, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Америчко друштво грађевинских инжењера (ASCE), Vol. 25, No. 1, стр. 1–8. DOI: 10.1061/ASCECP.1943-5487.0000063, јануар/фебруар 2011.

[6] Димкић М, Пушић М, Мајкић-Дурсун Б, Обрадовић В, Одређене импликације оксицних услова у алувијалним подземним водама, *Water Research and Management*, Часопис Српског друштва за заштиту вода, Vol. 1, No. 2, стр. 27–45, 2011.

[7] Димкић М, Пушић М., Видовић Д, Исаиловић В, Мајкић Б, Филиповић Н, Нумеричка процена старења радијалног бунара, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 1, стр. 43–49, 2011.

[8] Димкић М, Пушић М, Обрадовић В, Ђурић Д, Неколико природних показатеља старења радијалних бунара на београдском изворишту – други део, *Water Science and Technology*, Vol. 63, No. 11, стр. 2567–2574. PMID: 22049750, 2011.

[9] Елис Д, *Iron Bacteria, Organisms and Their Identification*, Merchant Books, (оригинално издање: 1918), репринт издање, 2006.

[10] Colmer A. R, Hinkle M. E, The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium: *Thiobacillus ferrooxidans*, *Journal of Bacteriology*, Vol. 62, No. 5, стр. 665–673. DOI: 10.1128/jb.62.5.665-673.1951, 1951.

[11] Хардер Е. Ц, *Iron-depositing Bacteria and Their Geologic Relations*, United States Geological Survey, Professional Papers бр. 113, Вашингтон, стр. 89, 1919.

[12] Бабац П, Бабац Д, *Београдско изворише подземних вода – бунари са хоризонталним дреновима*, Balby International, Београд, 2005.

[13] Барбич Ф, *Популације гвожђевитих и манганских бактерија у изданским водама београдског изворишта и њихов еколошки значај при искоришћавању ових вода*, докторска дисертација, Природно-математички факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1983.

[14] Петронијевић Н, Радовановић Д, Штуловић М, Сокић М, Јовановић Г, Камберовић Ж, Станковић С, Стопић С, Оњиа А, Анализа механизма неутрализације киселог рудничког дренажа употребом летећег пепела као алтернативног материјала – студија случаја екстремно киселог језера Робуле у источној Србији, *Water*, Vol. 14, No. 20, чланак бр. 3244. DOI: 10.3390/w14203244, 2022.

[15] Петронијевић Н, Штуловић М, Сокић М, Јовановић Г, Камберовић Ж, Станковић С, Стопић С, Оњиа А, Примена флотацијских јаловина као алтернативног материјала за санацију киселог рудничког дренажа – студија случаја екстремно киселог језера Робуле (Србија), *Metals*, MDPI, Vol. 10, No. 1, чланак бр. 16. DOI: 10.3390/met10010016, децембар 2019.

[16] Пет Зарић Ј, *Формирање и одрживо коришћење изворишта подземних вода у функцији генезе квартарних седимената доњег тока реке Саве*, докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2019.

[17] Штуловић М, Радовановић Д, Камберовић Ж, Кораћ М, Анђић З, Процена лужности учвршћених производа који садрже секундарну алкалну оловну згужвану шљаку, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, Article 2005. DOI: 10.3390/ijerph16112005, 2019.

[18] Furcas F. E, Mundra S, Lothenbach B, Angst U. M, Speciation controls the kinetics of iron hydroxide precipitation and transformation, arXiv preprint arXiv:2311.12464, November 21, 2023. arxiv.org

[19] Kumar Vadapalli V. R, Klink M. J, Etchebers O, Petrik L. F, Gitari W, White R. A, Key D, Iwouha E, Neutralization of acid mine drainage using fly ash, and strength development of the resulting solid residues, South African Journal of Science, 104, 7-8, 317-322. http://www.scielo.org.za-/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0038-23532008000400017, 2008.

[20] Xenidis A, Evangelia M, Paspaliaris I, Potential use of lignite fly ashfor the control of acid generation from sulphidic wastes, Waste Management, 22, 631–641. https://doi.org/10.1016-/S0956-053X(01)00053-8, 2022.

Рада Петровић[1]

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25077P

СПОРИ ПЕШЧАНИ ФИЛТРИ ЗА 21. ВЕК

Резиме: Хигијенски исправна вода за пиће остаје велики глобални изазов, посебно у руралним подручјима где, према УНИЦЕФ-у, живи 80% оних који немају приступ побољшаним системима водоснабдевања. Спори пешчани филтри (СПФ) идеално су решење за припрему воде за пиће у таквим областима. СПФ омогућавају уклањање суспендованих честица, растворених органских материја и других загађујућих материја, уклањајући тиме мутноћу, укус и мирис. Додатно, један од најважнијих аспеката примене СПФ је његова функција као биолошког филтра. Иако је принцип рада СПФ остао исти већ више од два века, дизајн, величина и примена СПФ су током година мењани и прилагођавани конкретним потребама. У овом раду разматрају се савремена решења и ефикасност СПФ по питању уклањања специфичних загађујућих материја, пре свега мутноће и микроорганизама, који су од посебног значаја за припрему воде за пиће у руралним областима.
Кључне речи: спори пешчани филтри, дизајн филтера, уклањање загађујућих материја, вода за пиће

SLOW SAND FILTERS FOR THE 21st CENTURY

Abstract: Safe drinking water remains a major global challenge, especially in rural areas where, according to UNICEF, 80% of those without access to improved water supply systems live. Slow sand filters (SPFs) are an ideal solution for preparing drinking water in such areas. SPFs allow the removal of suspended particles, dissolved organic matter, and other pollutants, thereby eliminating turbidity, taste, and odor. Additionally, one of the most important aspects of applying SPF is its function as a biological filter. Although the principle of SPFs operation has remained the same for more than two centuries, the design, size, and application of SPFs have been changed over the years and adapted to specific needs. This paper discusses modern solutions and the efficiency of SPFs in terms of removing specific pollutants, primarily turbidity and microorganisms, which are of particular importance for the preparation of drinking water in rural areas.
Key Words: slow sand filters, filter design, pollutant removal, drinking water

1. Увод

Спори пешчани филтри (СПФ) почели су да се примењују још почетком 19. века, а посебно када је средином 19. века утврђено да је узрочник колере загађена вода. Од тада је у Енглеској употреба СПФ била прописана законом за припрему воде из реке Темзе [1]. Почетком 20. века, СПФ губе на значају у поређењу са хемијским третманом, који је подразумевао коагулацију, флокулацију и таложење, уз накнадну примену брзих пешчаних филтара, који су заузимали мање места, при чему је било могуће

[1] *Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Карнегијева 4, Београд, radaab@tmf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-9511-5633*

успешно третирати воде различитог квалитета. Међутим, интересовање за СПФ се поново повећало 80-их година прошлог века, због повећане потребе за малим системима за припрему воде за пиће. Једноставна конструкција и управљање, мала потрошња енергије и могућност изградње коришћењем локалних сировина, без потребе за специјализованом опремом чине СПФ идеалним решењем за мале системе припреме воде. Агенција за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (USEPA) и Светска здравствена организација (WHO) препознале су СПФ као јефтин и поуздан поступак обезбеђивања хигијенски исправне воде за пиће [2]. СПФ омогућавају уклањање суспендованих честица, растворених органских материја и других загађујућих материја, уклањајући тиме мутноћу, укус и мирис. Суспендоване органске материје задржавају се у испуни од песка, након чега се споро минерализују микроорганизмима који формирају биофилм на песку, па је биолошка функција један од најзначајнијих аспеката примене СПФ. Основни параметар рада којим се контролише квалитет третиране воде је хидрауличко време задржавања (hydraulic retention time, HRT), који је функција протока Q, укупне запремине слоја песка V и порозности n: HRT = V·n/Q [1, 2]. Да би се обезбедила велика специфична површина испуне за формирање слоја микроорганизама, а да се истовремено обезбеди и велика порозност, потребно је користити песак релативно велике униформности. Широка расподела величине честица доводи до смањења порозности, што онда доводи до смањења HRT. Према томе, два параметра која најбоље описују СПФ за потребе пројектовања и поређења су HRT и расподела величина песка, односно униформност песка.

2. Механизми уклањања загађујућих материја

Загађујуће материје се у СПФ уклањају и физичким и хемијским поступцима [1, 2]. Испуна од песка обезбеђује велику специфичну површину за формирање биофилма непатогених аеробних микроорганизама, које метаболишу органску материју која улази са водом у филтар. Ови микроорганизми се такође хране бактеријама и вирусима који улазе у филтер са улазном водом. Истовремено, физички механизми (механичко „просејавање“, таложење на честицама песка, „пресретање, флокулација и др) обезбеђују задржавање суспендованих честица у филтру. Уколико те честице садрже органске материје, временом ће бити разграђене биолошким поступцима. Уклањање честица одиграва се доминантно у слоју на врху испуне, док се растворене органске материје које као такве улазе у филтар или настају разградњом органских честица, минерализују у доњим деловима филтра. Поре у филтру су увек у потпуности испуњене водом, јер се изнад филтра увек налази слој воде, који је изложен ваздушном кисеонику. Захваљујући томе, након неколико недеља рада, у првих 2-5 cm филтра се формира биофилм аеробних микроорганизама, због веће брзине уклањања суспендованих честица унутар овог слоја. Захваљујући томе, много веће уклањање бактерија се одиграва у горњих 5 cm филтра него у остатку филтра, што је у складу са разноврснијом микробиолошком популацијом у овој зони. Наравно, ефикасност уклањања у горњем слоју зависи од стања развоја, тј. зрелости биофилма. Показано је да поремећај биофилма током чишћења филтра доводи до значајног смањења уклањања бактерија. Биолошки процеси који се одигравају у биофилму укључују предаторство, природну смрт, инактивацију, биоантагонизам и метаболичко распадање и минерализацију.

Предаторство се сматра примарним процесом уклањања и инактивације микробних патогена у СПФ: већи микроорганизми, попут протозоа, хране се мањим микроорганизмима и честицама, попут бактерија и вируса. Бактеријски антагонизам може се односити на инактивацију патогених микроорганизама од стране других организама једноставним надмашивањем патогена у погледу апсорпције хранљивих материја и раста, што у суштини резултира исцрпљивањем патогена. Доказано је да присуство природних бактерија у филтрима смањује садржај патогена у третираној води. Бактерије, као најзаступљенији микроорганизми у биофилму, су посебно значајне за минерализацију органске материје унутар биофилма. Нека истраживања су показала да је у биофилму заступљено више од 90% бактерија и да омогућавају разградњу ароматичних једињења, уклањање азота и чак, бар привремено, уклањање мангана и арсена из подземних вода. Веома је важно да вода која се обрађује у СПФ буде скоро засићена ваздушним кисеоником, јер би у супротном услови у филтру могли постати анаеробни због потрошње кисеоника за разградњу органских материја, услед чега би се добила вода непријатног мириса. То је и разлог зашто СПФ морају бити отворени према атмосфери [1, 2].

3. Карактеристике филтера

Перформансе СПФ се могу квантификовати на основу мерења неколико параметара, као нпр. мутноће, боје, укупног органског угљеника (TOC), концентрације патогених бактерија, концентрације одређених органских загађујућих материја од локалног значаја итд. Ефикасност СПФ по питању ових параметара је одређена, пре свега, вредношћу *HRT*, величином честица песка и температуром (*T*), а за филтере са дефинисаним вредностима *HRT*, величине честица и *T*, ефикасност је одређена квалитетом воде која се обрађује и биолошком зрелошћу филтера [1, 2].

3.1. Дизајн филтера

СПФ се могу пројектовати и изводити за индивидуална домаћинства (1 - 10 људи), за школе и мале заједнице (10 – 1000 људи) или за мале општине (1000 – 5000 људи). За одређивање *HRT* се препоручује конструисање мале јединице (20 – 50 литара), имајући у виду локалне карактеристике вода које се третирају, при чему је потребно узети у обзир и утицај сезонског варирања температуре и других фактора на карактеристике воде. На основу одређене вредности *HRT* и предвиђене потрошње воде *Q*, узимајући претпостављену вредност порозности слоја песка (n = 0,4), одређује се запремина слоја *V*, након чега се могу конструисати шаржни или континуални СПФ различите геометрије, коришћењем различитих материјала за медијум и основу филтра. Дубина слоја испуне је најчешће 0,6 – 1 m, величина честица испуне 0,15 – 0,35 mm, коефицијент униформности 1,5 – 3, висина слоја воде изнад медијума 1-1,5 m, а брзина филтрације 0,1 – 0,4 m/h.

Под шаржним филтерима се подразумевају филтери са повременим коришћењем, односно филтери који раде са паузом, у којој се вода задржава у филтру, пре него што се дода нова количина воде. Дужина паузе је компромис између довољно дугог *HRT* за ефикасан третман и потребног снабдевања микроорганизама у слоју хранљивим материјама. Ови филтри се често називају биопешчани филтри (БПФ) и примењују се

у малим заједницама, школама и домаћинствима. Праве се од бетона или од пластике, при чему се у новије време више праве пластични, јер су јефтинији за градњу и лакши. Дизајн пластичних филтера је у неким случајевима модификован тако што су носећи слојеви шљунка замењени порозном пластичном плочом, што је омогућило повећање укупне запремине пора унутар активне зоне третмана, а смањени су и трошкови и рад потребан за инсталацију и одржавање. Примењиване су и друге модификације БПФ како би се прилагодили специфичним локалним захтевима. На пример, Kanchan Arsenic Filter (КАФ) је развијен за уклањање арсена, мангана и гвожђа из подземних вода додатком отпадних материјала, уситњене цигле и ексере од гвожђа, чиме је постигнуто значајно уклањање ових елемената, али и мутноће и колиформних бактерија. Преко 5000 ових филтера је распоређено у Непалу, где је након годину дана 83% било у употреби, што је приписано побољшаном изгледу, укусу и мирису филтриране воде [3].

3.1. Филтрациони медијум

Различити материјали се могу користити као филтрациони медијум, али је најзаступљенији песак. Карактеристике песка које утичу на ефикасност филтра су ефективна величина честица ($D10$), коефицијент униформности (Cu), састав и чистоћа песка [1, 2]. Показано је да је величина честица песка најважнији параметар који утиче на уклањање патогена из воде и да смањење вредности $D10$ доводи до ефикаснијег уклањања бактерија и протозоа из воде. Већа униформност песка обезбеђује већу порозност, а тиме и већу вредност *HRT* за исти проток и запремину слоја. Максимална препоручена вредност Cu је 3,0. Показано је да је уклањање *Cryptosporidium* протозоа много веће (99 %) када је Cu = 1,72, у односу на песак са Cu = 3,5 – 3,8, када је уклањање било само 48 % за исту воду. Прање филтрационог медијума пре формирања филтра је такође од значаја. Модификације филтрационог медијума. Испитиван је утицај различитих додатака у филтрациони медијум, изнад и испод, као што су комадићи гвожђа или бакра, наночестице елементарног гвожђа, зеолити, бентонити, боксит и др. Могућност унапређења ефикасности применом додатака гвожђа је зависила од састава воде, врсте загађујуће материје која се уклања и састава самог додатка. На пример, додатак слоја честица песка које су обложене гвожђа(III)-оксидом, дебљине 10 cm, је побољшао уклањање бактерија, али не мутноће. Додатак бакра је побољшао бактерицидна својства филтра, али није утицао на уклањање TOC и мутноће. Свакако је важно нагласити да се бакар и други биоцидни материјали морају додати при дну филтра, да не би довели до инактивације биомасе при врху филтра, која је одговорна за минерализацију органске материје. Додатак бентонита је такође довео до повећања степена уклањања бактерија, што је објашњено повећањем специфичне површине, а тиме и места за адхезију бактерија. Испитивана је и могућност уклањања арсена применом одговарајућих додатака, али се ипак саветује да се примењује „пост-СПФ“ за уклањање арсена, а не да се ти материјали додају у СПФ. Последњих година се испитују и материјали за ефикасно уклањање неких нових загађујућих материја (emerging contaminants), као што су остаци лекова [4]. Дубина филтрационог слоја. Препоручена дубина за велике филтре је генерално између 1,2 и 1,4 m, мада мали филтри за домаћинства могу да раде и при дубини мањој од 0,3 m. Препоручује се

минимална дубина од 0,3 m за ефикасно уклањање мутноће и колиформних бактерија, а 0,6 m за уклањање вируса. Међутим, треба нагласити да патогене бактерије и вируси не могу бити уклоњени у потпуности ни при овим дубинама филтерске испуне, па се препоручује пост-филтерска дезинфекција. Иако се већина органских материја и микроорганизама уклања у слоју при врху филтра, дубина филтра утиче и на ове параметре, вероватно због утицаја на *HRT*. Биолошка зрелост. Зрење филтра са временом значајно утиче на ефикасност уклањања микроорганизама и органских материја. Период сазревања СПФ варира од случаја до случаја (10 до 40 дана) и функција је квалитета улазне воде, *HRT* и конструкције филтера. Када се биолошки слој у филтеру „разруши“ прањем или услед ненамерног увођења микробиолошких токсина), неопходно је обновити биолошку популацију. У једном испитивању је показано да је за то било потребно 17 дана за $\log_{10}$ уклањање колиформних бактерија, док је у случају новог филтра за то било потребно 27 дана за исти ниво редукције [1]. Друго истраживање је показало да прање или замена филтрационог медијума доводе до смањења ефикасности уклањања бактерија од један $\log_{10}$. Стога, иако се учесталост чишћења често мери годинама, може се очекивати смањење перформанси током месеца непосредно након тога.

4. Услови рада СПФ

Као што је већ речено, ефикасност СПФ зависи од времена контакта воде и филтрационог медијума, *HRT*. Вредност *HRT* је кључна за разликовање брзих и спорих пешчаних филтера. Имајући у виду да је типична брзина филтрације код СПФ од 0,1 до 0,4 m/h, а дубина филтра 1 m и порозност 0,5, вредности *HRT* се крећу од 1,25 до 5 h. Међутим, с обзиром на висину слоја воде изнад филтрационог медијума од 1 до 1,5 m, стварна времена задржавања су од 2,5 до 12,5 h. За димензионисање СПФ је много логичније користити *HRT* него брзину филтрације, због тога што модерни СПФ имају различите дубине: у случају филтера за мала насеља дубине су од 0,7 до 1,2 m, док за индивидуална домаћинства могу бити и 0,2 m. Додатно, у случају филтера који раде са паузом, брзина филтрације нема значаја. Вредност *HRT* се може контролисати варирањем: а) протока у континуалним филтерима, б) времена додавања воде у случају шаржних филтера и ц) запремином и/или порозношћу филтрационог слоја. Генерално, са повећањем вредности *HRT*, повећава се ефикасност уклањања вируса, cryptosporidium цисти, мутноће, колиформних бактерија, боје и др. У случају шаржних филтера, смањивањем запремине воде која се додаје у филтер повећава се сфикасност уклањања загађујућих материја. Треба истаћи да је важно да додата запремина воде буде мања од запремине пора у филтру, јер ће у супротном део додате воде имати веома кратко задржавање, односно малу вредност *HRT*. Уобичајено се запремина додате воде подешава на 80 % од запремине пора у филтру. При томе се *HRT* подешава варирањем паузе између додавања воде у филтар. И код континуалних и код шаржних филтера је показано да се повећање ефикасности уклањања не може неограничено повећавати са повећањем *HRT*, што је у складу са сугестијом да је довољно време задржавања од 8 до 12 h, што се узима као оптимално при пројектовању филтера. На ефикасност СПФ утицај има и температура, пре свега због утицаја температуре на метаболизам микроорганизама. Показано је, на пример, да се ефикасност уклањања колиформних

бактерија смањује са 97 % на 87 % са снижењем температуре од 17 °C на 5 °C. Режим рада филтера има утицај на ефикасност, односно постоји разлика у ефикасности континуалних и шаржних СПФ при истој вредности *HRT*. Разлог томе је другачији начин распоређивања воде код шаржних поступака у односу на континуалне, јер ће део воде брзо проћи кроз површински слој у коме је највећа концентрација микроорганизама. Једноставна модификација шаржних филтера која може да допринесе побољшању ефикасности јесте уградња пумпе на изласку из филтра, која ће да рециркулише воду у филтар током паузе. На овај начин се повећава и ефективна вредност *HRT*, што је посебно од значаја при третману воде веће загађености. Квалитет воде која се обрађује има утицај на ефикасност СПФ по питању уклањања неких параметара, у опсегу одређених вредности. На пример, у једном истраживању је показано да повећање мутноће смањује ефикасност уклањања вируса, а у другом да повећање мутноће у опсегу од 10 до 50 NTU нема утицај на микробиолошки квалитет обрађене воде. Такође, утврђено је да повећање мутноће, укупних колиформних бактерија и фекалних колиформних бактерија нема утицај на ефикасност уклањања протозоа.

5. Закључак

Спори пешчани филтри се већ више од два века користе за припрему воде за пиће. Без обзира на велики напредак у развоју система за припрему воде за пиће, настављена је примена СПФ и у 21. веку, али превасходно у малим и средњим системима. Такође, СПФ се сада примењују у комбинацији са другим процесима обраде, посебно са накнадном дезинфекцијом, јер се не може гарантовати потпуно уклањање патогених микроорганизама. СПФ уклањају ефикасно многе микробиолошке, физичке и хемијске загађујуће материје из воде, при чему је уклањање мутноће и органских примеса од посебног значаја у случају када се примењује накнадна дезинфекција, да би се спречило настајање дезинфекционих нуспродуката. Да би се повећала ефикасност уклањања одређених загађујућих материја, предложен је додатак одређених материјала у филтерску испуну од песка, али се као ефикасније препоручује коришћење пост-СПФ филтера са тим материјалима. Посебан аспект истраживања у области примене спорих филтера у новије време је коришћење модификованих испуна за уклањање неких нових загађујућих материја (*emerging contaminants*).

6. Литература

[1] J. K. Maiyo, S. Dasika, C. T. Jafvert, Division of Slow Sand Filters for the 21st Century: A Review, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20, 2023, 1019.

[2] K. Abdiyev, S. Azat, E. Kuldeyev, D. Ybyraiymkul, S. Kabdrakhmanova, R. Berndtsson, S. Sultakhan, Review of Slow Sand Filtration for Raw Water Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries, *Water*, 15, 2023, 2007.

[3] T.K.K. Ngai, R.R. Shrestha, B. Dangol, M. Maharjan, S.E. Murcott, Design for sustainable development–Household drinking water filter for arsenic and pathogen treatment in Nepal, *J. Environ. Sci. Health Part A-Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 42, 2007, 1879–1888.

[4] J. Qi, C. Zhang, Y. Song, H. Yu, B. Ma, C. Hu, J. Qu, Prolonged operating cycle and enhanced removal of emerging contaminants in slow sand filters: Significance of algae-bacteria interaction, *J. Hazard. Mater*., 496, 139470, 2025.

Зорана Радибратовић[1], Ненад Миленковић[2]
Биљана Цакић[3], Милинд Хунгунд[4], Синиша Петрић[5]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25083R

ТЕХНОЛОШКИ ПРОЦЕСИ ОБРАДЕ ПОДЗЕМНИХ ВОДА ПРИМЕЊЕНИ НА ПОСТРОЈЕЊУ ЗА ПРЕРАДУ ВОДЕ У ЗРЕЊАНИНУ

Резиме: Водоснабдевање Зрењанина врши се са изворишта „Михајловачки друм“, на коме се са 34 бунара захвата подземна вода ОВК на дубинама од 50 до 137 m. Квалитет воде, коју карактерише повећана боја, садржај органске материје, амонијака, растворених гасова (метан) и метала (арсен, натријум и бор), захтева комплексан третман. Истраживањем на првом месту ефикасног а онда и оптималног поступка прераде ове воде бавили су се многи домаћи и страни стручњаци са мање или више успеха. У овом раду је дат приказ примењене технологије пречишћавања на фабрици воде у Зрењанину као резултат сарадње фирми Metito Utilities Limited (Pannonian Water д.о.о. Београд) и Института за водопривреду „Јарослав Черни“ д.о.о.
Кључне речи: водоснабдевање, квалитет воде, процеси третмана

CURRENT STATUS OF REGIONAL WATER SUPPLY SYSTEMS IN SERBIA AND POTENTIAL DEVELOPMENT

Abstract: Zrenjanin's water supply is from the spring „Mihajlovacki road“, where groundwater is collected from 34 wells at depths of 50 to 137 m. The quality of the water, which is characterized by an increased color, content of organic matter, ammonia, dissolved gases (methane) and metals (arsenic, sodium and boron), requires complex treatment. Many domestic and foreign experts have been involved in researching firstly the efficient and then the optimal process of processing this water. more or less successful. This paper presents the application of purification technology at the water factory in Zrenjanin as a result of cooperation between companies Metito Utilities Limited (Pannonian Water Ltd Belgrade) and „Jaroslav Cerni“ Water Institute Ltd.
Key Words: water supply, water quality, treatment processes

1. Увод

Зрењанин се водом снабдева са изворишта „Михајловачки друм“ из два линијска система бушених цевастих бунара, који се налази северно од града. Прва линија бунара,

[1] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, zorana.radibratovic@jcerni.rs, ORCID: 0009-0007-4444- 5481*
[2] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, nenad.milenkovic@jcerni.rs, ORCID: 0009-0000-7016- 3559*
[3] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, biljana.cakic@jcerni.rs*
[4] *Metito Utilities Limited, Београд, milind.hungund@metito.com*
[5] *Metito Utilities Limited, Београд, sinisa.petric@metito.com*

ближа граду, формирана је 1965-1970. године са 8 бушених бунара дубине око 126 m. Захваћене су подземне воде из основног водоносног комплекса на дубинама 50-77 m и 90-122 m. Друга линија бунара, око 1300 m северно од прве линије, почела се формирати 1978. године израдом четири бушена бунара дубине око 137 m.

Данас је на изворишту активно 34 бунара одакле се захваћена подземна вода шаље на Постројење за прераду воде за пиће (ППВ) а након третмана дистрибуира потрошачима у мрежу.

2. Историјат водоснабдевања Зрењанина

Пут до стабилног водоснабдевања хигијенски исправном водом Зрењанина је био захтеван и дуг. До краја 19. века један део становништва у Зрењанину снабдевао се водом за пиће из градских или сопствених бунара који су били у појединим улицама или двориштима а други се користио водом са Бегеја [1]. У циљу сузбијања болести узрокованих водом лошег квалитета, градска управа је одлучила да се избуше градски бунари, 1885-1895. године, на различитим локацијама. Тек 1904. поднет је први предлог градској скупштини за изградњу водовода а 1962. је оформљено предузеће за водовод и канализацију [2].

Године 1963. избушена су два велика и шест мањих бунара, као и шест хидрофора и водоторањ висок 38 метара, капацитета 1000 m^3. Две године касније, водоводна мрежа била је дугачка готово 60 km са 2.300 прикључака за 20.000 становника. Прва истраживања на изналажењу одговарајуће технологије за добијање квалитетне воде за пиће почела су 1975. године од стране словеначке фирме СОП Крошко у сарадњи са аустријском фирмом Owerhorf из Беча. Пар година касније, 1981. године, Пилот постројење пројектовала је и француска фирма Degremont [3]. Крајем 80-их и почетком 90-их година, изналажењу решења третмана ових вода бавио се и Институт за водопривреду „Јарослав Черни“. Године 1987. израдио је пројектну документацију за ППВ капацитета 500 l/s и третманом који се састојао од следећих процесних јединица: аерације, претходне озонизације, коагулације, флокулације таложења, филтрације на брзим пешчаним филтерима, завршне озонизације, филтрације кроз филтере са гранулисаним активним угљем (ГАУ) и дезинфекције. Почетком 90-их израдио је генерални пројекат који је подразумевао решење за третман воде применом мембранске филтрације (нано мембране).

Од 2004. године забрањена је употреба воде за пиће и припрему хране у Зрењанину али и свим околним насељима која користе централни водовод, нарочито због недозвољене концетрације арсена. Сирова вода, осим арсена (50-130 µg/L), има боју (40-70 Pt-Co), мирис и укус, повишен садржај органске материје (TOC 9-12 mg/L), гвожђа (0,2-0,8 mg/L) и мангана (0,05 – 0,7 mg/L), као и амонијака (0,7-1,9 mg/L). Такође, у сиро-вој води је повишен садржај натријума (190-300 mg/L), док је бор на граници МДК (~1 mg/L) [4].

Проблеми са квалитетом пијаће воде, свакако нису заобишли ни сва друга насељена места (села) са територије града која не користе централни водовод, већ имају сопствене бунаре и водоводну мрежу. Након забране коришћења воде за пиће у Зрењанину и

насељеним местима Арадац, Елемир, Клек, Тараш и Меленци, формирана је Комисија која је имала за задатак да прати изналажење најоптималнијег технолошког поступка за пречишћавање воде.

Комисија као и стручна служба ЈКП „Водовод и канализација“ је од самог почетка имала став да се свакој заинтересованој фирми омогуће једнаки услови за испитивање на Пилот постројењу у циљу добијања воде за пиће, услов је био свеобухватно решење по свим незадовољавајућим параметрима. На комплексност прераде указује велик број фирми које су покушале да докажу ефикасност својих технологија. Решавање ове проблематике обновљено је 2002. године још пре доношења Решења санитарне инспекције о забрани употребе воде за пиће. Испитивања су вршена ради утврђивања примена нових технологија, хемијских средстава и поступака који се примењују у процесима пречишћавања питких вода. До 2004. године, своје Пилот системе поставили су: „Universal Aqua Technologies“ (САД), „Waterlink“ (Немачка), „Culligan“ (Италиија), „Zenon“ (Канада-Мађарска), „Energo control“ (Словачка), „Hidrofilt- Purator“ (Мађарска), „Linde“ (Немачка), НР „Institut za opštu i fizičku hemiju“ и АТN „Slap“ из Србије. Сваки од ових Пилота примењивао је различите прилазе у решавању технологије пречишћавања воде, а добијени резултати контролисани су у лабораторији ЈКП „Водовод и канализација“ Зрењанин, Заводу за здравствену заштиту Зрењанин и „Биоеколошком центру“ Зрењанин [5].

У периоду 2005-2006. година, на основу међународног пројекта у оквиру Немачко-српског пословног савета реализована су наменска испитивања квалитета подземних вода на територији општина Кикинда, Нови Бечеј, Бечеј и Зрењанин. Реализована истраживања имала су за циљ утврђивање квалитета и могућности унапређења водоснабдевања на територији ових општина. За третман ових вода, које се одликују високим садржајем органских материја, хуминских материја, гасова (CH_4, CO_2 и H_2S), гвожђа, мангана, амонијака, арсена и бора, закључак је био да је углавном потребна примена процеса аерације, флокулације, озонизације, филтрације и дезинфекције. Овим процесима обраде воде се углавном достиже задовољавајући квалитет за пиће али је такође утврђено да је за уклањање/смањење садржаја арсена, натријума, амонијака и хуминских материја потребна примена сложених и скупих поступака мембранске филтрације (РО, НФ).

Спроведена испитивања на различитим пилот постројењима протеклих 30 година су дала и позитивне и негативне резултате, и као таква су одредила полазне основе и могућу технологију прераде на будућем постројењу. Након ових пилот испитивања, реализована су истраживања алувијалних наслага Тисе, у циљу испитивања могућности формирања изворишта уз Тису, са којег би се плитким бунарима на рачун обалске филтрације, обезбедиле додатне количине воде за будуће водоснабдевање ових општина.

У међувремену је израђена и Стратегија водоснабдевања АП Војводине која је, између осталог, детаљно сагледала квалитет вода за појединачна насеља и дала је предлог третмана. Конкретно, за Зрењанин овом Стратегијом је предвиђен процес мембранске филтрације уз адекватан предтретман воде. Једно од решења проблема водоснабдевања Зрењанина је виђено у изградњи Регионалног водоводног система

(РВС) са изворištем квалитетне подземне воде на локацији Ковин-Дубовац али до реализације овог система није дошло. У међувремену, Град Зрењанин је потписао уговор са немачком фирмом WTE Wassertechnic GmbH, након чега је склопљено и прво јавно-приватно партнерство са италијанском фирмом Zilio што је резултирало изградњом првог Постројења за прераду воде та пиће (ППВ) у Зрењанину [6].

Недуго затим, 2022. године компанија „Pannonian Water“ д.о.о. из Београда преузима постојеће постројење са намером унапређења технологије прераде како би дала захтеване ефекте пречишћавања.

3. Технологија прераде на постројењу 2018. година

Постројење за третман подземне воде са изворишта „Михајловачки друм“ капацитета Q=200 l/s, изграђено према технологији фирме Zilio, пуштено је у погон 2018. године и обухватало је следеће процесне јединице: хемијски предтретман (оксидација, коагулација и флокулација, pH подешавање), ултрафилтрацију (УФ), реверсну осмозу дела улазног протока (око 50%), јонску измену дела протока са УФ, дезинфекцију третиране воде и третман муља [7]. Први објекат у процесу пречишћавања је објекат предтретмана (аерациони базен) где се вршила оксидација сирове бунарске воде са натријум-хипохлоритом чиме се оксидишу гвожђе, арсен и манган присутни у подземној води и уклања амонијак оксидацијом преко превојне тачке. За потребе корекције pH вредности дозирала се киселина односно база (H_2SO_4 и NaOH). Додавањем хемијског средства за коагулацију ($FeCl_3$) се поспешивало формирање крупнијих флокула и ефикасније исталожавање.

Слика 1. Ситуација ППВ Зрењанин - 2018.год.
Figure 1. Layout WTP Zrenjanin - 2018.

Након овог процеса, избистрена вода се слала у објекат ултрафилтрације (УФ). Пермеат (пречишћена вода) са УФ се делио на два тока (по 50% укупног протока) и слао на даљи третман, део на реверсну осмозу (РО), а други на јонску измену. Цевним везама је омогућено да се на јединици за јонску измену третира и део тока вода после РО. Пречишћена вода са процеса реверсне осмозе и јонске измене се слала у бетонски резервоар чисте воде где се вршила њена дезинфекција натријум-хипохлоритом и дистрибуирала потрошачима. Процес прераде отпадних вода се састојао од ламеларног

таложника, након чега се избистрена вода враћала на почетак процесне линије, док се настали муљ (након кондиционирања полиелектролитом) водио на обезводњавање (на центрифуги) а затим одвозио и одлагао на санитарну депонију.

Постројење са овим концептом третмана подземне воде није могло да оствари континуалну производњу воде за пиће у складу са Правилником о хигијенској исправности воде за пиће (*Сл. лист СРЈ*, бр. 42/98 и 44/99 и *Сл. гласник РС*, бр. 28/2019). На основу накнадно спроведених анализа закључено је да на постројењу не постоји адекватан предтретман сирове воде што је за последицу имало веће оптерећење на мембранској филтрацији, што је довело до отежаног рада, учесталијег прања мембрана и продора гасова (метана) у инсталацију а на крају и до експлозије.

4. Унапређено Постројење за прераду воде 2023-2025. година

Након преузимања постројења, нови власник, фирма Metito Utility Limited („Pannonian Water“ доо Београд), приступила је сагледавању стања постојеће технологије и могућностима, као и начину унапређења предтретмана и рехабилитацији постојећих линија мембранске филтрације и јонске измене.

Решење реконструкције и доградње постојећег постројења резултат је сарадње „Pannonian Water“ са Институтом за водопривреду „Јарослав Черни“ из Београда. У складу са тим, реализован је нови допуњен предтретман у току 2023-2025. године на фабрици воде који обухвата:

- дегазацију воде у затвореним колонама (торњевима),
- таложење са процесом флотације растворeним ваздухом (DAF - Dissolved Air Flotation),
- процес филтрације на мултимедијалним филтерима (ММФ),
- додатни третман на кертриџ филтерима пре РО,
- и изградњу резервоара чисте воде капацитета 3000 m^3.

Први процес који је уведен као допуна постојећем третману је аерација воде. Процесом аерације вода се доводи у контакт са ваздухом у циљу размене гасова или испарљивих једињења. Вода прима кисеоник из ваздуха, док се одстрањују метан, угљендиоксид, амонијак, водоник-сулфид и органске супстанце које води дају непријатан мирис и укус. Концентрација метана у води се креће од 12 до 21 mg/L. Сам метан није токсичан али има експлозивна својства уколико се нађе у одређеној концентрацији (уделу) у ваздуху. Поступак дегазације се одвија у колонама (торњевима), где ваздух и вода теку супротно струјно. Колоне су са испуном велике специфичне површине око 140 m^2/m^3 чиме се омогућава бољи контакт воде и ваздуха Процесима дегазације растворени гасови (метан, водоник сулфид и др.) из воде прелазе у струју ваздуха који се одоздо уводи помоћу дувaљке-вентилатора. Усвојени однос ваздуха и воде 20:1 гарантује да концетрација метана у испуштеном ваздуху буде ниска.

Након дегазације аерисана вода се гравитационо уводи у прву комору оксидационог танка, где се врши дозирање натријум хипохлорита у циљу делимичне оксидације и преддезинфекције.

Слика 2. Дегазација
Figure 2. Degassing

Након оксидационог танка вода се уводи на флотацију. ДАФ је најчешће примењен на постројењима за третман површинске воде. Примери употребе ДАФ на подземним водама су ретки, а за њихов третман се уобичајено користи аерација (са ретензијом) и (био)филтрација. Међутим, постоје примери употребе ДАФ за уклањање гвожђа и мангана (препорука SUEZ за лаке флокуле хидроксида) уместо процеса седиментације. Такође, доказана је његова примена у третману вода са повишеним садржајем арсена и показан стабилан рад и при ниским температурама. Како би се доказала ефикасност и потврдила одлука о примени ДАФ-а у третману подземних вода на постројењу у Зрењанину, приступило се вишенедељним тестирањима у лабораторији Института за водопривреду „Јарослав Черни“. Ова тестирања су дала задовољавајуће резултате у погледу уклањања критичних параметара боје, органске материја и арсена. Осим тога, спроведена су пилот тестирања у компанији „Sigma DAF Clarifiers“ у Шпанији са сировом водом из Зрењанина. На основу свих тестирања применом $FeCl_3$ + PAC, показала се задовољавајућа ефикасност у опсегу примене $FeCl_3$ од 15 – 25 mg/L и PAC 20 – 30 mg/L, док се доза полиелектролита кретала до 0,5-1 mg/L.

У складу са тим, након аерације, усвојен је третман на флотацији растворeним ваздухом са претходним дозирањем хемикалија за коагулацију и флокулацију. Процес флотације се састоји од уклањања лаганих суспендованих материја и претходно формираних флокула, које се помоћу струје рециркулисане воде засићене мехурићима ваздуха, подижу на површину воде и уклањају скрепером [8]. ДАФ јединице су опремљене и пакетима плоча (ламела) како би се обезбедила додатна површина за

таложење, што помаже ефикаснијој сепарацији суспензија и струје воде. Димензионише се за хидрауличко оптерећење од ≤5m^3/h/m^2, укључујући проток рецикулисане воде. ДАФ јединица је опремљена скрепером за уклањање испливалих суспензија. Исталожени муљ на дну једнице се стајањем додатно згушњава и делимично обезводњава помоћу пужног система.

Слика 3. Флотација (ДАФ)
Figure 3. Dissolved Air Floation (DAF)

Оптималан рад ДАФ система остварен је подешавањем процеса коагулације и флокулације дозирањем различитих хемикалија и доза, као и адекватно подешавања уноса ваздуха у ДАФ. Опсег оптималних доза износи за поли-алуминијумхлорид 30-40 mg/L (PAC), гвожђе-хлорида 25-30 mg/L ($FeCl_3$) и полиелектролита од 0,2 – 0,5 mg/L (PE). Као могућност је остављено дозирање натријумхиполхорита у циљу преддезинфекције и оксидације у дозама до 5 mg/l.

Након ДАФ вода је требала да иде на постојећу ултрафилтрацију. Како би се утврдила могућност коришћења постојеће опреме, предузете су активности на утврђивању стања мембранске филтрације, које су показале да су мембране УФ оштећене што је захтевало њихову потпуну замену и довело у питање ефикасност рада истих. Како би се постигли најбољи ефекти рада постројења, приступило се још једном унапређењу постојећег предтретмана пре реверсне осмозе (РО). Спроведена су наменска пилот испитивања која су показала да филтрација на мултимедијалним филтерима песак-антрацит даје добре резултате у припрему воде за РО, уз адекватно подешавање рада ДАФ система (корекције врсте и дозе хемикалија и количине унетог ваздуха, одржавајући SDI (Silt density index) индекс испод 3).

На локацији постројења, у периоду од 22.03. до 26.06.2024. године реализована су пилот истраживања на мултимедијалним песак-антрацит филтерима (ММФ). Испитивања је извршила фирма „Милановић“ из Крагујевца. Улога ММФ филтера у процесу третмана воде на ППВ Зрењанин била би заштита реверсне осмозе и на првом месту у уклањању преосталих суспендованих материја и мутноће. Закључак спроведених

испитивања је да се мултимедијални филтери могу користити у претходном третману пре колоне реверсне осмозе и јонске размене, утврђена је оптимална брзина за пројектовање мултимедијалних филтера, утврђен је најефикаснији полимер, као и да је потребна доза полимера значајно нижа у поређењу са претходним тестираним полимерима, што је уједно и доказ компатибилности предметног полимера за ову специфичну врсту третмана улазне воде и филтрације и да је у пречишћеној води вредност SDI је била <3, што је задовољавајуће са аспекта њеног даљег третмана да РО.

Слика 4. Мултимедијални филтери (ММФ)
Figure 4. Multimedia filters (MMF)

У складу са спроведеним тестирањима, мултимедијални филтери су предвиђени за „полирање“ воде након ДАФ-а, у циљу уклањања, на првом месту укупних суспендованих материја и мутноће, као и захтевану вредност SDI за процес реверсне осмозе. Предвиђено је 13 затворених челичних филтера под притиском од којих су 12 радних а један додатни је у stand-by моду (у случају ремонта) са брзином филтрације 12 m/h [9]. Филтери су постављени у три паралелне линије, од којих две са по пет филтера и трећа линија са три филтера са остављеним простором за још два филтера за потенцијално будуће повећање капацитета прераде. Филтери се перу водом и ваздухом, једном дневно или у зависности од степена запрљаности.

Након ММФ вода се дистрибуира у два правца: директно на јонску измену или на кертриџ филтере од 5 μm, као предтретман за РО. Након кертриџ филтера вода се шаље ка РО и ка новом резервоару чисте воде (за блендинг односно потребно мешање воде након третмана воде реверсном осмозом).

Чиста вода се након третмана реверсне осмозе, јонске измене и воде за мешање одводи у нови резервоар чисте воде одакле се дистрибуира у мрежу ка потрошачима.

Слика 4. Ситуација постројења са новим објектима 2025. година
Figure 5. Layout of WTP with new structures 2025.

5. Пуштање у пробни рад и доказивање ефикасности рада постројења

Након завршених грађевинских радова и опремања новим технолошким јединица, као и ревитализацијом постојећих, постројење је пуштено у пробни рад у мају 2025. године. Током пробног рада вршена је оптимизација свих процесних јединица и спроведена су узорковања и анализе воде од стране релевантних институција из Зрењанина, Новог Сада и Београда. Ефикасност процеса по критичним параметрима је током пробног рада била већа од очекиване и то 80-85% за боју, 97-99% за арсен (као и гвожђе), 85-90% за органску материју, 37-43% за натријум и 90-94% за амонијак.

У складу са добијеним резултатима рада постројења добијена је санитарна сагласност а затим и употребна дозвола за комплетно постројење за прераду воде у Зрењанину, чиме је доказана ефикасност рада постројења које испоручује воду у складу са Правилником о хигијенској исправности воде за пиће по свим физичко-хемијских и микробиолошким параметрима.

6. Литература

[1] Монографија *Петровград*, 1938.

[2] Племенита течност, лист *Зрењанин*, 2019.

[3] Стратегија одрживог развоја града Зрењанина за период од 2014. године до 2020. године, наручилац: Република Србија, АП Војводина

[4] План развоја града Зрењанина за период 2023-2030. године, наручилац: Република Србија, АП Војводина, Град Зрењанин

[5] Претходна Студија изводљивости изградње Регионалног водоводног система Дубовац – Зрењанин – Кикинда, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, наручилац: АП Војводина, Покрајински секретаријат за енергетику и минералне сировине, 2006.

[6] Стратегија водоснабдевања и заштите вода у АП Војводина, Универзитет у Новом Саду, Природно.-математички факултет, Департман за хемију, наручилац: Покрајински секретаријат за науку и технолошки развој, 2009.
[7] Пројекат за извођење (ПЗИ) за ППВ Зрењанин, „Маунтин“ доо, наручилац: „Gruppo Zilio“ доо, 2017.
[8] Сепарат пројекта за грађевинску дозволу (ПГД) за предтретман на ППВ Зрењанин, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, наручилац: „Pannonian Water“ doo, 2023.
[9] Сепарат пројекта за грађевинску дозволу (ПГД) за мултимедијалне филтере на ППВ Зрењанин, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, наручилац: „Pannonian Water“ doo, 2024.

Matej Čehovin[1], Alojz Medic[2]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25093C

PRIMENA OZONA I UV ZRAČENJA ZA PRIPREMU PIJAĆE VODE MALIH VODOVODA – PRIMER IZ PRAKSE

Rezime: Oksidacija i dezinfekcija vode ozonom vrlo je efikasna, mada u malim i seoskim vodovodima ne baš često zastupljena, prvenstveno zbog ekonomskih razloga i relativno zahtevnih tehničkih karakteristika primene ove tehnologije. Dezinfekcija UV zracima, kroz više od 3 decenije primene, potvrđena je kao efikasna i relativno ekonomična metoda, ali se generalno ne može primeniti kao jedini stepen pripreme pijaće vode. U ovom radu se, na praktičnom primeru, diskutuje o primeni ozona i UV zračenja za pripremu vode za piće u malim i seoskim vodovodima u Republici Sloveniji.
Ključne reči: dezinfekcija, oksidacija, ozon, pijaća voda, UV

DRINKING WATER TREATMENT WITH OZONE AND UV FOR SMALL WATER SUPPLY SYSTEMS – PRACTICAL EXAMPLE

Abstract: Oxidation and disinfection of water with ozone is very effective, although it is not very common in small and rural waterworks, primarily due to economic reasons and the relatively demanding technical characteristics of the application of this technology. Disinfection with UV light has been confirmed as an effective and relatively economical method through more than 3 decades of application, but generally cannot be applied as the only stage of drinking water treatment. This paper discusses practical example of the application of ozone and UV radiation for drinking water treatment in small and rural waterworks in the Republic of Slovenia.
Key Words: Disinfection, drinking water, oxidation, ozone, UV

1. Uvod – glavne karakteristike i uloga ozona i UV zraka za pripremu pijaće vode

Ozon je sveprisutan u prirodi i tehnici. Generalno je najpoznatiji zbog uloge u Zemljinoj stratosferi zbog zaštite protiv UV (UV-C i UV-B) zraka na površini planete, a njegovo javljanje u troposferi (na površini planete), zbog njegovih karakteristika smatra se izrazito nepovoljnim za životnu sredinu. U hemijskom smislu, ozon se sastoji od tri atoma kiseonika (O_3) i alotropija je uobičajenog kiseonika sa dva atoma (O_2). Između praktično primenljivim sredstvima za pripremu pijaće vode, ozon je najsnažnije pojedinačno sredstvo za oksidaciju [1, 2]. Upoređenje tih potencijala oksidacije predstavljeno je u tabeli 1. Za pripremu pijaće vode, ozon se najčešće koristi kao sredstvo za oksidaciju organskih materija (uklanjanje TOC-a, naj-

[1] *MAK CMC tehnologija vode d.o.o, Ljubljana, Slovenija, Matej.Cehovin@mak-cmc.si, ORCID: 0000-0001-5665-735X*
[2] *MAK CMC tehnologija vode d.o.o, Ljubljana, Slovenija, Alojz.Medic@mak-cmc.si*

značajnije prethodnica AOX-a kod sledstvene primene hlora), Fe (gvožđa) i Mn (mangana), uklanjanje boje, nepovoljnih mirisa i ukusa, poboljšanje koagulacije i flokulacije itd. Također je vrlo efikasna i česta primena ozona za dezinfekciju pijaće vode, posebno površinske [1, 2].

Karakteristike ozona u vodenim rastvorima, u zavisnosti o fizičko-hemijskim parametrima (posebno pH u alkalnom području), su stvaranje hidroksilnih (HO•), hidroperoksilnih (HO_2•) i drugih radikala, posebno u alkalnom području [2]. Ozon za pripremu vode malih vodovoda primenjuje se u generalne svrhe, i za oksidaciju i za dezinfekcijo.

Tabela 1. Upoređenje potencijala oksidacije (na 25°C) različitih praktično primenljivih hemijskih sredstava za pripremu pijaće vode
Table 1. Comparison of oxidation potentials (at 25°C) of practically applicable oxidants for drinking water treatment

Sredstvo	Simbol	Potencijal oksidacije (V)
hidroksilni radikal	HO•	2,80
ozon	O_3	2,07
vodonik peroksid	H_2O_2	1,78
hidroperoksilni radikal	HO_2•	1,70
permanganat	MnO_4^-	1,68
hlor dioksid	ClO_2	1,57
hlorova (I) kiselina	HOCl	1,49
hlor – vodeni rastvor	$Cl_{2(aq)}$	1,36
kiseonik – vodeni rastvor	$O_{2(aq)}$	1,27

Ultraljubičaste ili UV zrake generalno su poznate po uticajima na život i zdravlje organizama, posebno štetnim kod preterane izloženosti, mada su u određenim dozama esencijalne za neke biohemijske procese. UV zrake u UV-C spektaru zračenja (talasna duljina 100–280 nm) vrlo su efikasno dezinfekciono sredstvo, posebno za dezinfekciju pijaće vode [3]. Primarni efekt UV zraka je na DNK mikroorganizme, zbog čega nisu sposobni za reprodukciju, a stoga ne mogu da zaraze druge organizme. Doze UV-C zraka sa talasnom duljinom 254 nm za 99,99% inaktivaciju (dezinfekciju) različitih mikroorganizama, navedene su u tabeli 2.

Spektar efikasnosti u odnosu na vrstu mikroorganizama relativno je širok. Veliki niz mikroorganizama visoko je osetljiv na UV-C zrake, posebno fekalni, uključujući bakterije *E. Coli*, streptokoke i parazite *Cryptosporidium*, *Giardia* i neki drugi, koji se samo slabo uklanjaju drugim dezinfekcionim sredstvima (najčešće hlorom).

Doze, potrebne za dezinfekciju virusa (npr. Adenovirus) i nekih bakterija (npr. *Clostridium perfingens*, *Bacillus subtilis*), previsoke su za praktičnu primenu ili čak neefikasne, time se UV dezinfekcija smatra neizvodljivom za tretman tih. Za dezinfekciju pijaće vode primenjuje se minimalna UV doza od 40 mJ/cm^2. Ova je doza propisana sektorskim smernicama i standardima, koji su ušli i u opštu praksu i legislaciju [3, 4].

Tabela 2. Doze UV-C zraka (254 nm) za 99,99% (4-log) dezinfekciju različitih mikroorganizama
Table 2. UV-C dosages (254 nm) for 99,99% (4-log) inactivation of different microorganisms

Mikroorganizam	UV doza (mJ/cm^2)
Bacillus subtilis	222
Streptococcus faecalis	30
Legionella pneumophila	30
Salmonella typhi	51
Escherichia coli	18
Cryptosporidium	12
Giardia	11
Vibrio cholerae	9

U malim vodovodima UV zrake primenjuju se praktično isključivo za dezinfekciju, u objektima za pripremu vode, pre distribucije (npr. izlazak iz rezervoara) ili/i na različitim kritičnim kontrolnim tačkama na distributivnoj mreži.

2. Primeri iz prakse – mali vodovod sa kapacitetom 3,5 L/s – Primer „R“

2.1. Ozonizacija pijaće vode na sistemu pripreme vode malog vodovoda „R“

Mali vodovodni sistem „R“ snabdeva seosko područje – brdski kraj u Republici Sloveniji sa oko 800–1200 potrošača (region je turistički posećen i relativno je velika fluktuacija broja potrošača). Jedini vir vode sa kapacitetom za javno vodosnabdevanje je površinski – potok. Prirodom, sirova voda izložena je brzim promenama kvaliteta zbog vremenskih situacija, a istovremeno pod velikim je rizikom potencijalnog antropološkog/veštačkog zagađenja. Karakteristike ove sirove vode (generalno u poređenju sa ostalim sirovim vodama za pripremu pijaće u R. Sloveniji, koje su u više od 93% podzemne) se prikazuju u obliku povišene mutnoće (čak do 100 NTU), sa relativno visokim vrednostima TOC (2–5 mg/L), smeđom bojom, zemljanim mirisom i ukusom, relativno niskim redoks potencijalom (150–250 mV), visokim utroškom permanganata i zagađenjem fekalnim mikroorganizmima (*E. Coli*, streptokoki), a povremeno čak i parazitima (*Cryptosporidium, Giardia*).

Sve ovo naglašava potrebu za primenom višestepenog tretmana sirove vode, da bi pijaća voda na kraju ispunjavala propisane parametre (važeće u R. Sloveniji a i na širem prostoru) [5]. Za takav tip sirove vode, oksidacija i dezinfekcija ozonom, zbog efikasnosti u odnosu na probleme fizikalno-hemijske i mikrobiološke neadekvatnosti, poželjna je tehnologija pripreme, a čak i retka/jedina, koja oslovljava više aspekta/parametara vode sa takvim karakteristikama.

Primena hlora za mikrobiološku kontrolu u ovakvoj sirovoj vodi ograničena je zbog visokih potencijala pojava hlorisanih nusprodukata dezinfekcije (AOX, THM – trihalometani,…) Na sistemu „R“, hlorisanje nije se primenjivalo od kraja devedesetih godina nadalje i zamenilo se hlor dioksidom, ali je doziranje toga ograničeno najvećom koncentracijom koja se može primeniti (0,4 mg/L) [4].

Objekat za pripremu vode kapaciteta je 3,5 L/s. Priprema vode sastoji od (po redosledu pojavljivanja): koagulacije, taloženja, filtracije na peščanim filterima, ozonizacije, adsorpcije na aktivnom uglju (GAC) i istovremeno uklanjanje viška rastvorenog ozona, zaštitna dezinfekcija UV zracima, rezidualna dezinfekcija hlor dioksidom pre distribucije.

Slika 1. Pogled na sustav za ozonizaciju (generator, rashladni sistem, upravljački ormar, reakciona posuda, analizator ozona u vodi i detektor ozona u vazduhu) na prezentovanom praktičnom primeru „R“
Figure 1. View of ozonation system (ozone generator, cooling system, power supply and control panel, reactor, dissolved ozone analyser, ozone in air detector) „R“

Ozon kao hemijsko sredstvo za primenu u postupcima pripreme vode, izuzetno je reaktivan i opasan gas. Nezavisno o veličini i kapacitetima objekta za pripremu vode, kod primene ozona (generisanje, aplikacija, destrukcija viška) neophodno je povesti računa o merama bezbednosti, koje su nekim sektorskim propisima i pravno obavezujuće, uzimajući u obzir, da je jedan takav sistem mašina, električna oprema, elektromagnetna oprema, oprema pod pritiskom itd. Ozonski sistem mora da bude opremljen i bezbednosnim sistemima za upotrebu u potencijalno eksplozivnim atmosferama (ATEX). Neophodna je automatska kontrola i detekcija mogućih ispuštanja gasne faze, kontrola i alarmiranje pristupa.

Na sistemu „R“ ozon se primenjuje od 1986. godine. Nekoliko godina (od kraja devedesetih godina 20. veka do 2016) ozon se nije primenjivao zbog kvarova tehnike i nedostupnosti rezervnih delova za servisiranje originalnog sistema („Jeklo Ruše“). U periodu od 2014. do 2016. godine izvršena je rekonstrukcija objekta i zamena zastarele opreme, a i delimična nadogradnja. Od 2016. godine dalje ponovo je uspostavljen sistem ozonizacije. Aplicirane doze ozona su reda veličine 0,5–2,0 mg/l, koje se javljaju kao povišen redoks potencijal u reakcionoj posudi (reda veličine 750–900 mV), dok je rezidual ozona reda veličine 0,05–0,10 mg/L. Glavni rezultati primene ozoniranja: mikrobiološki ispravna vode bez zabeležih odstupanja od propisanih parametara u monitoringu, voda bez izražene boje, ukusa i mirisa, poboljšana stabilnost fizičko-hemijskih parametara u sistemu vodosnabdevanja (stabilnost koncentracije sekundarnog dezinficijensa kroz distributivnu mrežu). U ekonomskom smislu,

prosečni ukupni trošak primene ozona na prezentovanom primeru iznosi reda veličine 0,05–0,10 €/m^3 [6].

2.2. UV dezinfekcija pijaće vode na sistemu pripreme vode malog vodovoda „R“

Prvenstveno, UV dezinfekcija na sistemu „R“ ugradila se je zbog poboljšanja mikrobiološke kontrole u periodu od 2009. godine nadalje. Sistem je bio projektovan za dozu zračenja od 40 mJ/cm^2, u skladu sa i danas važećim pravilnicima. Među značajnim parametrima za primenu ove tehnologije, UV transmitanca na 1 cm kod talasne duljine 254 nm u sirovoj vodi iznosi 65–75%. Za vreme ugradnje UV sistema u 2009. godini, na sistemu pripreme radili su samo taložnik, peščani filteri i filter sa aktivnim ugljenom (GAC filter). UV transmitanca posle tretmana u tadašnje vreme iznosila je oko 80%. Posle rekonstrukcije objekata i celokupnog tretmana od 2016. godine nadalje, UV transmitanca postiže vrednosti od 85-90%.

Ugrađen je bio monohromatski UV uređaj (zračenje talasne duljine 254 nm) sa jednom lampom snage od 210W (73W kod 254 nm). Primena UV dezinfekcije u periodu 2009–2016 pokazala se kao efikasna i pouzdana tehnologija, jer se posle implementacije više nisu javljali mikrobiološki neispravni uzorci posle primarne dezinfekcije. Pre toga, velik su uticaj na mikrobiološku sliku pripremljene vode imale organske materije, koje tadašnja tehnologija nije uklanjala u dovoljnoj meri, pa bi se velik deo hemijskog sredstva za dezinfekciju (originalno gasni hlor, kasnije hlor dioksid) zapravo potrošio na oksidaciji materija u vodi, umesto da bi bio na raspolaganju za izvršavanje dezinfekcione funkcije. Na dezinfekciju UV zracima organske materije nemaju toliko izraženih uticaja, pa se time i primarna dezinfekcija obavlja puno efikasnije. Stoga se, UV dezinfekcija zadržala kao stepen zaštitne dezinfekcije i posle 2016. godine i rekonstrukcije objekta, po principu zaštitite sa više barijera, mada zbog primene ozona više ne bi bila neophodno potrebna.

U ekonomskom smislu, prosečni ukupni trošak primene UV tehnologije na prezentovanom primeru iznosi reda veličine 0,005–0,010 €/m^3. Specifična potrošnja struje iznosi 0,015–0,020 kWh/m^3 [6].

Slika 2. Primer tipične instalacije UV reaktora na vodovodnom sistemu
Figure 2. View of typical UV disinfection system installation

3. Zaključak

U ovom radu su predstavljeni stručni aspekti primene ozona i UV zraka za pripremu pijaće vode na praktičnom primeru malog vodovoda. Iako se ozon generalno, zbog tehničko-tehnoloških i ekonomskih aspekta, puno češće primenjuje u sistemima sa većim kapacitetom, na ovom se primeru pokazuje, da je njegova primena željena a čak i potrebna također u malim vodovodnim sistemima. Ekonomski aspekti primene ozona u malim vodovodnim sistemima mogu da budu presudni u fazama odlučivanja i određivanja tehnologije pripreme vode već u predinvesticionoj fazi i fazi projektovanja. Mada ovde diskutovani primer sa navedenim ekonomskim parametrima ukazuje na mogućnost implementacije ove unapređene tehnologije pripreme pijaće vode bez prevelikog finansijskog tereta na celokupnu cenu vode (ne više od 10% ekonomske cene, koja se naplaćuje potrošačima).

UV dezinfekcija već je decenijama utvrđena kao efikasna tehnologija dezinfekcije pijaće vode, a u ekonomskom smislu u poslednjoj deceniji i po postala je puno više prihvatljiva. Generalno je razlog uvećane ekonomske prihvatljivosti raširenost tehnologije po broju instaliranih uređaja u svetskom merilu, pa se time smanjuju i generalni troškovi uređaja. Na diskutovanom primeru pokazano je, da i za male vodovodne sisteme, primena UV tehnologije ne treba da ima za rezultat više od 0,5–1% uticaj na povećanje ukupne cene vode, a istovremeno neuporedivo veći pozitivan uticaj na celokupan mikrobiološki kvalitet pijaće vode.

Istina je, da generalizovanje na osnovu pokaznog primera, nije moguće. Adekvatne tehnologije pripreme pijaće vode za postizanje propisanog kvaliteta trebalo bi da se odredi za svaki primer pojedinačno, uzimajući u obzir ne samo fizičko-hemijske i mikrobiološke karakteristike sirove vode, nego razmotriti zdravstveno-(hidro)tehničke, sanitarne i tehnološke aspekte uključi i (najmanje) aspekte opšte zaštite prirodne sredine, sociološke, ekonomske i urbanističke aspekte. Iako je ovo sve teško ostvariti u realnosti, bilo bi dobro da svi akteri u lancu vodosnabdevanja težimo ka tome, jer u širem smislu ovaj put dovodi do opšteg napretka na ovom području. Primena ozona i UV zračenja predstavljaju primenljiv i moguć kvalitativan pomak u procesima pripreme pijaće vode malih vodovoda.

4. Literatura

[1] Gottschalk C, Libra J. A, Saupe A, Ozonation of Water and Waste Water: *A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications*: Second Edition. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.

[2] Von Sonntag C, von Gunten U, Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment : *From Basic Principles to Applications*. IWA Publishing, London, UK, 2012.

[3] Hijnen W. A. M, Beerendonk E. F, Medema G. J, Inactivation Credit of UV Radiation for Viruses, Bacteria and Protozoan (Oo)Cysts in Water: A review. *Water Research* 40: 3–22, 2006.

[4] EPA: Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual; Environmental protection agency (Agencija za zaštitu životne sredine), Washington, SAD, 1999.

[5] Uredba o pitni vodi (Uredba o pijaćoj vodi), *Uradni list RS*, št. 61/23 (*Službeni glasnik Republike Slovenije* br. 61/23), 2023.

[6] Arhiva izvođenih projekata, MAK CMC tehnologija vode d.o.o., Ljubljana, Slovenija, 1989–2025.

Милица Коларски[1], Татјана Симчин[2]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25099K

САНАЦИЈА ФИЛТЕРСКИХ ПОЉА–ЕФЕКТИ СПРОВЕДЕНИХ РАДОВА

Резиме: На пешчаним филтерима успешно се из воде уклањају гвожђе, манган и амонијак, који су се пре филтрације саджали у концентрацијама већим од дозвољених Правилником о хигијенској исправности воде за пиће. Након санације филтерског поља потребно је време и одговарајући услови да се пешчана испуна обложи природно формираним слојем MnO_2 и биофилмом који садржи микроорганизме који доприносе уклањању гвожђа и мангана, односно амонијака. У раду су анализирани ефекти спроведених радова и време потребно да се поново достигне задовољавајућа ефективност филтрације.

Кључне речи: брзи-пешчани филтери, замена испуне, гранулометрија испуне, квалитет воде

REHABILITATION OF THE FILTERS – EFFECTS OF THE WORKS

Abstract: Sand filters successfully remove iron, manganese and ammonia from water, which were contained, before filtration, in concentrations higher than those permitted by the Regulation on the hygienic quality of drinking water. After the filter field is rehabilitated, it takes time and appropriate conditions for the sand filling to be coated with a naturally formed layer of MnO_2 and a biofilm containing microorganisms that contribute to the removal of iron and manganese, or ammonia. The study analyzes the effects of the works and the time required to achieve satisfactory filtration efficiency again.
Key Words: rapid-sand filters, replacement of sand filling, granulometry of media, water quality

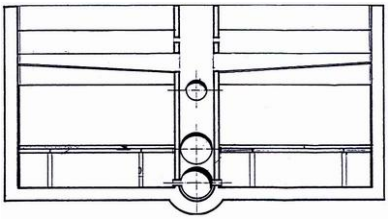
1. Увод

На Постројењу за прераду воде „Штранд“ у Новом Саду у функцији су две филтер станице са пешчаном испуном идентичне по конструкцији и капацитету 750 l/s. Стара филтер станица је изграђена 1964. године, а Нова филтер станица 1981. године. Обе су реконструисане 1995. године. Сваку филтер станицу чини по 12 (отворених) брзих пешчаних филтера површине 36 m^2 и филтерске испуна висине 1,15 m (слика 1а) и 1б)).

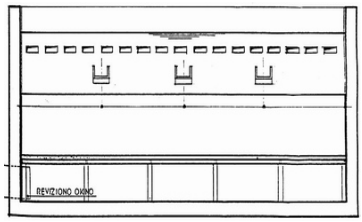
Први - носећи слој чини шљунак висине 0,15 m и то 0,10 m пречника зрна 4 – 8 mm и 0,05 m пречника зрна 2-4 mm. Други слој чини кварцни песак- висине 1 m, величине

[1] *Јавно комунално предузеће „Водовод и канализација Нови Сад“, Нови Сад, milica.kolarski@vikns.rs; ORCID: 0009-0009-9435-2149*
[2] *Јавно комунално предузеће „Водовод и канализација Нови Сад“, Нови Сад, tanja.simcin@vikns.rs; ORCID: 0009-0006-2195-186X*

зрна 0,6-1,2 mm. Слој воде изнад горње површине песка је око 1 m. Прање филтера врши се на сваких 48 h, обрнутим током.



Слика 1а) Попречни пресек филтера
Figure 1a) Cross section of the filter



Слика 1б) Уздужни пресек филтера
Figure 1b) Longitudinal section of the filter

2. Ефикасност филтрације и потреба за санацијом

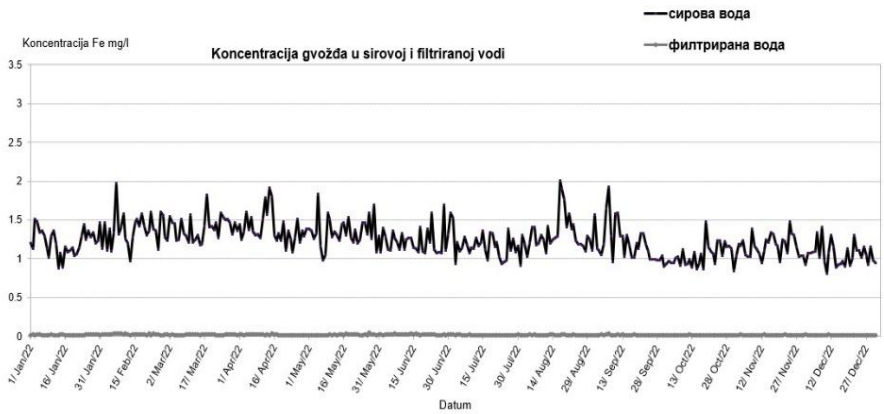
На постројењу се третира подземна вода са три изворишта: „Петроварадинска ада“, „Ратно острво“ и „Штранд“.

Подземне воде са сва три изворишта су сличних карактеристика. Имају низак садржај кисеоника са повишеним садржајем амонијака, гвожђа и мангана.

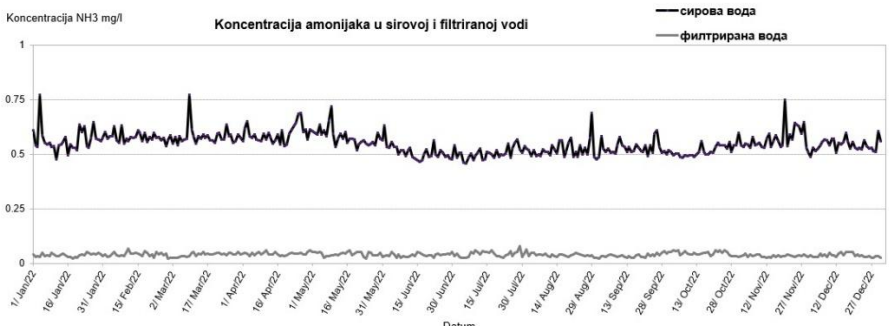
Филтрацијом на пешчаним филтерима се постиже следеће:

- задржавање хидроксида гвожђа (слика 2);
- каталитичка оксидација Mn и задржавање формираних оксида мангана Mn (слика 5);
- биооксидација амонијум јона и нитрита (слика 3 и 4);
- задржавање мањег дела органских материја;
- задржавање дела микроорганизама и биолошких индикатора.

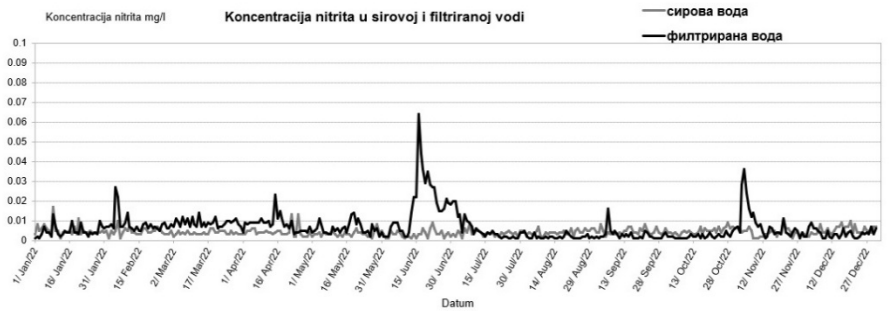
Током филтрације гвожђе и манган се уклањају у потпуности, а ефикасност уклањања амонијака је преко 90%.



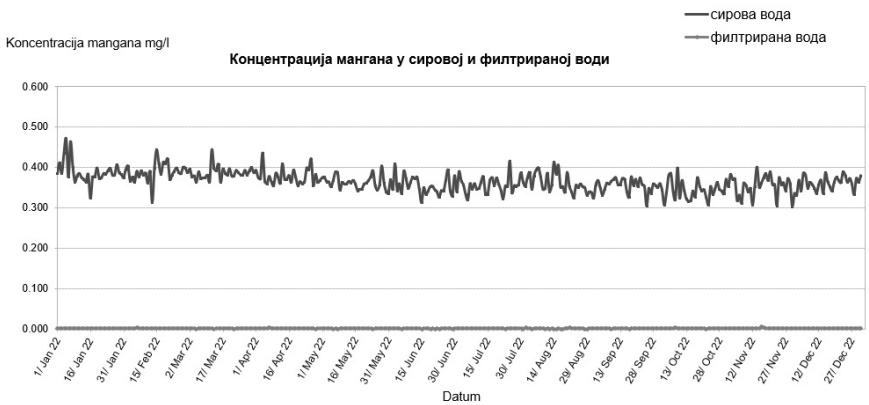
Слика 2. Концентрација гвожђа у сировој и филтрираној води
Figure 2. Iron concentration in raw and filtered water



Слика 3. Концентрација амонијака у сировој и филтрираној води
Figure 3. Amonnia concentration in raw and filtered water



Слика 4. Концентрација нитрита у сировој и филтрираној води
Figure 4.. Nitrite concentration in raw and filtered water



Слика 5. Концентрација мангана у сировој и филтрираној води
Figure 5. Manganese concentration in raw and filtered water

Квалитет рада филтера прати се у континуитету а једном годишње узимањем узорка испуне из сваког филтера проверава се и гранулација испуне, како би се утврдило

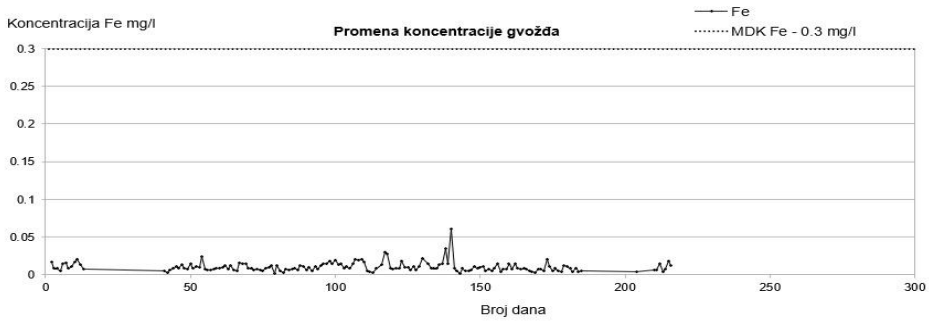
да ли је дошло до тзв. „гојења“ испуне. Потреба за санацијом целокупне филтерске испуне јавља се након вишегодишње употребе (више од 5 година) јер временом адсорбовани талог на зрну испуне утиче на одступање гранулометријске криве од пројектом дефинисаних услова.

Санација подразумева вађење старог песка, његово прање и просејавање; прање и преглед филтерских поља; преглед исправности и замена дизни и хидрауличка проба филтера водом и ваздухом ради провере режима рада. У санирана филтерска поља уграђује се нови кварцни песак и једним делом већ коришћени кварцни песак (стари песак који је прошао одговарајући третман односно који је опран, осушен и просејан). Учешће старог филтерског песка је максимално 30-40%. На овај начин убрзава се иначе спор процес „манганизовања“ новог песка односно формирања слоја манган IV оксида око зрна песка који је неопходан за потпуну каталитичку реакцију оксидације двовалентног мангана у његов нерастворни облик.

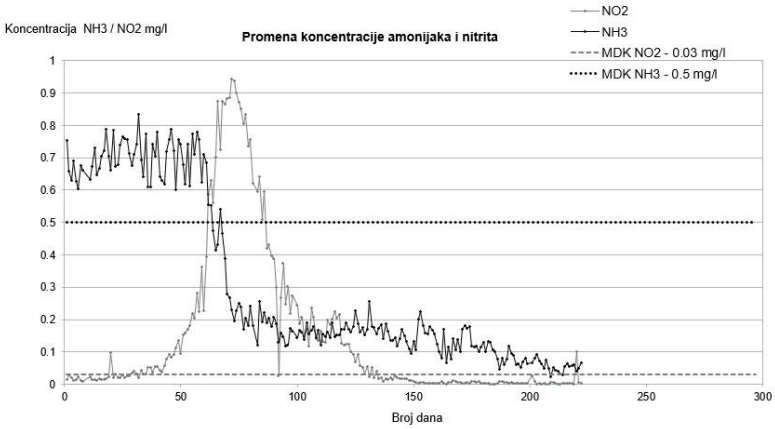
3. Резултати

До постизања потпуне ефикасност филтрације након санације, филтер се прво оптерети са само 50% од пројектованог капацитета тј. брзину филтрације потребно је смањити за 50%. У почетку ефикасност филтрације је неодговарајућа, односно концентрације мангана, амонијака и нитрита су изнад максимално дозвољених концентрација за воду за пиће, тако да се вода након филтрације не потискује у систем већ се одбацује у канализацију. У овом периоду мора се рачунати на рад са губицима прерађене воде.

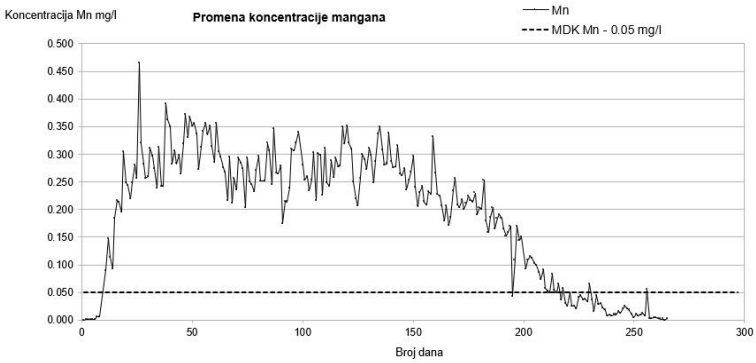
За разлику од мангана, амонијака и нитрита, заавршна оксидација гвожђа и уклањање флокула гвожђехидроксида након санације одмах се одиграва у потпуности. За издвајање гвожђа из воде није потребно време до постизања потпуне ефикасности филтрације, јер је након филтрације концентрација гвожђа далеко испод дозвољених концентрација за вод за пиће (слика 6). Што се тиче амонијака и нитрита, уобичајено време потребно да се испуна обложи биофилмом који садржи микроорганизме који доприносе нитрификационим процесима је 80-120 дана (слика 7). Најдуже време потребно је да се пешчана испуна обложи природно формираним слојем MnO_2 и да се каталитичком оксидацијом манган у потпуности уклања из воде. Пракса је показала да је за овај процес потребно је у просеку 200-250 дана (слика 8).



Слика 6. Промена концентрације гвожђа, након санације филтера
Figure 6. Change in iron concentration after filter rehabilitation



Слика 7. Промена концентрације амонијака и нитрита, након санације филтера
Figure 7. Change in ammonia and nitrite concentration after filter rehabilitation



Слика 8. Промена концентрације мангана, након санације филтера
Figure 8. Change in manganese concentration after filter rehabilitation

За сваки параметар приказано је просечно време потребно за формирање испуне. На брзину формирања испуне утичу и други фактори поред брзине филтрације. Температура воде је фактор који у одређеној мери може да утиче на хемизме у филтерској испуни. Такође током извођења санације односно током процеса просејавања старе испуне, уколико је мањи проценат искоришћења старог манганизованог песка са одговарајућом гранулацијом (15-25%) може се очекивати дужи временски период потребан за формирање испуне.

4. Закључак

Постројење за прераду воде „Штранд“ показује високу ефикасност у уклањању амонијака, гвожђа и мангана из подземних вода захваљујући примени пешчаних филтера и пажљиво контролисаном процес филтрације. Потпуна елиминација гвожђа и

мангана и преко 90% уклањања амонијака указују на исправно функционисање технолошког процеса и добру прилагођеност система специфичностима сирове воде.

Редовно праћење стања филтерске испуне, као и периодична санација након вишегодишњег рада, кључни су за очување пројектованих хидрауличких и филтрационих особина. Комбинацијом новог и регенерисаног песка током санације омогућава се брже формирање активних слојева на површини зрна, што скраћује време стабилизације и убрзава достизање пуног филтрационог капацитета.

Ипак, подаци о ефикасности након извршене санације показују да се у одређеном временском периоду након замене испуне не може рачунати на потпуно стабилан рад филтера. Због тога је неопходно пажљиво испланирати динамику санационих радова, уз процену могућих губитака у процесу производње, како би се очувао квалитет воде и спречили евентуални поремећаји у систему водоснабдевања.

5. Литература

[1] *Главни пројекат - санација филетерских поља*, ProIng 2009. године

Иван Ступић[1]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25105S

АКУМУЛАЦИЈА „ГРУЖА“ - ИЗАЗОВИ ОДРЖИВОГ УПРАВЉАЊА КЉУЧНИМ ВОДНИМ РЕСУРСОМ

Резиме: Акумулација „Гружа“ представља кључни водни ресурс централне Србије, са значајном улогом у водоснабдевању и заштити од поплава. Управљање овом акумулацијом суочава се са бројним проблемима и изазовима, укључујући очување квалитета воде, контролу загађења и усклађивање са важећим правним и институционалним оквиром. Овај рад има за циљ да анализира те изазове, сагледавајући правне, еколошке и друштвене аспекте управљања акумулацијом „Гружа“. Посебан акценат дат је на идентификовање проблема у пракси и предлагање решења која омогућавају одрживо и одговорно коришћење овог важног ресурса.
Кључне речи: Акумулација „Гружа“, одрживо управљање, водни ресурси, изазови

ACCUMULATION OF GRANULES - CHALLENGES OF SUSTAINABLE MANAGEMENT OF A KEY WATER RESOURCE

Abstract: The Gruža Reservoir represents a key water resource in central Serbia, playing a significant role in water supply and flood protection. The management of this reservoir faces numerous problems and challenges, including water quality preservation, pollution control, and compliance with the applicable legal and institutional framework. This paper aims to analyze these challenges, considering the legal, environmental, and social aspects of the management of the Gruža Reservoir. Special emphasis is placed on identifying problems in practice and proposing solutions that enable the sustainable and responsible use of this important resource.
Key Words: Gruža Reservoir, Sustainable Management, Water Resources, Challenges

1. Увод

Град Крагујевац је привредни, административни, образовни, здравствени и културни центар Шумадије. Са 171.186 становника (по попису из 2022. године), град је по величини, први у Шумадији, а четврти у Републици Србији. Територију града чини 78 месних заједница. Јавно комунално предузеће „Водовод и канализација“ Крагујевац снабдева водом за пиће грађане и привреду града Крагујевца, општине Баточина и део општине Кнић. Водоводни систем града чине три различита изворишта.

Први је водоводни систем Морава, пројектован 1974. године, који обухвата систем рени бунара у приобаљу реке Велике Мораве, у општини Баточина. Систем чини укупно

[1] *ЈКП ”Водовод и канализација” Крагујевац, stupicivan@yahoo.com,* ORCID*: 0009-0005-1185-0101*

14 рени бунара, као и постројење за прераду воде „Кошутњак“. Тренутно, због недостатка воде услед промењеног тока реке Велике Мораве, неки од рени бунара нису у функцији, али се убрзано ради на ревитализацији истих. Други извор је акумулација „Грошница“, удаљена око 12 километара од Крагујевца, са пројектованим капацитетом од 3.000.000 m³ сирове воде. Трећи и најважнији део система је акумулација „Гружа“, са пројектованим капацитетом од 64.000.000 m³. Општи подаци о акумулацији Гружа

Акумулација Гружа се налази на територији општине Кнић, а удаљена је око 25 километара од града Крагујевца. Изграђена је у периоду од 1979. до 1981. године, а пуњење је завршено 1983. године. Тип бране је бетонско-лучна, а смештена у месту Пајсијевић. Пројектовани капацитет акумулације износи 64,5 милиона m³ воде, чиме се она издваја као најзначајнији извор водоснабдевања града Крагујевца и делова околних општина. Језеро акумулације дужине је око 10 km, са ширином од 300 m до 2800 m, површином од око 900 хектара, просечном дубином 6,5 m и максималном дубином до 35 m. Дужина обале при максималном водостају износи око 42 km. Температура воде варира од 3,5°C у јануару и фебруару до 24–27°C у летњим месецима. Акумулација „Гружа“ је део Ибарско-шумадијског регионалног система водоснабдевања и обезбеђује значајан део потреба за водом града Крагујевца и делова општине Кнић. Просторно обухвата делове територија општина Крагујевац, Кнић, Чачак и Горњи Милановац.

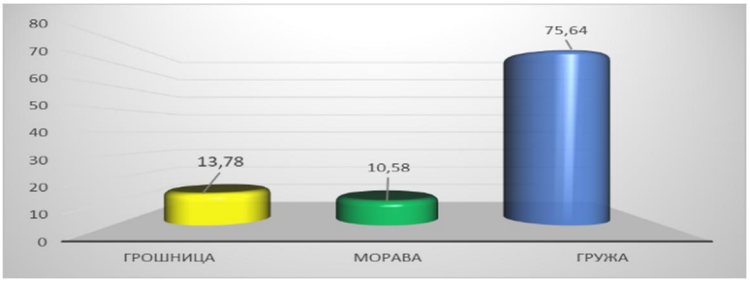


График 1. Учешће водоводних система у производњи воде 2024. године
Chart 1. Participation of water supply systems in water production in 2024

Иако акумулација има кључну улогу у водоснабдевању (график 1), постоје бројни изазови и проблеми у њеном управљању. Квалитет воде је угрожен повећаним садржајем мангана, амонијака и нитрата. Загађење је појачано услед урбанизације, изградње викендица и моторних чамаца на обали. Недостатак потпуне реализације мера заштите и дефинисаних зона санитарне заштите доводи до деградације акумулације. Постоји потреба за унапређењем просторног планирања и новим приступима у управљању сливом и преради воде, како би се обезбедило одрживо и безбедно коришћење овог важног водног ресурса

2. Изазови у управљању акумулацијом „Гружа“

Управљање акумулацијом Гружа суочава се са бројним изазовима који утичу на квалитет воде и одрживост водоснабдевања. Један од најзначајнијих проблема је очување квалитета воде. Додатни изазов представља загађење услед људских актив-

ности, као што су урбанизација, изградња викендица на обали и коришћење моторних чамаца, што доводи до деградације водног система.

Значајан изазов представља и бесправна градња на обалама акумулације, која нарушава еколошку равнотежу и доприноси деградацији водног система. Поред тога, неодговорно деловање риболоваца и рекреативних корисника језера погоршава стање квалитета воде и природног окружења. Ови фактори доводе до угрожености акумулације као кључног водног ресурса. Додатни изазови укључују недостатак ефикасне контроле људских активности, непотпуну реализацију мера заштите слива и потребу за унапређењем законске и институционалне подршке. Такође, сезонске варијације у водотоку и климатске промене могу довести до недостатка воде у одређеним периодима, што додатно компликује управљање акумулацијом.

2.1. Надзор акумулације „Гружа“

Стручне службе ЈКП „Водовод и канализација“ из Крагујевца редовно спроводе надзор акумулације „Гружа“ у складу са месечним и годишњим планом. Поред тога, врши се и ванредан надзор на захтев правних и физичких лица (график 2). У 2024. години поднето је 80 пријава за нелегалну градњу, док је у 2025. години поднето 32 пријаве.

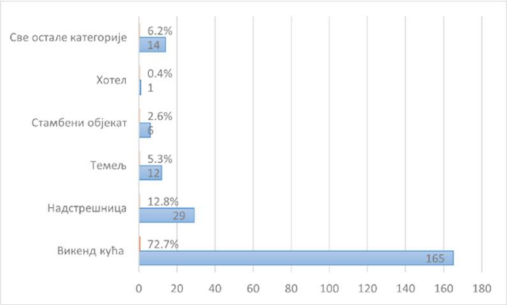


График 2. Број евидентираних нелегалних објеката
Chart 2. Number of recorded illegal structures

3. Проблем нелегалне градње на акумулацији „Гружа“

Ситуација на акумулацији „Гружа“ додатно је отежана стихијском и непланском изградњом, што представља озбиљан проблем за одрживост овог водоизворишта. На акумулацији је регистровано преко 200 нелегалних објеката, укључујући викендице, куће и ресторане, као и преко 100 бесправно постављених понтона и платформи на самој површини воде. Ови објекти се најчешће налазе у првој и другој зони санитарне заштите, где је било каква градња строго забрањена. Међу нелегалним објектима нису само мале викендице. Забележена је и изградња објеката од чврстог материјала, па чак и вишеспратног хотела. Неки од њих су подигнути на државном земљишту, а њихови власници су га оградили, чиме су ускратили приступ језеру и надлежним службама.

Главна последица ове неконтролисане градње је погоршање квалитета воде. Објекти најчешће немају уређене канализационе системе, па се отпадне и фекалне воде

сливају директно у језеро. Ово доводи до повећања концентрације нитрита и фосфата, што убрзава цветање алги и бактерија које су штетне по здравље људи. Оваква неконтролисана градња угрожава водоснабдевање преко 250.000 становника Крагујевца, Књића и Баточине, који зависе од овог водоизворишта. Константно погоршање квалитета воде може да доведе до тога да акумулација више не буде употребљива као извор питке воде, што би захтевало улагање значајних средстава у скупље и сложеније процесе пречишћавања воде. Овај проблем показује не само недостатак еколошке свести, већ и неефикасност надлежних институција у примени закона и решења о рушењу. Заштита овог природног ресурса није само питање екологије, већ и питање јавног здравља и одрживог развоја целог региона. Зато је неопходно хитно реаговање надлежних институција, спровођење строге контроле и забрана даље нелегалне градње.

Акумулација „Врутци“ код Ужица, која је кључна за водоснабдевање овог града, такође је била суочена са озбиљним проблемом загађења. Иако нелегална градња није била у толикој мери изражена као на „Гружи“, загађење је проузроковано другим факторима, попут ерозије тла и изливања канализације. У јеку проблема, вода из акумулације постала је неупотребљива за пиће због присуства токсичних алги, што је довело до ванредне ситуације и преласка на алтернативне изворе водоснабдевања. За разлику од „Груже“ где проблем траје, на Врутцима је криза довела до хитних реакција и улагања у нове системе за пречишћавање. Акумулација „Бован“, у близини Сокобање, примарни је извор воде за Алексинац и околна насеља. Иако је туристички развијена, има строжију контролу над градњом у својој заштитној зони. Проблеми са загађењем су мање изражени него на „Гружи“ и „Врутцима“ због веће удаљености насеља и боље контроле. Ипак, повремено се јављају проблеми са загађењем из туристичких објеката који нису адекватно повезани на канализацију. За разлику од „Груже“, на „Бовану“ се више ради на превенцији и контроли загађења, али то не значи да је проблем у потпуности решен. Поређење показује да је проблем акумулације „Гружа“ специфичан по својој критичности јер директно угрожава живот становника због масовне нелегалне градње на осетљивом подручју. За разлику од „Врутака“ где је проблем био решен у кризном моменту, на „Гружи“ се наставља. Док се на „Бовану“ проблем решава превентивно, на „Гружи“ се реагује након што је дошло до озбиљног загађења. Ово указује на неопходност доследне примене закона и подизања свести о значају водоизворишта за будућност

4. Стратегије и мере за одрживо коришћење акумулације „Гружа“

Да би се обезбедило дугорочно и одрживо управљање акумулацијом „Гружа“, неопходно је примењивати интегрисани приступ који обухвата правне, еколошке и управљачке мере. Једна од најважнијих активности је контрола људских активности и уклањање бесправних објеката. На обалама акумулације и у њеном сливу налази се више од 200 бесправних конструкција, укључујући викендице, платформе, бараке и друге привремене или сталне објекте, који нарушавају еколошку равнотежу и доприносе деградацији водног система. Потребно је организовати теренске акције и интервенције у сарадњи са локалним властима, јавним предузећима и еколошким организацијама, као и редовно праћење и приоритизацију уклањања најугроженијих

објеката. Поред тога, неопходна је контрола и регулисање рекреативних активности, као што су риболов и коришћење моторних чамаца, како би се смањило загађење и заштитила природна средина акумулације. Еколошке и техничке мере укључују примену савремених техника заштите воде, редовно праћење квалитета воде и санацију угрожених делова акумулације. Правни и институционални оквир такође је кључан за одрживо управљање. Јачање координације између надлежних институција и јавних предузећа, унапређење законске регулативе и санкционисање кршења прописа обезбеђују ефикасну контролу и дугорочну заштиту водног ресурса. Истовремено, едукација локалног становништва и корисника акумулације је од великог значаја. Подизање свести о значају заштите воде и промоција одговорног понашања у складу са еколошким и санитарним стандардима доприносе очувању акумулације Гружа као кључног ресурса за будуће генерације. Применом ових стратегија могуће је смањити негативне утицаје, обезбедити стабилно водоснабдевање и дугорочно очувати акумулацију као важан водни ресурс.

5. Смањење водних ресурса и климатске варијације

У јулу 2025. године, ниво воде на Гружанском језеру био је испод 40% пројектованог капацитета (график 3), што је резултат дуготрајне суше и недовољних падавина током зиме, пролећа и почетка лета. Ситуацију могу поправити само обилне и дуготрајне кише, којих за сада нема у најави.

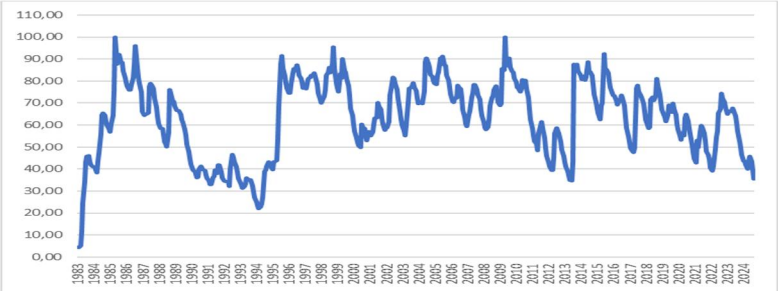


График 3. Испуњеност акумулације Гружа у %
Graph 3. Gruža reservoir filling rate in %

Овај пад водостаја има озбиљне последице по водоснабдевање, посебно на релацији Крагујевац–Баточина, где су рени бунари у Брзану такође угрожени. Јавно комунално предузеће „Водовод и канализација“ Крагујевац допрема воду цистернама у сеоска подручја која се суочавају са недостатком воде, како би се обезбедило снабдевање грађана. Поред тога, ниски водостаји погодују појави токсичних алги и других микроорганизама у води, што представља ризик по здравље људи и животну средину. Смањење водних ресурса такође отежава одржавање еколошке равнотеже у самом језеру и у сливу акумулације.

Климатске промене, посебно глобално загревање, повећавају учесталост екстремних метеоролошких појава. Просечна глобална температура порасла је за преко 0,5°C током 20. века, а последња деценија 20. века била је најтоплија од почетка мерења. У

Шумадији се ово манифестује кроз учестале екстремне температуре, интензивне падавине и суше.

Смањена количина падавина имала је директне последице на стање водних ресурса у Шумадији. У мају 2025. падавине су биле присутне, али њихова количина није била довољна да значајније допуни акумулацију, па је ниво воде углавном стагнирао уз благи пад услед потрошње и испаравања. Током јуна 2025. дошло је до потпуног изостанка падавина, што је довело до драматичног смањења дотока у акумулацију. Притоке, река Гружа и Борачка река, бележиле су знатно смањен проток, док су поједини мањи водотоци потпуно пресушили. У јулу 2025. последице су постале очигледне, јер је ниво Гружанског језера пао на историјски минимум, а медији и локалне власти упозоравали су да је стање алармантно и да се уочава пресушивање притока. Ситуација из 2025. године јасно показује рањивост акумулације „Гружа“ на климатске екстреме. Због чињенице да је реч о плитком језеру, просечне дубине свега 6,5 метара, оно је посебно осетљиво на комбинацију недостатка падавина и повећаног испаравања током летњих месеци. Иако изразито сушни периоди нису уобичајени, суше настају због поремећаја у општој циркулацији атмосфере, што утиче на пољопривреду и водопривреду.

Табела 1. Метеоролошки подаци (мај-јун 2025)
Table 1. Meteorological data (May-June 2025)

Месец	Падавине (Крагујевац)	Климатска норма (1991–2020)	Одступање	Оцена
Мај 2025	34,2 mm	41,1 mm	–17 %	Сушно
Јун 2025	≈ 0 mm	38,7 mm	–100 %	Екстремна суша

Период мај–јун 2025. године обележен је исподпросечним падавинама (–17 % у мају) и екстремном сушом (–100 % у јуну), што је резултирало значајним падом нивоа акумулације „Гружа“ (табела 1). Ови показатељи указују на неопходност систематичног планирања и заштите акумулације, улагања у алтернативне изворе водоснабдевања, као и развоја механизама за праћење и благовремено реаговање у условима климатских екстрема. Акумулација „Гружа“, иако представља стратешки ресурс за регион, показала се изразито осетљивом на климатске промене и варијабилност падавина, што је потребно унети као један од кључних елемената у дугорочне планове водоснабдевања централне Србије. Због свега наведеног, неопходно је предузети хитне мере за очување и заштиту акумулације „Гружа“, укључујући контролу коришћења воде, редовно праћење квалитета воде, едукацију корисника и развој алтернативних извора водоснабдевања, како би се обезбедила одрживост водних ресурса у условима све честијих сушних периода.

Годишње количине падавина у Шумадији расту са надморском висином, са просечном сумом од 682,1 mm. Доминантни континентални падавински режим карактерише максимум падавина у мају и јуну (12–13% годишње суме у јуну), док су минимални у фебруару и октобру (5–6%). Југозападни делови Шумадије, под утицајем медитеранске климе, имају максимум падавина у новембру, децембру и јануару, са минимумом у августу (график 4).

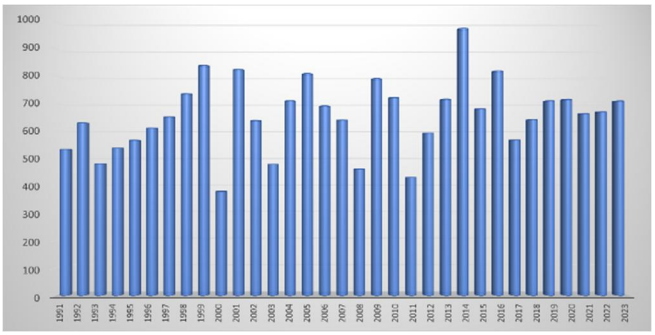


График 4. Количина падавина на територији Крагујевца за период 1991-2024
Graph 4. Precipitation in the territory of Kragujevac for the period 1991-2024

6. Доступност воде у свету

У светској потрошњи воде, пољопривреда има удео од 90%, а индустрија и домаћинства по 5%. Од категорије која се подразумева и о којој се не води претерано рачуна, вода је у 21. веку постала најзначајнији стратешки природни ресурс. Као што се каже да је 20. век карактерисала глобална борба за премоћ кроз контролисање извора нафте, тако се сматра да је 21. век - век борбе за контролу преосталих извора чисте воде.

Вода је један од кључних ресурса за живот, пољопривреду и индустрију. Иако више од 70% површине Земље чини вода, само 2,5% су слатководни ресурси. Од те количине, више од две трећине налази се у ледницима и вечитом снегу, док је мање од 1% глобалне воде лако доступно за људску употребу. То практично значи да је свега око 0,007% укупне воде на Земљи директно употребљиво у свакодневном животу. Подземне воде представљају невидљиву, али изузетно значајну компоненту: чине чак 99% све слатке воде у течном стању, а обезбеђују 25% воде за наводњавање и око 50% воде за домаћинства. Међутим, велики проблем представљају губици у водоводној инфраструктури: у појединим градовима у земљама у развоју више од 40% воде се губи пре него што стигне до крајњих корисника. Расподела воде у свету изузетно је неравномерна. На пример, Амазонски слив садржи око 16–20% глобалних резерви слатке воде, док читав Блиски исток и Северна Африка заједно располажу са мање од 1%. Аридне и полуаридне зоне, које заузимају око 40% копнене површине, имају свега 2% глобалних водних токова. Климатске промене додатно погоршавају ситуацију.

Сателитски подаци показују да је у периоду 2015–2023. дошло до губитка око 1.200 km³ копнене свеже воде у односу на просек из 2002–2014. године. Очекује се да ће повећана учесталост суша и поплава значајно утицати на водне ресурсе у подсахарској Африци, Јужној Азији и Медитерану.

То значи да Србија не спада у земље сиромашне водом, али ни онолико богате колико се претходних деценија мислило. Са друге стране, као и све слабије развијене земље, и Србија се доста неекономски и нееколошки понаша према тим резервама, наиме, процењује се да губитак у смислу неповратног отицања неискоришћене воде износи чак 5-10 кубних метара сваке секунде.

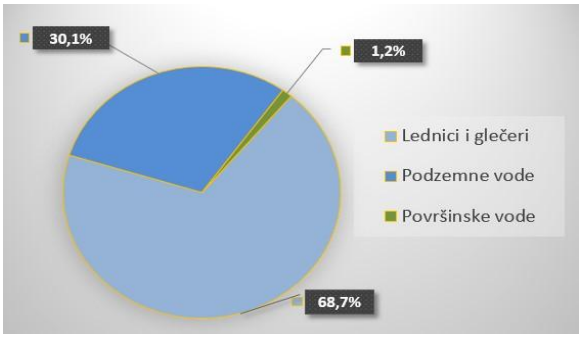


График 5. Количине воде на земљи
Chart 5. Amount of water on earth

7. Закључак

Акумулација „Гружа“ представља један од најзначајнијих водних ресурса у Србији, који обезбеђује воду за град Крагујевац и околна насеља. Анализа стања указује да се овај водни систем суочава са бројним изазовима – од смањења водних ресурса и нестабилних падавина, преко екстремних летњих температура и дуготрајних суша, до људских утицаја као што су бесправна градња и неодговорно коришћење језера. Низак ниво воде и погоршани квалитет воде представљају ризик по водоснабдевање, здравље становништва и еколошку равнотежу у сливу акумулације. Истовремено, климатске варијације и честе суше наглашавају потребу за адаптацијом и одрживим управљањем. Како би се обезбедила дугорочна одрживост акумулације, неопходно је примењивати интегрисани приступ који обухвата законске и институционалне мере, контролу људских активности, едукацију становништва, редовно праћење водостаја и квалитета воде, као и развој алтернативних извора водоснабдевања. Примењене мере као што су уклањање бесправних објеката, рационализација потрошње воде и превентивне активности током екстремних суша могу значајно допринети очувању акумулације Гружа као кључног водног ресурса. Укратко, одрживо управљање, превентивне мере и свест корисника воде представљају кључне факторе за обезбеђење сигурног и стабилног снабдевања водом у будућности, уз очување природне и еколошке вредности акумулације.

8. Литература

[1] Закона о водама *Службени гласник РС*, бр. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018, 95/2018 (други закон)
[2] Републички хидрометеоролошки завод Србије (РХМЗ), месечни билтени за мај и јун 2025
[3] Стратегија управљања водама до 2034 године
[4] Младен Милиовојевић,Соња Радаковић, *Вода на планети земљи*
[5] Савић М. *Хидрогеолошке карактеристике Шумадије*. Београд: Геолошки институт.
[6] Водопривредна основа Републике Србије, Београд, Министарство пољопривреде и водопривреде, 1969, 2001.
[7] Републички хидрометеоролошки завод - https://www.hidmet.gov.rs/

Драгољуб Бајић[1], Милица Степановић[2]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25113B

АНАЛИЗА РИЗИКА И ПРОЦЕНА УГРОЖЕНОСТИ ПОДЗЕМНИХ ВОДА: СЛУЧАЈ ИЗВОРИШТА „НОВОСЕЛИЈА“ (БАЊА ЛУКА, РЕПУБЛИКА СРПСКА, БОСНА И ХЕРЦЕГОВИНА)

Резиме: Рад приказује анализу ризика и процену угрожености подземних вода изворишта „Новоселија“ у Бањој Луци (Република Српска, Босна и Херцеговина). Применом GOD методе, извршена је оцена рањивости подземних вода као и процена ризика на потенцијално загађење. Резултати указују на зоне различитог степена осетљивости, пружајући научну основу за заштиту подземних вода и одрживо управљање водним ресурсима. Резултати наглашавају значај хидрогеолошких истраживања у очувању изворишта пијаћих вода и подржавају спровођење циљаних мера заштите животне средине.
Кључне речи: хидрогеолошка истраживања, GOD метода, управљање водним ресурсима, заштита подземних вода, пијаће воде

RISK ANALYSIS AND VULNERABILITY ASSESSMENT OF GROUNDWATER: THE CASE OF THE „NOVOSELIJA“ SOURCE (BANJA LUKA, REPUBLIC OF SRPSKA, BOSNIA AND HERZEGOVINA)

Abstract: This paper presents a risk analysis and groundwater vulnerability assessment of the „Novoselija“ spring in Banja Luka (Republika Srpska, Bosnia and Herzegovina). By applying the GOD method, the vulnerability of groundwater and the risk of potential contamination were evaluated. The results indicate zones with varying degrees of sensitivity, providing a scientific basis for groundwater protection and sustainable water resource management. The findings highlight the importance of hydrogeological research in preserving drinking water sources and support the implementation of targeted environmental protection measures.
Key Words: hydrogeological research, GOD method, water resource management, groundwater protection, drinking water

1. Увод

Процена рањивости подземних вода и ризика од загађења представља кључну основу за планирање и управљање овим ресурсима, како у погледу њихове заштите, та-

[1] *Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4839-1093*

[2] *Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, milica.stepanovic@rgf.bg.-ac.rs, ORCID: 0009-0006-1594-3898*

ко и упроцени ризика и предузимању превентивних мера. Појам „рањивост подземних вода“ увео је Margat (1968), а заснива се на претпоставци да природно окружење у одређеној мери штити подземне воде од продора загађивача. Током инфилтрације, вода са загађивачем може бити делимично прочишћена проласком кроз одређене седименте у порозној средини, захваљујући физичким, хемијским и биолошким процесима [2]. С друге стране, [11] разликују се природна и специфична рањивост. Природна зависи од геолошких и хидрогеолошких услова, док специфична укључује и карактеристике самих загађивача. Многи истраживачи сматрају специфичну рањивост релевантнијом, јер је подложна утицају антропогених фактора [10].

Рањивост подземних вода је релативна и не може се директно измерити. За њену процену користе се различити параметри као што су састав земљишта, карактеристике засићене и незасићене зоне, топографија и однос површинских и подземних вода [11].

Најчешће коришћене методе за процену рањивости су: DRASTIC, GLA, EPIK и GOD, које се разликују по параметрима које узимају у обзир и на основу којих се подручја класификују према степену рањивости. У новије време, све више се користе технике науке о подацима, попут машинског учења, за моделирање и процену рањивости подземних вода. Примери примене ових техника долазе из Марока [4], Ирана [5], Пакистана [1], Египта [3] и других земаља, где се комбинују са методама као што су DRASTIC и GALDIT. Такође, ГИС технологија игра важну улогу у просторно-временској анализи и визуализацији података [8, 9]. У оквиру овог рада, приказана је методологија за процену рањивости подземних вода у ширем подручју изворишта „Новоселија“, које снабдева становништво Бање Луке пијаћом водом. У ГИС софтверу примењена је GOD метода, а детаљан опис алгоритма и резултата дат је у наставку рада.

2. Истражно подручје

Извориште „Новоселија“ је део регионалног водоводног система Бања Лука и снабдева око 200.000 потрошача на територији града Бања Лука, општине Челинац и дела општине Лакташи. Налази се на десној обали реке Врбас и постоји од 1942. године. Данас обухвата 11 бунара (од којих је 9 активних), 5 инфилтрационих базена за вештачко прихрањивање издани, 2 захвата површинске воде са Врбаса и постројење за прераду воде. Поред бунара, постоји и 8 активних пијезометара за праћење нивоа подземних вода.

Геолошки састав ширег подручја истраживања обухвата седименте мезозоика и кенозоика [7]. Најстарије стене у овом региону припадају горњетријаским седиментима, док су најмлађи наслази речне терасе, сачињене од шљункова дебљине 10 - 12 метара. Управо у тим наслагама развијена је издан из које се врши експлоатација подземних вода. Карактерише се добрим филтрационим особинама, а коефицијент филтрације износи око $7{,}5 \times 10^{-3}$ m/s.

Поред изворишта „Новоселија“, постоји и мање извориште „Суботица“, удаљено 22 km од града, са неколико каптираних извора, укупне издашности око 15-20 l/s, а које није предмет овог рада.

На слици 1 су приказане фотографије предметног изворишта, где се могу уочити водозахватни објекти, део корита реке Врбас и инфилтрациони басен.

Слика 1. Изворište „Новоселија“
Figure 1. The „Novoselija“ groundwater source

3. Методологија

Решење проблема управљања и анализе рањивости подземних вода у конкретном случају започиње се прикупљањем и припремом података, затим њиховом анализом и интерпретацијом, применом техника науке о подацима, и на крају визуелизацијом. У овом истраживању примењена је техника ГИС-а као метода за процену рањивости подземних вода, уз коришћење GOD методе (Foster et al, 2002).

Наука о просторним подацима представља спој ГИС-а и класичне науке о подацима, са фокусом на геопросторне информације и новије рачунарске технике. Она

омогућава анализу локација, њихових међусобних односа и просторних образаца, користећи тачке, линије, полигоне, растере и атрибутне податке.

У овом случају, алгоритам за процену рањивости обухвата следеће кораке:

а) Прикупљање података - укључује теренска истраживања, архивске материјале, геолошке и хидрогеолошке карте, податке о локацијама бунара и пијезометара, дубини до нивоа подземних вода, као и резултате изведених тестова црпења.

б) Припрема података - сређивање, нормализација и трансформација података у формат погодан за анализу.

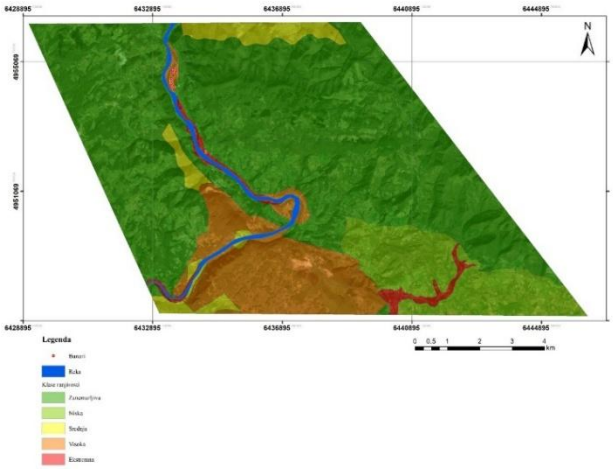
в) Анализа података - класификација литолошких јединица према GOD методи, која користи три параметра: хидродинамичке особине водоносника („G“), литолошки састав и степен консолидованости незасићене зоне („O“), и дубину до водоносника („D“).

г) ГИС обрада - георeференцирање карата, креирање тематских слојева за сваки параметар, додељивање нумеричких вредности и израчунавање индекса рањивости множењем вредности „G“, „O“ и „D“.

д) Визуелизација података - кроз тематске карте са бојама и симболима, уз легенду и текстуални опис, добија се коначна мапа рањивости подземних вода.

4. Резултати и дискусија

На основу анализе три кључна фактора GOD методе - „G“ (хидродинамичке карактеристике водоносника), „O“ (литолошки састав и степен консолидованости у зони аерације) и „D“ (дубина до подземне воде) - израђена је финална мапа рањивости подземних вода за шире подручје изворишта „Новоселија“ (слика 2).



Слика 2. Карта рањивости подземних вода шире зоне изворишта „Новоселија“
Figure 2. Groundwater vulnerability map of the „Novoselija“ groundwater source

Мапа приказује пет класа рањивости: од занемарљиве до екстремне. Највећи степен рањивости утврђен је управо у зони изворишта, у оквиру терасних шљункова, што је и очекивано с обзиром на њихову порозност и танак заштитни глинени слој. Јужно од изворишта, у зони алувијалних седимената, рањивост је оцењена као екстремна, што указује на висок ризик од брзог продора загађивача. Са источне и западне стране, водоносник је ограничен флишним седиментима кредне старости, који су хидрогеолошки класификовани као „условно безводни“, па је у тим зонама рањивост занемарљива. Ови подаци су од великог значаја за дефинисање зона санитарне заштите изворишта, у складу са важећим прописима Републике Српске.

5. Закључак

Комбинација ГИС техника и методологије науке о подацима представља унапређени приступ који омогућава прецизну и ефикасну анализу просторних и временских фактора у процени рањивости подземних вода. Једна од главних предности ГИС-а је могућност идентификације просторне расподеле рањивости на основу географски повезаних података, као што су ниво подземне воде, геолошке карактеристике терена и извори загађења.

Оваквим интегрисаним приступом добијају се модели рањивости који се могу применити на регионалном, националном и глобалном нивоу. Они могу приказати тренутно стање или предвидети будуће промене, што омогућава креирање стратегија за смањење ризика од загађења и заштиту подземних вода. Ове стратегије се могу прилагођавати у складу са новим подацима у реалном времену. Могу се приказати конкретни резултати и закључци до којих се дошло, услове под којима ти закључци важе, ограничења као и евентуалне правце потребних додатних истраживања.

Захвалница

Аутори изражавају захвалност Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на подршци научним истраживањима, која су од суштинског значаја за развој друштва заснованог на знању (Уговор бр. 4451-03-136/2025-03/200126).

6. Литература

[1] Awais M, Aslam B, Maqsoom A, Khali U, Ullah F, Azam S, Imran M. Assessing nitrate contamination risk in groundwater: a machine learning approach. *Appled Sciences*, 11, 21, 10034. https://doi.org/10.3390/app112110034, 2021.

[2] Brassington R. Field hydrogeology, 3rd edn., 276 pp. Chichester: John Wiley & Sons. Foster S. S. D, Hirata R. Gomes D, Elia M, Paris M. *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and enviroments agencies*. The World Bank, Washington DC, USA, 103 p, 2002.

[3] Gad M, Gaagai A, Eid M. H, Szucs P, Hussein H, Elsherbiny O, Elsayed S, Khalifa M. M, Moghmanm F. S, Moustapha M. E, Tolan D. A, Ibrahim H. Groundwater quality and health risk assessment using indexing approaches, multivariate statistical analysis, artificial neural networks,

and GIS techniques in EI Kharga Oasis, Egypt. - *Water*, 15, 6, 1216. https://doi.org/-10.3390/w15061216, 2023.

[4] Ijlil S, Essahlaoui A, Mohajane M, Essahlaoui N, Mili E. M, Van Rompaey A. Machine learning algorithms for modeling and mapping of groundwater pollution risk: a study to reach water security and sustainable development (sdg) goals in a mediterranean aquifer system. *Remote Sensing*, 14, 10, 2379. https://doi.org/10.3390/rs14102379, 2022.

[5] Jalali R, Tishezan P, Hashemi H. A machine learning framework for spatio-temporal vulnerability mapping of groundwaters to mitrate in a data scarce region in Lenjanat Plain, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 42088-42110. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33920-8, 2024.

[6] Margat, J. Vulnerabilite des nappes d'eau souterrune a la pollution (Groundwater Vulnerability to Contamination). Bases de al cartographie (Doc.) 68 SGC 198HYD, BRGM, Orleans, 1968.

[7] Mojićević M, Vilovski S, Tomić B. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Banja Luka*. Institut za geološka istraživanja Sarajevo, 1969.

[8] Motlagh Z. K, Derakhshani R, Sayadi M. H, Groundwater vulnerability assessment in Central Iran: integration of gIS-based DRASTIC model and a machine learning approach. - Groundwater for Sustainable Development, 23, 101037. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101037, 2023.

[9] Smida H, Tarki M, Gammoudi N, Dassi L. GIS-based multicriteria and artificial Neural network (ANN) investigation for the assessment of groundwater vulnerability and pollution hazard in The Barga Shallow Aquifer (Central Tunisia): a critical review of generic and modified DRASTIC models. - *Journal of Contaminant Hydrology*, 259, 104245. https://doi.org/10.1016/j.jcondyd.-2023.104245, 2023.

[10] Stepanović M, Bajić D, Polomčić D, Šikman S, Novitović A. Procena ugroženosti podzemnih voda primenom GOD metode: slučaj izvorišta za vodosnabdevanje Sopota. *Vodoprivreda*, 53, 311-312, 143-151, 2021.

[11] Vrba, J. and Zaporozec, A. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability - IAH International Contributions to Hydrogeology*, 16. FRG, Heise Publication, Hannover, 131 p, 1994.

Горан Гавриловић[1], Трајко Станић[2]
Зоран Миловановић[3]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25119G

РЕЗУЛТАТИ РЕВИТАЛИЗАЦИЈЕ РЕНИ БУНАРА НА ИЗВОРИШТУ „БРЗАН“: УТИЦАЈ НА КАПАЦИТЕТ И КВАЛИТЕТ ВОДЕ

Резиме: Извориште „Морава-Брзан“ за снабдевање Крагујевца водом за пиће изграђено је у периоду 1965-1976. године са 14 рени бунара. Током година долази до смањења капацитета изворишта услед промене тока реке Велике Мораве, ниског водостаја, као и наслага у самим дреновима. У новембру 2024. године извршено је подводно снимање стања дренова које је показало да су дренови у врло лошем стању. Приступа се ревитализацији бунара и у овом раду биће укратко описан поступак добијања нових количина воде, од снимања подводном камером дренова, утискивања нових дренова, испирања и контроле квалитета добијене воде
Кључне речи: рени бунар, извориште „Морава-Брзан“, ревитализација

RESULTS OF THE RENI WELL RENOVATION AT THE BRZAN SPRING: IMPACT ON CAPACITY AND WATER QUALITY

Abstract: The „Morava-Brzan“ spring for supplying Kragujevac with drinking water was built in the period 1965-1976 with 14 wells. Over the years, the capacity of the spring has decreased due to changes in the course of the Velika Morava River, low water levels, and deposits in the drains themselves. In November 2024, underwater recording of the condition of the drains was carried out, which showed that the drains were in very poor condition. The revitalization of the well is underway, and this paper will briefly describe the process of obtaining new quantities of water, from recording the drains with an underwater camera, inserting new drains, flushing and quality control of the obtained water..
Key Words: reni well, spring „Morava-Brzan“, revitalization

1. Општи подаци

Снабдевање Крагујевца водом за пиће обезбеђено је захватима површинских вода из акумулација на рекама Грошници и Гружи, као и изворишта подземних вода код Брзана. Извориште „Морава-Брзан“ изграђено је на левој обали реке Велике Мораве код села Брзан. Пројектовање и формирање изворишта обављено је у периоду од 1965. до 1976. године. Укупно је урађено 14 бунара са хоризонталним дреновима. Систем за водоснабдевање подземним водама из алувијалних наслага реке Велике Мораве радио

[1] *ЈКП „Водовод и канализација“ Крагујевац, gorangsm@mts.rs, ORCID: 0009-0007-0487-2008*
[2] *Atinska 93, Kragujevac, tstanicvkpb@gmail.com*
[3] *ЈКП „Водовод и канализација“ Крагујевац, jkpvik@gmail.com*

је све до изградње акумулације на реци Гружи. Пуштањем у рад акумулације на Гружи, након пуњења 1983. године, изворište „Морава-Брзан“ је престало да ради и било је у стању мировања све до краја осамдесетих година. Поновно активирање изворишта „Морава-Брзан“ извршено је крајем осамдесетих због повећања потрошње воде у подручју система водоснабдевања града Крагујевца, као и због појачаног пражњења акумулације „Гружа“ изазваног неповољним хидролошким условима, када је ниво језера на Гружи опао толико да је угрожено уредно водоснабдевање града Крагујевца.

Бунари су просечне дубине 15,0 m. Пречници бунара су 4,00 m за 11 бунара и 2,00 m за 3 бунара. При дну бунара утиснути су хоризонтални дренови (8, односно, 6 дренова).

Дренажне цеви су пречника 200 mm са прорезима за дренирање воде из водоносног слоја. Дужина појединачног дрена износи од 15-30 m. Дренажне цеви су ливено-гвоздене, дужине око 2,0 m. Отвори на дренажним цевима су ширине 6 mm. Дренажне цеви су утиснуте на различитим висинама од дна бунара у водоносни слој који је хетерогеног састава. Дужина утиснустих дренажних цеви зависила је од отпора који се јавио приликом утискивања.

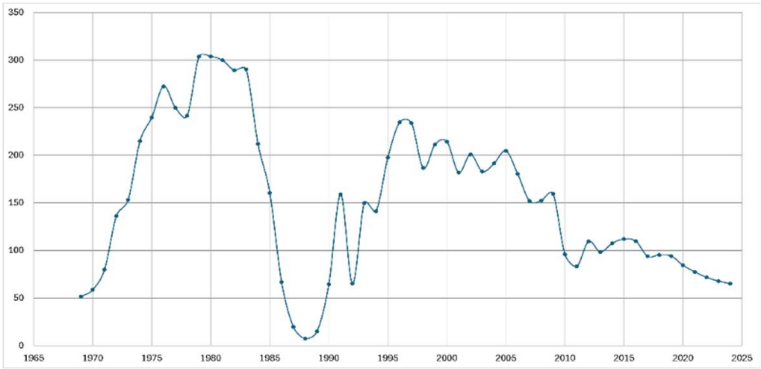


График 1. Количина дистрибуиране воде са изворишта „Морава-Брзан“ L/s
Figure 1. Quantity of distributed water from the "Morava-Brzan" spring L/s

Капацитет изворишта је према пројекту требало да буде око 500 L/s. Током експлоатације добијани су разни капацитети од 150-500 L/s (график 1.). Током година експлоатације дошло је до смањења количина воде услед померања корита реке Велике Мораве, као и све нижег водостаја саме реке.

2. Садашње стање

На основу дугогодишњег праћења нивоа реке Велике Мораве, количина падавина и издашности рени бунара 9 (РБ-9) може се закључити да на ниво подземних вода највише утиче водостај Велике Мораве (график 2).

Како је изворište у експлоатацији више од 50 година дошло је и до стварања наслага материјала у подземним слојевима где се налазе дренови. Такође је дошло и

до смањења отвора на самим дреновима што отежава филтрацију, односно доток воде у бунарско окно. Због лоше хидролошке ситуације и због више деценијског коришћења изворишта, а како би се потрошачима од самог изворишта па до постројења „Кошутњак“ које се налази у Крагујевцу, обезбедиле довољне количине воде, ЈКП „Водовод и канализација“ Крагујевац је у новембру 2024. године покренуло процес обнављања овог изворишта.

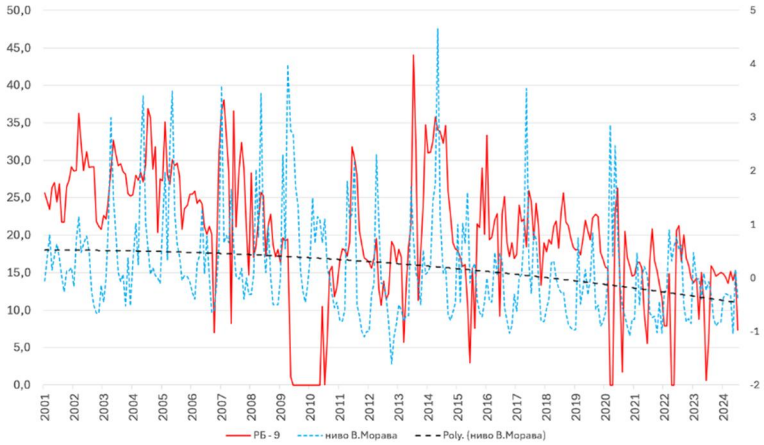


График 2. Зависност количине воде на РБ-9 (L/s) у односу на ниво реке Велике Мораве (m)
Figure 2. Dependence of water quantity on RB-9 (L/s) in relation to the level of the Velika Morava River (m)

У првој фази су одређени бунари на којима ће се извршити снимање стања дренова помоћу подводне камере. Одређено је 5 бунара и то су: РБ-1, РБ-2, РБ-4, РБ-8 и РБ-9. Ових пет бунара су одређени на основу количина воде које могу дистрибуирати, односно бунари са најмањом и највећом издашношћу.

Слика 1. Изглед унутрашњости дренова
Picture 1. Inside view of the drains

Подновно снимање рени бунара (слика 1) ради дефинисања стања у којем се налазе дренови извршено је у периоду од 07.11.2024. до 08.11.2024. године. Подводним снимањем дренова рени бунара регистровано је лоше стање дренова на свим бунарима. На неким дреновима је снимањем констатована велика количина талога у и на дренским цевима, али су они проходни до одређене дужине. Неке дренове уопште није било могуће снимити или су веома мало снимљени због велике количине материјала која је регистрована на уласку у дренске цеви.

На основу подводног снимања констатовано је тренутно стање унутрашњости рени бунара РБ-1, РБ-2, РБ-4, РБ-8 и РБ-9. Због јако лошег стања дренова, на већини бунара, дошло је до знатног смањења капацитета наведених бунара. Из истих разлога није могуће извести механичко-хемијску ревитализацију постојећих дренова.

На основу горе наведеног, узимајући у обзир опште хидрогеолошке услове на терену и тренутно стање дренова, предложена је ревитализација бунара утискивањем пластичних дренова мањег пречника у постојеће дренове. Оваква метода ревитализације бунара омогућила би несметани рад бунара дужи низ година, са значајним повећањем издашности.

По завршетку снимања и израде елабората одређена су 3 бунара на којима ће се вршити утискивање нових дренова у постојеће дренове, као и испирање подземља и чишћење дренова и то су РБ-1, РБ-2 и РБ-9.

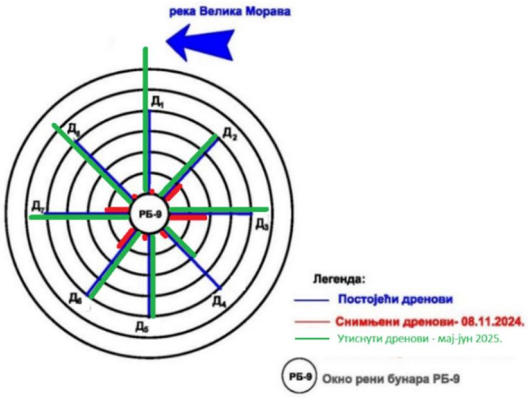
3. Извршени радови

У другој половини маја 2025. започети су радови на утискивању нових пластичних дренова у РБ-9. Пре било каквих радова у самом бунару извршен је тест издашности, односно која количина воде се може исцрпети из бунара у току 3 дана а да ниво воде буде константан. Овим тестом је остварена издашност РБ-9 од 10 L/s.

После утврђивања издашности бунара, започет је процес утискивања нових дренова (табела 1 і слика 2). По завршетку утискивања вршено је испирање дренова помоћу воде и ваздуха под притиском. Такође, вршено је и испирање свих дренова помоћу раствора лимунске киселине, како би се наслаге рђе на старим дреновима уклониле и омогућио доток нових количина воде.

Табела 1. Дужине дренова
Table 1. Lengths of drains

Дрен	Снимљена дужина дрена	Дужина утиснутог новог дрена
1	0,60	35
2	5,20	20
3	8,30	24
4	2,00	10
5	1,10	20
6	5,40	20
7	5,50	24
8	0,30	26



Слика 2. Дужина дренова
Figure 2. Lengths of drains

Када су сви процеси утискивања и испирања завршени, извршено је поновно мерење издашности бунара. Мерењем издашности после свих предузетих мера добијен је резултат од око 46 L/s. За ову количину воде потребно је узети у обзир да је ниво Велике Мораве на почетку радова износио -44 cm, а по завршетку радова је -88 cm.

Када је завршено са испитивањем издашности воде, урађене су хемијске анализе како би се утврдио квалитет добијене воде (график 3.)

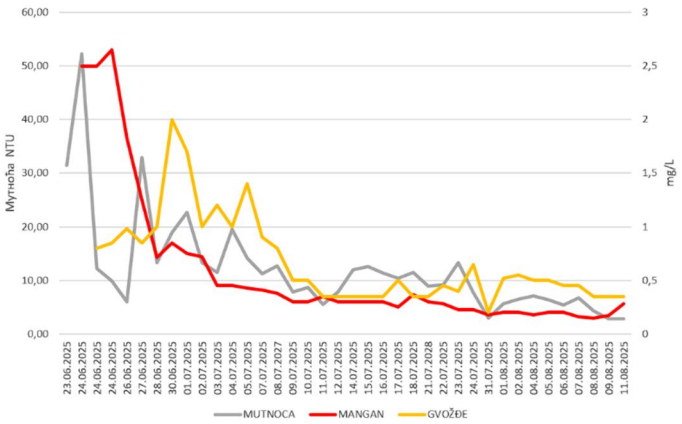


График 3. Мутноћа, концентрације мангана и гвожђа РБ-9 (mg/L)
Figure 3. Turbidity, manganese and iron concentrations in RB-9 (mg/L)

Након добијања првих резултата хемијских анализа, започето је испирање бунара, односно подземља. Параметри који су праћени су мутноћа, боја, манган и гвожђе. Током вишедневног испирања долази до смањења свих параметара, али како би се убрзао процес пуштања РБ-9 у систем водоснабдевања, а због недостатка воде са изворишта „Морава-Брзан“, извршено је испитивање квалитета воде из сваког дрена.

Резултати испитивања квалитета воде из сваког дрена показали су да у дреновима 2, 3 и 4 постоји увећана концентрација гвожђа и мангана. Затварањем ова три дрена 30. јула покушано је да се убрза добијање воде квалитета који се може проследити у дистрибутивну мрежу. На овај начин постигнуто је смањење боје и мутноће, као и концентрације мангана.

Коначно, 13. августа рени бунар 9 је укључен у систем водоснабдевања са изворишта „Морава-Брзан“. Квалитет воде је праћен на више контролних тачака у насељу Баточина као и на црпној станици Жировница. Концентрације мангана и гвожђа нису прелазиле МДК вредности, као ни боја и мутноћа.

Укључивањем РБ-9 у систем водоснабдевања добијене су довољне количине воде за насеље Баточина, као и за све потрошаче до постројења „Кошутњак“.

4. Закључак

Ревитализацијом бунара РБ-9 успешно је повећан капацитет воде, а такође после одређеног времена испирања добијен је и квалитет, што је обезбедило довољне количине воде за општину Баточина, као и за потрошаче до Крагујевца. Овај приступ ревитализације, са утискивањем нових дренова, омогућио је дугорочни рад изворишта упркос веома лошој хидролошкој ситуацији. Такође, нови дренови ће олакшати радове на редовном одржавању бунара.

5. Литература

[1] *Извештај о снимању дренова рени бунара РБ-1, РБ-2, РБ-4, РБ-8 и РБ-9 на изворишту „Брзан“*, општина Крагујевац, 2024

[2] *Елаборат о резервама подземних вода изворишта „Морава-Брзан“ за потребе водоснабдевања града Крагујевца*, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, 2013.

[3] Горан Гавриловић, Иван Ступић, *Утицај падавина на квантитет водних ресурса на подручју Шумадије*, Удружење за технологију воде и санитарно инжењерство, Зборник радова, Бања Ковиљача 2025.

Никола Николић[1], Васо Новаковић[2]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25125N

МОГУЋНОСТ ЗАХВАТАЊА ВЕЋИХ КОЛИЧИНА ПОДЗЕМНЕ ВОДЕ ЗА ВОДОСНАБДИЈЕВАЊЕ НАСЕЉА И ПРИВРЕДЕ ЈУГОЗАПАДНОГ ДИЈЕЛА БРЧКО ДИСТРИКТА, БОСНА И ХЕРЦЕГОВИНА

Резиме: У раду су приказани параметри водоносног слоја перспективног изворишта „Домажић“, које налази се на сјевероисточној граници општине Градачац, на самој тромеђи општина Градачац, Сребреник и Брчко Дистрикт. За потребе водоснабдијевања, најзначајније су резерве подземне воде акумулиране у аквиферу пукотинско - кавернозне порозности, тј. кречњацима сармата и бадема села Хргови, које се налази у југозападном дијелу Брчко Дистрикта. Аутори су у више наврата кроз ревитализацију старих и извођење новог бунара, те моделска испитивања увјерили у перспективност овог подручја што је приказано у овом раду.
Кључне речи: водоснабдијевање, бунар, кречњаци

POSSIBILITY OF PUMPING LARGER QUANTITIES OF GROUNDWATER FOR WATER SUPPLY TO SETTLEMENTS AND INDUSTRY IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE BRČKO DISTRICT, BOSNIA AND HERZEGOVINA

Abstract: The paper presents the parameters of the aquifer of the prospective water source “Domažić,” located on the northeastern border of the Gradačac municipality, at the junction of the municipalities of Gradačac, Srebrenik, and Brčko District of Bosnia and Hertzegovina. For water supply purposes, the most significant reserves are those of groundwater accumulated in the aquifer of fissure–cavernous porosity, i.e., in the Sarmatian and Badenian limestones of the village of Hrgovi, situated in the southwestern part of Brčko District. During the revitalization of old wells, the construction of new ones, and model testing, the authors have repeatedly confirmed the potential of this area, which is presented in this paper.
Key words: water supply, water well, limestones

1. Увод

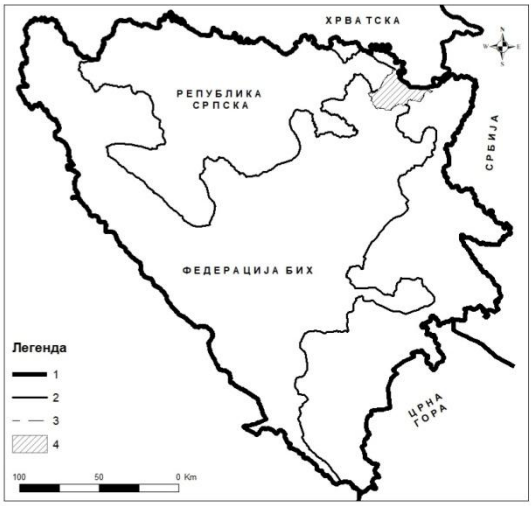
Брчко Дистрикт се налази у сјеверном дијелу Босне и Херцеговине (слика 1), под управом је оба ентитета као кондоминијум, али има велики степен аутономије и сопст-

[1] *ИПИН доо - Институт за примијењену геологију и водоинжењеринг, Бијељина, Босна и Херцеговина, nikolanikolic@ipin-institut.com, ORCID: 0009-0004-0261-8776*

[2] *ИПИН доо - Институт за примијењену геологију и водоинжењеринг, Бије љина, Босна и Херцеговина, vasonovakovic@ipininstitut.com, ORCID: 0009-0009-7999-3992*

вене органе управе. Брчко Дистрикт има укупно 83.516 становника према попису из 2013. године. Подручје Хргова и Домажића захвата падине сјеверног обода Мајевице. Извориште „Домажић“ налази се на сјевероисточној граници општине Градачац, на самој тромеђи општина Градачац, Сребреник и Брчко Дистрикт. За потребе водоснабдијевања, најзначајније су резерве подземне воде акумулиране у аквиферу пукотинско - кавернозне порозности, тј. кречњацима сармата и бадема у југозападном дијелу Брчко Дистрикта.

Подземене воде овог аквифера су субартеског карактера на ширем подручју. Латерално ограничење водоносног слоја (сармат - баден) је на истоку (у подручју Зовик - Вражићи) прелазом у лапоровити развој бадена, а у осталим правцима, површинама издањивања и ерозионим базисима у долинама ријека. По дубини залијегања слој је ограничен такође постепеним прелазом у лапоровито глиновити фацијални развој бадена, дефинисан условима дубље седиментације. Моћност баденског водоносног слоја износи искуствено 50 - 150 m, а наслаге сармата се крећу (20 - 60 m), а на мјестима и до 147 m што је утврђено ранијим структурним бушењима у околини Домажића.



Слика 1. Географски положај општине Брчко

Легенда: 1 – Државна граница; 2 – Ентитетска граница; 3 – Граница Брчко Дистрикта; 4 – Брчко Дистрикт

Figure 1. Geographical location of Brčko

Legend: 1 – State border; 2 – Entity border; 3 – Border of Brcko district; 4 - Brcko district

ДОО „ИПИН“ из Бијељине је за потребе ЈП „Комунално Брчко“ ДОО Брчко, 2024. извео радове на физичко-хемијској ревитализацији бунара БХ-1 Домажић, у Хрговима Доњим [4]. Осим тога аутори су имали прилику да учествују у реализацији допунских хидрогеолошких истраживања изворишта „Домажић“ од октобра 2015. до фебруара 2016. године [3]. У оквиру теренских истраживања изведени су пијезометри ПД-2/1 и ПД-4, те бунар БВ-3. Такође је извршен преглед и чишћење постојећег бунара БВ-2,

затим континуирано осматрање нивоа подземне воде током групног опитног црпљења и израда хидродинамичког модела аквифера са симулацијом експлоатације црпилишта и модела транспорта загађења и анализа хазарда изворишта „Домажић“ [3].

Аутори су такође имали прилику урадити и Елаборат о категоризацији, класификацији и прорачуну резерви подземних питких вода изворишта „Домажић“ код Градачца са стањем на дан 01.03.2016. године. При наведеним радовима, аутори су се увјерили да постоји могућност обезбјеђења додатних количина воде за водоснабдијевање насеља и привреде овог дијела Брчко Дистрикта. На такав закључак се долази и прегледом документације претходно изведених истраживања и литературе. Рударско-геолошки факултет из Тузле је 1990. урадио Студију геолошких, геофизичких, рударских и геотермалних истраживања на подручју Брчког и за хидрогеолошка истраживања ради обезбијеђења воде за пиће – Књига 2 водоснабдијевање, а у којој Р. Ваљаревић наводи потребу хидрогеолошких истраживања на потенцијалном терену, ради иницирања подземних вода у карстно-пукотинској издани [6]. И Рударски институт из Тузле је урадио Елаборат хидрогеолошких истраживања сјеверног обода Мајевице [5]. Процјена експлоатационих резерви по Е. Оручу за црпилишну зону Маоча је 174 l/s а за црпилишну зону Бос. Бијела је 123 l/s [5].

Циљ овог рада је да се кроз анализу познатих хидрогеолошких карактеристика овог изворишта, прикажу хидрогеолошке карактеристике подручја и да процјена могућности захватања већих количина воде за потребе водоснабдијевања насеља и привреде Брчко Дистрикта БиХ.

2. Методе истраживања

Као што је наведено у уводу, аутори овог рада имали су прилику да кроз извођење хидрогеолошких истраживања овог подручја и ревитализацију бунара, као и приликом израде Елабората о резервама и моделским испитивањима, изврше реинтерпретацију постојеће литературе и фондовске документације, добију резултате властитих истраживања и уоче дјелимично неискоришћен хидрогеолошки потенцијал.

У августу 2024. године извршена је демонтажа бунарске пумпе и опреме бунара БХ-1 Домажић, у Хрговима Доњим, те снимање унутрашњости бунара ради дефинисања стања бунарске конструкције, проходности бунара и количине талога у њему. Тестирање бунара БХ-1 у Домажићу изведено је дана 02.09.2024. године, и поново 05.09.2024. године, након чишћења и ревитализације примјеном 3 различита капацитета. За потребе прорачуна хидрогеолошких параметара водоносне средине, искоришћени су подаци поврата нивоа подземне воде.

После ревитализације бунара БХ-1 узет је узорак за физичко-хемијску анализу воде, која је урађена у Институту за јавно здравство Републике Српске, Регионални центар Зворник.

Истраживања на изворишту „Домажић“, у дијелу који припада простору општине Градачац су обухватила теренска истраживања, лабораторијска испитивања и кабинетску обраду података, а извело их је предузеће ДОО „ИПИН“ из Бијељине у периоду од октобра 2015. године до фебруара 2016. године. У оквиру теренских истраживања

изведени су пијезометри ПД-2/1 и ПД-4, те бунар БВ-3. Такође је извршен преглед и чишћење постојећег бунара БВ-2, затим континуирано осматрање нивоа подземне воде и групно опитно црпљење. У оквиру лабораторијских испитивања извршено је испитивање квалитета воде на 14 узорака узетих током групног опитног црпљења. Кабинетска обрада података обухватила је прикупљање постојеће документације и подлога, као и података добијених током допунских хидрогеолошких истраживања. Након дефинисања почетних услова, завршена је и израда хидродинамичког модела аквифера са симулацијом експлоатације црпилишта и модела транспорта загађења и анализа хазарда изворишта „Домажић“. Циљ израде математичког модела јесте симулација на изворишту „Домажић“, односно симулација експлоатације црпилишта капацитетом од 120 l/s. Програмски пакет који је коришћен за ове симулације је Groundwater Vistas компаније Environmenral Simulations Inc. Модел прогнозе рада пројектованог изворишта са капацитетом 120 l/s је симулиран када су претходном прогнозном моделу додати следећи бунари са капацитетима од:

- БВ-2 = 50 l/s
- БВ-3 = 50 l/s
- БВ-1 = 14,5 l/s и
- БХ-1 = 11,1 l/s.

Нажалост, тенденције погоршања квалитета изворишта подземних вода су све израженије и математички модели симулације транспорта загађења су најпоузданији метод прогнозе и контроле ремедијације загађења [2]. Као основа за 3Д нумерички модел потенцијалног транспорта загађења на изворишту „Домажић“, коришћени су гранични услови из претходног модела рада изворишта са капацитетом од 120 l/s. Програм који је коришћен за симулацију је MT3DMS, а графички интерфејс је Groundwater Vistas.

3. Резултати и дискусија

Снимањем унутрашњости бунара БХ-1 у августу 2024. утврђено је да је на дубини од 21,0 m од прирубнице (око 20,11 m од површине терена) доњи крај бунарске цијевне конструкције и дубље је незацјевљени дио бунара, односно да је бунар „опен-холе“ тренутне дубине 35,5 m.

У табели 1 дати су измјерени карактеристични параметри током тестирања.

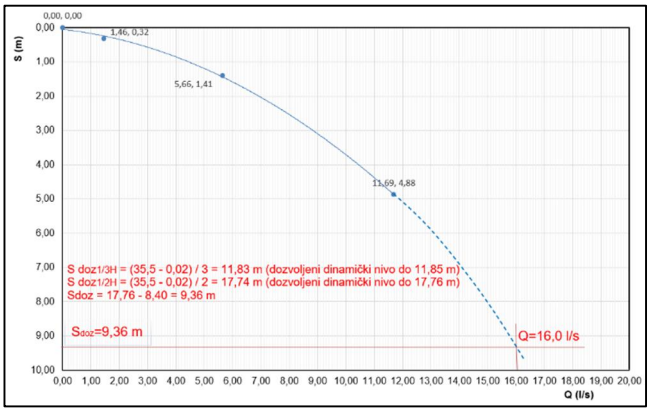
Табела 1. Резултати тестирања бунара БХ-1 након ревитализације
Table 1. The results of testing well BH-1 after revitalization

Капацитет црпљења бунара (l/s)	Снижење нивоа воде бунара БХ-1 (m)
1,46	0,16
5,66	0,97
11,69	12,30

На основу формираног дијаграма, а према критеријуму дозвољеног снижења од 1/2H добија се да је оптимални капацитет (несавршеног) бунара БХ-1 након

спроведене физичко-хемијске ревитализације у тренутним хидролошким условима Qопт = 16,0 l/s (слика 2).

На основу физичко-хемијске анализе подземне воде из бунара БХ-1 Домажић закључујемо да вода припада хидрокарбонатној класи, калцијумској групи. Утврђене вриједности физичко-хемијских параметара воде бунара БХ-1 су у границама референтних вриједности према Правилнику.



Слика 2. Дијаграм S=f(Q) за примјењене капацитет црпљења несавршеног бунара БХ-1 Домажић и прогнозна снижења за период од 25 година
Figure 2. Diagram S=f(Q) for the applied pumping capacity of the imperfect well BH-1 Domažić and forecast reductions for a period of 25 years

Бунар БВ - 3 је извео „ИПИН“ д.о.о., а његов степенасти тест црпљења (Step Draw Down Test - СДДТ) обављен је са три различита капацитета, у укупном трајању 18 сати (3 x 6 сати) и осматрањем поврата нивоа (Recovery тест - РТ) у трајању од 3 сата. Максимални примијењен капацитет црпљења овог бунара је 61 l/s (табела 2), али је његов капацитет ограничен према критеријуму задовољења филтрационих стабилности по ободу бушотине на 52,28 l/s.

Табела 2. Резултати тестирања бунара БV-3 у фебруару 2016.
Table 2. The results of testing well BV-3 in february 2016.

Капацитет црпљења бунара (l/s)	Снижење нивоа воде бунара (m)
26,5	3,72
40,0	5,78
61,0	10,68

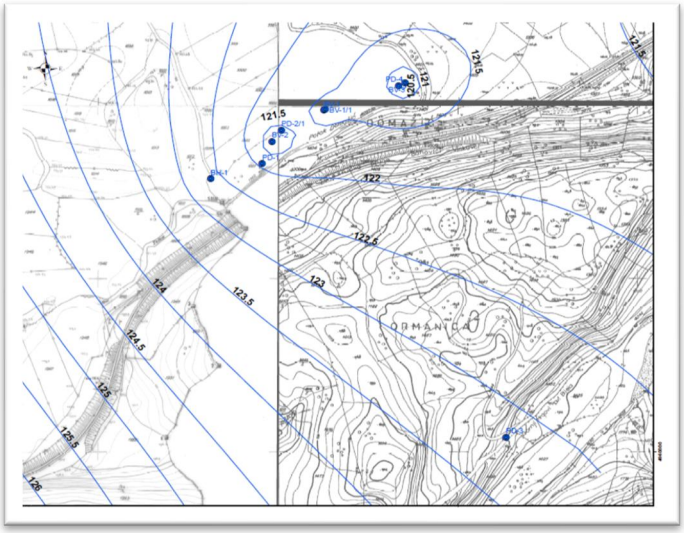
Моделском симулацијом је добијен прогнозни модел рада изворишта (слика 3), са бунарима следећих капацитета:

- БВ - 2 = 50 l/s
- БВ - 3 = 50 l/s
- БВ - 1 = 14,5 l/s
- БХ - 1 = 11,7 l/s.

За потребе израде модела, искоришћен је податак вриједности коефицијента филтрације, који износи K=2,0x10^{-4} m/s, а добијен обрадом података тестирања бунара БВ-3.

Моделска испитивања су показала да аквифер у зони црпилишта може да обезбеди 120 l/s, а да ниво воде нема значајан пад на ширем простору - у овом случају мање од 6 m (слика 3). Ако се има у виду да је бушењем бунара БВ-3 до дубине 90 m утврђено присуство органогеног кречњака са израженим пукотинско-кавернозним типом порозности, а на мјестима и до 147 m (структурна бушења у околини Домажића), јасно је да се извођењем савршених бунара у ширем простору Домажића и Хргова може захватити вишеструко већа количина воде од количине 120 l/s добијене моделским испитивањима. Дозвољено снижење којим се остварује добар еколошки статус подземних вода је 1/3 висине заводњеног дијела водоносног слоја, што је у овом случају преко 30 m, одн. значајно више од 6 m колико је снижење нивоа воде у ширем подручју при црпљењу 120 l/s.

Као основа за 3Д нумерички модел транспорта загађења коришћени су гранични услови из претходног хидродинамичког модела рада изворишта капацитетом од 120 l/s, који је урађен за потребе прогнозе и процјене количине воде која се може црпјети из истраживаног аквифера.



Слика 3. Приказ динамичког нивоа при раду бунара на изворишту „Домажић“
Figure 3. Dynamic level display during well operation at the Domažić spring

Црпљење подземних вода некада премашује њихово истовремено обнављање а природно дренирање подземних вода у ријеке се наставља несмањено, очигледно је да практично сво црпљење у подручјима са великим црпљењем потичу из складиштења, односно вода се црпи из водоносног слоја [1]. Али у овом случају та граница није ни

приближно досегнута, па су створени услови да се допунским хидрогеолошким (и геофизичким) истраживањима ширег подручја, те извођењем нових савршених бунара омогући захватање већих количина подземне воде за водоснабдијевање насеља и превреде југозападног дијела Брчко Дистрикта Босне и Херцеговине.

4. Закључак

ДОО „ИПИН“ из Бијељине је за потребе ЈП „Комунално Брчко“ ДОО Брчко, 2024. године извео радове на физичко-хемијској ревитализацији бунара БХ-1 Домажић, у Хрговима Доњим (лит. 3). Осим тога аутори су имали прилику да учествују у реализацији допунских хидрогеолошких истраживања изворишта „Домажић“ од октобра 2015. до фебруара 2016. године. У оквиру теренских истраживања изведени су пијезометри ПД-2/1 и ПД-4, те бунар БВ-3. Такође је извршен преглед и чишћење постојећег бунара БВ-2, затим континуирано осматрање нивоа подземне воде током групног опитног црпљења и израда хидродинамичког модела аквифера са симулацијом експлоатације црпилишта и модела транспорта загађења и анализа хазарда изворишта „Домажић“. При наведеним радовима, аутори су се увјерили да постоји могућност обезбјеђења додатних количина воде за водоснабдијевање насеља и привреде овог дијела Брчко Дистрикта.

Снимањем унутрашњости бунара БХ-1 у августу 2024. утврђено је да је на дубини од 21,0 m од прирубнице (око 20,11 m од површине терена) доњи крај бунарске цијевне конструкције и дубље је незацјевљени дио бунара, односно да је бунар „open-hole“ тренутне дубине 35,5 m.

На основу физичко-хемијске анализе подземне воде из бунара БХ-1 Домажић закључујемо да вода припада хидрокарбонатној класи, калцијумској групи. Утврђене вриједности физичко-хемијских параметара воде бунара БХ-1 су у границама референтних вриједности према Правилнику.

Бунар БВ - 3 је извео „ИПИН“ д.о.о., а његов степенасти тест црпљења (Step Draw Down Test - СДДТ) обављен је са три различита капацитета, у укупном трајању 18 сати (3 x 6 сати) и осматрањем поврата нивоа (Recovery тест - РТ) у трајању од 3 сата. Максимални примијењен капацитет црпљења овог бунара при тестирању је 61 l/s, али је његов капацитет ограничен према критеријуму задовољења филтрационих стабилности по ободу бушотине на 52,28 l/s.

Моделска испитивања су показала да аквифер у зони црпилишта може да обезбеди 120 l/s, а да ниво воде нема значајан пад на ширем простору - у овом случају мање од 6 m (слика 3). Ако се има у виду да је бушењем бунара до дубине 90 m утврђено присуство органогеног кречњака са израженим пукотинско-кавернозним типом порозности, а на мјестима и до 147 m (структурна бушења у околини Домажића), јасно је да се извођењем савршених бунара у ширем простору Домажића и Хргова може захватити вишеструко већа количина воде од количине 120 l/s добијене моделским испитивањима. Дозвољено снижење којим се остварује добар еколошки статус подземних вода је 1/3 висине заводњеног дијела водоносног слоја, што је у овом случају преко 30 m, одн. значајно више од 6 m колико је снижење нивоа воде у ширем

подручју при црпљењу 120 l/s. У овом случају та граница није ни приближно досегнута, па су створени услови да се допунским хидрогеолошким (и геофизичким) истраживањима ширег подручја, те извођењем нових савршених бунара омогући захватање већих количина подземне воде за водоснабдијевање насеља и привреде југозападног дијела Брчко Дистрикта Босне и Херцеговине.

5. Литература

[1] Driscoll F. and others, *Groundwater and wells, second edition*, Johnson Screens, Minnesota, 2003.

[2] Калуђеровић Д. *Математички модели кретања подземних вода и траснспорта загађења*, Београд, 2016.

[3] Новаковић В. Николић Н. *Елаборат о категоризацији, класификацији и прорачуну резерви подземних питких вода изворишта „Домажић“ код Градачца са стањем на дан 01.03.2016. године,* ДОО ИПИН, Бијељина, 2016.

[4] Новаковић В. Николић Н, *Елаборат о проведеним радовима и добијеним резултатима физичко-хемијске ревитализације бунара БХ-1 Домажић у Хрговима Доњим*, ДОО ИПИН, Бијељина, 2024.

[5] Oruč E. *Елаборат хидрогеолошких истраживања сјеверног обода Мајевиц*, Рударски Институт, Тузла, 2000.

[6] Ваљаревић Р. и др. *Студија геолошких, геофизичких, рударских и геотермалних истраживања на подручју Брчког и за хидрогеолошка истраживања ради обезбијеђења воде за пиће* – Књига 2 водоснабдијевање: Рударско-геолошки факултет, Тузла, 1989.

Младен Попов[1] Драгана Таминџија[2]
Маријана Крагуљ Исаковски[3], Тајана Симетић[4]
Александра Тубић[5], Драган Радновић[6], Јасмина Агбаба[7]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK25133P

УТИЦАЈ ДОЗЕ ДЕЗИФИЦИЈЕНСА НА ОДАБРАНЕ ФИЗИЧКО-ХЕМИЈСКЕ И МИКРОБИОЛОШКЕ ПАРАМЕТРЕ КВАЛИТЕТА ВОДЕ

Резиме: Квалитет воде за пиће представља један од најважнијих фактора за очување јавног здравља, при чему посебну улогу има примена ефикасних метода дезинфекције. У овом раду испитиван је утицај различитих доза натријум-хипохлорита, као најчешће коришћеног дезинфекционог средства, на промену одабраних физичко-хемијских и микробиолошких параметара воде. Циљ лабораторијских испитивања био је да се утврди оптимална доза дезинфекционог средства која обезбеђује ефикасну инактивацију индикаторних микроорганизама, без негативног утицаја на остале параметре квалитета воде, попут pH вредности, електропроводљивости и садржаја резидуалног хлора. Током испитивања примене концепта C·t, посматране су промене у микробиолошком оптерећењу, као и евентуалне измене у физичко-хемијским својствима воде. Резултати су показали да постоји јасна корелација између повећања дозе дезинфицијенса и смањења броја микроорганизама, али и да веће дозе могу довести до појаве нежељених нус-продуката. Пажљива контрола дозирања дезинфекционог средства кључна је за постизање равнотеже између микробиолошке безбедности и очувања физичко-хемијских особина воде, те да се оптимизацијом процеса дезинфекције могу значајно унапредити стандарди у третману подземних вода.

Кључне речи: микроорганизми, дезифекција, третман воде за пиће, бројност микроорганизама

[1] *Јавно комунално предузеће „Водовод и канализација“ Нови Сад, Нови Сад, e-mail: mladen.popov@vikns.rs*

[2] *Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за биологију и екологију, Нови Сад, e-mail: dragana.cucak@dbe.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-8179-8285*

[3] *Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, e-mail: marijana.kragulj@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-6880-6735*

[4] *Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, e-mail: tajana.djurkic@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0923-7034*

[5] *Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, e-mail: aleksandra.tubic@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7503-7754*

[6] *Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за биологију и екологију, Нови Сад, e-mail: dragan.radnovic@dbe.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3753-1887*

[7] *Природно-математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине, Нови Сад, e-mail: jasmina.agbaba@dh.uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-9915-2885*

THE INFLUENCE OF DISINFECTANT DOSE ON SELECTED PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL PARAMETERS OF WATER QUALITY

Abstract: The quality of drinking water is one of the key factors for public health protection, with effective disinfection methods playing a crucial role. This study investigated the impact of different doses of sodium hypochlorite, one of the most commonly used disinfectants, on selected physicochemical and microbiological parameters of raw groundwater. The aim of the laboratory experiments was to determine the optimal disinfectant dose that ensures effective inactivation of indicator microorganisms, without adversely affecting other water quality parameters such as pH value, electrical conductivity, and residual chlorine content. By testing based on C·t values, changes in microbiological load were observed along with possible alterations in the physicochemical properties of the water. The results showed a clear correlation between increasing disinfectant doses and the reduction in microbial counts. However, higher doses also posed risks of generating undesirable disinfection by-products and affecting the taste and aesthetic characteristics of the water. It was concluded that careful control of disinfectant dosing is essential to achieve a balance between microbiological safety and the preservation of physicochemical water quality. Optimization of the disinfection process can significantly enhance the standards in groundwater treatment, ensuring both effective pathogen removal and compliance with drinking water quality criteria.
Key Words: microorganisms, disinfection, drinking water treatment, microorganism count

1. Увод

Обезбеђивање здравствено исправне воде за пиће представља један од приоритета у очувању јавног здравља, а дезинфекција је кључни корак у том процесу. Вода, као ресурс од суштинског значаја, неопходна је не само за основне људске потребе, већ и за бројне индустријске и пољопривредне активности. Ипак, сирове воде, без обзира на њихов извор, често садрже различите микроорганизме, међу којима су и патогене бактерије које могу угрозити здравље људи [1].

Подземне воде, захваљујући природној филтрацији кроз слојеве земљишта, уобичајено се сматрају безбеднијим у односу на површинске. Међутим, и у њима се могу наћи микроорганизми попут колиформних бактерија, спорулишућих облика, али и патогена. Поред бактерија, у подземним водама могу бити присутни и вируси, протозое и гљиве, што додатно повећава микробиолошко оптерећење.

Из тог разлога, примена дезинфекционих поступака представља неопходан корак пре употребе воде као пијаће. Најраспрострањенији метод је хлорисање, које се спроводи различитим једињењима хлора. Натријум хипохлорит има посебан значај због једноставности примене и високе ефикасности у уништавању микроорганизама. Ипак, процес хлорисања може довести и до стварања дезинфекционих нуспродуката, попут трихалометана, који, уколико се не прате и не контролишу, могу представљати дугорочан ризик по здравље [2].

Полазећи од наведеног, циљ овог рада је процена ефикасности натријум хипохлорита у уклањању одабраних бактеријских сојева из сирове подземне воде, уз одређивање оптималне дозе и потребног времена контакта за постизање најбољег дезинфекционог ефекта.

2. Материјал и методе

Испитивања су изведена на узорцима воде прикупљеним на улазу у ретензиони резервоар Фабрике воде на Сунчаном кеју у Новом Саду. Ова тачка узорковања одабрана је јер представља почетни сегмент система за третман воде и самим тим референтно место за процену полазног квалитета воде [3,4]. Узорковање је спроведено након фазе аерације, како би се добили подаци о физичко-хемијским и микробиолошким параметрима пре уласка у процесе филтрације и дезинфекције.

Физичко-хемијске анализе

Концентрација укупног хлора у раствору натријум-хипохлорита мерена је јодометријском методом, док су резидуални слободни и везани облици хлора (моно-, ди- и трихлорамин) одређивани титрацијом са феро-амонијум-сулфатом применом DPD методе. pH вредност је мерена pH метром (pH/ION 735), електропроводљивост кондуктометром (HI 933000), мутноћа турбидиметром (Turb TB 250 WL), а UV апсорбанција на 254 и 278 nm спектрофотометром UV-1800 Shimadzu. Садржај укупног и растворeног органског угљеника (TOC и DOC) одређен је на апарату Elementar LiquiTOCII, а биодеградабилни DOC израчунат је као разлика између почетне и минималне измерене вредности. Концентрације амонијака, нитрата, нитрита и ортофосфата, као и перманганатни индекс и тврдоћа воде, анализирани су према важећим стандардима [5].

Дезинфекција и праћење резидуалног хлора

Као дезинфекционо средство примењиван је раствор натријум-хипохлорита концентрације 5 mg Cl_2/ml. Тестирање је вршено у распону почетних концентрација између 0,5 и 10 mg Cl_2/l. У току експеримената пратило се присуство резидуалног слободног хлора, као и формирање комбинованих облика, применом стандардних аналитичких процедура.

Микробиолошке анализе

Бројност микроорганизама у узорцима воде одређивана је spread plate и pour plate методама. Хранљиви агар је инокулисан и инкубиран на 22°C у трајању од 72 часа и на 37°C у трајању од 48 часова. Након инкубације извршено је бројање колонија, а резултати су изражени као CFU/ml. Изоловано је и идентификован MALDI-TOF анализом 19 најчешће присутних и здравствено значајних бактеријских сојева, од којих су за даље тестове одабрани: *Enterococcus faecium 2* (умерено осетљив на дезинфекцију) и *Bacillus cereus 13* (високо отпоран, продуцент ендоспора).

Одређивање MIC и MBC

Испитивања минималне инхибиторне концентрације (MIC) и минималне бактерицидне концентрације (MBC) [6] су спроведена стандардном микродилуционом методом у микротитар плочама у два различита матрикса: Милер-Хинтон бујону, као примеру средине са високим садржајем органских материја, и у узорку воде са улаза у ретензиони резервоар, који представља средину са ниским садржајем органске материје.

Изабрани сојеви су ресуспендовани у физиолошком раствору до густине од 0,5 McFarland јединица и инокулисани у серију двоструких разређења NaOCl (900–113 mg Cl_2/l у бујону; 80–1,25 mg Cl_2/l у води) при полазној густини од 10^5 CFU/ml. Након инкубације очитане су MIC и MBC вредности.

Одређивање C·t вредности

Поред тога, за одабране изолате израчуната је C·t вредност (производ концентрације дезинфицијенса и времена контакта). Бактерије су излагане различитим концентрацијама NaOCl, а њихова инактивација праћена је у интервалима од 0, 5, 10, 20, 30, 40 и 60 минута.

3. Резултати и дискусија

Узорковање воде извршено је на улазу у ретензиони резервоар, а затим је урађена анализа одабраних физичко-хемијских параметара. Резултати су приказани у табели 1. Уочено је да квалитет узорака није у потпуности у складу са критеријумима дефинисаним Правилником о хигијенској исправности воде за пиће [7]. Забележене су нешто више концентрације амонијака, гвожђа и мангана, као и повећане вредности мутноће воде. Овакви резултати су очекивани с обзиром на то да је реч о подземној води из алувиона реке, узоркованој на самом почетку процеса третмана, одмах након фазе аерације.

Табела 1. Физичко-хемијски параметри квалитета воде узорковане након аерације, а пре пешчане ефилтрације

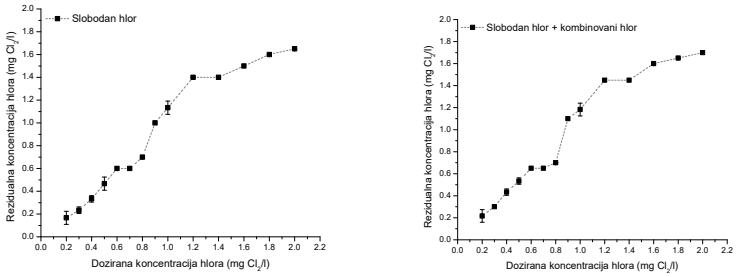
Table 1. Physico-chemical parameters of water quality sampled after aeration and before sand filtration

Параметар	Мерна јединица	Резултати анализе воде
Температура	ºC	19,65±0,16
Мутноћа*	NTU	4,15±1,34
pH	/	7,38±0,46
Електропроводљивост	µS/cm	516±13,40
Слободан хлор	mg Cl_2/l	<0,05
$УВ_{254nm}$	cm^{-1}	0,10±0,01
Оксидабилност	mg $KMnO_4$/l	5,63 ±0,40
TOC	mg C/l	1,72±0,08
DOC	mg C/l	1,38±0,38
Гвожђе*	mg/l	1,32±0,59
Манган*	mg/l	0,33±0,04
Амонијак*	mg N/l	0,45±0,11
Нитрати	mg N/l	<0,04
Нитрити	mg N/l	<0,005
Ортофосфати	mg P/l	0,14±0,03
Алкалитет	mmol/l	4,33±0,05
Тврдоћа	mg $CaCO_3$/l	243±2,0

** изнад максимално дозвољених концентрација према Правилнику о хигијенској исправности воде за пиће (Сл. лист СРЈ бр. 42/98 и 44/99 и Сл. гласник РС бр. 28/2019).*

На основу резултата може се закључити да вода садржи нешто повишене нивое појединих органских и неорганских материја, које могу утицати на ефикасност хло-

рисања. Вредности pH, алкалитета и тврдоће показују стабилне услове за хемијске реакције, док присуство амонијака и повећане количине гвожђа и мангана указују на потребу за пажљивим прилагођавањем процеса дезинфекције. Ови параметри представљају основу за одређивање оптималне дозе хлора у наставку анализе (слика 1).



а) б)

Слика 1. Графички приказ одређивања превојне тачке применом натријум-хипохлорита у води. Резидуални хлор је приказан у функцији (а) слободног хлора и (б) слободног + комбинованог хлора (хлорамини)

Figure 1. Graphical representation of breakpoint determination using sodium hypochlorite in water. Residual chlorine is shown as a function of (a) free chlorine and (b) free + combined chlorine (chloramines)

Резултати микробиолошке анализе

Микробиолошка анализа пет узорака воде узетих током јуна 2024. показала је да већина узорака задовољава критеријуме за природну воду из затворених изворишта.

Табела 2. Резултати микробиолошких анализа узорака воде на улазу у ретензиони резервоар
Табела 2. Results of microbiological analyses of water samples at the inlet of the retention reservoir

Параметар	мин-макс (просек) 5 узорака јун 2024.	МДК за затворена изворишта
Proteus врсте у 100 ml**	0	0
Pseudomonas aeruginosa у 100 ml**	0	0
Стрептококе фекалног порекла у 100 ml**	0-1	0
Фекалне колиформне бактерије у 100 ml воде **	0	0
Аеробне мезофилне бактерије на агару после инкубације од 48 часова на 37°C у 1 ml воде*	1-58	100
Аеробне хетеротрофне бактерије на агару после инкубације од 72 часова на 22°C у 1 ml воде*	7-215	-
Укупне колиформне бактерије одређене као највероватнији број у 100 ml воде (CFU) **	0	5
Сулфиторедукујуће клостридије у 100 ml воде**	0	1

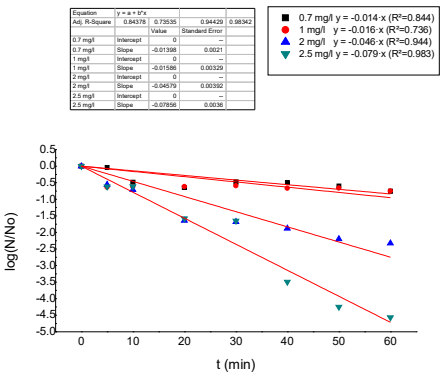
*граница детекције методе: 1 CFU/ml, **1 CFU/100ml

Један узорак од садржао је једну колонију фекалних стрептокока у 100 ml, што је изван дозвољених граница. Аеробне мезофилне бактерије (37°C) кретале су се од 1 до 58 CFU/ml, а аеробне хетеротрофне бактерије (22°C) око седам пута више, што указује на повољније услове за раст аутохтоних бактерија. Селекцијом је издвојено 19 најдоминантнијих колонија, укључујући један фекални стрептокок. Бојењем по Граму утврђено је 12 Грам-позитивних и 7 Грам-негативних изолата, од којих су неки продуковали ендоспоре. За испитивање отпорности на NaOCl одабрани су изолати 2, 5, 12 и 13. MIC и MBC вредности у Милер-Хинтон бујону кретале су се од <125 до >1000 mg Cl_2/l. Најосетљивији био је изолат 2, а најотпорнији изолати 12 и 13.

Табела 3. Минималне инхибиторне и бактерицидне концентрације натријум хипохлорита за 4 бактеријска соја изолована из воде на улазу у ретензиони резервоар
Table 3. Minimum inhibitory and bactericidal concentrations of sodium hypochlorite for 4 bacterial strains isolated from water at the inlet of the retention reservoir

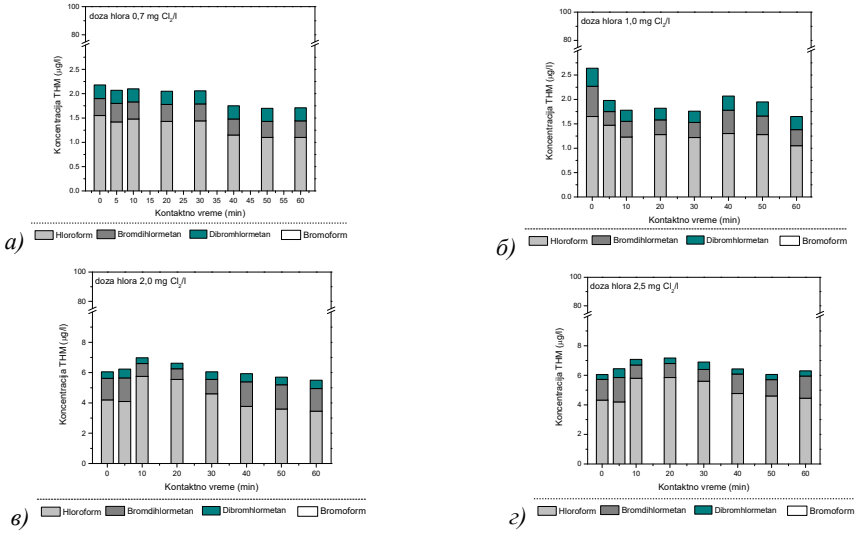
	У присуству органске материје				У води на улазу у ретензиони резервоар		
	MIC (mg Cl_2/l)	MBC (mg Cl_2/l)			MBC (mg Cl_2/l)		
	24h	10min	60min	24h	10min	60min	24h
2	<125	500	500	500	<1.25	<1.25	<1.25
5	250	500	500	500	<1.25	<1.25	<1.25
12	500	>1000	>1000	>1000	20	20	5
13	500	>1000	>1000	>1000	10	5	5

C·t анализе су изведене на изолатима *Enterococcus faecium* 2 и *Bacillus cereus* 13 као репрезентима умерено осетљивих и отпорних бактеријских група. Праћењем бројности и концентрације слободног и везаног хлора утврђено је да је за 1–2 log редукцију *Enterococcus faecium* потребно 0,6–1,2 mg Cl_2/l, док *Bacillus cereus* захтева 2,6–5,3 mg Cl_2/l. Садржај трихалометана након хлорисања варирао је од 0,89 до 71,6 µg/l.



Слика 2. Кинетика дезинфекције бактеријског изолата *Enterococcus faecium 2* применом различитих концентрација хлора
Figure 2. Disinfection kinetics of the bacterial isolate *Enterococcus faecium 2* using different chlorine concentrations

Предикција ефективних C·t вредности показује да отпорни продуценти ендоспора чине мањи део укупне микробне заједнице, па су ниже дозе хлора обично довољне за већину аеробних мезофила.



Слика 3. Садржај трихалометана у хлорисаним узорцима воде обогаћене бактеријском културом врсте *Enterococcus faecium*

Figure 3. Trihalomethane content in chlorinated water samples enriched with a bacterial culture of the species *Enterococcus faecium*

Додатно, садржај трихалометана у води након хлорисања при наведеним реакционим условима је приказан је на слици 3. На основу добијених резултата утврђено је да са повећањем почетне концентрације дезинфекционог средства и реакционог времена не долази до значајније промене садржаја трихалометана у води. Садржај трихалометана у води се кретао у опсегу од 1,7-7,08 µg/l при почетним дозама хлора од 0,7-2,5 mg Cl_2/l.

Табела 4. Предикција ефективних C·t вредности за 1- и 2-log инактивацију бактеријских изолата применом раствора натријум хипохлорита

Table 4. Predicted effective C·t values for 1- and 2-log inactivation of bacterial isolates using sodium hypochlorite solution

Инактивација микроорганизама *Enterococcus faecium 2*	*C·t (mg·min/l)*	*C (*mg Cl_2/l*)*	
		40 min	60 min
1-log	37	0,9	0,6
2-log	75	1,9	1,2
Инактивација микроорганизама *Bacillus cereus* 13	*C·t (mg·min/l)*	*C (*mg Cl_2/l*)*	
		40 min	60 min
1-log	159	4,0	2,6
2-log	317	7,9	5,3

3. Закључак

Резултати испитивања указују да је избор концентрације натријум-хипохлорита и времена контакта кључан за ефикасну дезинфекцију воде на улазу у ретензиони резервоар. Сојеви *Enterococcus faecium* 2 и *Bacillus cereus* 13 показују различиту отпорност, при чему је изолат 13 значајно резистентнији, али чини мањи део укупне микробне заједнице. Доза и време контакта који елиминишу ову групу бактерија довољни су да се контролише већина аеробних мезофила.

Практична примена показује да при времену контакта од 60 минута довољна доза за 2-log редукцију *Enterococcus faecium* 2 износи 1,2 mg Cl_2/l, док је за *Bacillus cereus* 13 потребно 5,3 mg Cl_2/l. С обзиром да су продуценти ендоспора само мањи део популације, за већину бактерија примениће се ниже концентрације. При овој дози резидуални хлор остаје прихватљив (<0,5 mg Cl_2/l), а садржај трихалометана је у дозвољеном опсегу.

Важно је напоменути да су наведене вредности добијене у лабораторијским условима и да у реалном систему могу бити потребне веће концентрације. Због тога је неопходно спровести континуирани мониторинг резидуалног хлора и бројности микроорганизама.

4. Литература

[1] Bertelkamp C. *Organic Micropollutant Removal during River Bank Filtration*, doktorska disertacija, KWR Water Research Institute, Holandija, 2015.

[2] Далмација Б., и сар. *Пречишћавање и дезинфекција воде*. Природно-математички факултет, Нови Сад, 2005.

[3] Kvalitet vode – Uzimanje uzoraka – Deo 3: Zaštita uzoraka i rukovanje uzorcima vode, SRPS EN ISO 5667-3:2017.

[4] Kvalitet vode - Uzimanje uzoraka - Deo 2: Smernice za postupke uzimanja uzoraka, SRPS ISO 5667-2:1997.

[5] APHA - AWWA - WPCF: Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, Washington, 2012.

[6] Jorgensen J. H, Ferraro M. J. Antimicrobial Susceptibility Testing: A Review of General Principles and Contemporary Practices, *Clinical Infectious Diseases* 49, 1749-1755. https://doi.org-/10.1086/647952, 2009.

[7] Правилник о хигијенској испарвности воде за пиће, *Службени лист СРЈ*, 42/98, 44/99 i 28/2019.

Мирјана Нинковић-Николић[1]
Александар Танасковић[2]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25141N

УТИЦАЈ МЕШАЊА РЕЧНЕ И ПОДЗЕМНЕ ВОДЕ НА КОРОЗИВНЕ ОСОБИНЕ И КВАЛИТЕТ ВОДЕ У ДИСТРИБУТИВНОЈ МРЕЖИ

Резиме: Корозија и таложење калцијум-карбоната ($CaCO_3$) могу настати током транспорта воде за пиће кроз цевоводе дистрибутивне мреже водоводног система, што може довести до деградације квалитета воде и техничких проблема унутар система. На процесе корозије и формирања талога утичу бројни фактори, укључујући pH вредност, температуру, алкалитет, тврдоћа, укупне растворене материје (TDS), као и концентрације јона хлорида (Cl^-), сулфата (SO_4^{2-}), карбоната (CO_3^{2-}) и бикарбоната (HCO_3^-). За предикцију појаве корозије и таложења користе се различити рачунски показатељи, као што су Ланжелиеов индекс сатурације (LSI), Ризнаров индекс стабилности (RI), Пукориусов индекс (PSI), Ларсон-Сколдов индекс (LR) и индекс агресивности воде (AI), који узимају у обзир поменуте карактеристике воде. У овом раду разматране су промене ових индекса корозивности и агресивности у зависности од степена мешања вода из два различита извора у оквиру дистрибутивне мреже, са фокусом на праћење промена квалитета воде које настају као резултат тог мешања.
Кључне речи: квалитет воде, индекси корозивности, дистрибуција

INFLUENCE OF RIVER AND GROUNDWATER MIXING ON CORROSION POTENTIAL AND DRINKING WATER QUALITY STABILITY IN DISTRIBUTION NETWORKS

Abstract: Corrosion and calcium carbonate ($CaCO_3$) scaling can occur during the transport of drinking water through the pipelines of a water distribution system, potentially leading to degradation of water quality and operational issues within the network. These processes are influenced by several factors, including pH value, temperature, alkalinity, hardness, total dissolved solids (TDS), and concentrations of chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), carbonate (CO_3^{2-}), and bicarbonate (HCO_3^-) ions. To predict the likelihood of corrosion and scaling, various empirical indices are used, such as the Langelier Saturation Index (LSI), Ryznar Stability Index (RSI), Puckorius Scaling Index (PSI), Larson-Skold Index (LR), and the Aggressiveness Index (AI), all of which rely on the physicochemical characteristics of water. This paper examines changes in corrosion and aggressiveness indices as a function of mixing ratios between two different sources of drinking water within a distribution network, with a focus on monitoring resulting changes in water quality.
Key Words: Water quality, corrosion indices, distribution

[1] *ЈКП „Београдски водовод и канализација“, Београд, mirjana.ninkovic@bvk.rs, ORCID 0009-0000- 1806-8722*
[2] *ЈКП „Београдски водовод и канализација“, Београд, aleksandar.tanaskovic@bvk.rs, ORCID 0009- 0006-1236-337X*

1. Увод

Квалитет воде за пиће на улазу у дистрибутивни систем може се разликовати од квалитета воде на славинама потрошача, услед промена у физичким, хемијским и микробиолошким параметрима. Степен дестабилизације ових параметара и њен утицај на крајњи квалитет воде зависи од више фактора, укључујући структуру и материјал цеви, старост дистрибутивног система, мешање вода из различитих извора, промене у концентрацији резидуалног дезинфекционог средства, хидрауличке поремећаје и прекиде у снабдевању водом.

Промене у квалитету воде на улазу у систем често су повезане са сезонским варијацијама, нарочито у ситуацијама које захтевају прилагођавање процеса прераде, како би се задовољили захтеви прописани Правилником о хигијенској исправности воде за пиће. Дестабилизација квалитета воде као последица мешања вода из више извора, или прекида у водоснабдевању, све је чешћа појава услед повећане потражње за водом. Проблеми са квалитетом воде најчешће су резултат унутрашњих хемијских реакција у води, као и интеракције са унутрашњим површинама цеви различитих материјала, старости и конструкције. Мешање вода може подстаћи агресивност и корозивност, што доводи до губитка стабилности квалитета воде. Нестабилност настаје када параметри као што су тврдоћа, алкалитет, температура,TDS и pH вредност нису у равнотежи. Тада долази до нежељених процеса као што су ослобађање тешких метала, ресуспензија талога, издвајање материјала са зидова цеви, повећање мутноће и боје, ослобађање микроорганизама из биофилма и промене у концентрацији резидуалног дезинфекционог средства. Као резултат, дистрибутивни систем може постати секундарни извор загађења [1].

За процену агресивности и корозивности воде развијени су бројни показатељи, међу којима се најчешће користе Langelierov индекс засићења (LSI), Ryznarov индекс (RSI), Puckoriusov индекс (PSI) и индекс агресивности (AI), који се базирају на вероватноћи формирања заштитног филма $CaCO_3$. Такође се користи и Larson-Scoldov индекс (LR), који укључује додатне параметре везане за присуство јона хлорида и сулфата [2], [3].

У овом раду анализиране су промене квалитета воде у реалном дистрибутивном систему, које су настале као последица мешања вода из различитих изворишта и поремећаја у водоснабдевању, кроз праћење вредности индекса корозивности и агресивности. Губитак стабилности квалитета воде идентификован је на основу притужби корисника, које су се односиле на замућење, непријатан мирис и укус воде.

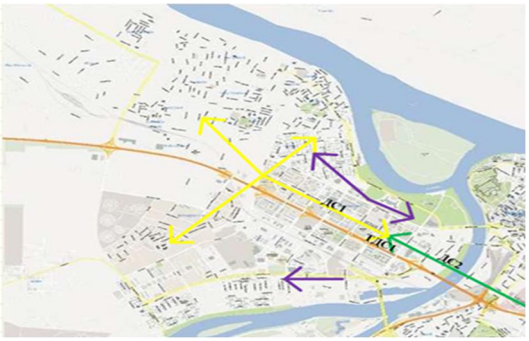
2. Материјал и методе

2.1. Област проучавања

Дистрибутивни систем ДС1 користи за снабдевање водом чист прерађени обалски филтрат речне воде. Током летњег периода, када долази до повећане потребе за водом, ДС1 се допуњава водом из дистрибутивног система ДС2, чији је извор прерађена мешана речна вода и обалски филтрат речне воде у односу 2:1. Обалски филтрати речне воде из оба извора снабдевања прерађују се конвенционалним поступком, уз

завршну дезинфекцију гасним хлором. Речна вода из ДС2 пречишћава се унапређеним поступком прераде површинске воде, такође уз завршну дезинфекцију гасним хлором. Током ситуација као што су повећане потребе за водом у летњим месецима, ДС1 се додатно снабдева водом из ДС2. На месту спајања ДС1 и ДС2, ТДС1, не спроводи се додатни третман воде. Област снабдевања обухвата површину од 482 km² са приближно 435.000 становника [4].

Област снабдевања водом приказана је на слици 1.



Слика 1. Област снабдевања водом (ДС1→, ДС2→,зона мешања→)
Figure 1. Water supply area (DS1→, DS2→,mixing zone→)

2.2. Параметри квалитета воде

Таложење у цевима настаје када се двовалентни јони метала, попут калцијума (Ca^{2+}) и магнезијума (Mg^{2+}), комбинују са другим јонима растворeним у води и таложе на унутрашњим зидовима цеви. Главни облици наслага укључују $CaSO_4$, $MgCO_3$, $CaCO_3$ и $MgCl_2$. Брзина таложења расте са порастом температуре и концентрације соли у води. Вода са већим садржајем јона Ca^{2+} і Mg^{2+} (тзв. „тврда вода“) мање је склона корозији, јер формира заштитни слој на унутрашњим површинама цеви. Приказ просечног квалитета воде за пиће из ДС1 и ДС2, као и на месту њиховог сусрета, дат је у табели 1.

Табела 1. Просечни параметри квалитета воде за ДС1 и ДС2 потребни за дефинисање индекса корозије и агресивности воде
Table1. Average water quality parameters for DS1 and DS2 required to define the corrosion index and water aggressiveness

Параметри	ДС1	ДС2	ТДС1
Температура	17,6	21,1	22,8
pH вредност	7,8	7,5	7,7
Укупна тврдоћа, °dH	16,7	12,7	13,0
Суви остатак на 105 °C, mg/L	380	300	309
Хлориди, mg/L	32,2	28,8	29,8
Сулфати, mg/L	29,8	31,4	31,8
Бикарбонати, mg/l	314,2	217,6	219,8
Алкалитет, mE/L	5,2	3,6	3,6
Калцијум, mg/l	80,1	70,1	70,6

2.3. Индекси корозивности и агресивности

Индекси корозивности и агресивности служе као индикатори корозивних карактеристика воде. Langelierov индекс сатурације (LSI), Ryznarov индекс (RSI) и Puckoriuson индекс (PSI) показују да ли постоје услови за таложење $CaCO_3$ за оцену корозивности. Користе се као показатељи стабилности воде, будући да је утврђено да филм калцијум-карбоната смањује развој корозије Индекс агресивности (AI) показује потенцијал воде да оштети структуру азбестно-цементних цеви. Larson-Scoldov индекс (LR) показује агресивност воде према ниско-угљеничном челику и ливеном гвожђу [5]. Вредности распона за све поменуте индексе приказани су у табели 2.

Табела 2. Вредности индекса LSI, RSI, PSI, AI и LR
Table 2. LSI, RSI, PSI, AI and LR index values

Индекс	Границе	Активност воде
Langelierov индекс сатурације (LSI)	LSI<0 LSI=0 LSI>0	Вода није засићена са $CaCO_3$ и може бити корозивна. Вода је у равнотежи Вода је засићена са $CaCO_3$ и може се очекивати формирање филма
Ryznarov индекс сатурације (RSI)	RSI<5 5<RSI<7 RSI>7	Изражено формирање филма $CaCO_3$. Формирање наслага $CaCO_3$ Вода није засићена са $CaCO_3$ и може бити корозивна.
Puckoriusov индекс сатурације (PSI)	PSI<4,5 4,5<PSI<6,5 PSI>6.5	Изражено формирање филма $CaCO_3$. Формирање наслага $CaCO_3$ Вода није засићена са $CaCO_3$ и може бити корозивна.
Индекс агресивности воде (AI)	AI<10 10<AI<12 AI>12	Вода је веома агресивна. Вода је умерено агресивна Вода није агресивна.
Larson-Scoldov индекс (LR)	LR<0.2 0,2<LR<0,6 LR>0,6	Јони Cl^- и SO_4^{2-} не утичу на корозију. Може се очекивати појачана корозија. Очекује се значајна корозија.

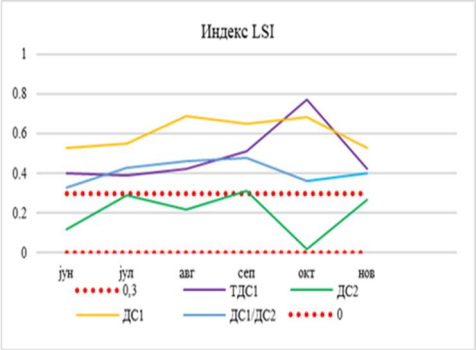
2.4. Идентификација поремећаја квалитета воде

Снабдевачи водом за пиће могу открити губитак стабилности квалитета воде на основу примедби корисника, које се најчешће односе на замућење воде, непријатан мирис, укус и сличне промене. Чињеница да вода на уласку у дистрибутивни систем испуњава критеријуме квалитета прописане Правилником о хигијенској исправности воде за пиће не гарантује да ће ти критеријуми бити задржани дуж целог тока до крајњих корисника, посебно у погледу стабилности квалитета. Корисници услуга, распоређени широм дистрибутивног система, представљају значајан ресурс за праћење квалитета воде и рану детекцију поремећаја. Локализација и утврђивање порекла поремећаја стабилности воде (нпр. дестабилизација биофилма, губитак резидуалног дезинфекционог средства, корозија), изазваних променама параметара као што су температура, pH вредност и бројност микроорганизама, дефинише стратегију за откривање и отклањање проблема.

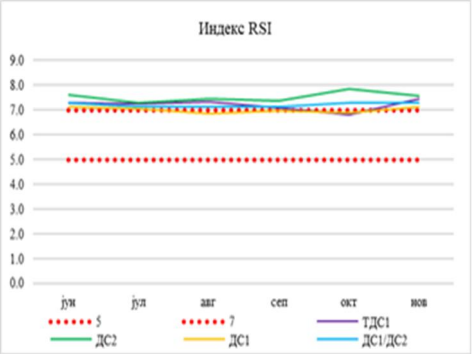
3. Резултати и дискусија

У постојећи дистрибутивни систем ДС1 уведен је нови извор снабдевања водом из дистрибутивног система ДС2, услед повећане потребе за водом изазване сезонским варијацијама температуре. Мешањем вода из различитих система регистрована је појава проблема са квалитетом воде, пре свега у виду замућења, узрокованог подстицањем агресивности и корозивности воде. Постојећи дистрибутивни системи ДС1 и ДС2 користе већ више деценија исте изворе снабдевања и цевне материјале различитих карактеристика, који су дуже време у експлоатацији. Током тог периода, у складу са старошћу система, дошло је до уобичајеног формирања наслага и биофилмова на унутрашњим зидовима цеви. Током шестомесечног периода испитивани су индекси корозивности и агресивности воде на улазима у ДС1 и ДС2, као и на месту сусрета два извора, на контролном месту ТДС1. Такође, спроведена су испитивања и на моделу мешања вода из ДС1 и ДС2 у односу 1:1.

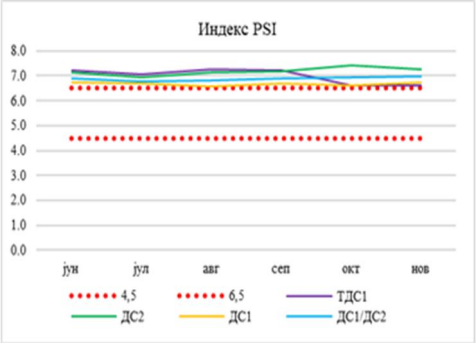
Резултати испитивања приказани су на сликама 2-6.



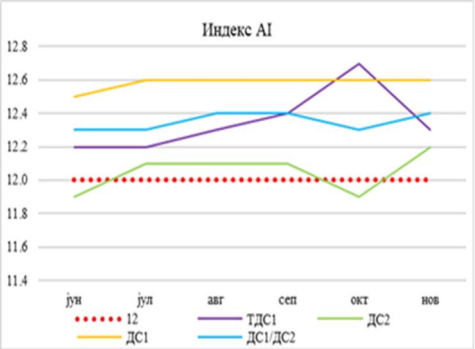
Слика 2. Langelierov индекс сатурације
Figure 2. Langelierov saturation index



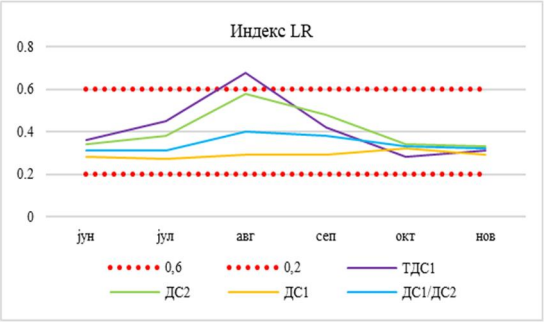
Слика 3. Ryznarov индекс сатурације
Figure 3. Ryznar saturation index



Слика 4. Puckoriusov индекс
Figure 4. Puckorius index



Слика 5. Индекс agresivnosti vode
Figure 5. Aggressive index



Слика 6. Larson-Scoldov индекс корозивности
Figure 6. Larson-Scold index

Добијене су следеће вредности индекса корозивности и агресивности воде:

Табела 3. Индекси корозивности и агресивности воде за ДС1, ДС2, ТДС1 и ДС1/ДС2
Table 3. Indices of water corrosivity and aggressiveness of DS1, DS2, TDS1 i DS1/DS2

	LSI	RSI	PSI	AI	LR
ДС1	0,5-0,7	6,8-7,1	6,6-6,8	12,6	0,3
ДС2	0,0-0,3	7,3-7,8	7,0-7,4	11,9-12,2, 0,3-0,6	
ТДС1	0,4-0,8	6,8-7,4	6,6-7,3	12,2-12,7, 0,3-0,7	
ДС1/ДС2 (1:1)	0,3-0,5	7,1-7,3	6,8-7,0	12,3-12,4, 0,3-0,4	

На основу добијених вредности може се констатовати да је вода из ДС1 на граници агресивности и корозивности, да поседује потенцијал за таложење $CaCO_3$, и да је неутрална према цементним цевима. Дистрибутивни систем ДС1 додатно се снабдева водом из ДС2, која је током целог периода праћења показивала умерену до изражену агресивност према челичним и ливено-гвозденим цевима, док је према азбест-цементним цевима била неутрална. ДС2 користи као извор мешавину прерађене речне воде и прерађеног обалског филтрата речне воде, у односу 2:1. Додатно снабдевање ДС1 водом из ДС2 одвија се у зони мешања најближој месту прикључења на ТДС1, где је утицај најизраженији. Са повећањем потреба за водом из ДС2, зона мешања шири се и на области које раније нису биле под њеним утицајем. Оваква расподела довела је до нарушавања физичке, хемијске и биолошке стабилности воде за пиће, што је као крајњи резултат изазвало пораст примедби корисника на квалитет воде.

Пораст примедби корисника услуга регистрован је од августа, а највећи број примедби забележен је у септембру, када је утицај мешања са водом из система ДС2 био најизраженији. Највећи број примедби пристигао је из области која се највећим делом ослања на ливено-гвоздену дистрибутивну мрежу. Материјал цеви, чија је унутрашња заштита током вишедеценијске експлоатације делимично пропао, под утицајем агресивне и корозивне воде долази у директан контакт са водом за пиће, што

нарушава њену стабилност [6]. Хидраулички скокови у потрошњи довели су до повећања брзине воде у мрежи, што је изазвало одвајање биофилма са унутрашњих зидова цеви и ресуспензију наталожених материја. Као последица, дошло је до ослобађања метала и појаве боје и замућености на славинама корисника. Снабдевач водом за пиће је на уочене поремећаје реаговао испирањем угроженог подручја до постизања задовољавајућег квалитета воде.

На слици 7 приказан је број примљених примедби на квалитет воде у посматраној области.

Слика 7. Примљене примедбе потрошача на квалитет воде из испитиване области
Figure 7. Received water quality complaints from observed area

4. Закључак

Резултати истраживања показују да мешање вода из различитих извора у дистрибутивном систему може значајно утицати на дестабилизацију физичко-хемијских и микробиолошких карактеристика воде за пиће. Посебно је примећено да вода из ДС2, иако хигијенски исправна на улазу у систем, због своје израженије агресивности и корозивности, негативно утиче на стабилност воде у зони мешања са водом из ДС1.Током периода испитивања забележен је пораст примедби корисника на квалитет воде, пре свега у вези са замућењем, непријатним мирисом и укусом, посебно у областима које користе ливено-гвоздене цеви са ослабљеном унутрашњом заштитом. Ове појаве повезане су са хидрауличким поремећајима, ресуспензијом талога и дестабилизацијом биофилма, што је довело до ослобађања метала и других загађујућих материја. Праћењем вредности индекса корозивности и агресивности (LSI, RSI, PSI, AI и LR) утврђено је да је вода из ДС1 стабилнија у поређењу са водом из ДС2. Мешање вода довело је до повећања потенцијала за корозију и нарушавање стабилности, нарочито у зони спајања система.

Да би се смањио ризик од нарушавања квалитета воде и повећала стабилност дистрибутивног система, препоручује се повећање учешћа стабилнијих извора, као што је прерађени обалски филтрат речне воде (ДС1), оптимизација управљања мешањем вода у систему, континуирано праћење индекса корозивности и агреси-вности, одржавање хидрауличке стабилности и контроле времена задржавања воде у мрежи, правовремено испирање мреже у угроженим зонама. Одржавање равнотеже квалитета

воде и минимизација негативног утицаја мешања различитих вода од великог су значаја за дугорочну заштиту инфраструктуре, стабилност квалитета воде и задовољство корисника.

5. Литература

[1] Anshar A. M, Musa B, Ayaz M, Kasim S, Raya I, Ramirez-Coronel A. A, Chowdhury Sh., Zabibah R., Romero-Parra R., Barboza-Arenas L. A., Mustafa Y. F., Al-Khafaji D. A Critical Review on Corrosion and Fouling of Water in Water Distribution Networks and Their Control *Acta Chim.Slov*. 70, 173-183, 2023.

[2] Nedeljković A, Rajaković-Ognjanović V, Branisavljević N. Procena korozivnih karakteristika vode prema indeksima agresivnosti-primer bunarskog polja u Vojvodini. *Vodoprivreda* 48, 211-219, 2016.

[3] Kumar S, Singh R, Maurya N. S. Assessment of Corrosion Potential Based on Water Quality Index in the Distribution Network of Urban Patna, Bihar, India. *Nature Environment and Pollution Technology* 21, 2117-2127, 2022.

[4] Tanasković A, Ninković-Nikolić M. Uticaj mešanja vode iz različitih izvora snabdevanja na oblikovanje buduće strategije upravljanja kvalitetom vode u distributivnom sistemu. *Voda i sanitarna tehnika 1*, 2022.

[5] Chang-geng Li, Cheng Liu, Wen-hui Xu, Ming-gang Shan, Hai-xia Wu, Ming-gang Shan, Hai-xia Wu. Formation mechanism and supervisory predicion of scaling in water supply pipelines: A review. *Water Research* 222, 118922, 2022.

[6] Tanasković A, Ninković-Nikolić M. Primedbe korisnika usluga kao indikator gubitka integriteta distributivnog sistema za vodosnabdevanje. *Voda i sanitarna tehnika 3*, 2022.

Aleksandra Porjazoska Kujundziski[1]
Dragica Chamovska[2, 3]

Professional paper
DOI: 10.5937/VIK25149P

PREVENTING PIPELINE SCALE IN THERMOMINERAL WATER SYSTEMS

Abstract: Systems exposed to thermomineral water are prone to the formation of solid calcium carbonate, which induces significant challenges, including reduced efficiency, increased energy consumption, and high removal costs. The thermomineral spring water of Katlanovo spa shows high carbonate hardness and calcium content, leading to scale formation. As a solution to this problem, our study proposes water treatment with CO_2 gas. Calcium carbonate precipitation is prevented by increasing the partial pressure of CO_2 in the system, due to the decreased pH of water and increased calcium solubility.
Key Words: Thermomineral water, sodid deposits, calcium carbonate, CO_2 treatment

PREVENCIJA STVARANJA KARBONATNIH DEPOZITA U CEVOVODIMA TERMOMINERALNIH VODNIH SISTEMA

Rezime: Sistemi izloženi termomineralnoj vodi podložni su formiranju čvrstog kalcijum karbonata, što izaziva poteškoće, uključujući smanjenu efikasnost, povećanu potrošnju energije i visoke troškove njihovog uklanjanja. Termomineralna voda banje Katlanovo pokazuje visoku tvrdoću i sadržaj kalcijuma, što dovodi do formiranja karbonatnih depozita. Kao rešenje ovog problema, naše istraživanje predlaže korišćenje CO_2 gasa za tretman vode. Porastom parcijalnog pritiska CO_2 gasa u sistemu, sprečava se precipitacija kalcijum karbonata, zahvaljujući smanjenju pH vrednosti vode i povećanoj rastvorljivosti kalcijuma.
Ključne reči: termomineralne vode, cvrsti depositi, kalcijum karbonat, CO_2 tretman

1. Introduction

The scaling process in natural and industrial waters is commonly associated with the formation of undesired solid precipitates, composed mainly of calcium carbonate ($CaCO_3$). These deposits usually form on solid surfaces that come into contact with carbonate-rich media. This occurrence introduces significant problems in both households and industrial settings, and is related to efficiency and the life span of equipment [1].

[1] *Faculty of Engineering, International Balkan University, Skopje, R. North Macedonia, aporjazoska@ibu.edu.mk, ORCID0000-0001-8177-3328*
[2] *Faculty of Technology and Metallurgy, „Ss. Cyril and Methodius“ University in Skopje, R. North Macedonia*
[3] *Research Center for Environment and Materials, Macedonian Academy of Sciences and Arts, Skopje, R. North Macedonia, dragica@tmf.ukim.edu.mk, ORCID: 0000-0002-4382-6633*

Precipitation of calcium carbonate occurs when the solution reaches the oversaturation with calcium (Ca^{2+}) and carbonate (CO_3^{2-}) ions [2]. Factors, including temperature, media acidity/alkalinity, partial pressure of carbon dioxide (CO_2) dissolved in the solution, and a variety of ions in the solution, affect the concentration of saturation of the ions mentioned above, and thus, the carbonate precipitation, too [3]. The formation of carbonate crystals in the system is facilitated at higher temperatures, due to the lower solubility of calcium carbonate in water. Similar to the effect of a temperature, higher alkalinity also promotes easier sediment formation. Reduction of the partial pressure of CO_2 in the system shifts the chemical equilibrium toward the formation of carbonate sediments [3].

Precipitates of $CaCO_3$ exist in several polymorphic crystalline forms. The most thermodynamically stable and the most abundant structure of calcium carbonate is the crystalline form of calcite. The metastable equivalents belong to the minerals aragonite and vaterite [2, 3].

In addition to pure calcium carbonate deposits, water containing different compounds can form scales composed of a mixture of varying carbonate compounds. Such deposits exhibit different morphology and hardness of films, but they also show variant solubility and ease of removal [4].

Solid calcium carbonate precipitated in industrial systems, such as heat exchangers, pipes, boilers, or cooling equipment, leads to several challenges, including reduced process efficiency, increased energy consumption, equipment failure, and other operational challenges [5]. Therefore, strategies that many industries implement to prevent or manage scaling include „water softening“, pH adjustment, or the use of scale inhibitors [4, 5].

As a continuation of our previous study [6] dealing with the affinity of water in Katlanovo Spa to create deposits of calcium carbonate, this work focuses on the potential of water treatment with CO_2 gas as a promising technique to address this issue.

2. Materials and methods

This study, as the previous one [6], covers the thermo-mineral water from Katlanovo Spa. Table 1 [6] presents the chemical composition of water, determined by the Institute for Public Health of the Republic of North Macedonia.

Tabela 1. Hemijski sastav termomineralne vode izvorske i sabirni bazen;
Institut za javno zdravlje Republike Severne Makedonije [6]
Table 1. Chemical composition of thermo-mineral water from spring and collecting pool; analyses done by the Institute for Public Health of the Republic of North Macedonia [6]

Location	Spring	Collecting pool
pH	7.27	7.88
Dry residue (mg L^{-1})	1980	1650
El. Conductivity (293 K, μScm^{-1})	2307	1663
Suspended particles (mg L^{-1})	38	37
Chlorides, Cl^- (mg L^{-1})	165	162
Sulphates, SO_4^- (mg L^{-1})	56	55
Fluoride, F^- (mg L^{-1})	2.6	2.5

Location	Spring	Collecting pool
Calcium, Ca^{2+} (mg L^{-1})	359	172
Magnesium, Mg^{2+} (mg L^{-1})	99	114
Silicon dioxide, SiO_2 (mg L^{-1})	750	732
Total water hardness, °dH	74.60	51.8
Carbonate hardness of water, °dH	73.10	49.7
Potassium, K^+ (mg L^{-1})	158	165
Sodium, Na^+ (mg L^{-1})	99.9	91.3
M-alkalinity (ml L^{-1}; 0.1M HCl)	261	177
Bicarbonates, HCO_3^- (mg L^{-1})	1588	1080
Free CO_2 (mg L^{-1})	144	/

Yet, in accordance with the rulebook for the quality of natural mineral waters, Official Gazette of R. Macedonia number 183/2018, this Table does not include the concentration of ions present in the minimal amounts.

3. Results and discussion

The thermo-mineral water, used for the treatment of patients in Katlanovo spa, is located about one kilometre from the spa, at a depth of around eighty meters. At the same time, spring capacity ranges between 4 and 4.6 L s^{-1}. The thermal water from the spring to the spa is transported by gravity through a pipeline with a length of about 840 m to a receiving pool in front of the spa and later to the spa facilities (pools, bathtubs, etc.).

Since its inception, Katlanovo spa has encountered a recurring issue with the accumulation of solid deposits on the surfaces of pipelines, pools, etc., which in previous years has been addressed via mechanical removal. The problem with the solid deposits is mainly attributed to the chemical composition of the water (high carbonate hardness, i.e. high calcium content, high alkalinity, etc.), Table 1 [6].

The total amount of calcium carbonate deposits on the walls of the transport pipeline and the spa facilities is more than 82 tons/year. Thus, in addition to the high operational costs of the frequent removal of solid deposits, the costs related to the frequent interruptions in the spa's operation also incur substantial expenses.

In accordance with the equation of qualitative determination of the tendency of water to accumulate carbonate deposits [6], the saturation index (SI) must be lower, and/or equal to 0, for the prevention of precipitation. This means that to prevent carbonate precipitation, it is necessary to either significantly reduce the calcium concentration in the water and its total alkalinity, or to reduce the pH value of the water. Such a conclusion is based on the understanding that smaller values of SI indicate a lower risk of precipitation and underscores the need for a particular chemical treatment.

The standard chemical procedures (using complexing salts, ion exchangers, etc.) are inapplicable in this case, due to the introduction of undesirable, often toxic chemical substances, the change in the water composition used in patients' treatment, as well as the lack of economic reasonableness.

Therefore, the authors firmly believe that one of the acceptable procedures to decrease carbonates (mainly calcium carbonate) from these waters is their treatment with CO_2. This

method would significantly reduce the pH value and, at the same time, drastically increase the solubility of calcium in the water. In this way, the high concentrations of calcium (about 360 mg L^{-1}) in the spring water would remain in the water until they are discharged from the pools.

The basic reactions responsible for the prevention of carbonate deposits from forming in the $CaCO_3$ – H_2O – CO_2 system are as follows [3]:

$$CaCO_3 \Leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$$

$$CO_3^{2-} + H_2O \Leftrightarrow HCO_3^- + OH^-$$

$$HCO_3^- + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3 + OH^-$$

$$H_2CO_3 \Leftrightarrow CO_{2(g)} + H_2O$$

Accordingly, the system under consideration will contain the following ions (molecules): Ca^{2+}, CO_3^{2-}, HCO_3^-, H_2CO_3, CO_3, H^+, OH^-.

The calculated ion concentrations in the $CaCO_3$ – H_2O – CO_2 system are given in Table 2. A temperature of 50 °C was chosen because it is close to the temperature of the spring water, which is 54 °C, and the temperature of the water in the transport pipeline ranges between 54 and 49 °C.

Табела 2. Израчунате концентрације јона у систему $CaCO_3$ – H_2O – CO_2 на 50 °C
Table 2. Calculated concentrations of ions in the $CaCO_3$ – H_2O – CO_2 system at 50 °C

	P_{CO_2} / atm						
C / mol · L^{-1}	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$	0.167	0.3	0.6	1.2
$[HCO_3^-]$	$8.6 \cdot 10^{-4}$	$1.83 \cdot 10^{-4}$	$5.54 \cdot 10^{-3}$	$7.08 \cdot 10^{-3}$	$8.60 \cdot 10^{-3}$	$1.09 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$
$[CO_3^{2-}]$	$2.69 \cdot 10^{-5}$	$1.25 \cdot 10^{-5}$	$4.17 \cdot 10^{-6}$	$3.27 \cdot 10^{-6}$	$2.69 \cdot 10^{-6}$	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$1.69 \cdot 10^{-6}$
$[Ca^{2+}]$	$4.30 \cdot 10^{-4}$	$9.29 \cdot 10^{-4}$	$2.77 \cdot 10^{-3}$	$3.54 \cdot 10^{-3}$	$4.30 \cdot 10^{-3}$	$5.42 \cdot 10^{-3}$	$6.84 \cdot 10^{-3}$
$[OH^-]$	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.73 \cdot 10^{-7}$	$1.66 \cdot 10^{-7}$	$1.13 \cdot 10^{-7}$	$7.14 \cdot 10^{-8}$	$4.51 \cdot 10^{-8}$
pH	8.315	7.65	6.70	6.48	6.315	6.114	5.914

It is evident that the increase in the partial pressure of CO_2 (from that in atmospheric air, $3 \cdot 10^{-4}$ atm) significantly affects the concentration of ions in the water (the calcium carbonate-bicarbonate balance) as well as its pH value.

At the higher values of P_{CO_2}, the concentration of bicarbonates increases significantly, and the concentration of carbonates decreases, resulting in a drastic growth in the concentration of calcium in the water (from about 17 mg/L in atmospheric conditions, at $P_{CO_2} = 3 \cdot 10^{-4}$ atm to about 275 mg L^{-1} for $P_{CO_2} = 1.2$ atm, at 50°C). On the other hand, the pH value of the water decreases to about 6, which also suggests a reduced tendency for the formation of calcium carbonate deposits.

According to previously calculated values of the saturation index from 0.9 to 1.35 in the temperature range from 40 to 50 °C, it was shown [6] that the examined thermomineral water displays a pronounced tendency for precipitation, mainly calcium carbonate solid deposits on the inner walls of the pipelines and collection pools. This result was also confirmed under

water usage conditions, when a drastic drop in the concentration of dissolved calcium in the water occurs (from 360 mg L^{-1} in the spring water to 172 mg L^{-1} in the receiving pool), as well as an increase in the pH value of the water from 6.4 to 7.43.

It follows that the CO_2 content in the spring thermomineral water (145 mg L^{-1} and P_{CO_2} = 0.17 atm) does not provide conditions for preventing the process of calcium carbonate precipitation from waters containing 360 mg (Ca^{2+}) L^{-1}, such as that of our concern.

This result implies that due to insufficient confinement of the system (transport pipeline with a length of 840 m), there is practically complete desorption of the CO_2 present in the water, i.e. the establishment of equilibrium with CO_2 in the atmospheric air, which leads to the conclusion that the pH value for a given water (chemical composition) mainly depends on the amount of adsorbed CO_2 (P_{CO_2}).

For example, spring water at 27°C with pH = 6.4 and C_{CO_2} = 145 mg L^{-1} after 24 hours of contact with atmospheric air reaches a pH value of around 7.6. On the other hand, spring water with a pH of 6.4, after intensive treatment with CO_2, reaches a pH of 5.9, and in contact with atmospheric air for a period of 24 hours, it achieves a pH of 6.2.

A contact of the spring water with CO_2 having a partial pressure of at least 0.5 atm is needed to ensure a minimal concentration of CO_2 of 370 mg L^{-1} in the thermal mineral spring water at 50 °C. This approach would provide a concentration of CO_2 in the water greater than 400 mg L^{-1}. To implement the above procedure, one should install a carbonation column with intense control of the parameters such as temperature, pH, flow of the incoming and outgoing spring water, as well as the flow of CO_2 gas for carbonation of the spring water.

4. Conclusions

Katlanovo spa has faced a persistent problem with the scaling of solid deposits in pipelines, pools, and other surfaces, which in the past was managed primarily through mechanical cleaning methods. Regular removal of solid deposits requires frequent interruptions in the spa's operation and incurs additional expenses.

As a solution to this problem, our research proposes a chemical method of using CO_2 gas for water treatment. The CO_2 significantly reduces crystallisation of carbonate deposits on contact surfaces, keeping them as fine suspended particles from the source until they are discharged from pools.

5. Literature

[1] Dietzel M, Boch R, Precipitation of $CaCO_3$ in natural and man-made aquatic environments - Mechanisms, analogues, and proxies. *Geochemistry*, *84*(4), 126206, https://doi.org/10.1016-/j.chemer.2024.126206, 2024.

[2] González-López J, Fernández-González Á, Jiménez A Precipitation behaviour in the system Ca^{2+}-C^{o2+}-CO_3^{2-}-H_2O at ambient conditions — Amorphous phases and $CaCO_3$ polymorphs, *Chemical Geology*, *482*, 91-100, https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.003, 2018.

[3] Hamdi, R., & Tlili, M. M. Calcium Carbonate Formation in Groundwater-Supplied Drinking Water Systems: Role of CO_2 Degassing Rate and Scaling Indices Applicability. *Water*, *16*(15), 2159. https://doi.org/10.3390/w16152159, 2024.

[4] Moya S. M, Botella N. B. Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism. *Water*, *13*, 2365. https://doi.org/10.3390/w13172365, 2021.

[5] Alimi, F. Influence of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation: A Critical Review. *Magnetochemistry*, 10(11), 83. https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10110083, 2024

[6] Porjazoska Kujundziski A, Chamovska D. (2024, October 08-11). Qualitative determination of the solid calcium carbonate deposition tendency from natural waters [Paper presentation] *45. Međunarodna konferencija „Vodovod i kanalizacija '24“,* Brzece, Kopaonik, R. Serbia. https://doi.org/10.5937/VIK24321K, 2024.

Olivera Doklestić[1]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25155D

MODEL FUNKCIONISANJA I OPERACIONALIZACIJE VODOVODNIH SISTEMA U USLOVIMA SMANJENOG DOTOKA ZA SISTEME U TURISTIČKOJ REGIJI

Rezime: Rad se bavi vodovodnim sistemima snabdijevanja u primorskom regionu, koji je turistička sredina, a gdje su značajne promjene u parametrima funkcionisanja vodovodnog sistema u zimskom i ljetnjem periodu. Date su analize gubitaka vode, odnosno neprihodovane vode, kao razlika proizvedene i prodate vode, u periodu 2015-2022, i ključni IP za neprihodovanu vodu, kvartalno, kao pokazatelji efikasnosti funkcionisanja sistema. Smanjenje neprihodovane vode primjenom povećanog stepena operativnosti na mreži za otklanjanje kvarova, odredilo je kurs smanjenja gubitaka za naredni period u cilju dovođenja do nivoa da se ne odražavaju na efikasnost, tj. funkcionalnost cijelog sistema. U poglavlju 3. dat je opšti model monitoringa za upravljanje vodovodnim sistemima u regiji, sa akcentom na vanrednim stanjima usljed nedovoljnog dotoka vode.
Ključne reči: neprihodovana voda, smanjenje gubitaka, turizam, model

MODEL OF FUNCTIONNING AND OPERATIONALIZATION OF THE WATER SUPPLY SYSTEM IN CONDITIONS OF REDUCED FLOW FOR SYSTEMS IN THE TOURISTIC REGION

Abstract: The paper deals with the water supply systems in the Coastal region, which is a tourist area, and where there are significant changes in the functioning parameters of the water supply system in winter and summer. Analyzes of water losses, i.e. non-revenue water, as the difference between produced and sold water, in the period 2015-2022, and key IP for non-revenue water, quarterly, as indicators of system functioning efficiency, are given. The reduction of non-revenue water by applying an increased level of operation on the network to eliminate faults, determined the course of reducing losses for the next period in order to bring them to a level where they do not reflect on efficiency, i.e. functionality of the entire system. In chapter 3, a general monitoring model for the management of water supply systems in the region is given, with an emphasis on emergency situations due to insufficient water supply.
Key Words: Up to 5 (five) words, separated by comma

1. Uvodne napomene

Tretiranje vodnih resursa i upravljanje njima u primorskom regionu, gdje je turizam osnovna privredna grana, moralo bi već da ima sasvim drugačiji pristup od sadašnjeg. To znači

[1] *Ekoboka projekt doo, Herceg Novi, Crna Gora, ekoboka.rp@gmail.com, ORCID:0009-0000-5857-0602*

da se pitanju vode u sistemu prilazi samo kao kvatitativnoj, obnovljivoj kategoriji, koja proizvodi finansijsku dobit i od koje zavisi privredni razvoj, turizam, a zanemaruje se činjenica vremenske ograničenosti iscrpjivanja, kao posljedica globalne svjetske vodne krize.

Turistička privreda, kao oblik industrije koja neprekidno iscrpljuje prirodne resurse, prostor i pitku vodu, najznačajniji je ekonomski činilac cijele primorske regije Crne Gore. Tendencija jačanja turističke privrede, u kvantitativnom i kvalitativnom smislu, ogleda se prvo u porastu broja turista, povećanju specifične dnevne potrošnje vode i u kumulativnom sezonskom povećanju potrošene količine. S druge strane, klimatske prilike u lokalnom području, kao dio globalnih klimatskih promjena, manifestuju se porastom temperatura vazduha i smanjenjem visine godišnjih padavina.

Porast temperature nužno je povezan sa povećanjem potrošnje vode za piće, higijenske potrebe i za zalivanje zelenih površina, dok se smanjuju raspoložive količine iz vodnih resursa. Racionalno korišćenje vode iz vodovodnog sistema i razrađeno operativno upravljanje tokom cijele godine sve više dobija na značaju. Nadopunjavanje lokalnih sistema na primorju Crne Gore vodom iz sistema Regionalnog vodovoda „Crnogorsko primorje“, tokom ljeta je izuzetno važno i bez njega je nezamislivo uredno funkcionisanje snabdijevanja. Po izvještaju RVCG, 10 avgusta 2025[2]. zabilježena je rekordna isporuka vode iz sistema od 976 l/s ili 25% više nego u 2024, kada je to bilo 774 l/s, ili za 55% više nego u 2023, kada je isporučeno 669 l/s. Distrubucija vode u špicu ljetnje sezone 2025 je bila: za Ulcinj 65 l/s, Budvu 320 l/s, za Kotor 182 l/s i Tivat 152 l/s. Herceg Novi ne dobija vodu iz sistema RVCG jer ima dovoljne količine iz svojih resursa. No, za sve njih, i regionalni i pojedinačne lokalne sisteme, i dalje je važna samo jednosmjerna količina vode, sa latentnim strahom od incidentnih slučajeva pri kojima se neće moći isporučiti dovoljna količina potrošačima. Pri tome se misli na risorte i velike hotelske aglomeracije.

Za slučajeve vanrednog umanjenja dotoka vode u sistem potrebno je imati operativni plan ili agendu reagovanja, sa organizacijom upravljanja sistemom. Važan dio agende je prepoznavanje pojma hazarda, odnosno, bezbjedonosne funkcije vodovodnog sistema koja je zasnovana na teoriji efikasnosti rada. Sve veća izgradnja objekata stanovanja i velikih hotelskih kompleksa podiže potrebe u potrošnji u mjeri da se ne nazire granica potrebnih gornjih količina.

U radu istog autora za ovu konferenciju iz 2024. godine bilo je riječi o operativnosti sistema na primjeru Herceg Novog u uslovima restriktivnog snabdijevanja zbog smanjenja dotoka vode iz primarnog resursa. Uobičajena pojava smanjenog dotoka vode zbog veze na hidroelektroenergetski sistem Trebišnjice trpi posljedice zbog redovnih godišnjih remonta hidropostrojenja HET-a, i nešto je što za turističku privredu ovog grada znači ozbiljan „kamen spoticanja“, zbog problematične distribucije vode ka potrošačima. Takođe, taj operativni zadatak uspostavljanja funkcionalnog sistema tokom kraćeg restriktivnog perioda nije pitanje samo tog konkretnog perioda, nego čitave godine ili perioda od više godina, tim prije što je to permanentna pojava, sa snažnim posljedicama za potrošače. Zapravo, što je duži period prilagođavanja – to su manje posljedice u „udarnom“ terminu obustave dotoka.

[2] *Vijest je objavio portal Radio Tivta, u ponedjeljak 11. avgusta.*

U radu je primjenjen induktivni princip razmišljanja i donošenja zaključaka, od konkretnog primjera ka opštem i zajedničkom.

2. Karakteristike sistema snabdijevanja

Činjenica je da se u operativnosti vodovodnog sistema Herceg Novog nije daleko odmaklo za posljednjih 40 godina, otkako je izgrađen cjevovod kroz Konavle i izvršeno priključenje na vodostan u Platima, tj. na hidrotehnički tunel između HE „Trebinje“ i HE „Dubrovnik“. Zatvaranja dotoka vode iz HET-a je nužna, periodična, operativna potreba, radi remonta elektropostrojenja dvije elektrane i pomoćnih objekata. Zatečeno stanje ima status nepromjenljivog, sa konotacijom neizbježnog, pa su se vodovodno preduzeće i opština priklonili statusu žrtve, kako za snabdijevanje stanovništva tako i za turističku privredu (osnovna privredna grana).

Postoje varijantna rješenja za poboljšanje stanja ali su ona još uvijek veoma daleko od realizacije, a i sa previsokom cijenom i sumnjive tehničke realizacije. Restriktivni režim snabdijevanja vodom je nešto što je grad stavilo na „crnu turističu listu“, i dalo imidž „grada bez vode“. Obustava dotoka sa Plata zaključno sa 2017. godinom događala se prije početka ljetnje sezone i to od kraja maja do sredine juna. Tokom posljednjih 10-15 godina, zbog lošeg upravljanja sistemom, restrikcije su provođene i tokom ljeta za neke djelove opštine iako su raspoložive količine bile u maksimumu, sa 400÷550 l/s. Ta količina je morala da bude dovoljna za potrebe 7/24 za 70.000 stanovnika (uvećanje populacije stalnog stanovništva za 2,1 put). Ove brojke su dale matematički proračun potrošnje od q= 308 l/st/dan, uzimajući tehnički gubitak od 50%. Međutim, čak i takvi enormno uvećani parametri stanja ne mogu da zadovolje teoretsku postavku stanja gubitaka, jer su oni bili zapravo mnogo veći.

Naime, ako prosjek govori da su u periodu 2015-2017. gubici bili 80%, znači da su u zimskom periodu bili i preko 85%, pa je ljeti stepen iskorištenosti vode iz sistema spao na nekih 25%. Efikasnost funkcionisanja sistema je bila na niskom nivou, uz obavezno precrpljivanje lokalnog izvorišta „Opačica“, sa značajno smanjenom izdašnošću u kasnijem ljetnjem periodu, što je dovelo do poremećenog vodnog bilansa u sistemu, odnosno nedovoljne količine za potrebe potrošača. Restriktivan režim je bio nužan na rivijeri (potez od Zelenike do Kamenara) gdje je nekih 11.000 stanovnika, sa ljetnjim koeficijentom uvećanja 2, ali sa stalnim sezonskim porastom.

U tabeli 1 dat je numerički prikaz kumulativnih količina vode koje ulaze u sistem, na osnovu očitanog na vodomjerima i procenata gubitaka, u periodu 2015-2022. Od 2018. se primjenjuje sistematski pristup smanjenju gubitaka kroz princip otklanjanja starih kvarova i povećanje opertivnosti rada na brzom otklanjanju novootkrivenih. Jedna od osnovnih karakteristika vodovodnog sistema je njegova sezonalna diferenciranost po ključnim parametrima.

Mreža cjevovoda, koja velikim dijelom nije georeferencirana, tj. nije determinisana, jer i dalje veliki broj cjevovoda prolazi kroz privatna imanja, nosi snažnu karakteristiku sezonskog reagovanja. Kad je sistem u „zimskom“ stanju i kada je broj potrošača sa nekih 8.000-10.000 neaktivnih (oko 40 %), cjevovodi su pod pritiskom, a gubici značajno veći nego tokom ljetnje sezone, kada su pritisci u mreži značajno manji.

Tabela 1. Proizvedenena i naplaćena količina, procentualni gubitak za period 15/22
Table 1. Produced and collected water quantyty, precentige od water losses in 15/22

godina	proizvodnja (m^3)	fakturisano (m^3)	gubitak (%)	razlika (%)
2015	13.695.039	2.695.107	80,3	
2016	12.787.044	2.684.493	79,0	0,6
2017	13.403.837	2.726.691	79,7	
2018	12.128.176	2.810.824	77,9	
2019	12.701.420	2.945.499	76,8	
2020	12.140.634	2.589.064	78,7	4,2
2021	12.007.853	2.934.471	75.6	
2022	11.562.571	3.043.883	73,7	

Tabela 2. Ključni IP, potrošnja vode po korisniku mjesečno, kvartalno 2018-22
Table 2. Key PI, quorterly and yearly water consumption per user per month 2018-22

Godina (m^3/kor/mjes)	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.
I kvartal	6,40	6,92	8,11	6,81	6,86
II kvartal	9,31	9,44	8,47	8,93	9,62
III kvartal	17,44	17,83	12,26	17.30	17,10
IV kvartal	8,23	8,41	9,49	7,91	8,22
prosječno	10,35	10,65	9,58	10,24	10,46

Tabela 3. Ključni IP, neprihodovana voda po korisniku, kvartalno, po godinama
Table 3. Key PI, quorterly and yearly non-revenue water per user per month

Godina (m^3/kor/mjes)	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.
I kvartal	35,18	35,24	33,82	30,65	29,24
II kvartal	34,54	34,40	34,34	31,73	29,90
III kvartal	36,31	36,88	39,20	34,12	27,94
IV kvartal	34,77	34,59	31,63	30,17	29,97
prosječno	35,20	35,28	34,75	31,67	29,27

Unapređenje funkcionisanja sa akcentom na podizanju mobilnosti i operativnosti intervencija na mreži od 2018. godine pokazuje stalni godišnji napredak u poboljšanju indikatora performansi. Gubici su i dalje veliki, ali sa stalnim trendom opadanja. Godina 2020, prepoznata po kovid epidemiji, koja je ozvaničena u martu te godine, odrazila se u smanjenju turističkog prometa od svega 15% u odnosu na prethodnu godinu, pa tako i u smanjenju potrošnje vode.

Odnos proizvedene i količine očitane na vodomjerima, kao potrošene i fakturisane, ne daje realnu sliku gubitaka, ali se taj odnos može uzeti u opštoj ocjeni efikasnosti sistema. Indikatori performansi su realniji pokazatelj efikasnosti upravljanja jer se bave elementima, fizičkim i operativnim parametrima sistema, i kroz više aspekata.

Stalni trend poboljšanja IP-a je prvi indikator dobrog puta, ali ne i jedini. Ono što je važno jeste pravljenje prvog novog koraka u poboljšanju upravljanja da bi se ubrzalo smanjenje gubitaka. Treba znati da se svake godine potrošnja uvećava za 5 ÷7 %, dok su raspoložive količine vode manje-više konstantne. Trend smanjenja gubitaka bi se neminovno morao nastaviti bržim koracima.

Cilj je dobijanje stabilnog sistema takvog da u vanrednim situacijama potrošači svih kategorija i u svim djelovima opštine praktično ne osjete manjak vode u sistemu, a uz punu operacionalizaciju prekomponovanje količina vode i sa maksimalnim korištenjem lokalnih i eksternuh resursa.

Ono što je realno moguće jeste analiziranje postojećeg stanja u cilju:

- Smanjenja tehničkih gubitaka
- Korišćenje lokalnih izvorišta
- Racionalna upotreba vode iz sistema.

Iz takvog statusa operativnog sistema u jednom „momentu“ potrebno je napraviti iskorak u narednu fazu unapređenja upravljanja i funkcionisanja vodovodnog sistema. Ta naredna faza podrazumijeva poboljšanje tehničkih performansi sistema (povećanje dijela gravitacionog snabdijevanja na štetu potisnog, smanjenje graničnih pritisaka u sistemu, rješavanje lokalnih „džepova“ nedovoljnih pritisaka, itd), uspostavljanje aktivne kontrole curenja i tzv. integralno upravljanje cjevnom mrežom i svim objektima u vodovodnom sistemu. Upravljanje sistemom snabdijevanja zapravo je upravljanje realnim gubicima vode, tj. onim što se po IWA terminologiji zove ILI index[3]. Gubici vode moraju biti primarna stavka ne samo jedne opštine i njenog vodovodnog preduzeća nego države i osnovna premisa efikasnosti, odnosno bezbjedonosnog vodovodnog sistema[4].

Međutim, teoretska razmatranja i praktična realizacija se bitno razlikuju. S praktične strane sagledan problem znači, u prvom redu, potpuno poznavanje fizičkih karakteristika mreže i pripadajućih objekata, kao i stalno hidrauličko analiziranje rada sistema. Naime, geometrijske osobine sistema kao statične mogu da imaju potpuno drugačiji odraz na funkcionisanje, odnosno na hidrauličko stanje vodovodnog sistema.

Trend u smanjenju gubitaka kao sistematski pristup značio bi da se sa svakom narednom godinom, počevši od 2022, gubici permanentno smanjuju, te da IP, neprihodovana voda po potrošaču pokažu umanjenje 4 do 5 % godišnje, te bi za 5 godina gubici mogli da budu svedeni na mjeru da stanovništvo i gosti u Herceg Novom praktično ne osjete zatvaranje vode

[3] *ILI znači Infrastructure leakage index (engl.), u prevodu Indeks infrastrukturnog procurivanja, određen kroz IWA – International water association, Task Force on Water Loss.*

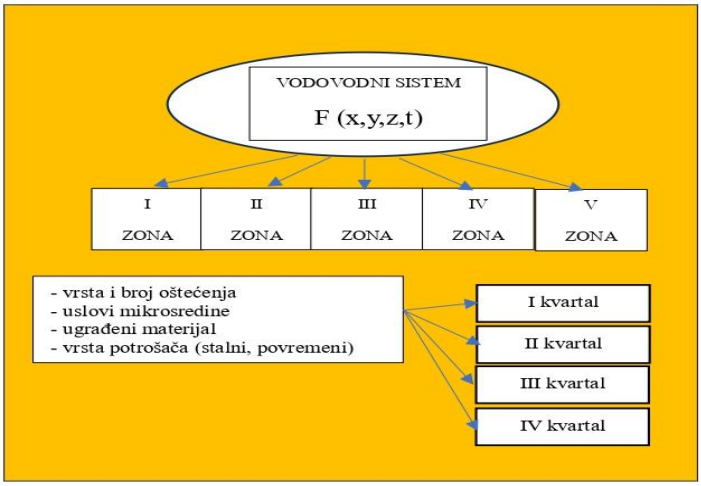
[4] *Šotić, A, Ivetić M, Sežeti prikaz oslonaca efikasnog vodovodnog sistema, Zbornik radova „Gubici vode u sistemima javnog vodosnabdevanja“, Beograd, 2024.*

iz HET-a, 20 časova u toku dana, uz racionalnu distribuciju, tako što bi obustave bile jedino preko noći kada se rezervoari pune. Voda za sistem obezbjeđuje se iz lokalnih izvorišta i RV CG, u količini i do 300 l/s. Dakle, ključ rješenja nije u izgradnji eksternih cjevovoda nego u racionalnom upravljanju prostorom i vodovodnim sistemom. Pri tome je od posebnog značaja Integralno upravljanje objektima vodovodnog sistema, kroz stalnu interakciju: nastajanja kvarova-popravke-zamjena-ekonomija preduzeća-operativne jedinice.

3. Diskusija i zaključak

Vodovodni sistemi su organizmični, prostorno-vremenski dinamički sistemi, u kojima su neprekidne promjene parametara sistema, koji su u funkciji vremena i prostora. Prostorne promjene čine geometriju ili fizičko stanje sistema, uz ekstenzije-dogradnje cjevovoda, odnosno, interpolaciju unutar mreže, sa novim priključcima, novim cjevovodima, ugradnjom novih djelova, pumpi, rezervoara. Prostorne forme u okruženju vodovodnog sistema čine sredinu zbog koje funkcioniše vodovodna mreža, odnosno sistem snabdijevanja, za razne objekte visokogradnje, saobraćajnice, zidove i drugo, što sve zajedno ima veliki fizički uticaj na vodovodni sistem, koji je poput krvotoka.

Vremenski aspekt vodovodnog sistema uvezuje hidrauličke i fizičke parametre stanja, govori o stepenu rezidentnosti vodovodnog sistema na prostorne promjene. U primorskom regionu je konfiguracija terena takva da ni jedan grad nije ravanski (osim Ulcinja) već ima izraženu brdovitost i izgrađenost objekata takvu da je snabdijevanje organizovano u više visinskih zona (u tome su veoma izraženi Herceg Novi i Budva, pa i Kotor). Zato vodovodne sisteme ne možemo posmatrati samo kao ravanske (sa geometrijskom determinacijom x i y) već su izuzetno važne visinske komponente, što zapravo i čini smisao vodosnabdijevanja i baratanje pritiscima.



Slika 1. Shema vodovodnog sistema kao funkcija prostornih i vremenskih parametara
Figure 1. Sheme of the water supply system as a function of spatial and temporal parameters

Segmentacija sistema po prostornim zonama (u visinskom smislu ili vizavi gravitiranja izvorima snabdijevanja ili rezervoarima) i unutar svake zone, pojedinačno, podrazumijeva da se radi analiza stanja sistema kroz integralni princip upravljanja objektima, a to je poznavanje vrste i broja oštećenja, ugrađenog materijala, vrste potrošača (stalni i povremeni, domaćinstva i privreda, vrsta privrede u pogledu potrošnje) i poznavanje uslova mikrosredine (u pogledu gustine objekata, gustine priključaka, stabilnost, stvaranja pukotina, geološkog sastava, pa i hemijskog sastava mikrosredine tla). Segmentacija po vremenskim zonama znači uvođenje tretmana sezonalnosti, odnosno, kako je dato u shemi na slici 1 tretiranje stanja u vodovodnom sistemu kvartalno[5].

Shema sa slike 1 predstavlja složen vodovodni sistem kao funkciju prostornih i vremenski promjenljivih parametara. U prostornom smislu vodovodni sistem je podijeljene na visinske ili funkcionalne ravanske zone, kao svojevrsne podsisteme, svaki sa svojom organizacijom, a međusobno funkcionalno povezani.

Unutar svake zone radi se baza podataka, vodi se analiza oštećenja i ugrađenog materijala, i analiza vrste potrošača. Unutar svake zone prate se ključni IP[6] i to po kvartalima i vrši njihovo poređenje i analiziranje. Proces smanjenja gubitaka je ciklični proces, sa stalnim analiziranjem i poređenjem vrijednosi IP-a, kao „peglanje“ rezultata da bi se postizao smisao bržeg smanjenja neprihodovane vode. Što je sistem izdjeljen na više segmenata to je lakše upravljanje djelovima.

Pri tome treba imati u vidu da se zbir pojedinačnih segmenata ne može posmatrati kao linearno sabiranje da bi se dobio kumulativni rezultat. Svaki segment je sabirak koji treba da odgovara matematičkom nizu a ne prostom sabirku. Ovo dolazi od činjenice hidrauličkih parametara, odnosno, složenih hidrauličkih uslova tečenja u cjevima pod pritiskom, ali i zbog međusobno različitih vrsta spojeva, postojanja ventila, koji, svaki za sebe u toku manipulacija, proizvodi izvjesne udare na sistem, različitog intenziteta u zavisnosti od uslova tečenja.

Princip sezonalnosti otvara više zanimljivih pitanja oko stanja i funkcionisanja vodovodnih sitema u turističkim regijama, posebno u primorju Crne Gore. Pojave vanrednih situacija sa smanjenjem dotoka vode u sistem snabdijevanja različito se manifestuju u ljetnjem periodu u odnosu na zimski, vansezonski. Vanredne situacije se moraju rješavati uz niz pretpostavki i uspostavljanje modela u kojem se, pored zadataka funkcionisanja sistema, moraju predvidjeti potencijalna mjesta nastajanja oštećenja sa curenjem ili drugim vrstama kvarova.

4. Literatura

[1] Babić M, Majdanac N, Predojević N, Baze podataka i hidraulički model kao osnova za smanjenje gubitaka u vodovodnom sistemu, *Zbornik radova „Gubici vode u sistemima javnog vodosnabdevanja“*, Beograd, 2024.

[5] *Vodovodna preduzeća obrađuju benčmarking na kvartalnom nivou i podatke dostavljaju Regulatornoj agenciji za energetiku, koja na osnovu njih reguliše cijene usluga snabdijevanja vodom*

[6] *IP – indikator performansi*

[2] Doklestić O, Upravljanje vodovodnim sistemom u restriktivnom režimu snabdijevanja, Zbornik radova *sa 45 međunarodne konferencije „Vodovod i kanalizacija 24“*, Savez inženjera i tehničara Srbije, Brzeće, 2024.

[3] Vlatković D, Korelacija vodne i enegetske efikasnosti u hercegnovskom vodovodnom sistemu, Zbornik radova sa *42 međunarodne konferencije „Vodovod i kanalizacija 21“*, Savez inženjera i tehničara Srbije, Vrnjačka Banja, 2021.

[4] Šotić A, Ivetić M, Sežeti prikaz oslonaca efikasnog vodovodnog sistema, Zbornik radova *„Gubici vode u sistemima javnog vodosnabdevanja“*, Beograd, 2024.

Milica Stanišić[1]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25163S

POBOLJŠANJE EFIKASNOSTI VODOSNABDIJEVANJA ZAMJENOM AZBESTNO-CEMENTNIH CJEVOVODA U CRNOJ GORI

Rezime: Ovaj rad analizira aktuelno stanje vodovodnih sistema u Crnoj Gori, sa posebnim fokusom na zamjenu azbestno-cementnih (AC) cjevovoda radi povećanja efikasnosti, bezbjednosti i održivosti snadbijevanja vodom. Prikazane su ključne slabosti mreže, glavni rezultati studije o potrebama i investicijama do 2055. godine i date preporuke za prioritetne mjere, uz naznaku za potrebu GIS i hidrauličkog modeliranja kao osnove za donošenje ispravnih odluka. Poseban akcenat je stavljen na analizu nefakturisanih gubitaka vode (NRW), investicije, prioritetnu listu radova koji je potrebno izvesti kao i neophodnu digitalizaciju infrastrukture.
Ključne reči: vodovod, azbestno-cementne cijevi, gubici vode, GIS, Crna Gora

IMPROVING THE EFFICIENCY OF WATER SUPPLY BY REPLACING ASBESTOS-CEMENT PIPES IN MONTENEGRO

Abstract: The paper presents the results of a comprehensive project for the modernization and improvement of water supply systems in Montenegro through the replacement of asbestos-cement (AC) pipes. The analysis covered 23 cities, assessing network conditions, identifying technical and management challenges, and elaborating investment priorities up to 2055. Key challenges include extremely high water losses, obsolete materials, and a lack of hydraulic models and GIS data. Proposed solutions and an investment plan focus on public health and economically sustainable water management.
Key Words: water supply, asbestos-cement pipes, GIS, water losses, Montenegro

1. Uvod

Vodovodni sistemi u Crnoj Gori (ukupno 23 gradske opštine (25 lokaliteta)), se suočavaju sa brojnim izazovima, uključujući visok stepen gubitaka vode (NRW ≈ 67%), korišćenje zastarelih materijala (azbest-cementnih cijevi ≈ 18% ukupne mreže, nepostojanje sistematskih baza podataka i nedostatak savremenih analitičkih alata za upravljanje mrežom. Sve gore navedeno direktno utiče na energetsku, ekonomsku i zdravstvenu održivost sistema.

2. Prikupljanje i analiza podatka

Analiza vodovodnih sistema je sprovedena u tri faze: prva faza obuhvatala je prikupljanje i verifikaciju podataka o postojećem stanju sistema, druga faza uključivala je izradu osnovnih

[1] *E3 Consulting, Podgorica, Crna Gora, msmilicastanisic@gmail.com*

hidrauličkih modela bez kalibracije, dok je treća faza podrazumijevala ekonomsku procjenu i izradu investicionog plana za zamjenu azbestno-cementnih cijevi i poboljšanje efikasnosti vodovodnih sistema.

2.1. Prikupljanje podataka

Podaci o osnovnim karakteristikama vodosnabdevanja prikupljani su višestepenim pristupom – upitnicima, terenskim obilascima, analizom postojeće dokumentacije i konsultacijama sa stručnjacima vodovodnih preduzeća i opština. U velikom broju opština uočena je parcijalnost ili nedostatak podataka, a posebno podataka koji se tiču starosti, materijala i statusa cjevovoda, kapaciteta izvorišta, rezervoara i pumpnih stanica.

2.2. Podaci o hidrauličkim i GIS modelima i analiza podataka

Dostupnost i kvalitet GIS baza i hidrauličkih modela bili su veoma ograničeni – samo 4 vodovodna preduzeća dostavila su osnovne modele (a toga nijedan nije bio kalibrisan). Stručni tim je izradio osnovne-inicijalne modele za ostale sisteme za potrebe procjene i detekcije kritičnih tačaka sistema. GIS baza i hidraulički modeli mreže preporučeni su kao neophodni alat za kvalitetno planiranje i upravljanje sistemima.

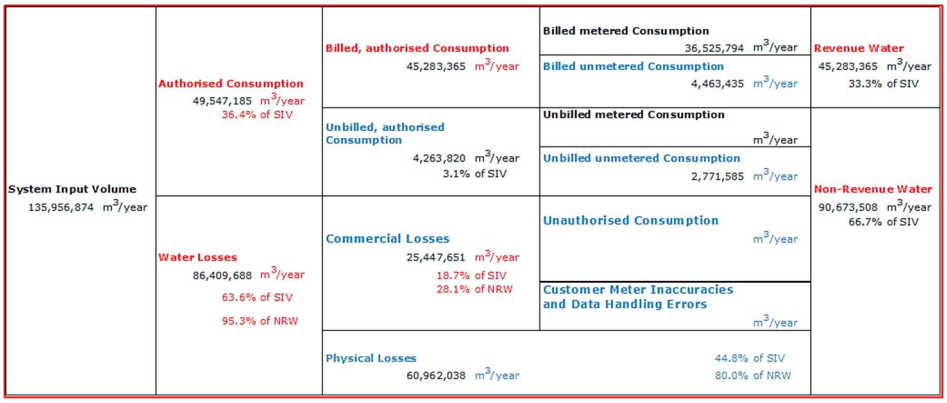
2.3. Ekonomska analiza

Ekonomska analiza koja je dala mjere prioritizacije urađena je po smjernicama Evropske komisije. Ukupne investicione potrebe analizirane su kroz tri faze: hitne mjere (2024–2030), srednjoročne (2030–2040) i dugoročne mjere (2040–2055).

3. Rezultati

3.1. Stepen izgrađenosti vodovodnog sistema i gubici vode

Vodovodni sistemi u Crnoj Gori pokrivaju 93% stanovništva, ali je efikasnost distributivne mreže izuzetno niska zbog velikih gubitka vode („non-revenue water“ – NRW) koja iznosi prosječno oko 66,7%.

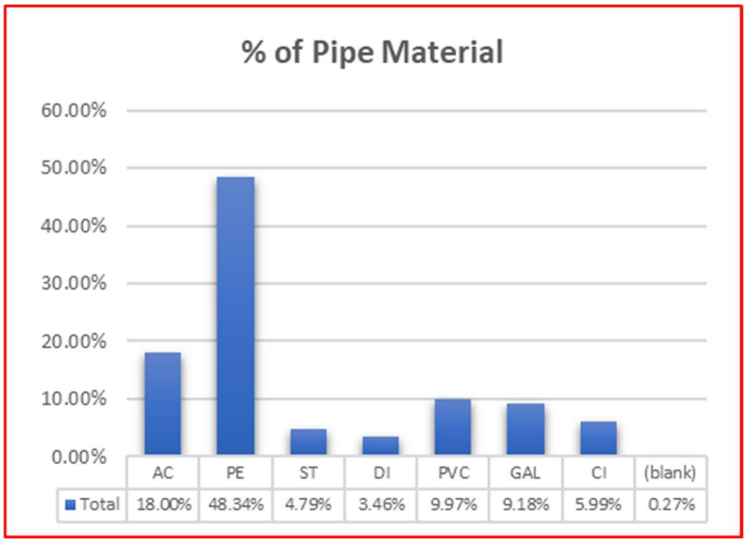


Slika 1. Vodni bilans crnogorskih vodovoda
Figure 1. Water balance

U pojedinim sistemima, osim Podgorice, gubici prelaze 80%. Glavni razlozi su zastarjeli azbest-cementni cjevovodi, visok pritisak, nedostatak zoniranja mreže (slika 1), itd.

3.2. Struktura i dužina cjevovoda

Ukupna dužina vodovodne mreže iznosi 3.386 km, od čega oko 609 km čine azbestno-cementne cijevi. Najveći dio (48%) su PE cijevi, dok je ostalo raspoređeno na PVC (10%), duktilne (9%), pocinčane (6%), ST (5%) i ostale materijale.



Slika 2. Materijal cjevovoda u vodovodnim sistemima Crne Gore (%)
Figure 2. Pipe material in WS of Montenegro (%)

3.3. Investicione potrebe

Procjena ukupnih troškova do 2055. iznosi oko 506 miliona eura, od čega je neophodno 135 miliona eura za zamjenu azbest-cementnih cijevi. Investicioni plan predviđa raspodjelu sredstava na urgentne mjere (2024–2030), srednjoročna i dugoročna ulaganja (tabela 1).

Tabela 1. Procjena investicija za rekonstrukciju i izradu vodovodnog sistema do 2055.
Table 1. Cost estimation for Rehabilitation/ Reconstruction/ Development of WSSs up to 2055.

#	Opština	Hitne mjere (2024-2030) (EUR)	Srednjoročne mjere (2030-2040) (EUR)	Dugoročne mjere (2040-2055) (EUR)	Ukupno (EUR)	Procjena investicija za zamjenu AC cijevi (EUR)
1	Andrijevica	1,126,000	1,006,000	615,000	2,747,000	184,000
2	Bar	4,999,000	7,103,000	1,653,000	13,755,000	4,993,435
3	Berane	7,228,000	6,489,000	8,160,000	21,877,000	6,833,011

#	Opština	Hitne mjere (2024-2030) (EUR)	Srednjoročne mjere (2030-2040) (EUR)	Dugoročne mjere (2040-2055) (EUR)	Ukupno (EUR)	Procjena investicija za zamjenu AC cijevi (EUR)
4	Bijelo Polje	14,712,000	3,373,000	11,168,000	29,253,000	15,286,300
5	Budva	6,884,000	13,214,000	9,925,000	30,023,000	7,565,324
6	Cetinje	23,178,000	11,764,000	2,359,000	37,301,000	1,992,565
7	Danilovgrad	8,033,000	12,496,000	10,416,000	30,945,000	16,737,620
8	Herceg Novi	10,822,000	12,900,000	9,181,000	32,903,000	3,780,985
9	Kolašin	2,974,000	6,308,000	1,261,000	10,543,000	2,280,610
10	Kotor	7,178,000	7,432,000	4,136,000	18,746,000	5,731,566
11	Mojkovac	3,104,000	1,025,000	1,092,000	5,221,000	602,000
12	Nikšić	13,811,000	19,986,000	19,970,000	53,767,000	6,831,522
13	Plav	6,665,000	5,073,000	875,000	12,613,000	479,635
14	Pljevlja	13,682,000	3,570,000	1,812,000	19,064,000	8,193,025
15	Plužine	1,328,000	933,000	791,000	3,052,000	0
16	Podgorica	30,619,000	23,499,000	44,507,000	98,625,000	24,670,713
17	Rožaje	1,482,000	5,273,000	1,670,000	8,425,000	3,109,489
18	Šavnik	344,000	211,000	170,000	725,000	0
19	Tivat	7,625,000	1,734,000	514,000	9,873,000	3,952,350
20	Ulcinj	5,060,000	21,444,000	21,154,000	47,658,000	19,450,384
21	Žabljak	2,465,000	4,206,000	1,621,000	8,292,000	2,229,850
22	Gusinje	4,365,000	4,106,000	500,000	8,971,000	418,605
23	Petnjica	1,092,000	327,000	50,000	1,469,000	0
	Ukupno	**178,776,000**	**173,472,000**	**153,600,000**	**505,848,000**	**135,322,989**

3.4. Glavni nedostaci vodovodnog sistema i preporuke

Analize su pokazale da se glavne slabosti vodovodnih sistema mogu sažeti na sledeći način:

- Nedostatak podataka, GIS-a baza, hidrauličnih modela i mjerenja u sistemu;
- Visok procenat nefakturisanih gubitaka vode (NRW), oko 66,7% ulazne zapremine vode;

- Veliki fizički gubici uzrokovani visokim pritiskom u sistemu
- Nedostatak zoniranja distributivne mreže – sistem radi pod visokim pritiskom
- Nedostatak rezervoarskog prostora
- Relativno visok procenat azbestno-cementnih cijevi, oko 18% ukupne dužine (609 km)
- Oko 32% cijevi ima neadekvatan prečnik, manji od 80 milimetara
- Zbog loših odluka u prošlosti, prvenstveno nedostatka hidrauličnih modela, sistemi su konceptualno pogrešni (što je glavni razlog za visok pritisak u sistemu)

Za efikasniji rad vodovodnih sistema neophodno je sprovesti sledeće aktivnosti:

- Smanjenje ne-fizičkih gubitaka, što uključuje otkrivanje i eliminaciju ilegalnih priključaka, kao i precizno evidentiranje stvarne potrošnje, obzirom da postojeća potrošnja često nije pravilno mjerena i naplaćena;
- Smanjenje fizičkih gubitaka kroz pronalaženje i sanaciju curenja na mreži;
- Izrada i korišćenje GIS i hidrauličkih modela cjelokupnog sistema, što omogućava precizno planiranje i upravljanje mrežom;
- Zoniranje mreže za bolje upravljanje pritiskom i sprečavanje prekomjernog pritiska u cjevovoda;
- Instalacija savremenih uređaja za praćenje parametara sistema, uključujuć i vodozahvate, unutrašnje sekcije mreže i korisnike;
- Kontinuirani monitoring kako fizičkih tako i ne-fizičkih gubitaka, uz sistematsko otkrivanje i brzo reagovanje na kvarove;
- Ugradnja i redovno očitavanje, kao i kalibracija vodomjera kod svih korisnika, u cilju povećanja tačnosti obračuna i efikasnosti naplate usluga.

Ove mjere su ključne za efikasnu borbu protiv visokog nivoa gubitaka vode i održivo upravljanje vodovodnim sistemima.

4. Zaključak

Analiza dostupnih podataka pokazala je da efikasno upravljanje vodosnadbijevanje u Crnoj Gori nije moguće bez integrisane zamjene AC cijevi, implementacije GIS i hidrauličkih modela i modernizacije sistema naplate i kontrole potrošnje. Dugoročan plan zahtjeva ulaganja i sistematsko unapređenje digitalnog vođenja infrastrukture, čime bi se obezbjedila optimalna ekonomska i zdravstvena sigurnost građana.

Zahvalnica

Rad je nastao shodno podprojektu „Unapređenje efikasnosti vodosnabdijevanja zamjenom azbestno-cementnih cijevi na teritoriji Crne Gore (MNE: FS-AC)”, realizovanom u periodu od septembra 2023. do aprila 2024. godine, u okviru Programa za pripremu projekata u oblasti životne sredine i klimatskih promjena (PPF).

5. Literatura

[1] FS-AC, *Summary Report – Improving the Efficiency of Water Supply by replacing Asbestos-Cement Pipes*, Crna Gora, 2024.
[2] Službeni podaci ViK preduzeća Crne Gore.
[3] Evropska komisija, *Cost Benefit Analysis Guidelines*, 2021.

Марко Бабић[1]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25169B

УНАПРЕЂЕЊЕ ВОДОВОДНЕ ДИСТРИБУТИВЕ МРЕЖЕ У СОКОБАЊИ

Резиме: Рад приказује унапређење система водоснабдевања у Сокобањи у циљу решавања сезонских несташица узрокованих повећаном потрошњом током туристичке сезоне и смањеним капацитетом изворишта. Пројекат обухвата поделу мреже на ОЗБ, поделу прве висинске зоне на две, како би се смањио прекомерни притисак код ниско лоцираних корисника. Пројекат, такође садржи изградњу додатног резервоарског простора, као и хидрауличко моделирање рада водоводног система. Предвиђена су хидрогеолошка испитивања у циљу проналажења додатних изворишта, смањење неприходоване воде и проширење обухвата услуге кроз рехабилитацију и доградњу система.

Кључне речи: водоснабдевање, ОЗБ, висинске зоне, резервоари, смањење губитака

IMPROVEMENT OF THE WATER DISTRIBUTION SYSTEM IN SOKOBANJA

Abstract: The paper presents the upgrade of the water supply system in Sokobanja to address seasonal shortages caused by increased tourist consumption and reduced source capacity. The project includes dividing the network into DMAs, splitting the first elevation zone into two to reduce excessive pressure for low-lying users, construction of additional water tank capacity, and hydraulic modeling of the water supply system. Furthermore, hydrogeological investigations are planned to identify additional water sources, reduction of non-revenue water, and expansion of service coverage through the rehabilitation and extension of the existing system.

Key Words: Water supply, DMA, elevation zones, water tanks, water loss reduction

1. Увод

Сокобања је једно од најпосећенијих одмаралишта у земљи и припада групи реномираних туристичких центара са најдужом традицијом организованог туризма.

Сокобања је позната као бања за рехабилитацију због благотворног утицаја континенталне климе, велике концентрације кисеоника, озона и негативних јона у ваздуху, одсуства загађења ваздуха, малог броја магловитих и ветровитих дана, присуства специфичних елемената у ваздуху и олигоминералне воде.

[1] *Louis Berger, Београд, marko.babic@lbadria.com, ORCID: 0009-0008-2139-4914*

1.1. Постојеће стање водоводног система

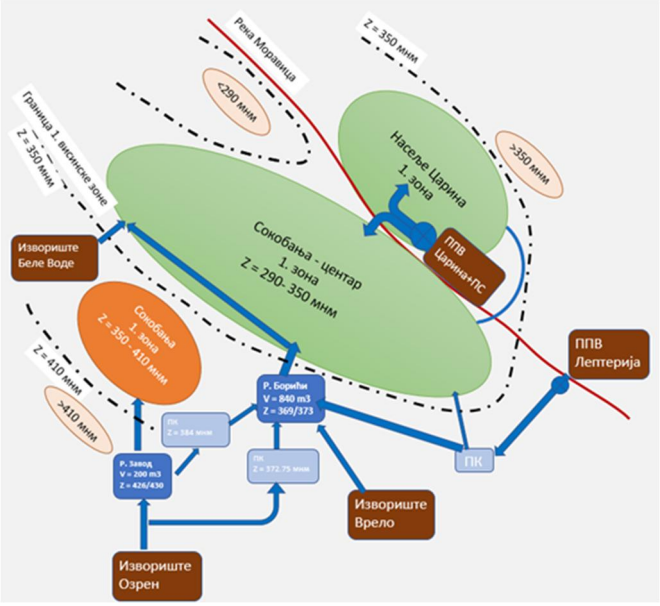
Водоводни систем Сокобање, којим управља ЈКП „Напредак“, покрива урбани део општине, односно насеље Сокобања, са покривеношћу од 95%. На слици 1. налази се шематски приказ услужног подручја, где су приказани урбано подручје Сокобање и насеље Озрен. Снабдевање водом у осталим сеоским насељима општине заснива се на локалним водоводним системима и појединачним бунарима.

Постојећу водоводну инфраструктуру чине следећи објекти:

- Изворишта
- Постројења за пречишћавање воде за пиће
- Резервоари
- Водоводна дистрибутивна мрежа.

Водоводни систем Сокобање подељен је у две висинске зоне:

- Зона 1: 290-350 m. Потрошачи прве висинске зоне се снабдевају водом са карстног извора Беле Воде и из резервоара Борићи. Такође, вишак воде из изворишта Озрен, које се користи за снабдевање водом потрошача друге висинске зоне, пласира се потрошачима прве висинске зоне преко прекидне коморе у близини резервоара „Завод“. Када потребе потрошача прве висинске зоне премаше капацитете поменутих извора, ЈКП „Напредак“ преко ППВ Царина (захват из реке Моравице) надомешта недостајућа количина воде.



Слика 1. Шема водоводног система Сокобање - постојеће стање
Figure 1. Scheme of water supply system in Sokobanja - existing state

- Зона 2: 350-410 m. Потрошачи друге висинске зоне снабдевају се водом са извора Озрен, одакле вода прво гравитационо дотиче у резервоар „Завод“, одакле се даље пласира потрошачима ове зоне.

Постоје два резервоара воде - „Борићи“ и „Завод“, као део водоводне мреже у Сокобањи. Капацитет ова два резервоара је следећи:

- Борићи (Зона 1)– 2 x 420 m^3
- Завод (Зона 2) – 200 m^3.

Дужина водоводне мреже је око 41 km. Тренутно водоводни систем Сокобање броји око 3.246 прикључака који опслужују домаћинства, јавне установе (болнице, школе итд.) и комерцијалне потрошаче (хотеле и мала предузећа). У Сокобањи нема великих индустријских потрошача.

1.2. Изворишта

Потрошачи у Сокобањи снабдевају се водом из подземних и површинских извора:

- Три природна карстна извора: „Врело“, „Озрен“ и „Беле Воде“, чији капацитети значајно варирају током године (максимална издашност у току пролећних месеци и минимална издашност у току летњих месеци);
- Захват воде из реке Моравице и њено пречишћавање кроз ППВ „Царина“;
- Бунар за воду Лептерија преко ППВ „Лептерија“.

Минимална и максимална издашност изворишта је приказана у табели 1:

Табела 1. Капацитети изворишта у Сокобањи
Table 1. Yield of water sources in Sokobanja

Извориште	Тип	Максимална издашност (l/s)	Минимална издашност (l/s)
Озрен	Карстно извориште	50	12
Врело	Карстно извориште	25	6
Беле воде	Карстно извориште	20	5
Лептерија	Бунар	25 (35)*	25
Царина	Река Моравица	40	20
Укупно		160	68

* систем димензионисан на 35 l/s али због оперативних проблема лимитиран на 25 l/s

1.3. Дистрибутивна мрежа

Дистрибутивна мрежа у Сокобањи је у укупној дужини од око 41 km различитог цевног материјала и пречника који су приказани у табели 2.

Преовлађујући материјал цевовода је азбестно-цементни, који чини приближно 50% укупне дужине дистрибутивне мреже. Цеви од HDPE и PVC-а чине приближно

34%. Осим што није у складу са прописима ЕУ, велика заступљеност азбестно-цементних цеви сматра се неповољном, јер код овог материјала током времена долази до повећања броја цурења, нарочито на спојевима.

Табела 2. Дужина цеви по цевном материјалу
Table 2. Pipe lenght per pipe material

Материјал	Укупна дужина (km)	Удео (%)
Ливене цеви	0,86	2,11
Азбестно-цементне цеви	20,64	50,39
Ливено гвоздене цеви	0,06	0,14
HDPE	10,87	26,54
Поцинковане цеви	2,8	6,85
Челичне цеви	2,69	6,55
PVC	3,04	7,42
Укупно	40,96	100

Преовлађујући материјал цевовода је азбестно-цементни, који чини приближно 50% укупне дужине дистрибутивне мреже. Цеви од HDPE и PVC-а чине приближно 34%. Осим што није у складу са прописима ЕУ, велика заступљеност азбестно-цементних цеви сматра се неповољном, јер код овог материјала током времена долази до повећања броја цурења, нарочито на спојевима.

1.4. Структура и начин рада система водоснабдевања

Постојећи систем водоснабдевања у Сокобањи функционише на следећи начин:

- Корисници у тренутно нижој (првој) висинској зони постојећег система водоснабдевања Сокобања (обухвата преко 90% водоводног дистрибутивног система Сокобање) налазе се на надморским висинама приближно између 290 и 350 метара.
- Друга висинска зона обухвата кориснике који се налазе на надморским висинама од 350 до 410 метара.
- Прва висинска зона снабдева се водом директно са извора „Беле Воде“ (надморска висина 372,14 m) и из резервоара „Борићи“. Резервоар „Борићи“ се пуни водом са извора „Врело“ и из ППВ „Лептерија“, преко прекидне коморе (ПК) „Борићи“. Вишак воде са извора „Озрен“ (надморска висина 489,00 m), који се не користи за другу висинску зону, дистрибуира се директно у прву висинску зону преко прекидне коморе у близини резервоара „Завод“. Када потребе за водом премаше капацитете наведених изворишта, ЈКП укључује и воду из Моравице (ППВ Царина) у мрежу.
- Друга висинска зона се снабдева водом са изворишта „Озрен“, преко резервоара „Завод“. Као што је већ поменуто, вишак воде дистрибуира се преко прекидне

коморе код резервоара „Завод“ директно у дистрибутивну мрежу ниже (прве) висинске зоне.

- Пошто се вода са извора „Озрен“ и „Беле Воде“ дистрибуира гравитацијом у систем водоснабдевања Сокобање, они су стално у функцији. Доток воде са ових извора зависи од расположивих количина на самим изворištима. Када је потреба за водом већа од расположивих количина воде са наведених изворишта, укључују се пумпе на извору „Врело“, затим се активира ППВ „Лептерија“, а на крају и ППВ „Царина“.
- Вода из ППВ „Лептерија“ се пумпа из резервоара пијаће воде на коти 312 m до прекидне коморе „Сокоградска“. Из ПК „Сокоградска“ вода се гравитацијом дистрибуира до ПК „Борићи“ и даље према резервоару „Борићи“.

1.5. Неприходована вода

У склопу пројекта одрађена је свеобухватна анализа водног биланса како би се, између осталог, проценила количина неприходоване воде. У наставку ће бити презентовани само главни закључци.

Количина неприходоване воде (eng. Non-revenue water – NRW) за 2019. годину износила је 1.503.498 m³/god, што представља просечно 47,7 l/s, односно 72,7% од укупне испоручене количине воде са изворишта. Ова количина обухвата легалну нефактурисану воду, илегалну потрошњу, грешке у мерењу, грешке у процесуирању и обради података као и стварне, физичке губитке.

Обрадом података је процењено да физички губици износе 1.385.716 m^3/god. Овај податак се још може презентовати и као 3.796 m^3/dan, односно 3,9 m^3/h.km.

Са великом извесношћу може се претпоставити да је узрок тако великих физичких губитака састав материјала цевовода у мрежи, у којој су азбестно-цементне цеви заступљене са око 50%. Код овог материјала губици воде расту током времена, посебно на спојевима. Такође, могући узрок повећаних губитака у појединим деловима система могу бити и нешто већи притисци, нарочито у зимском периоду када је потрошња воде минимална.

1.6. Водни биланс

Потребе за водом представљају кључни полазни основ за израду водног биланса, као и за пројектовање система за водоснабдевање. У овом делу биће приказане све компоненте водног биланса, узимајући у обзир све релевантне параметре који утичу на укупну потрошњу воде. У претходним поглављима приказани су подаци о издашности изворишта и губицима воде у систему, док ће у наставку бити презентовани главни потрошачи.

На основу увида и анализе базе наплате ЈКП-а, утврђено је да у Сокобањи има 3.246 регистрована потрошача, који су подељени у четири категорије: домаћинства, мала, средња и велика привреда. Наплата потрошачима врши се читањем потрошње у периоду од априла до децембра, док се паушално врши у зимском периоду. Око 8% потрошача је и даље на паушалној наплати.

За потребе прорачуна водног биланса, потрошачи су груписани у 3 категорије: становништво, хотели и предузећа и институције. Анализом главних компоненти за 3 референте године, успостављен је водни биланс који је приказан у табели 3.

Табела 3. Сумирани водни биланс за 3 узастопне године
Table 3. Summary of water balance for 3 respective years

Компонента водног биланса	Јединица	Година 1	Година 2	Година 3
Изворишта	l/s	56,2	56,2	65,5
Фактурисана потрошња домаћинство	l/s	11,8	11,9	13,9
Фактурисана потрошња хотели	l/s	2,6	3,0	2,6
Фактурисана потрошња привреда и институције	l/s	2,2	1,3	1,4
Укупно фактурисана	l/s	16,6	16,2	17,9
Неприходована вода	l/s	39,6	40,0	47,7
	%	70,5	71,2	72,7

1.7. Потребе за водом

Потребе за водом одређене су за пројектни период од 30 година. Приликом дефинисања потреба за водом, а на основу анализе података и мерења, спроведене су следеће активности:

- Демографска анализа до краја пројектног периода
- Усвојен тренд повећања прикључења на систем до 100%
- Усвојена специфична потрошња становништва од 150 l/st.dan
- Предвиђен је раст потрошње воде за туристичке капацитете и привреду
- Одређене месечне и дневне неравномерности потрошње воде свих категорија потрошача.

Пројекција потреба за водом за усвојени пројектни период (до 2052. године) је приказана у табели 4.

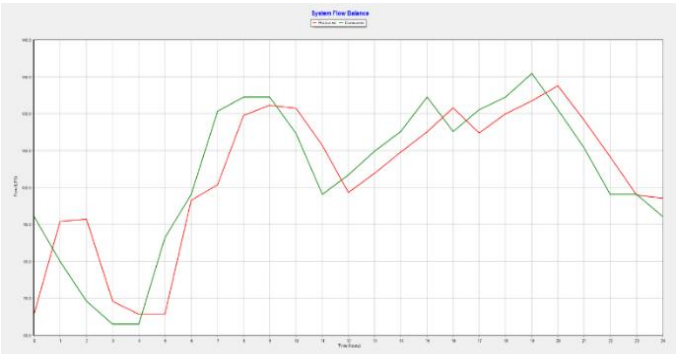
Табела 4. Потребе за водом у Сокобањи до 2052. године
Table 4. Water demand in Sokobanja until 2052. year

Компонента	Јединица	2026	2030	2040	2052
Становништво	m^3/god.	510.497	514.096	515.114	519.880
Туризам (хотели и бање)	m^3/god.	107.084	119.219	130.263	143.545
Привреда и институције	m^3/god.	61.109	63.534	65.302	68.121
Потребе за водом	m^3/god.	678.690	696.849	710.680	731.545

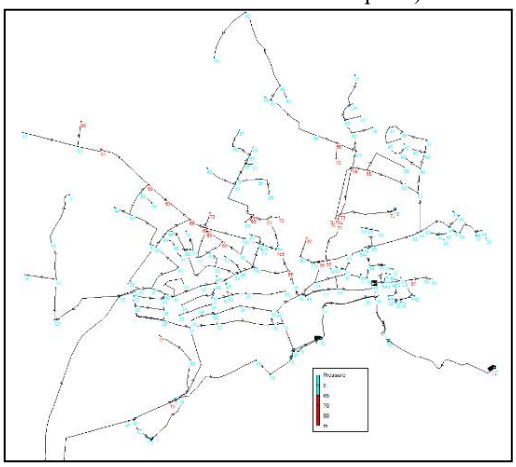
2. Хидраулички модел постојећег стања

Математички модел система водоснабдевања Сокобање формиран је коришћењем софтверског пакета EPANET. Модел је формиран на основу GIS модела, уз додатно мапирање водоводне мреже, уношењем улазних података о капацитетима изворишта, цевних материјала (пречник, рапавост), резервоара (коте дна, запремина и максимални ниво), пумпних станица (Q-H крива) као и дијаграме неравномерности за све чворове. Укупни губици воде (NRW) распоређени су по чворовима математичког модела на основу врсте и старости материјала цеви, као и притиска у систему водоснабдевања.

Резултати хидрауличког модела постојећег стања приказан је на следећим графицима:



Слика 2. Водни биланс за дан са максималном потрошњом (Црвена боја - доток воде са изворишта; Зелена боја – потрошња воде у систему)
Figure 2. Water balance for day with maximum consumption (Red color – inflow from water sources; Green color – water consumption)



Слика 3. Притисци у систему за сат са најмањом потрошњом
Figure 3. Pressures in the hour with minimal demands

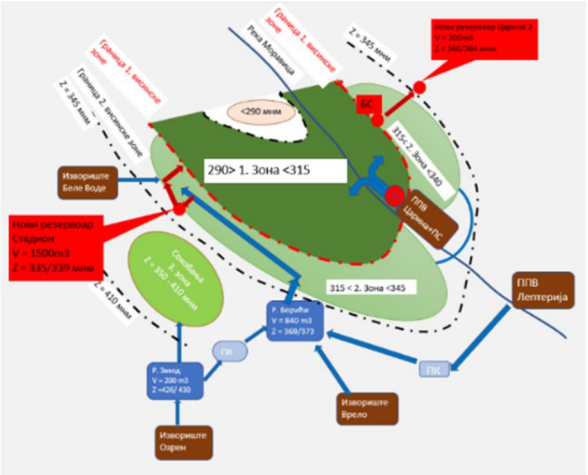
Хидраулички модел постојећег стања водоводног система у Сокобањи указао је на следеће проблеме:

- Концепт водоводног система није постављен адекватно, узимајући у обзир велике висинске разлике потрошача. Систем је подељен у две висинске зоне, са висинском разликом између потрошача исте висинске зоне од око 60 m, што се сматра превеликим;
- Недовољна количина резервоарског простора за покривање неравномерности између дотока и потрошње. Тренутно, резервоарски простор чини само 12% од максималне дневне потребе за водом, што је недовољно. Резервоар „Борићи“ је углавном празан, поготову у летњем периоду, тако да резервоарски простор као и да не постоји. Такође, притисци у нижим деловима прве висинске зоне су велики (зими до 8 бара) што доводи до честог пуцања цеви;
- Будући да је Сокобања туристичко место, пик туристичке сезоне (август) се поклапа са минималном издашношћу извориштa, што доводи до несташица воде.

3. Успостављање новог концепта водоснабдевања

Узимајући претходно наведене проблеме у функционисању водоводног система у Сокобањи, извршено је ново зонирање система, које је диктирала постојећа инфраструктура, односно позиција резервоара. Услед високог положаја резервоара „Борићи“, који служи за снабдевање прве висинске зоне, иста је подељена на нове две зоне:

- Зона 1: 290 – 315 m
- Зона 2: 315 – 345 m
- Зона 3: 345 – 400 m

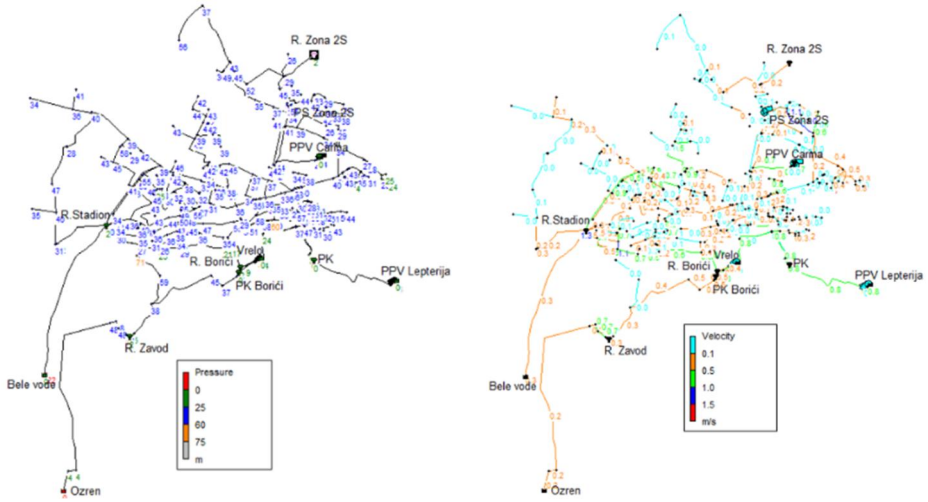


Слика 4. Шема новог концепта водоснабдевања у Сокобањи
Figure 4. New concept of water supply in Sokobanja

Зона 3 остала је непромењена, узимајући у обзир положај резервоара „Завод“ као и чињенице да се у овој зони налази мали број потрошача, те да није предвиђен пораст становништва у будућности. Такође, како би нове зоне 1 и 2 биле континуирано снабдевене водом за пиће, предвиђена је изградња два нова резервоара: резервоар „Стадион“, V=1.500 m^3 и резервоар „Царина 2“, V=200 m^3. Шема будућег стања водоводног система у Сокобањи је приказана на слици 4.

4. Хидраулички модел пројектованог стања

На основу успостављања новог концепта водоснабдевања, извршено је хидраулично моделирање система и његова калибрација. Хидраулички модел је показао да је нови концепт у складу са постојећом инфраструктуром (цевоводи довољне пропусне моћи) што резултира оптималним притисцима и брзинама у периодима највеће и најмање потрошње. Резултати хидрауличког прорачуна пројектованог система су приказани на следећим сликама:



Слика 5. Притисци и брзине у мрежи у времену са максималном потрошњом
Figure 5. Pressure and velocity in the network in hour with maximum water demand

5. Закључак

Детаљном анализом постојећег стања водоснабдевања, хидрауличким моделирањем и успостављањем новог концепта рада водоводног система у Сокобањи обезбеђено је дугорочно и поуздано снабдевање водом свих потрошача. Новим концептом оптимизовани су притисци у систему, рад постојећих и нових резервоара, и обезбеђена је резервна запремина за непредвиђене околности (нпр. гашење пожара). Смањењем притиска у систему директно се утицало на смањење губитака воде за око 24%, односно 11,5 l/s у просеку. Нови концепт система успоставио је нове висинске зоне и самим тим директно утицао на поделу система у основне зоне билансирања (4 ОЗБ),

које су неопходан корак у даљем раду на смањењу губитака у систему. Управљање притиском, односно одржавање просечног притиска у систему до 5 бара, директно утиче на смањен број пуцања цевовода, а самим тим и на губитке воде у водоводном систему.

6. Литература

[1] Louis Berger, *Студија оправданости – Унапређење водоводне дистрибутивне мреже Сокобање*, 2022.

[2] Љубисављевић Д, Бабић Б, Ђукић А, Лекић Б, *Комунална хидротехника, примери из теорије и праксе*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, друго издање Београд, 2010.

[3] David Pearson: *Standard definitions of water losses*, 2019.

[4] GiZ, VAG, FHNW, KIT: *Упутства за смањење губитака воде са фокусом на управљање притиском*, 2011.

Бојан Ећим[1]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25179E

СИСТЕМ ВОДОСНАБДЈЕВАЊА „ТОМАШИЦА“

Резиме: Око 6.000 становника који насељавају подручја уз саобраћајницу Приједор-Томашица (Гомјеница, Петрово, Миљаковци, Гаћани, Саничани, Ракелићи, Пејићи, Томашица, Криваја, Буснови), на десној обали ријеке Сане и подручја уз саобраћајницу Приједор-Сански Мост (Зецови, Расавци, Ништавци, Алишићи) на лијевој обали Сане, немају ријешено организовано јавно снабдјевање водом. Водоснабдјевање становника овог подручја није систематски рјешавано, а сва досадашња истраживања су показала да на овом подручју нема довољно квалитетних локалних извора са потребном издашношћу за рјешавање овог проблема. Постојеће снабдјевање водом одвија се путем мањих импровизованих локалних водовода са неадекватном заштитом самог изворишта, путем појединачних бунара и доводом воде цистерном. Оваква ситуација не обезбјеђује потребне стандарде у погледу количина и контроле квалитета воде и ограничава развој овог подручја. Изградњом јединственог система водоснабдјевања ови проблеми би се ријешили, а обухват водоснабдијевања Града Приједора би износио преко 90%. У овом раду је приказан историјат истраживања, која ће у завршници довести до реализације пројекта водоснабдјевања.
Кључне ријечи: водозахват, акумулације, бунари.

„TOMAŠICA“ WATER SUPPLY SYSTEM

Abstract: About 6.000 inhabitants who live in the areas along the Prijedor-Tomašica road (Gomjenica, Petrovo, Miljakovci, Gaćani, Saničani, Rakelići, Pejići, Tomašica, Krivaja, Busnovi), on the right bank of the river Sana and the areas along the Prijedor-Sanski Most road (Zecovi, Rasavci, Nishtavci, Ališići) on the left bank of the Sana, do not have an organized public water supply. The water supply of the inhabitants of this area has not been systematically solved, and all previous researches have shown that there are not enough high-quality local sources in this area with the necessary abundance to solve this problem. The existing water supply takes place through smaller improvised local waterworks with inadequate protection of the source itself, through individual wells and water supply by tanker. This situation does not provide the necessary standards in terms of water quantity and quality control and limits the development of this area. By building a unique water supply system, these problems would be solved, and the water supply coverage of the City of Prijedor would amount to over 90%. This paper presents the history of the research, which will ultimately lead to the realization of the water supply project.
Key Words: water catchment, reservoirs, wells.

1. Увод

На подручју Приједорске регије регистровано је више акумулација нискоминерализоване (питке) воде која служи за водоснабдијевање становништва. Ове акумулације су везане за одређене геолошке комплексе:

[1] *„Водовод“ а.д. Приједор, b.ecim@vodovod-pd.com, ORCID: 0009-0007-7823-2345*

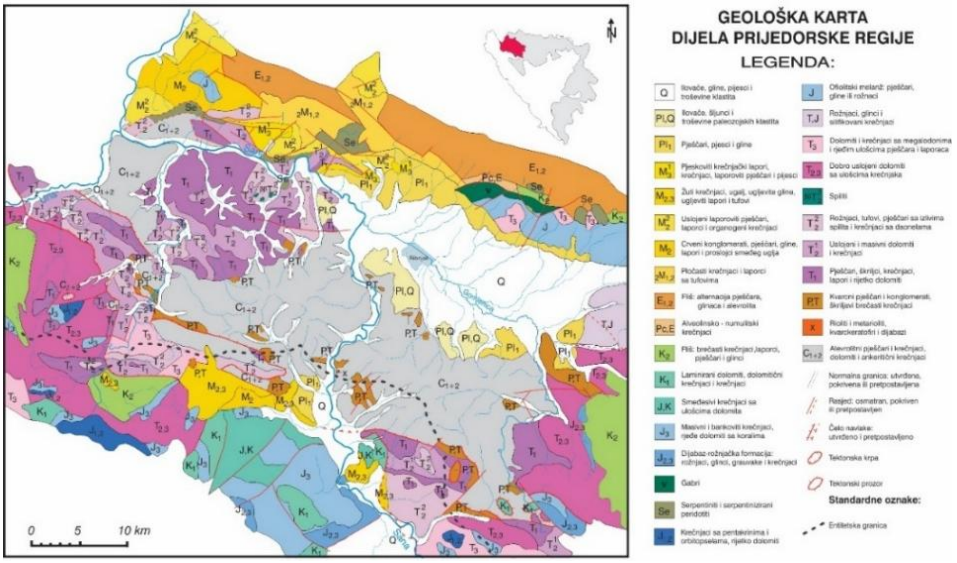
- алувиони ријека Уне, Сане, Гомјенице, Јапре и др. (al-b),
- пролувијални комплекс јужних падина Козаре (Pr-Q),
- старији делувијално-пролувијални седименти јужног и сјеверног обода Приједорског неогеног базена (P_1,Pl,Q),
- лапоровито - глиновито-пјешчарско-кречњачки комплекс (M_3^1, $E_{1,2}$, $E_{2,3}$),
- дијабаз-рожњачки комплекс (дијабази, габри, перидотити, серпентинити, глинци, пјешчари, конгломерати, кречњаци, DR, p-se),
- мезозојско кречњачко - доломитски комплекс (MKD)
- палеозојски комплекс (C_{1+2})

Табела 1. Геолошке резерве и акумулације подземних вода
Table 1. Geological reserves and groundwater accumulations

Ознака комплекса	Карактеристике комплекса
al-b	Алувијални седименти у алувионима ријека Уне, Сане, Гомјенице, Јапре и њихових притока и барски и језерски седименти Омарско-Приједорског поља. Издани су значајне, али осјетљиве на загађења, пошто се хране директно из водотокова са површинских терена.
pr-Q	Пролувијални комплекс јужних падина планине Козаре је формиран на потезу Брезичана до Ивањске. У њему су створене издани у мањим сочивима шљунка са ниским фактором водозамјене.
Pl_1,PlQ	Старији делувијално-пролувијални седименти (јужни и сјеверни обод приједорског неогеног басена) чине иловаче, глине, ситнозрни пијесак и трошевине палеозојских, мезозојских и кенозојских седимената. Формиране издани су разбијене, али са нешто већом водообилношћу од издани из pr-Q комплекса и имају локални значај за водоснабдјевање.
M_3^1,$E_{1,2}$,$E_{2,3}$	Лапоровито-глиновито-пјешчарско-кречњачки комплекс чине седименти миоцена и еоцена заступљени на Козари и Каменградском неогеном басену. Издани формиране у еоценским кречњацима су нешто значајније и имају локални значај за водоснабдјевање у зонама Козарца, Бенковца, Голе планине и Мраковице.
DR-p-se	Дијабаз-рожначки комплекс чине дијабази, габрови, перидотити, серпентинити, глинци, пјешчари, конгломерати и кречњаци.Најзначајније издани су формиране кречњачким олистоплакомама на Дреновачи, Лисини и у серпентинитским габроидним масама централног дијела Козаре. Овај комплекс се у источном дијелу терена налази на самом рубу металогенетске јединице. Значај ових издани умањује знатно осцилирање издашности у току године (каптаже Ратково Врело и Вријеска).
MKD	Мезозојско-кречњачко-доломитски комплекс чине седименти тријаса и подређено јуре и креде. Овај комплекс је развијен у источном и западном дјелу јединице, а граде га кречњаци, доломити, пјешчари, туфозни пјешчари, алевролити и глинци. Изузетно су значајни, као колектори, они дијелови кречњачких и доломитских маса који залијежу испод ерозионог базиса ријека Сане и Уне и њихових притока. Најзначајније издани су формиране у наслагама у Матарушком и Рапића пољу и користе се у водоснабдијевању Града Приједора и у Доњој Драготињи гдје се, такође, користе за водоснабдјевање.

Ознака комплекса	Карактеристике комплекса
C_{1+2}	Палеозојски комплекс шкриљаца и пјешчара са кречњацима граде карбонски пермски аргилити, огилофилити, алевролити, пјешчари, кречњаци, доломитисани, анкеритисани, сидеритисани кречњаци доњег и средњег карбона. У кречњачком дијелу комплекса су развијене значајне издани формиране у масивима, који залијежу испод младих седимената у неогеном басену, имају артерски и субартерски карактер. Природни извори имају локални значај, а артерске и субартерске издани нису довољно истражене.

Најзначајнија површинска акумулација воде Града Приједора се налази на локалитету Томашица, односно три језера - Блатњак, Сјеверна и Јужна Томашица, укупне запремине преко 17 милиона m^3. Језера су настала улијевањем подземних и површинских вода у депресије настале након завршетка експлоатације жељезне руде. Приликом разматрања идеја о експлоатацији ових вода, вршена су углавном физичко-хемијска испитивања, при чему је посебна пажња обрађена на карбонатну тврдоћу и укупну минерализацију. Ова испитивања су показала да су најквалитетније воде оне које су акумулиране у палеозојским и кенозојским комплексима.



Слика 1. Геолошка карта дијела Приједорске регије
Figure 1. Geological map of part of the Prijedor region

Због изузетног значаја, дужи временски период је вршено праћење квалитета и утврђено је да ове воде задовољавају све параметре за водоснабдјевање становништва. Посебно треба напоменути да је готово цијело сливно подручје Томашице ненасељено, што је изузетно повољно са аспекта евентуалне контаминације воде. Када се све наведено узме у обзир, будућа припрема воде за пиће била би сведена на основне операције: седиментацију, филтрацију и дезинфекцију [2].

Табела 2. Хемијске карактеристике воде из Томашице
Table 2. Chemical characteristics of water from Tomašica

Хемијске карактеристике	Јединица мјере	Јужна Томашица	Блатњак	Сјеверна Томашица
Fe^{2+} (жељезо)	mg/l	0	0	0
Mn^{2+} (манган)	mg/l	0	0	0,04
Ca^{2+} (калцијум)	mg/l	16,43	97,74	50,10
Mg^{2+} (магнезијум)	mg/l	5,64	32,34	18,14
NH_4^+ (амонијак као N)	mg/l	0	0,05	0
NO_3^- (нитрати као N)	mg/l	0	0	0
NO_2^- (нитрити као N)	mg/l	0	0	0
Cl^- (хлориди)	mg/l	0	0,35	0,64
SO_4^{2-} (сулфати)	mg/l	10,30	209,00	77,10
p-алкалитет	mg/l	0	0	0
m-алкалитет	mg/l	0,80	2,20	2,20
ph	-	7,45	7,98	8,03

2. Водоснабдјевање из акумулација

Концепција Пројекта је изведена тако да се потребне количине воде (20 l/s) захватају из језера (акумулација) насталих рударском дјелатношћу у оквиру Рудника жељезне руде „Љубија“ у Томашици и након основног третмана транспортују до потрошача.

Основни објекти овог система водоснабдјевања су:

1. Водозахват

2. Пумпна и хлорна станица

3. Резервоар запремине 500 m^3

4. Главни гравитациони цјевовод са свим потребним прикључним шахтовима, муљним и зрачним испустима и арматуром.

У склопу овог рјешења урађен је и Пројекат снабдјевање водом подручја Томашица гдје је утврђена максимална часовна потрошња од 16,58 l/s. У пројекту су јасно дефинисани сви тражени параметри. Како се испоставило, велика цијена коштања платформе за црпљење и обезбјеђивање непосредне зоне санитарне заштите су захтјевале другачије рјешење.

3. Водоснабдјевање из постојећих бунара

Приликом дефинисања изворишта за будући водоводни систем „Томашица-Приједор“ и у сарадњи са Рударским институтом Приједор (Елаборат о класификацији, категоризацији и прорачуну резерви на локалитету Томашица код Приједора) у подручју бившег површинског копа Јужна Томашица откривен је бунар БТ-4, који је

изграђен за потребе одводњавања површинског копа 1977. године. Податак да је у фази разраде и тестирања овог бунара утврђена његова издашност од 25 l/s био је мотив за провјеру његовог тренутног стања и утврђивање евентуалне могућности његове регенерације и стављања у функцију водоснабдјевања.

Основна намјера је била да се провјере количине воде које се оваквим објектом могу захватити из кречњачких издани овог подручја. На основу Програма који је израдио РГФ из Београда покушали смо очистити бунар до мутноће испод 1 NTU што је стандард за употребу воде за пиће.

Активности су проведене у двије фазе. Прву фазу је обавио Хидро-коп из Бањалуке и за веома кратко вријеме су постигнути охрабрујући резултати. Нажалост, због ограничених средстава овај посао није завршен до краја. Надали смо се да ће Водовод успјети само пумпањем извршити испирање бунара до потребне мутноће али нисмо у томе успјели зато што су пукотине, поре и каврене кречњачке издани испуњени лимонитном рудом која се веома тешко испира. Чињеница да је бунар БТ-4 лociран у непосредној близини бившег површинског копа указује на то да је присуство рудних материјала у овој зони велико и да та зона није поволјна за формирање изворишта за водоснабдјевање.

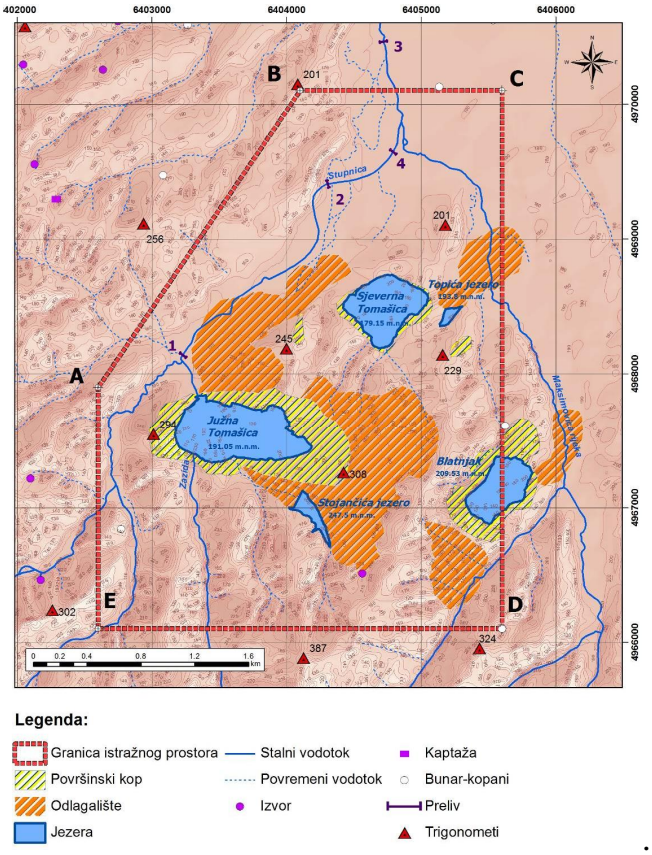
Капацитет црпљења од 55 l/s уз мало снижење нивоа од 10 m указује на велике резерве воде у кречњачким изданима овог подручја што нас охрабрује у намјери да се проведу остала планирана геофизичка и хидрогеолошка истраживања овог подручја и одреде нове повољније микролокације за бушење бунара за водоснабдјевање.

Све резултате проведених истраживања смо послали на РГФ у Београд, професору Веселину Драгишићу који нам је послао слиједеће мишљење и приједлоге:

„Изведена истраживања у локалности Јужна Томашица имала су за циљ проверу резултата добијених пре око 40 година. Током седамдесетих година прошлог века у простору рудних лежишта Јужна и Северна Томашица изведен је значајан обим истражног бушења пијезометара и бунара. Израдом и тестирањем појединих бунара (БТ-4 и БТ-5) у локалности Јужна Томашица констатовано је да се из карбонских карстификованих кречњака могу захватити значајне количине подземних вода (више од 25 l/s по бунару).

Четрдесет година након израде ових хидрогеолошких објеката требало је потврдити резултате који треба да послуже за пројектовање нових истражних бушотина и бунара. Тестирање бунара БТ-4 показало је да је карстна издан у подручју Јужне Томашице изузетно богата водом и да се из бунара БТ-4 може захватити више од 50 l/s по једном бунару. Но квалитет подземних вода у бунару БТ-4 није задовољавајући услед повишених концентрација гвожђа, мангана, као и због повећане мутноће. БТ-4 може захватити више од 50 l/s по једном бунару.

Овакав хемијски састав је последица присуства руде гвожђа у кавернама и пукотинама, а вероватно и близине површинског копа и рудних одлагалишта. То и није велико изненађење за ауторе Програма хидрогеолошких истраживања у подручју Томашице, који су будућа хидрогеолошка истарживања и пројектовали ван контура површинских копова и рудних одлагалишта.



Слика 2. Орохидрографска карта ширег подручја Томашице [6]
Figure 2. Orohydrographic map of the wider Tomašica area [6]

Сматрамо да се даља хидрогеолошка истраживања треба да изведу према урађеном Програму обзиром да се у подручју предвиђеном за њихову реализацију не очекују рудна тела, као и да је на основу више истражних бушотина констатован одличан квалитет подземних вода:

- Пре израде истражних бушотина и бунара треба извести геофизичка истраживања како би се добили подаци о дубинама водоносних зона, њихове дебљине и сл.
- Будућа геофизичка истраживања су конципирана тако да се њихова реализација на терену започне од већ познатих објеката где су бушењем потврђене карактеристике водоносних зона, као што је то случај са бунаром БТ-4 и другим хидрогеолошким објектима.

Након завршених геофизичких испитивања, а у случају позитивних резултата приступило би се изради истражних хидрогеолошких бушотина (пијезометара) и даље истражно-експлоатационих бунара“. [6]

4. Нова локација

У оквиру Елабората о класификацији, категоризацији и прорачуну резерви на локалитету Томашица код Приједора вршено је испитивање на изворишту „Стубло“ и Бунару БТ-1 које се користе за снабдјевање питком водом рудника Омарска. Како је капацитет ових објеката водоснабдјевања недовољан за потребе водовода, одлучено је да се на овим локалитетима изврше истражни радови и да се са више спрегнутих бунара дође до довољне количине воде.

За потребе обезбјеђења додатних количина воде за водоснабдјевање јужног дијела града Приједора, 2017. године је урађен Пројекат детаљних хидрогеолошких истраживања подземних питких вода за потребе водоснабдјевања на локацији Томашица код Приједора. У оквиру ових радова изведено је бушење, каротажна мјерења, зацјевљење, испирање, разрада и тестирање истражно-експлоатационог бунара ИЕБСТ-1.

Радови на извођењу бунара су изведени у периоду јуни - јули 2019. године. Укупна дубина бунара износи 102 m, зацијевљење челичом колоном је до 24 m, након чега је уграђен Џонсон филтер дужине 12 m и на крају таложник дужине 4 m, односно конструкција бунара износи 40 m.

Табела 3. Геолошки састав профила бушотине
Table 3. Geological composition of the well profile

дубина		састав
0,0	0,2	насип
0,2	2,8	глина, сива
2,8	3,5	шљунак
3,5	4,2	шљунак, заглињен
4,2	4,8	глина, шљунковита
4,8	6,6	шљунак, црвени
6,6	8,4	глина, шљунковита црвена
8,4	17,5	глина, црвена
17,5	18,1	глина, шљунковита
18,1	21,5	глина
21,5	22,2	бреча, конгломератична
22,2	26,2	кречњак
26,2	27,2	каверна
27,2	31,2	кречњак, испуцао
21,2	40,2	кречњак, компактан
40,2	41,0	каверна
41,00	96,0	кречњак, компактан
96,0	102,0	кречњак, нестабилна зона

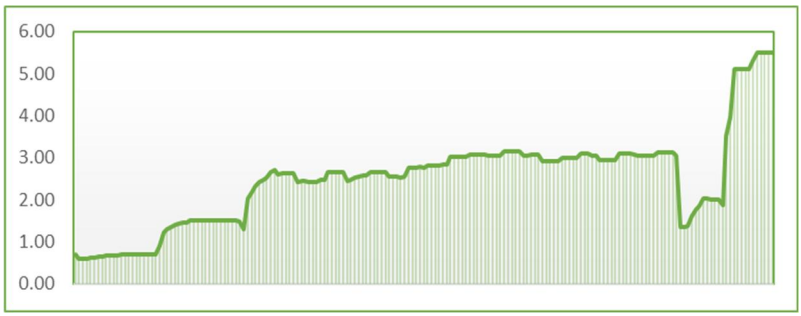
Из табеле су видљиве двије каверне на дубини 26,2-27,2 m и 40,2-41,0 m које су у току бушења запуњене осталим материјалом и глином из исплаке и чије испирање би могло потрајати.

Како би се бунар детаљно очистио и тестирао „Водовод“ а.д. Приједор је приступио пробном црпљењу до коначног избистравања и одређивања осталих параметара, попут капацитета, динамичког нивоа и анализа воде. Направљена је привремена конструкција бунара са бунарском пумпом Грундфос СП 215-2 37 кW, капацитета H_{max}-65m, Q_{max}-275m^3/h, која је постављена на 20 метара од коте тла.

Пробно црпљење је вршено од 23.09.2019. године од 17.00 часова до 10.10.2019. године 08.00 часова. Рад је вршен са четири различита капацитета црпљења и то: 10,20,30 и 40 l/s. Наизмјенично је вршено гашење пумпи ради контролисања поврата нивоа и ради, код поновног паљења, изазивања хидрауличких удара који су вршили испирање каверни. Из каверни је избачена већа количина ситног материјала здробљеног бушењем и микронских честица глине из исплаке и из саме каверне.

На графиконима који слиједе је приказано кретање протока, нивоа и мутноће током пробног црпљења. Евидентно је да приликом гашења и поновног паљења, односно изазивања хидрауличких удара, мутноћа расте. То је узроковано испирањем честица материјала из каверни. Такође, при константном протоку мутноћа опада, што значи да се честице умире, односно пред крај црпљења, честице су махом избачене из бунара.

Дијаграм 1. Проток приликом пробног црпљења
Diagram 1. Flow rate during test pumping



Дијаграм 2. Ниво приликом пробног црпљења
Diagram 2. Level during test pumping

Табела 4. Резултати физичко - хемијских анализа бунара ИЕБСТ-1
Table 4. Results of physical and chemical analyses of the IEBST-1 well

Анализирани параметар	Мјерна јединица	Референтна вриједност	Вриједности
мутноћа	NTU	≤1	1,75
температура узорка	°C	-	10,5
концентрација јона водоника (pH)	Ph jedinica	6.8-8.5	8,3
хлориди	mg/l	≤250	8,3
утрошак $KMnO_4$ (присуство органских материја)	O_2 mg/l	≤5	1,0
амонијак	mg/l	≤0.50	<0,1
нитрити	mg/l	≤0.50	<0,01
нитрати	mg/l	≤50	4,4
Електро проводљивост	µS/cm /20°C	≤2500	377/20,1°C
Fe (жељезо)	µg/l	≤200	60
Mn (манган)	µg/l	≤50	1,0

5. Закључак

Након дуготрајног и обимног хидрогеолошког истраживања, претпостављамо да је пронађен најефикаснији и најекономичнији начин обезбјеђења водоснабдјевања за око 6.000 становника који насељавају подручја уз саобраћајницу Приједор-Томашица (Гомјеница, Петрово, Миљаковци, Гаћани, Саничани, Ракелићи, Пејићи, Томашица, Криваја, Буснови), на десној обали Сане и подручја уз саобраћајницу Приједор-Сански Мост (Зецови, Расавци, Ништавци, Алишићи) на лијевој обали Сане.

Укључење у систем новоизграђеног истражно - експлоатационог бунара ИЕБСТ-1 би задовољило дугогодишње потребе становништва ових подручја са питком водом, те би покривеност подручја обухваћеног водоснабдјевањем била преко 90%.

6. Литература

[1] *Извјештај о резултатима друге фазе хидрогеолошких истраживања и испитивања на подручју ревира „Томашица“*, Геоинжењеринг Сарајево, ООУР Институт за геотехнику и хидрогеологију, Књига В, Сарајево 1976.

[2] Цвијић Р, *Геоменаџмент у функцији коришћења и развоја минералних ресурса љубијске металогенетске области*; Монографија, Приједор, стр. 98-101, 2004.

[3] *Предстудија о економској оправданости истраживања вода на локалитету „Томашица“ код Приједора*, Рударски институт Приједор, Приједор 2005.

[4] *Пројекат детаљних хидрогеолошких истраживања на утврђивању режима, квалитета и количина воде Томашичких језера*, Рударски институт Приједор, Приједор 2009.

[5] Цвијић Р, Иванковић Б, *Елаборат о класификацији, категоризацији и прорачуну резерви вода на локалитету Томашица код Приједора са стањем на дан 01.06.2016. године*; Приједор 2016.

[6] Драгишић В. Стручно мишљење о резултатима изведених радова у локалности Јужна Томашица и правцима даљих истраживање; Београд 2016.

[7] *Извјештај о чишћењу и разради бунара БТ-4 Јужна Томашица*, Водовод а.д. Приједор, 2016.

[8] *Извјештај о геофизичким истраживањима на подручју Томашице код Приједора*, Рударски институт Приједор, Приједор 2016.

[9] *Извјештај о пробном црпљењу ИЕБСТ-1 бунара Томашица*, Водовод а.д. Приједор, 2019.

Dragan Marinović[1], Svetlana Belošević[2]
Zoran Milićević[3], Dušanka Marinović[4]
Jovana Belošević[5]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25189M

KVALITET BAZENSKE VODE GRADA KRALJEVA

Rezime: Zadovoljstvo korisnika, uz brigu o kvalitetu životne sredine, prioritet je savremenog društva. Važan deo urbanih sredina predstavljaju bazeni za kupanje, pružajući ne samo osveženje tokom letnjih meseci, već i prostor za rekreaciju, druženje i fizičku aktivnost. Kvalitet vode je neizostavan faktor prilikom analize bazena za kupanje. Bez obzira na estetiku i udobnost prostora, bezbednost vode je suštinski element koji utiče na zadovoljstvo korisnika i njihovu zdravstvenu dobrobit. Ovaj rad prikazuje kontrolu kvaliteta vode bazena za kupanje grada Kraljeva. Kontrola kvaliteta vode u bazenima obuhvata stalno merenje i praćenje higijenske i zdravstvene ispravnosti vode merenjem fizičko hemijskih i mikrobioloških parametara. Metode ispitivanja i kontrole kvaliteta vode bazena za kupanje moraju se sprovoditi u skladu sa odgovarajućim pravilnicima. U ovom radu su prikazani rezultati ispitivanja vode bazena za kupanje, grada Kraljeva. Uzorci su uzorkovani u periodu od početka rada gradskog bazena, kraj juna i u toku jula i avgusta 2025. godine. Rad obuhvata rezultate kvaliteta vode bazena za kupanje grada Kraljeva. U uzorcima su rađena mikrobiološki i fizičko hemijski parametri radi očuvanja kvaliteta bazenske vode i zaštite zdravlja stanovništva grada Kraljeva odnosno kupača.
Ključne reči: bazenska voda, mikrobiološki, fizičko hemijski parametri

QUALITY OF SWIMMING POOL WATER IN THE CITY OF KRAJLEVA

Abstract: User satisfaction, along with care for the quality of the environment, is a priority of modern society. Swimming pools are an important part of urban areas, providing not only refreshment during the summer months, but also space for recreation, socializing and physical activity. Water quality is an essential factor when analyzing a swimming pool. Regardless of the aesthetics and comfort of the space, water safety is an essential element that affects user satisfaction and their health well-being. This paper shows the water quality control of the swimming pool in the town of Kraljevo. Water quality control in swimming pools includes constant measurement and monitoring of the hygienic and health correctness of water by measuring physical, chemical and microbiological parameters. Methods of testing and controlling the quality of swimming pool water must be carried out in accordance with the relevant re-

[1] *Zavod za javno zdravlje, Kraljevo, dragan.marinovic@zjzkv.org.rs, ORCID: 0000-0001-9257-1596*
[2] *Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, svetlana. belosevic@pr.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3555-054X*
[3] *Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Ekonomski fakultet, Kosovska Mitrovica, zoran.milicevic@pr.ac.rs, ORCID 0000-0001-7805-0137*
[4] *Vojnomedicinska akademija - VMA, Beograd, dushka97@gmail.com, ORCID: 0009-0001-9422-6355*
[5] *Univerzitet u Beogradu, Farmaceutski fakultet, Beograd, jovanabelosevic2@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6326-4117*

gulations. This paper presents the results of water testing of the swimming pool in the town of Kraljevo. The samples were sampled in the period from the beginning of the operation of the city pool, at the end of June and during July and August 2025. The paper includes the results of the water quality of the swimming pool in the city of Kraljevo. In the samples, microbiological and physical-chemical parameters were tested in order to preserve the quality of the pool water and protect the health of the population of the city of Kraljevo, i.e. the bathers.
Key Words: pool water, microbiological, physical and chemical parameters

1. Uvod

Zadovoljstvo korisnika, uz brigu o kvalitetu životne sredine, prioritet je savremenog društva. Ovaj rad prikazuje kontrolu kvaliteta vode bazena za kupanje. Kontrola kvaliteta vode u bazenima obuhvata stalno merenje i praćenje higijenske ispravnosti vode merenjem fizičko-hemijskih i mikrobioloških parametara. Metode ispitivanja i kontrole kvaliteta bazenske vode moraju se sprovoditi u skladu sa odgovarajućim pravilnicima. Da bi se obezbedila kvalitetna usluga, bezbednost korisnika i ispunili higijenski zahtevi, voda koja cirkuliše u sistemima bazena mora da ispunjava propisane standarde, odnosno da ispunjava postavljene zahteve kvaliteta. Stoga se redovnim kontrolama vode u bazenu i nadzorom opreme bazena mogu postići zadovoljavajući bezbednosni uslovi za korisnike. Najvažnija kontrola kvaliteta bazenske vode je mutnoća, sadržaj slobodnog hlora u vodi i pH vrednost vode. Budući da je oprema za prečišćavanje vode koja se koristi u bazenima, dinamičke prirode, odnosno sadrži rotirajuće komponente (ventilatori, cirkulacione pumpe), pravovremeni pregledi i ispitivanja prema tehničkim zahtevima mogu otkloniti potencijalne kvarove i održati ispravnost i pouzdanost sistema. Izuzetno je važno često čistiti ili menjati delove opreme koji se brzo zaprljaju, kao što su sonde, creva, filteri.

Gradski bazeni su uglavnom javni bazen otvorenog tipa i namenjeni su svim korisnicima za potrebe rekreacije, plivanja, sportskih aktivnosti, odmora i drugih usluga. Rad bazena se sprovodi u skladu sa važećom zakonskom regulativom, zahtevima međunarodnih standarda i primenjenih sistema kvaliteta, kao i svim internim propisima, pravilima i uputstvima. Gradski bazen stavlja korisnika u prvi plan i najviše pažnje posvećuje ispunjavanju zahteva korisnika i održavanju visokog nivoa zadovoljstva korisnika.

2. Eksperimentalni deo

U radu su prikazani rezultati kontrole, higijenske ispravnosti bazenske vode, grada Kraljeva (slika 1). Bazen grada Kraljeva se nalazi na levoj obali reke Ibra i pripada Sportskom centru „Ibar“. On je javni bazen otvorenog tipa i namenjen je svim korisnicima. Uzorci su uzorkovani od početka rada gradskog bazena, odnosno od kraja juna, celi juli i polovina avgusta meseca 2025. godine. Sportski centar „Ibar“ i Zavod za javno zdravlje u Kraljevu imaju sklopljen ugovor o ispitivanju, sa ciljem kontrole kvaliteta bazenske vode.

Bazenska voda mora ispunjavati određene kriterijume i postavljene uslove kvaliteta u skladu sa odgovarajućim propisanim normativima. Kvalitet bazenske vode propisan je članom 3 priloga 2, Pravilnika o zdravstvenoj ispravnosti bazenskih voda *Sl. Glasnik* broj 30/2017 i 97/2017 [1]. Moraju se takođe zadovoljiti norme Pravilnika o dezinfekciji i pregledu vode za piće (*Sl. gl. SRS* br. 60/81) [2] Pravilnika o načinu uzimanja uzoraka i

metodama za laboratorijsku analizu vode za piće (*Sl. gl. SFRJ* br. 33/87) [3] i to Standardnim metodama za ispitivanje higijenske ispravnosti vode [4] ili Validovanim metodama Zavoda za javno zdravlje Kraljevo (VMK).

Slika 1. Gradski bazen grada Kraljeva
Picture 1. City pool of the city of Kraljevo

Kvalitet bazenske vode direktno zavisi od kvaliteta vode u cirkulaciji, vode za dopunjavanje sistema, atmosferskog zagađenja i zagađenja od kupača. Da bi se obezbedili svi kriterijumi za kvalitetno prečišćavanje vode i da bi se ispunili zdravstveni uslovi bazenske vode, neophodna je kontrola fizičko hemijskog kvaliteta bazenske vode. Uz odgovarajuću kontrolu fizičko hemijskih karakteristika bazenske vode, obezbeđuje se pravilna dezinfekcija vode, što je neophodan uslov za sprečavanje zagađenja bazenske vode i bezbedno korišćenje bazena.

Fizičko hemijska analiza uzoraka bazenske vode vršila se:

- Volumetrijskim metodama (kvantitativno određivanje organske materije utrošak $KMnO_4$, sadržaj hlorida Cl)
- Elektrohemijskom metodom (vrednost pH),
- Spektrofotometrijskim metodama (sadržaj: hlorida),
- Komparatorska metoda (slobodni rezidualni hlor),
- Turbidimetrijskom metodom (mutnoća).

Instrumenti koji su se koristili za pomenuta ispitivanja su: pH-metar (Hanna), spektrofotometar-Lambda 2 (Perkin Elmer), turbidimetar (Hach), komparator.

Fizičko-hemijski parametri ispitivanja su određeni Pravilnikom o zdravstvenoj ispravnosti bazenskih voda (*Sl. glasnik* broj 30/2017 i 97/2017). Granične vrednosti za fizičko-hemijske parametre su date u tabeli 1.

Pored fizičko-hemijskih svojstava, voda u bazenu mora da ispunjava potrebne mikrobiološke zahteve. Da bi se utvrdio mikrobiološki kvalitet bazenske vode, potrebno je izvršiti uzorkovanje i analizu vode. Osnovni zadatak pri ispitivanju mikrobioloških karakteristika bazenske vode je uzimanje reprezentativnog uzorka, na osnovu kojeg se mogu dobiti svi važni parametri kvaliteta bazenske vode.

Tabela 1. Parametri fizičko hemijskog ispitivanja i njihove granične vrednosti
Table 1. Physical and chemical test parameters and their limit values

Redni broj	Parametar	Jedinica mere	Donja gr. vrednost	Gornja gr. vrednost	Oznaka metode
1	Temperatura	ºC	-	-	SRPS H.Z.106/1970
2	pH vrednost	-	6.5	7.8	SRPS EN ISO 10523:2016
3	Mutnoća	NTU	-	≤5	P-IV-4B
4	Utrošak $KMnO_4$	mg/l	-	≤20	P-IV-9a
5	Hloridi Cl	mg/l	-	≤300	SRPS ISO 9297/1
6	Slobodni rezidualni hlor	mg/l	0,1	1.0	P-V-18/B

Pravilno uzimanje uzorka vode za njegovu analizu je ključno, jer se samo na taj način može dobiti kvalitetan uvid u stanje bazenske vode, odnosno reprezentativni rezultati na osnovu kojih se prave dalji planovi tretmana bazenske vode. Veći broj mikrobioloških metoda ispitivanja sprovodi se prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće (*Sl list SRJ* br. 42/98 i 44/99 i *Sl glasnik RS* br. 28/2019) [5].

Mikrobiološka analiza pijaće vode oduhvatila je sledeće mikrobiološke parametre:

- Ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija
- Koliformne bakterije fekalnog porekla
- Ukupne koliformne bakterije
- Sulfitoredukujući sporogeni anaerobi
- Pseudomonas aeruqinosa
- Streptokoke fekalnog porekla i
- Proteus vrste.

Mikrobiološki i fizičko hemijski parametri bazenske vode urađeni su u laboratorijama Zavoda za javno zdravlje u Kraljevu.

3. Rezultati i diskusija

Dobijeni rezultati ispitivanih-fizičko hemijskih i mikrobioloških parametara u bazenskoj vodi grada Kraljeva, a uzetih u toku kraja juna i celog jula i polovine avgusta 2025. godine, ukupno 25 uzoraka i to u junu 5 u julu 12 i u avgustu 8 dati su u tabeli 2.

Dobijeni rezultati daju presek trenutnog stanja kvaliteta vode za kupanje bazena grada Kraljeva u toku njegovog rada u junu, julu i avgustu 2025. Rezultati pokazuju da zahtevima: Pravilnika o zdravstvenoj ispravnosti bazenske vode i Pravilnika o higijenskoj ispravnosti

vode za piće u toku 2025. sa aspekta fizičko hemijske i mikrobiološke analize, nije bilo neispravnih uzoraka.

Tabela 2. Rezultati ispitivane vode bazena za kupanje grada Kraljeva u 2025. godini.
Table 2. Results of the tested water of the swimming pool of the city of Kraljevo in 2025.

	FIZIČKO HEMIJSKA			MIKROBIOLOŠKA ANALIZA	
	Datum uzorkovanja	Ispravnost		Ispravnost	
		Neisp.	Ispra.	Neisp.	Ispra.
JUNI 2025.	21.06.	/	+	/	+
	23.06	/	+	/	+
	26.06.	/	+	/	+
	28.06	/	+	/	+
	30.06	/	+	/	+
JULI 2025	03.07.	/	+	/	+
	05.07.	/	+	/	+
	07.07.	/	+	/	+
	10.07.	/	+	/	+
	12.07.	/	+	/	+
	14.07.	/	+	/	+
	19.07.	/	+	/	+
	21.07.	/	+	/	+
	24.07.	/	+	/	+
	26.07.	/	+	/	+
	28.07.	/	+	/	+
	31.07.	/	+	/	+
AVGUST 2025	02.08.	/	+	/	+
	04.08.	/	+	/	+
	07.08.	/	+	/	+
	09.08.	/	+	/	+
	11.08.	/	+	/	+
	14.08.	/	+	/	+
	16.08.	/	+	/	+
	18.08.	/	+	/	+
UKUPNO	25	0	100%	0	100%

4. Najčešće neusaglašenosti u kontroli vode bazena za kupanje

Najvažnije preventivne radnje u obezbeđivanju kvaliteta bazenske vode su redovno čišćenje sondi i kućišta od hlora i pH vrednosti, čišćenje filtera pumpi, uključujući moguću zamenu potrošnog materijala, oštećenih elemenata ili delova bazenske opreme (ventili, elektronski elementi, sistem filtera, sistem za automatsko doziranje hemijskih sredstava). U slučaju da se pojave neusaglašenosti, potrebno je primeniti korektivne radnje kako bi se uočene neusaglašenosti što pre otklonile.

U tabeli 3. navedene su moguće neusaglašenosti, uzroci i korektivne i preventivne radnje koje se primenjuju u cilju otklanjanja neusaglašenosti i njihovog mogućeg ponavljanja.

Tabela 3. Najčešće neusaglašenosti, uzroci i korektivne i preventivne mere
Table 3. The most common non-conformities, causes and corrective and preventive measures

Moguće neusaglašenosti	Uzrok	Korektivne i preventivne radnje
Zamućenost vode u bazenu	• Formiranje kamenca zbog visokog pH. • Taloženje granula narandžaste boje . • Nedostatak potrebne dezinfekcije (hlorisanje). • Predugo vreme promene vode • Spor protok vode.	• Kontrolišite pH vode i povećajte doziranje kiseline da biste postigli optimalni pH. • Kontrolišite da voda za popunjavanje ne sadrži Fe. Ako sadrži, treba instalirati predfilter za zadržavanje gvožđa. • Proverite da li pumpa obezbeđuje potrebnu brzinu protoka.
Loš kvalitet prečišćene vode	• Formirani kanali unutar filtera. • Retko ili neodgovarajuće pranje filtera. • Nepravilni položaji kontrolnih ventila. • pH vrednost ili sredstva za dezinfekciju nisu u granicama zadatih vrednosti.	• Proverite da li je pad pritiska filtera u granicama. • Proverite da li su vremena pranja filtera odgovarajuća. • Proverite ispravan rad ventila, zamenite oštećene delove.
Visok pad pritiska kroz filter	• Koagulacija punjenja filtera. • Prisustvo stranih tela u distribuciji cevi. • Nepravilan rad pumpi.	• Uklonite nedostatke, strana tela.
Minerali za filtriranje u bazenu	• Neispravna flokulacija. • Formirani kanali unutar filtera.	• Ispraznite filter i napunite ga prema uputstvima.

5. Zaključci

Analizom mikrobioloških i fizičko-hemijskih parametara u 25 uzoraka bazenske vode za kupanje ispitivanih u toku kraja juna, celog jula i polovine avgusta meseca 2025. godine, iz gradskog bazena grada Kraljeva može se zaključiti:

Od 25 ispitivanih uzoraka bazenske vode za kupanje u toku 2025. godini svi uzorci su bili ispravni u pogledu fizičko-hemijske i mikrobiološke ispravnosti.

Kvalitet bazenske vode za kupanje, grada Kraljeva zadovoljava norme Pravilnika o zdravstvenoj ispravnosti bazenskih voda (*Sl. glasnik* broj 30/2017 i 97/2017) i Pravilnika o higijenskoj ispravnosti vode za piće (*Sl. list SRJ* broj 42/98, 44/ 99 i *Sl. glasnik RS* br. 28/2019).

Kompletan sistem bazenske tehnologije je uspostavljen tako da teži da obezbedi tražene zahteve i željeni nivo kvaliteta bazenske vode. Najveća pažnja i koncentracija posvećena je načinima sprovođenja kontrole kvaliteta bazenske vode koji su prikazani u radu i kojima se ostvaruje praćenje izmerenih vrednosti i efekti procesa na osnovu kojeg se upravlja radom čitavog sistema.

Metode kontrole kvaliteta vode u bazenu imaju veliki uticaj na zdravstvenu bezbednost korišćenja bazenskih usluga kao i na proces održavanja i dugotrajan rad celog bazena.

Poseban značaj kontrole kvaliteta je blagovremeno prepoznavanje određenih neusaglašenosti u radu sistema, te mogućnost preduzimanja preventivnih mera i aktivnosti kojima se sprečava nastanak nepravilnosti uz mogućnost kontinuiranog unapređenja svih procesa.

Upotreba savremene opreme i uređaja za automatsko merenje zadatih parametara u velikoj meri obezbeđuje fleksibilnost u radu i pruža dodatnu sigurnost u slučaju promene kvaliteta bazenske vode.

Važno je istaći da pravilno upravljanje sistemima bazenskih postrojenja i povezivanje njihovih elemenata doprinosi smanjenju kvarova i boljem praćenju rada postrojenja, te unapređuje proces kontrole kvaliteta bazenske vode.

6. Literatura

[1] Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti bazenskih voda*, Službeni glasnik SRS* broj 30/2017 i 97/2017.

[2] Pravilnik o dezinfekciji i pregledu vode za piće*, Službeni glasnik SRS* broj 60/81 i 97/2017.

[3] Pravilnika o načinu uzimanja uzoraka i metodama za laboratorijsku analizu vode za piće, *Službeni glasnik SFRJ* broj 33/87.

[4] Poček B, *Voda za piće, standardne metode za ispitivanje higijenske ispravnosti*, Savezni Zavod za Zdravstvenu Zaštitu, NIR, Privredni pregled, Beograd, 1990.

[5] Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće*, Službeni list SRJ* broj 42/98, 44/99 i *Službeni glasnik RS* broj 20/2019, 1999.

[6] Dalmacija B, Agbaba J, Klašnja M, urednici. *Savremene metode u pripremi vode za piće* I izdanje. Novi Sad: Futura; 2009.

[7] Marinović D, Dimitrijević N, Savić V, Stojanović M, Popović D, Kvalitet vode za piće iz seoskih vodovoda posle majskih poplava 2014. godine u okolini grada Kraljeva, *Tehnika* 2016.

[8] Marinović D, Dimitrijević Z, Milićević Z, Jugović Z, Stojanović M, Marinović D, Kvalitet vode alternativnih izvora grada Kraljeva u 2018-2019, Zbornik radova „*Vodovod i kanalizacija“* Kraljevo, 2020,

Александар Стојановић[1]
Слободан Стојановић[2]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25197S

ОСТВАРИВАЊЕ ПРИРУБНИЧКИХ ВЕЗА У КОМПЛИКОВАНИМ УСЛОВИМА УГРАДЊЕ

Резиме: Циљ овог рада је да прикаже, на што сликовитији начин, неке од компликованијих примера из праксе у којима је било потребно остварити прирубничку везу између цеви у водоводним системима, а у нади да ће приказано бити од помоћи свима у решавању истих или сличних проблема када се са њима сусретну. Рад је превасходно базиран на различитим проблемима који настају приликом реконструкција постојећих цевовода, као и током изградње нових, а нарочито у случајевима који настају услед несаосности и угаоног одступања између прирубница којима треба остварити међусобни спој.
Кључне речи: прирубница, спој, оса, угао, одступање

ESTABLISHING FLANGED CONNECTIONS UNDER COMPLEX INSTALLATION CONDITIONS

Abstract: The aim of this paper is to illustrate, as vividly as possible, some of the more complex real-life cases where it was necessary to establish a new flanged connections between pipes in water supply systems, with the hope that the presented examples will be helpful to others in resolving some of the same or similar issues when they encounter them. The paper is primarily based on various problems which arise during the reconstruction of existing pipelines, as well as the construction of the new ones, particularly due to misalignment and angular deviation between flanges that need to be connected.
Key Words: flange, connection, axis, angle, deviation

1. Прирубничка веза

Водоводни системи су изузетно сложени системи, и као такви изискују изузетну пажњу при пројектовању, извођењу радова и самој експлоатацији.

Сваки систем је отпоран онолико колико је јак његов најслабији члан. Ова древна истина је добра почетна основа и за оно што ће бити тема овог рада. Наиме, често се дешава да услед изузетно велике битности (и цене) оних најглавнијих елемената система (пумпе, вентили, затварачи - али и саме цеви) прирубничке везе буду сматране за нешто што је само по себи јасно и што не изискује никакву посебну пажњу. Али ово није увек случај.

[1] *АРМАС, Београд, astojanovic@armas.co.rs*
[2] *АРМАС, Београд, sstojanovic@armas.co.rs*

Сваки прирубнички спој је дефинисан кроз основне параметре називног пречника цеви (DN) и називног притиска цеви (PN). Ово даље, а на основу стандарда EN 1092-2, дефинише подеони круг на ком се налазе отвори за остваривање споја помоћу вијчаних веза. Овај подеони круг, заједно са одређеним бројем отвора дефинисаних димензија, мора бити исти на обе прирубнице које се спајају како би била омогућена прирубничка веза. Није мали број проблема који у пракси настају услед неразумевања ових основних параметара, или избора неодговарајућих или непотпуних података при одређивању потребне арматуре или осталих елемената за уградњу. Међутим, како ово није тема овог рада, нећемо се бавити тим проблемима који су готово увек изазвани недовољном пажњом или незнањем појединаца.

Оно што овај рад жели да прикаже јесу проблеми који настају и након придавања све потребне пажње неопходним параметрима и када се, поред свих напора, јаве проблеми при остваривању прирубничких веза, а услед околности које настају приликом радова, како при постављању новог цевовода, тако и приликом реконструкције постојећег.

2. Угаоно одступање

Приликом сваког постављања новог цевовода, а нарочито приликом реконструкције постојећег, увек се јавља вероватноћа да радови неће проћи у циљаним околностима, а један од тих параметара је и да међусобни угао између две цеви при спајању буде такав да прирубнице буду међусобно паралелне, како би међуприрубнички заптивач био равномерно и правилно оптерећен са обе стране, са циљем омогућавања поуздане заптивености, али и спречавања оптерећивања елемената споја. Ово, наравно, често није случај.

Услед услова на терену, недовољне пажње посвећене припремним радовима, несавршености опреме, као и увек присутном људском фактору, а често услед веома кратких рокова за извођење радова, настаје угао између две прирубнице предвиђене за остваривање везе. Са порастом овог угла између две прирубнице расту и проблеми, а нарочито за цеви великих пречника.

Како би се овај проблем отклонио, постоје различите методе, од класичних „импровизованих“ радова на лицу места, до просте примене грубе силе како би се прирубнице повезале. Оно што је готово увек заједничко тим, нажалост, уобичајним методама је кратак рок њиховог дејства. Наравно, узрок овоме је што на тај начин недовршен и оптерећен спој постаје слаба тачка у систему, који ионако има својих радних, дневних, периодичних и сезонских гибања.

Како би се предупредиле последице наведеног деловања, најбољи начин је имати посебни елемент споја који ће на себе преузети несавршености постављања цеви и њихових прирубница, а како би се сам прирубнички спој растеретио. Један од изузетних начина да се ово постигне је уградња подесивог прирубничког елемента између прирубница које се спајају. Идеја је да се простим континуалним закретањем једне половине таквог елемента у односу на другу, компензује било који угао који постоји између две прирубнице које треба да остваре спој.

Слика 1. Приказ могућих изгледа везе и покривања угаоноих одступања користећи Подесиви прирубнички заптивач - ППЗ, DN100
Figure 1. View of possible flange connections and coverage of angular deviations using Adjustable flange gasket - PPZ, DN100

Овакав елемент - Подесиви прирубнички заптивач (ППЗ) је далеко напредније решење од често коришћених тзв. „косих гума“, које имају само одређени угао за који се могу уградити и немају могућност подешавања, док ово, новоустановљено решење покрива било који угао у распону од 0° до 8°.

Слика 2. Приказ подесивог прирубничког заптивача - ППЗ, као и изглед истог у случајевима када покрива углове од 0° (горе) и 8° (доле)
Figure 2. View of the Adjustable flange gasket - PPZ and its appearance in cases when 0° (top) and 8° (bottom) angles are covered

Наравно, како би ово решење, као и свако базирано на решењу од гуме било прихватљиво за пијаћу воду, неопходно је да буде израђено од EPDM-а према стандарду EN 681-1. Треба нагласити да решења заснована на принципу гуме имају своја иманентна ограничења, попут упитне поузданости при заптивању на великим притисцима за цевоводе већих пречника. Зато се у таквим случајевима (за називне пречнике цевовода преко DN200) препоручује решење идентичне намене, али израђено ливењем, како би се осигурала трајна поузданост заптивања, уз неоптерећеност споја, чак и за цевоводе великих пречника (до DN1000).

Слика 3. Приказ могућих изгледа везе и покривања угаоноих одступања користећи подесиви прирубнички прстен - ППП, DN250
Figure 3. View of possible flange connections and coverage of angular deviations using Adjustable flange ring - PPP, DN250

И овде је идеја да се простим континуалним закретањем једне половине арматуре у односу на другу компензује било који угао који постоји између прирубница које треба да остваре спој, тако да Подесиви прирубнички прстен (ППП) на овај начин може покрити било који угао у интервалу од 0° до 6°.

Слика 4. Приказ подесивог прирубничког прстена - ППП, као и изглед истог у случајевима када покрива углове од 0° (горе) и 6° (доле)
Figure 4. View of the Adjustable flange ring - PPP and its appearance in cases when 0° (top) and 6° (bottom) angles are covered

Монтажа наведених елемената за кориговање угаоног одступања је крајње једноставна. У постојеће стање између две прирубнице се умеће подесиви прирубнички елемент и приступа се закретању једне половине у односну на другу док се не погоди затечени угао у конкретном случају.

Слика 5. Приказ уградње Подесивог прирубничког прстена - ППП, DN500
Figure 5. Installation example of Adjustable flange ring - PPP, DN500

Слика 6. Приказ из два погледа решавања угаоног одступања на споју цеви и арматуре уградњом Подесивог прирубничког прстена - ППП, DN300
Figure 6. View from two perspectives of solving angular deviation on connection between pipe and shutter by installing Adjustable flange ring - PPP, DN300

Додатна предност уградње оваквих елемената је у случајевима када се спајају цеви и различите врсте арматуре, где је додатно неповољно када постоји угао између прирубница које треба спојити и где је то угаоно одступање изузетно битно решити без оптерећивања елемената споја.

3. Осно одступање

Други веома чест проблем при спајању прирубница је њихова несаосност, тј. несаосност елемената које треба спојити прирубничком везом. Ово је у својој суштини и сложенији проблем од угаоног одступања, не само због компликованости остваривања прирубничког споја, већ и услед каснијег утицаја на струјање флуида на конкретном месту, са свим особеностима до којих ће доћи. Али, будући да ово није тема рада, фокусираћемо се на прирубнице и начин како да се прирубничка везе оствари што квалитетније. Остваривање прирубничке везе у оваквим случајевима се, нажалост, у пракси најчешће решава свођењем осног одступања на угаоно одступање. Ово се постиже применом механичке силе како би се елементи споја на одређени начин савили или оптеретили до те тачке да се уметањем одређених помоћних елемената може на силу остварити прирубнички спој.

Ово је, наравно, двоструко погрешно. Прво - јер се оптерећује прирубнички спој чиме он постаје слаба тачка у каснијој експлоатацији (као што смо видели и у претходном поглављу, у случајевима када постоји угаоно одступање,) и друго (а још опасније) - јер се оптерећују саме цеви и/или арматура на којима се врши спајање, тј. непотребно се делује на сам материјал ових компоненти.

Слика 7. Приказ вишеосног адаптера, као и изглед истог у случајевима када се слободна прирубница ротира да би се повезала са постојећом

Figure 7. View of the Multiaxis adapter and its appearance in cases when the free flange is rotated in order to make connection with existing flange

Како би се оваква ситуација избегла, изузетно решење је уградња елемента под називом Вишеосни адаптер. Ова специјално израђена арматура омогућава спајање несаосних елемената у веома великом распону несаосности, тј. међусобном положају оса елемената које треба спојити.

Додатна предност је и то што са повећањем називног пречника расте и покривени опсег несаосности који је покривен - 20 mm до DN300, 30 mm у распону DN350-DN600, док за опсег DN700-DN1000 износи 40 mm.

Наравно, приступа се решавању проблема несаосности као на сликама 7 и 8. Пре свега се слободна прирубница благо везује за већ постојећу „фиксирану“ прирубницу цеви или неке друге арматуре (прирубница у црној боји), а закретањем самог тела вишеосног адаптера се решава сама несаосност са остатком система (који би се у овом случају даље повезивао преко горње прирубнице - тела спојнице).

Оно што је суштина Вишеосног адаптера је да је једна прирубница слободна у односу на другу и да се тиме врши омогућавање повезивања елемената између којих постоји несаосност.

Слика 8. Приказ Вишеосног адаптера, као и изглед истог у случајевима када се тело спојнице ротира да би се кориговала постојећа несаосност
Figure 8. View of the Multiaxis adapter and its appearance in cases when the body of the joint is rotated in order to cover exisiting off-axis positions

Допунска предност је и могућност редног повезивања више комада Вишеосног адаптера, како би се нека изузетно велика несаосност отклонила. Ово важи уз претпоставку, наравно, да постоји простор за такву уградњу и несметани хидраулички услови за каснију експлоатацију система.

4. Комбиновано осно и угаоно померање

Није реткост да се услед свих, раније побројаних, фактора приликом извођења радова, а нарочито приликом реконструкције цевовода, дође у ситуацију да на месту споја, где је потребно остварити одређену прирубничку везу, буде затечена ситуација да постоји комбинација и осног и угаоног померања. Ово је свакако и најкомпликованији случај за решавање.

Да би се постигли најбољи резултати, са становишта брзине уградње, као и касније експлоатације, најбоље је приступити проблему да се затечено комбиновано одступање отклони тако што се угаоно одступање (γ на слици 9) покрије применом одговарајућег подесивог прирубничког елемента, док се несаосност (Δ_D на слици 9) решава коришћењем вишеосног адаптера (једног или више њих, а у зависности од специфичности и размера проблема).

У наведеном примеру, две прирубнице (обојене у црно) представљају затечено стање између крајева два цевовода која треба спојити, при чему се јасно уочава да између њих постоји, како угаоно, тако и знатно осно одступање, које је заправо толико изражено да је неопходно користити два комада вишеосног адаптера, између којих је уметнут Подесиви прирубнички заптивач. Сви приказани елементи су DN150.

Слика 9. Приказ отклањања изузетно сложеног проблема комбинованог угаоног и осног померања, користећи напредна АРМАС решења
Figure 9. Example of solving very complex problem of combined angular and axis deviation by using advanced ARMAS solutions

На овај начин се на изузетно иновативан, ефикасан и поуздан начин остварује прирубника веза у изразито компликованим условима уградње.

5. Закључак

Нада аутора је да је овим радом дат што сликовитији приказ, из праксе, неких од веома честих проблема на цевоводима, који настају приликом извођења прирубничких веза, и добру идеју како исте отклонити и и поуздано решити када се са њима сусретне.

Сва наведена решења имају за основни циљ да се уградња изврши без непотребног опетерећивања елемената у споју, а како би се избегли каснији потенцијални проблеми приликом експлоатације.

6. Литература

[1] Архива АРМАС - Фотографије са терена
[2] Архива АРМАС - Студија случаја „Контакт“, 2022.
[3] Архива АРМАС - Графички прикази из Каталога производа, 2024.

Dejan Kubatov [1]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25205K

POZITIVNA ISKUSTVA JKP „VODOVOD“ BEZDAN U IZGRADNJI FABRIKA VODE I SPAJANJE VIKEND NASELJA NA SISTEM VODOSNABDEVANJA

Rezime: U radu je dat pregled istorijata nastanka i razvoja javnog komunalnog preduzeća Bezdan. Dat je pregled izvedenih većih projekata izvedenih od 2016. godine do danas koji su znatno unapredili snabdevanje vodom za piće korisnike JKP „Vodovod“ Bezdan.
Ključne reči: vodovod, tretman vode za piće,vikend naselja, cevovod, Bezdan

POSITIVE EXPERIENCES OF PUBLIC COMMERCIAL COMPANY VODOVOD BEZDAN IN CONSTRUCTION OF WATER FACTORIES AND CONNECTION OF WEEKEND RESORT TO THE WATER SUPPLY SYSTEM

Abstract: The paper provides an overview of the history of the creation and development of the public utility company Bezdan. An overview of the larger projects carried out from 2016 to the present day, which have significantly improved the supply of drinking water to the users of PUC Vodovod Bezdan, is given.
Key Words: plumbing, drinking water treatment, pipeline, Weekend resort Bezdan

1. Uvod

Tokom 1984. godine Bezdan, kao relativno ozbiljno privredno mesto u Vojvodini. donosi odluku, opredeljenjem radnih ljudi, stanovnika i radnih organizacija gradskog naselja Bezdan, da se delom kroz tekući samodoprinos, učešće domaćinstava i učešće radnih organizacija finansira I faza Vodovoda Bezdan, izgradnja cevovoda u većem delu naselja i ugradnja pumpi na izvorištu. II faza izgradnje vodovoda se odnosila na izgradnju postrojenja za preradu vode, koje se sastojalo od sledećih objekata: aeraciona hala, rezervoar za sirovu vodu, filter stanica, crpna stanica, komandni pult, nuz objekti (sanitarija i drugo).

Godine 1990, jednoglasnom odlukom, Mesna zajednica Bezdan donosi odluku o osnivanju Komunalnog preduzeća „Vodovod“ Bezdan sa delatnošću: proizvodnja i distribucija vode, obezbedivši sredstva za rad u iznosu od tadašnjih 200.000 dinara, plus osnovna sreds tva, koja su tadašnjom knjigovodstvenom procenom iznosila oko 2,5 miliona dinara. Broj zaposlenih u tom trenutku je bio sedam radnika, od kojih je jedan izvršioc bio u računovodstvu, jedan je bio rukovodilac, a pet radnika su bili na ostalim poslovima održavanje vodovoda.

[1] *JKP „Vodovod”, Bezdan, kubatovd@yahoo.com, ORCID: 0009-0006-4191-6076*

Dana 30.11.2016. godine održana je 8. sednica Skupštine Grada Sombora na kojoj je doneta Odluka o preuzimanju osnivačkih prava nad KP „Vodovod“ Bezdan (*Sl. list grada Sombora* br. 27/2016) kao i Odluka o osnivanju javnog komunalnog preduzeća „Vodovod“ Bezdan (*Sl .list grada Sombora* br. 27/2016) kojom su u cilju regulisanja pravnog statusa postojećeg komunalnog preduzeća KP „Vodovod“ Bezdan, od strane Grada Sombora preuzeta osnivačka prava i obaveze nad Komunalnim preduzećem „Vodovod“ Bezdan, kao i osnovano novo JKP„Vodovod“ Bezdan.

Javno komunalno preduzeće „Vodovod“ Bezdan je javno preduzeće kome se poveravaju poslovi sakupljanja, prečišćavanja i distribucije vode i odvođenja otpadnih voda na teritoriji naseljenih mesta Bezdan, Bački Breg, Bački Monoštor i Kolut. Pretežna delatnost preduzeća je: skupljanje, prečišćavanje i distribucija vode. JKP „Vodovod“ Bezdan je nakon donošenja navedenih odluka i izvršenog usklađivanja sa Zakonom o javnim preduzećima upisano u registar Agencije za privredne registre pod brojem BD 105521/2016. Pravni naslednik nekadašnjeg preduzeća KP „Vodovod“ Bezdan, je postao JKP „Vodovod“ Bezdan. Danas, JKP „Vodovod“ Bezdan kao javno preduzeće koje obavlja poslove skupljanja, prečišćavanja i distribucije vode, pruža i niz usluga u sklopu svoje osnovne delatnosti. JKP „Vodovod“ Bezdan ima ukupno 13 radnika, na sledećim radnim mestima: direktor - 1 izvršilac, pravnik - 1 izvršilac, finansijsko i knjigovodstveno radno mesto - 1 izvršilac, Služba naplate - 1 izvršilac, Fabrika vode Bezdan – 5 izvršilaca, ekipa za intervencije - 2 izvršilaca, Fabrika vode Bački Breg – 1 izvršilac, Fabrika vode Bački Monoštor - 1 izvršilac.

Od 2016. godine, neposrednim finansiranjem od strane Sekretarijata za vodoprivredu, Grada Sombora i sopstvenih sredstava, direktno i indirektno u JKP „Vodovod“ Bezdan je uloženo preko 1,5 miliona eura u poslove unapređenja rada samog vodovoda. Naime, prethodnih godina rada vodovoda, u kvalitet vode se ili nije apsolutno ništa ulagalo ili se ulagalo veoma malo. Higijenski propisi su vremenom pooštravani u smislu dobijanja kvalitetnije vode za piće, te se moralo pristupiti hitnim aktivnostima u cilju unapređenja gotovog proizvoda.

2. Servisiranje Culligan postrojenja u Bezdanu 2017 . godine

Godine 2017. servisiran je Culligan postrojenje u Bezdanu, izmenjena je ispuna i servisirani su svi ventili.

Slike 1, 2. Pogon u Bezdanu, pre i posle renoviranja
Figure 1, 2. Plant in Bezdan, before and after renovation

3. Izgradnja Fabriku vode u Bačkom Bregu 2019. godine

Godine 2019. otvorili smo Fabriku vode u Bačkom Bregu. Projekat je podrazumevao izgradnju Postrojenja za pripremu vode za piće i on obuhvata:

- izgradnju rezervoara sirove vode zapremine 30 m³,
- opremanje postojeće filter stanice sa opremom za obradu vode iz bunara do kvaliteta vode za piće, prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti za piće,
- projektovani kapacitet postrojenja je 25 m³/h
- izgradnju rezervoara prečišćene vode zapremine 50 m³,
- izgradnju rezervoara vode od pranja filtera zapremine 15 m³,
- potrebne povezne cevovode na postojeću infrastrukturu.

Karakteristike postrojenja:

- kapacitet prerade 25 m³/h (7 l/s)
- vreme rada postrojenja 22 h/d
- maksimalni dnevni kapacitet prerade 22*25= 550 m³/d
- maks. časovna količina vode koja se isporučuje u naselje 50 m³/h (14 l/s)
- maks. dnevna količina vode sa požarom 7,0 l/s + 7,5l/s = 52 m³/h (14.5 l/s)

Slike 3, 4. Fabrika vode Bački Breg
Figure 3, 4. Bački Breg Water Factory

Slika 5, 6. Fabrika vode Bački Breg
Figure 5, 6. Bački Breg Water Factory

3. Izgradnja Fabrike vode u Bačkom Monoštoru

Godine 2021. otvorena je Fabrika vode u Bačkom Monoštoru. Naselje Bački Monoštor se snabdeva pijaćom vodom sa postojećeg izvorišta lociranog na katastarskoj parceli 1532 K.O. Bački Monoštor. Objekti vodosnabdevanja se sastoje iz tri bunara, poveznih cevovoda i objekta u kojem je smeštena hidroforska i elektro oprema. Trenutni kapacitet izvorišta je 20 l/s. Prosečna starost stanovništva iznosi 40,1 godina. U naselju ima 1.346 domaćinstava, a prosečan broj članova po domaćinstvu je 2,91. Bački Monoštor se vodom za piće snabdeva sa PPV Bački Monoštor. Potrošnja vode je 13,1 l/s.

Postrojenje za pripremu vode za piće naselja Bački Monostor je projektovano sa sledećim parametrima:

- kapacitet prerade: 47 m³/h
- vreme rada postrojenja: 23 h/dnevno
- maksimalni dnevni kapacitet prerade: 1.081 m³/dan
- maks. časovna količina vode koja se isporučuje u naselje 79,2 m³/h
- maks. dnevna količina vode sa požarom 75,4 m³/h

Postrojenje se snabdeva sirovom podzemnom vodom iz bunara koji se nalazi na lokalitetu budućeg postrojenja za tretman vode. Osnovne karakteristike sirove vode na lokaciji su:

- povišena boja i mutnoća,
- povećana elektroprovodljivost,
- povećana koncentracija gvožđa, mangana, amonijaka i arsena i velika tvrdoća vode.

U tabeli 1 dat je izvod iz analize vode Instituta za javno zdravlje Vojvodine.

Tabela 1. Tehnološkog postupkak postrojenja u Bačkom Bregu
Table 1. Technological proces of drinking water treatment plant Backi Breg

Red. br.	Tehnološki proces	Broj stepeni procesa	Opis
1	Predhlorisanje / Korektivno hlorisanje	1	Tehnološka oprema za proizvodnju mešovitog dezinfektanta na mestu potrošnje elektrolizom razblaženog vodenog rastvora soli.
2	Filtracija – 1 stepen (UF1 filter)	1	Multimedijalni filter na bazi silikatnog peska i antracita za bistrenje vode i uklanjanje boje i mirisa iz vode
3	Filtracija – 2 i 3 stepen (UFP1 i UFP2 filteri)	2	Multimedijalni filter na bazi silikatnog peska, antracita i mangan dioksida za uklanjanje gvožđa i mangana iz vode
4	Doziranje flokulanta	1	Doziranje flokulanta na bazi polielektrolita na ulazu u dekanter
5	Taloženje	1	Šaržno (dekantacija).

4. Opis tehnološkog postupka

Sirova voda se predhloriše, čime se vrši primarna dezinfekcija vode i oksidacija gvožđa, mangana i arsena, koji se pri tome prevode u taložni oblik, kao i potpuna oksidacija amonijaka. Doziranje dezinfektanta ispred prvog stepena je balansirano tako da zadovolji potrebe oksidacije i obezbedi rezidual aktivnog hlora na izlazu iz trećeg stepena filtracije,

čime se izbegava primarno hlorisanje vode na ulazu u rezervoar čiste vode. Predhlorisana voda se vodi na prvi multimedijalni filter čiju ispunu čine silikatni pesak i antracit. Funkcija filtera je bistrenje i uklanjanje boje i mirisa iz vode. Sa prvog filtera, voda se uvodi na dvostepeni multimedijalni filter (drugi i treći filter) na bazi silikatnog peska, antracita i mangan dioksida. Funkcija filtera je uklanjanje gvožđa i mangana iz vode. Fitrirana voda se skladišti u rezervoaru čiste vode. Voda na ulazu u rezervoar ima rezidual hlora. Na potisu prema potrošačima se vrši korektivno hlorisanje. Voda od pranja filtera se transportuje do dekantera. Na ulazu u dekanter dozira se flokulant na bazi polielektrolita. Po završetku taloženja, voda se iz dekantera recirkulacijom vraća na ulaz rezervoara sirove vode, dok se talog ispušta u ocedni bazen, koji se nakon delimične prirodne dehidratacije vadi iz ocednog bazena i odvozi na deponiju.

Da bi se vodio tehnološki postupak prerade i kvantitativno pratila potrošnja vode, na sledećim pozicijama su postavljeni protokomeri:

- Na potisu između bunara i rezervoara sirove vode
- Na ulazu u filtersku sekciju (ispred prvog filtera)
- Na potisu prema potrošačima.

Uz pomoć automatike se ostvaruje optimalna proizvodnja mešovitog dezinfektanta. Dobijeni rastvor mešovitog dezinfektanta se uz pomoć membranskih pumpi (38) ubrizgava u cevovod. Analizator dobija informaciju o koncentraciji hlora i preko pumpi održava zadatu koncentraciju. Na ovaj način je obezbeđena kontinualna proizvodnja mešovitog dezinfektanta sa automatskom kontrolom procesa, a takođe i automatsko doziranje i merenje rezidualnog hlora.

Slika 7. Fabrika vode Bački Monoštor
Figure 7. Bački Monoštor Water Factory

Slika 8. Fabrika vode Bački Monoštor
Figure 8. Bački Monoštor Water Factory

Slika 9. Fabrika vode Bački Monoštor
Figure 9. Bački Monoštor Water Factory

5. Analiza kvaliteta vode

5.1. Analiza pre puštanja fabrike u rad

Tabela 2. Rezultati hemijske analize pre puštanja fabrike u rad
Table 2. Results of chemical analysis before putting the factory into operation

Rezultati hemijske analize:

Broj protokola: A-02289

Datum završetka analize: 21.8.2019.

Naziv parametra	Rezultat	MDK	Jedinica mere	Oznaka i naziv metode
Miris	Bez	Bez		MH0032 - Odredivanje mirisa u vodi *
Boja	Slabo žuta			MH0031 - Odredivanje boje u vodi *
Mutnoca	0.33	5.00	NTU	MH0001 - Odredivanje mutnoce u vodi
pH	8.1	6.8 - 8.5		MH0002 - Odredivanje pH vrednosti u vodi
Ukupni ostatak posle isparenja na 105 °C	888		mg/l	MH0003 - Odredivanje ukupnog ostatka posle isparenja na 105°C u vodi
Nitriti	<0.005	0.030	mg/l	MH0004 - Odredivanje sadržaja nitrita u vodi
Nitrati	5.1	50.0	mg/l	MH0005 - Odredivanje sadržaja nitrata u vodi
Amonijak	0.24	1.00	mg/l	MH0006 - Odredivanje sadržaja amonijaka u vodi
Hloridi	154	250	mg/l	MH0007 - Odredivanje sadržaja hlorida u vodi
Ukupno gvožde	<0.05	0.30	mg/l	MH0008 - Odredivanje sadržaja gvožda u vodi
Potrošnja KMnO4	18.4	12.0	mg/l	MH0009 - Odredivanje potrošnje KMnO4 u vodi
Elektricna provodljivost	1342	2500	µS/cm	MH0010 - Odredivanje elektricne provodljivosti u vodi
Arsen	0.086	0.010	mg/l	MH0013 - SRPS ISO 11969:2002

* - Metode ispitivanja su van obima akreditacije laboratorije.

Nalaz: Analizirani uzorak vode NE ODGOVARA propisima Pravilnika o higijenskoj ispravnosti vode za pice Sl. list SRJ br. 42/98, br. 44/99, zbog povecanog utroška KMnO4 i sadržaja arsena.

5.2. Analiza posle puštanja fabrike u rad

Table 3. Rezultati hemijske analize posle puštanja fabrike u rad
Table 3. Results of chemical analysis after putting the factory into operation

Rezultati hemijske analize:

Broj protokola: A-01811/2022

Datum početka analize: 7/6/2022.
Datum završetka analize: 7/11/2022.

Naziv parametra	Rezultat	** Merna nesigurnost	MDK	Jedinica mere	Oznaka i naziv metode
Miris	Bez		Bez		MH0032 - Odredivanje mirisa u vodi *
Boja	Bez				MH0031 - Odredivanje boje u vodi *
Mutnoca	0.20	± 0.210	5.00	NTU	MH0001 - Odredivanje mutnoce u vodi
pH	7.2	± 0.050	6.8 - 8.5		MH0002 - Odredivanje pH vrednosti u vodi
Ukupni ostatak posle isparenja na 105 °C	916	± 20.000		mg/l	MH0003 - Odredivanje ukupnog ostatka posle isparenja na 105°C u vodi
Nitriti	<0.005	± 0.002	0.030	mg/l	MH0004 - Odredivanje sadržaja nitrita u vodi
Nitrati	1.4	± 0.100	50.0	mg/l	MH0005 - Odredivanje sadržaja nitrata u vodi
Amonijak	<0.05	± 0.040	1.00	mg/l	MH0006 - Odredivanje sadržaja amonijaka u vodi
Hloridi	88	± 2.000	250	mg/l	MH0007 - Odredivanje sadržaja hlorida u vodi
Ukupno gvožde	<0.05	± 0.050	0.30	mg/l	MH0008 - Odredivanje sadržaja gvožda u vodi
Potrošnja KMnO4	9.4	± 0.500	12.0	mg/l	MH0009 - Odredivanje potrošnje KMnO4 u vodi
Elektricna provodljivost	1388	± 12.000	2500	µS/cm	MH0010 - Odredivanje elektricne provodljivosti u vodi
Arsen	0.003		0.010	mg/l	MH0013 - SRPS ISO 11969:2002

* - Metode ispitivanja su van obima akreditacije laboratorije.
** - Merna nesigurnost se izražava kao proširena merna nesigurnost sa 95% verovatnoće pokrivanja i iskazana je na nivou odgovarajućeg MDK.
Primenjeno pravilo odlučivanja: hipoteza sigurnog odbijanja rezultata uzimajući u obzir mernu nesigurnost (EUROLAB Technical Report No. 1/2017).

Komentar rezultata: Svi analizirani parametri uzorka vode ODGOVARAJU propisima Pravilnika o higijenskoj ispravnosti vode za pice Sl. list SRJ br. 42/98, br. 44/99.

Kvalitet vode za piće posle izrade postrojenja za prečišćavanje vode je pokazao dobre rezultata i voda je ispravna za piće.

6. Izgradnja povezanog cevovoda od Bezdana do Koluta

Godine 2023. završen je projekat izgradnje poveznog cevovoda od Bezdana do Koluta, u dužini od 4.200 metara. Celokupan posao je odradio JKP „Vodovod“ Bezdan sa sopstvenim mašinama i ljudstvom.

Projekat je finansiran u celosti od Grada Sombora u iznosu od 42 miliona dinara.

Naselje Kolut je naselje u Republici Srbiji koje administrativno pripada Opštini Sombor, u Zapadnobačkom okrugu. Prema popisu iz 2011. godine naselje broji 1.327 stanovnika. Od tog datuma broj stanovnika beleži značajan pad. Osnovna škola broji 60 učenika, a stanovništvo se pretežno bavi poljoprivredom. U naselju se nalazi prvi privatni Zoo vrt koji broji preko 100 zivotinja.

Naselje Kolut se snabdeva vodom iz bunara, koji se nalazi u centru naselja. Voda se iz bunara, bunarskim pumpama potiskuje u distributivni sistem preko hidrofora. Distributivna mreža u naselju se sastoji od glavnih magistralnih pravaca i sekundarne mreže. Početkom 2020. godine u naselju je izgrađena dohlorna stanica kojom se poboljšao kvalitet vode. Međutim, i pored novoizgrađene stanice, naselje ima problem sa kvalitetom i količinama vode. Rešenje ovih problema je izgradnja dovodnika kojim će se pijaća voda dovesti iz naselja Bezdan, što je cilj ovog projekta.

Potreban kapacitet vode predstavlja polazni podatak za projektovanje dovodnika od naselja Bezdan do naselja Kolut. On je određen maksimalnom očekivanom potrošnjom konzumnog područja na kom se sistem projektuje.

U nastavku su dati osnovni parametri potrebni za proračun kapaciteta:

- Broj stanovnika: N=1.327 stanovnika
- Specifična potrošnja po stanovniku: q_{spec}= 150 l/st/dan
- Koeficijent dnevne neravnomernosti: K_d=2,0
- Koeficijent časovne neravnomernosti: K_h=2,5

Proračun maksimalne dnevne i časovne potrošnje stanovništva:

- Srednja dnevna potrošnja stanovnika ($Q_{sr,dn}$):
  $Q_{sr,dn} = N * q_{spec} = 1327*150 = 199,05\ m^3/dan = 2,30\ l/s$
- Maksimalna dnevna potrošnja stanovništva ($Q_{max,dn}$)
  $Q_{max,dn} = Q_{sr,dn}*K_d = 199\ 050*2,0 = 398,10\ m^3/dan = 4.61\ l/s$
- Maksimalna časovna potrošnja ($Q_{max,h}$)
  $Q_{max,h}= Q_{max,dn} *K_h =398,10*2,5 = 41,47\ l/h = 11,52\ l/s$
- Protivpožarna potrošnja
  Za naselje Kolut merodavan je jedan požar u trajanju od 2h, a merodavan protivpožarni protok je 10 l/s.

Usvojeno je postrojenje za povišenje pritiska GRUNDFOS HYDRO MPC-E-3 CRIE15-2, proizvodni model 99166908 i ima sledeće karakteristike:

- Max pritisak sistema: 16 bar
- 1 Protok: 12 l/s
- Napor: 20 m pri 87%
- 2 Protok: 14.61 l/s
- Napor: 23.5 m pri 95 %
- Postrojenje radi u režimu 2+1

Slika 10. Pumpna stanica Kolut
Figure 10. Pumping station Kolut

Slika 11. Pumpna stanica Kolut
Figure 11. Pumping station Kolut

Slika 12. Pumpna stanica Kolut
Figure 12. Pumping station Kolut

JKP „Vodovod“ Bezdan, iako sa veoma malim brojem radnika, opstaje na tržištu među velikim vodovodima, isključivo sopstvenom željom za unapređenjem poslovanja i dobrim odnosima sa lokalnom samoupravom i rukovodećim ljudima u Gradu Somboru.

Planova imamo na pretek. Za 2024. godinu nam je u planu izgradnja cevovoda prema vikend naseljima Korlatoš, Šebešfok i prema Dunavu, u dužini od skoro 7 km, gde bi mogli da snabdevamo brodove sa pijaćom vodom na ulazu u Srbiju. Navedeni projekat planiramo da finansiramo uz pomoć Grada Sombora i sopstvenim sredstvima

7. Projekat cevovoda od Bezdana do Šebešfoka i Korlatoša

Godine 2024. započeli smo, a u julu 2025. godne završili veliki projekat izgradnje poveznog cevovoda od Bezdana do vikend naselja Šebešfok i Korlatoš u dužini od 7.200 metara.

Projektovani vodovod obuhvata cevovod od naselja Bezdan do kraja naselja Šebešfok i predstavlja proširenje javnog vodovoda naselja Bezdan, povezivanjem vikend naselja Korlatoš i Šebešfok na javnu vodovodnu mrežu naselja Bezdan. Cevovod od Bezdana do naselja Šebešfok se priključuje na postojeću vodovodnu mrežu u ulici Žrtava fašizma na postojeći cevovod od azbest-cementnih cevi prečnika 200 mm. Na mestu priključenja predvidja se ugradnja zatvarača sa ugradbenom garniturom

Izgradnja cevovoda od Bezdana do vikend naselja Šebešfok se može izvoditi u pet faza:

- Prva faza je deo cevovoda od priključka na vodovodnu mrežu u naselju Bezdan do ukrštanja sa kanalom Bezdan – Vrbas , od stacionaže 0+000.00 do 0+199.34
- Druga faza je ukrštanje sa kanalom Bezdan – Vrbas od stacionaže 0+199.34 do 0+363.29
- Treća faza je deonica od stacionaže 0+363.29 pa do kraja naselja Korlatoš-stacionaža 3+417.29, odnosno do kanala DTD Vrbas-Bezdan.
- Četvrta faza je ukrštanje sa kanalom Bezdan – Vrbas od stacionaže 3+417.29 do 3+486.53
- Peta faza je vodovod u naselju Šebešfok od stacionaže 3+486.53 do 5+627.13

Celokupan posao su odradili radnici JKP „Vodovod“ Bezdan sa sopstvenim mašinama i ljudstvom.

Projekat je finansiran u celosti od Grada Sombora u iznosu od 48 miliona dinara i sopstvenim sredstvima.

Vikend naselja i povezivanje njihovih korisnika, smatramo za prvi deo projekta. Drugi deo projekta se odnosi na dovođenje vode do carinske ispostave na Dunavu, gde je krajnji cilj snabdevanje teretnih i putničkih brodova sa pijaćom vodom. U proseku dnevno prođe do 5 brodova koji imaju potrebu za pijaćom vodom. Analizom smo utvrdili da se količine kreću od 10 do 50 m^3 po brodu.

Slika 13. Cevovod od Bezdana do Šebešfoka
Figure 13. Pipeline from Bezdan to Šebesfok

8. Zaključak

Celokupnom analizom naših vodovoda sa aspekta tehničkog stanja opreme i sistema snabdevanja, kao i na osnovu rezultata vezanim za kvalitet vode za piće, došlo se do zaključka da je u trenutku preuzimanja kvalitet vode bio izvan dozvoljenih granica.

Izgradnjom sistema za pripremu vode i dovodnika vode do Koluta, došlo se do okolnosti u kojima pored dovoljne količine vode posle višedecenijskog problema imamo i potreban kvalitet vode u skladu sa zakonom. Naša je zakonska obaveza da učinimo sve da stanovnici naselja u seoskim sredinama što pre dobiju dovoljno kvalitetne vode za piće i da ostaju na tim prostorima. Iskustvo i rešenja imamo, a potrebno je hitno iznaći kako kako bi se postigli ciljevi održivog ruralnog razvoja, osigurao ostanak stanovništva na selu i sačuvalo njihovo zdravlje.

4. Literatura

[1] Kuljančić Đ, Projekat OBJEKAT PPPV (Postrojenje za prečišdavanje pijade vode na parceli br. 1532 K.O. B. Monoštor i deo pristupnog puta na parceli br. 2658 K.O. B.Monoštor u Bačkom Monoštoru)

[2] Isić M, Projekat Projekta za građevinsku dozvolu Postrojenje za pripremu vode za piće na kat. par. br. 701 i 932 KO Bački Breg, u Bačkom Bregu.

[3] Roka A, Projekat Postorijenje za dezinfekciju pijaće vode u CS Kolut.

[4] Interna dokumentacija JKP „Vodovod“ Bezdan

Aleksandar Đukić[1], Damjan Ivetić[2]
Ognjen Govedarica[3], Branislav Babić[4]

Pregledni stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25215D

UTICAJI PRILIVA ČISTIH VODA U KANALIZACIJU NA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

Rezime: Priliv infiltracije i kišnih voda u kanalizaciju za upotrebljene vode u lokalnim uslovima nije moguće u potpunosti izbeći, ali ako je priliv ovih voda prevelik može doći do ozbiljnih posledica po funkcionisanje kanalizacije i postrojenja za prečišćavanje komunalnih otadnih voda. U radu su predstavljeni uzroci i posledice priliva čistih voda u kanalizacioni sistem, sa naglaskom na njihov uticaj na funkcionisanje kanalizacije i efikasnost procesa prečišćavanja otpadnih voda. U uslovima ubrzane izgradnje kanalizacije i postrojenja za prečišćavanje, ukazano je na neophodnost da se ovoj problematici hitno i sistematski posveti odgovarajuća pažnja u Republici Srbiji.
Ključne reči: kanalizacija, infiltracija, kišne vode, prečišćavanje otpadnih voda

EFFECTS OF CLEAN WATER INFLOW IN SEWERAGE ON WASTEWATER TREATMENT

Abstract: The inflow of infiltration and rainwater into the foul sewers cannot be completely avoided, but if this inflow is excessive, it can lead to serious consequences for the operation of sewerage and municipal wastewater treatment plants. The paper presents the causes and consequences of clean water inflow into the sewage, with an emphasis on their impact on the sewer system performance and the efficiency of municipal wastewater treatment processes. In the context of accelerated construction of sewage systems and treatment plants, it is highlighted that urgent and systematic attention must be paid to this issue in the Republic of Serbia.
Key Words: Sewerage, infiltration, rainwater, wastewater treatment

1. Uvod

Otpadne vode se sakupljaju unutar objekata ili pojedinih površina internim sistemima kanalizacije i zatim se odvode i izlivaju u ulične (javne) kanalizacione kolektore. Kanalizacioni

[1] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, djukic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3548-989X*
[2] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, divetic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7475-6108*
[3] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, ogovedarica@grf.bg.ac.rs,ORCID:0000-0002-4995-3932*
[4] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, babic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-1224-6297*

kolektori mogu biti u obliku otvorenih ili zatvorenih kanala. Bez obzira da li se primenjuju otvoreni ili zatvoreni kanali, oni se uvek postavljaju u javnom zemljištu, bilo ispod saobraćajnica ili drugih javnih površina (trotoari, zelene površine i dr). Postoje dva osnovna tipa kanalizacionih mreža [1]:

- Opšti sistem kanalizacije - gde se jednom mrežom kanala sakupljaju i odvode upotrebljene i atmosferske otpadne vode.
- Separacioni sistem kanalizacije - gde se jednom mrežom kanala sakupljaju i odvode upotrebljene vode iz domaćinstava, ustanova i industrije, a drugom mrežom se sakupljaju i odvode atmosferske otpadne vode.

Kanalizacioni sistemi se projektuju i izvode tako da zadovolje potrebe koje će se javiti nakon 15 do 30 godina nakon završetka izgradnje. Dužina ovog vremenskog prerioda zavisi od raspoloživosti planske dokumentacije. Kanalizacioni sistemi su veoma nefleksibilni kada je u pitanju rekonstrukcija i proširenje kapaciteta tako da se uobičajeno planiraju i grade tako da zadovolje krajnje potrebe razmatranog slivnog područja.

Količine otpadnih voda zavise od broja stanovnika, njihovog standarda i navika tj. specifične potrošnje vode po stanovniku, razvijenosti industrije priključene na javnu kanalizaciju, da li je u pitanju opšti, separacioni ili kombinovani sistem kanalizacije, količine infiltriranih podzemnih voda u kanalizaciju i dr, kao i od geografskih uslova - veličine slivne površine sa koje otpadne vode mogu doći na uređaje za prečišćavanje [1].

2. Vrste i odlike „čistih“ voda koje dospevaju u kanalizaciju

Čiste vode koje se mogu pojaviti u kanalizaciji uključuju podzemne vode i kišni oticaj sa površine terena. U ovom radu će se razmatrati samo prilivi čistih voda u kanalizaciju upotrebljenih voda separacionih sistema kanalizacije.

2.1. Infiltracija

U kanale može dospeti i podzemna voda ako su kanali postavljeni ispod nivoa podzemne vode. Takođe, jedan deo voda koje se proceđuju kroz zemljište može dospeti u kanalizacacionu mrežu. Ispitivanja su pokazala da se u uslovima visokih podzemnih voda one u manjoj ili većoj meri neizbežno infiltriraju u kanale. Količina ovih infiltriranih voda zavisi od sastava zemljišta, nivoa podzemnih voda, kvaliteta i broja izvedenih spojeva između kanala i između kanala i revizionih silaza (šahtova). Glavni izvori infiltracije u kanalizaciju su pukotine i oštećenja kanalizacionih cevi usled starenja ili pomeranja tla, neispravni spojevi cevi sa šahtovima ili između cevi, oštećnja od korenja vegetacije, vodopropusnost zidova ili osnova šahtova, i drugo.

Odomaćena je praksa da se količine infiltriranih voda prikazuju u procentima od ukupne količine komunalnih i industrijskih otpadnih voda. Ovaj način prikazivanja količine infiltriranih voda je suštinski pogrešan jer ne uzima u obzir faktore koji zaista utiču na pojavu i veličinu infiltracije. Bolje je određivati količinu infiltrirane vode prema jedinici dužine kanalizacione mreže ili prema jedinici površine naselja koje se kanališe.

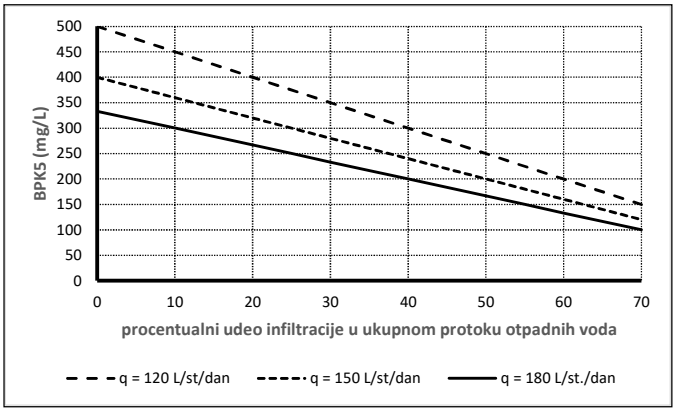
Ispitivanja pokazuju da su količine infiltriranih voda najčešće kreću od 30 do 160 m^3/dan po kilometru mreže. U slučaju nekvalitetnog izvođenja mreže ili oštećenih kolektora, vrednost

infiltracije može biti i znatno veća. Često se računa sa 70 m^3/dan po km mreže ako je polovina dužine kanala stalno ispod nivoa podzemne vode. Takođe, postoje preporuke da količine infiltiranih voda mogu biti u opsegu od 2,3 do 11,5 m^3 po hektaru kanalisane površine [1].

Promene količina infiltriranih voda zavise prvenstveno od promene nivoa podzemnih voda i veličine oštećenja kolektora i njihovih spojeva. Kako su promene nivoa podzemnih voda obično spore i blage u praktičnim proračunima se najčešće računa da je količina infiltriranih voda konstantna tokom vremena.

Kvalitet infiltriranih voda zavisi od lokalnih uslova i sastava zemljišta, ali najčešće su u pitanju reltivno čiste vode sa niskim ili zanemarljivim saržajem zagađujućih materija. Međutim, istraživanja ukazuju da priliv infitracije može trajno da poremeti sastav otpadne vode u odnosu na projektovane vrednosti [2].

U narednoj tabeli je prikazan uticaj udela infiltracije na koncentraciju petodnevne biohemijske potrošnje kiseonika (BPK_5) u ukupnom protoku vode u kanalizaciji za upotrebljene vode. Pretpostavka je da se u kanalizaciji skupljaju samo otpadne vode od domaćinstava.



Slika 1. Zavisnost koncentracije BPK5 (mg/L) u otpadnoj vodi u sanitarnoj kanalzaciji od udela infiltriranih voda (pretpostavljen unos 60 gBPK5/dan po stanovniku) za različite količine otpadnih voda po stanovniku

Figure 1. Dependence of BOD_5 concentrations in sanitary sewer wastewater on the share of infiltrated water (assuming 60 g BOD_5/day per capita) for various wastewater volumes per capita

Navedene vrednosti su teorijske i mogu poslužiti samo kao orijentacija, dok se vrednosti udela infiltracije moraju preciznije određivati detaljnijim analizama, uključujući i terenska ispitivanja.

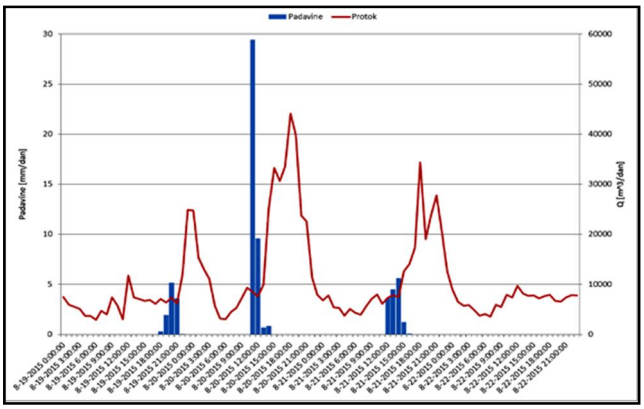
2.2. Dotok kišnih voda

Bez obzira što je kanalizacija za upotrebljene vode planirana za odvođenje samo komunalnih otpadnih voda, tokom kiše jedan deo kišnice može ući u kanale za upotrebljenu vodu. Ove količine nisu velike ako je kanalizacija izvedena kvalitetno i ako nisu na nju spojeni odvodi sa krova (olučnjaci) ili pojedini slivnici. U ovom slučaju kišnica može ući u kanale za

upotrebljene vode kroz poklopce revizionih silaza (šahtova) i to u najvećoj količini od 0,5 do 2 L/s po poklopcu šahta, ako se na tom delu ulice obrazuje tok vode dubine 2,5 cm, što ne bi trebalo često da se dešava jer su šahtovi kanalizacije obično postavljeni blizu osovine ulice na višim kotama od jedne ili obe ivice kolovoza. Ako su na kanalizaciju za upotrebljene vode priključeni pojedini olučnjaci, dvorišni odvodi ili ulični slivnici, onda količine kišnih voda za vreme kiše mogu biti značajne [1]. Takođe, priliv kišnih voda može nastati i slučajnim/namerim povezivanjem delova kišne kanalizacije na kanalizaciju za upotrebljenu vodu [1].

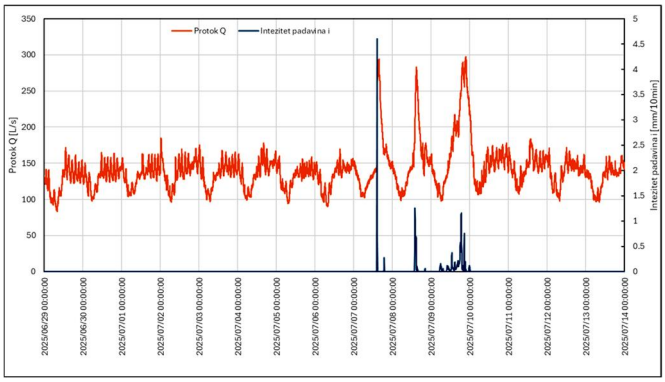
Nažalost postoji rasprostranjeno shvatanje da je priključenje pojedinih oluka na kanalizaciju za upotrebljene vode korisno za njeno ispiranje, što je pogrešno i kao što će se pokazati, može vrlo negativno uticati na prečišćavanje otpadnih voda.

Kvalitet kišnih voda varira u širokim granicama kako po vremenu tako i po prostoru. Najčešće je kvalitet kišnog oticaja najlošiji na početku kišne epizode, i tokom kiše se brzo poboljšava kako kišni oticaj spira i odnosi našistoće sa površne terena. Zagađnja kišnog oticaja zavise od lokalnih uslova a najšešće su u pitanju suspendovane materije sa adsorbovanim zagađenjima (teški metali i dr.), soli (tokom zimskih meseci, ako se nanosi so na puteve), organska zagađenja, ugljovodonici i drugo [3], [4].



Slika 2. Merenja protoka otpadnih voda i kiša na ispustu otpadnih voda Obrenovca
Figure 2. Measurements of wastewater flow and rain at the Obrenovac wastewater outlet

Na slici 2 prikazani su rezultati merenja protoka u kanalizaciji za upotrebljene vode Obrenovca i visine pale kiše [5]. Zaključeno je da prosečna specifična količina otpadnih voda iznosi oko 260 L/st.dan, a da je specifična infiltracija u opsegu od 37 do 50 m^3/dan po km (0,42-0,58 L/s/km) postojeće kanalizacione mreže u Obrenovcu, ili do 0,06 L/s po hektaru (za procenjenu ukupnu površinu pod kanalizacijom oko 600 hektara), a da je uticaj kiše prilično izražen: pri slabim padavinama (visina pale kiše 5 mm) protok na ispustu raste do 300 L/s, a pri jačem pljusku (visina pale kiše oko 30 mm), protok na ispustu dostiže i preko 500 L/s, što je 7,5 puta više od prosečnog protoka otpadnih voda na ispustu. Ovako velike varijacije protoka u kratkom vremenu mogu uticati na poremećaje u radu budućeg postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda.



Slika 3. Merenja protoka otpadnih voda i kiša na ispustu otpadnih voda 2025. godine
Figure 3. Wastewater flow and rainfall mesurements at the wastewater outlet in year 2025

Na slici 3 prikazan je deo rezultata merenja protoka i padavina u sklopu merne kampanje koju je Građevinski fakultet Beograd sproveo tokom 2025. godine u kanalizaciji za upotrebljene vode jednog grada srednje veličine u Srbiji. Merenja su sprovedena na nekoliko ključnih lokacija unutar kanalizacione mreže, dok su na slici 3 prikazani rezultati merenja samo na najnizvodnijem mernom mestu. Tokom merne kampanje su zabeležene tri kišne epizode 7, 8. i 9. jula, visina padavina 5,9 mm, 5,3 mm i 13,7 mm, respektivno. Uticaj kiše na maksimalne zabeležene protoke je bio skoro uniforman, gde su se u sva tri slučaja zabeležene maksimalne vrednosti protoka između 280 i 300 L/s. U odnosu na prosečne vrednosti protoka u suvim danima, pri zabeleženim kišnim epizodama protok je povećan oko 2,2 puta. Sa druge strane, kišni oticaj nakon najveće, treće, kišne epizode je značajno duže trajao u odnosu na prve dve epizode, što koresponidra sa ukupnom zapreminom pale i otekle kiše. Preliminarna analiza rezultata ukazuje da sama kanalizaciona mreža ima kapacitet da retenzira kišni oticaj, odnosno ublaži pik hidrograma kišnog oticaja.

3. Uticaji prilva čistih voda u kanalizaciju

3.1. Infiltracija

Infriltracija utiče na trajno povećanje hidrauličkih opterećenja kanalizacije, što kod sistema sa crpnim stanicama dovodi i do povećanja godišnjih troškova. Uticaji infiltracije na prečišćavanje otpadnih voda su složeni i višestruki:

a. Hidrauličko preopterećenje - podzemne vode koje ulaze u kanalizaciju povećavaju ukupni protok, posebno tokom vlažnih sezona ili uslova visokog nivoa podzemnih voda. Ovo povećava protok do postrojenja za prečišćavanje, što može:

- da snizi efikasnosti tretmana i aktiviranje obilaznog voda,
- dovesti do povećanog opterećenja pumpi, aeratora i druge opreme za prečišćavanje.

b. Razblaživanje otpadnih voda - infiltrirane vode su relativno čiste (nizak sadržaj organskih i suspendovanih materija, nutrijenata). Ovo smanjuje koncentraciju organske materije u otpadnoj vodi, čineći biološki tretman (kao što je aktivni mulj) manje efikasnim jer se

mikroorganizmi koji vrše prečišćavanje oslanjaju na određene nivoe organskog opterećenja da bi optimalno funkcionisali.

c. Povećani operativni troškovi - više vode znači više energije potrebne za pumpanje i aeraciju, kao i veću potrošnju hemikalija u tretmanu.

d. Uticaj na proizvodnju mulja - niže organsko opterećenje dovodi do manje produkcije biomase, što potencijalno narušava ravnotežu mikrobnih populacija u jedinicama za tretman.

3.2. Dotok kišnih voda

Veliki dotok kišnih voda u kanalizaciju za upotrebljene vode može, pored povećanja hidrauličkog opterećenja kanalizacije i operativnih troškova pumpanja otpadne vode dovesti do lokalnih plavljenja. Naime u slučaju kada kanalizacioni sistemi ne mogu da prihvate dodatnu količinu voda, sirova otpadna voda iz kanalizacije se izliva u podrume, površinu terena ili vodoprijemnike, što predstavlja ozbiljan rizik po životnu sredinu i javno zdravlje.

Uticaji na procese prečišćavanja, su višestruki:

a. Skokovi protoka - priliv kišnog oticaja izaziva iznenadna, kratkotrajna povećanja protoka tokom kišnih padavina. Ovi skokovi protoka mogu:

- prekoračiti hidraulični kapacitet postrojenja.
- ispirati istaložen mulj ili bakterije u bazenima postrojenja.
- izazvati udarno opterećenje ili poremećaje procesa u biološkim reaktorima.

b. Skraćenje hidrauličkog vremena zadržavanja - procesima tretmana, posebno biološkim, potrebno je vreme da se razgradi zagađenje, a povećan protok smanjuje ovo vreme, smanjujući efikasnost uklanjanja zagađenja.

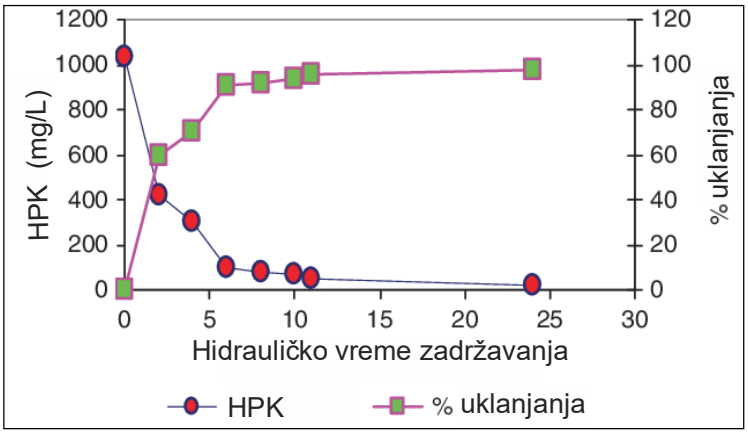
c. U slučaju dezinfekcije efluenta, veliki protoci mogu smanjiti efekat dezinfekcije.

3.3. Zbirni efekti

Zbirni efekti infiltracije i dotoka kišnih voda su:

- Povećan rizik od hidrauličkog preopterećenja kanalizacione mreže i lokalnih izlivanja kanalizacionog sadržaja.
- Povećano vreme rada crpnih stanica i troškovi pumpanja otpadne vode.
- Postrojenje za prečišavanje otpadnih voda konstantno obrađuje veći protok nego što je projektovano.
- Performanse prečišćavanja mogu biti nestabilne, posebno tokom vlažnog vremena.
- Vek trajanja opreme je smanjen zbog stalne prekomerne upotrebe i opterećenja.
- Kvalitet efluenta može biti pogoršan, moguće je povremeno aktiviranje obilaznog voda (bajpasa).

Od ranije je poznato da postoji direktna zavisnost između vremena zadržavanja vode i mulja u biološkom reaktoru postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda i efikasnosti uklanjanja organskog zagađenja iz otpadnih voda (iskazanog kao petodnevna biohemijska potrošnja kisenonika - BPK5 ili kao hemijska potrošnja kiseonika – HPK). Ova zavisnost se može izvesti iz kinetičkih jednačina bioloških procesa razgradnja u rekatorima (videti lit. [6]) i više puta je potvrđena merenjima u praksi, ako na primer u lit. [7] što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Uklanjanje HPK u zavisnosti od hidrauličkog vremena zadržavanja [7]
Figure 4. COD removal efficiency versus hydraulic retnetion time [7]

Metode za detekciju infiltracije i priliva kišnih voda obuhvataju kompleksne aktivnosti kao što su merenja protoka, traserska merenja, snimanje unutrašnjosti kolektora, matematičko modeliranje i drugo, i predmet su istraživanja i razvoja u svetu [8].

Aktivnosti na smanjenju infiltracije i dotoka kišnih voda obuhvataju obimne, dugotrajne i kompleksne aktivnosti kao što su: snimanje stanja, popravka i zamena elemenata (sanacija) kanalizacije, rekonstrukcija kanalizacije, prevezivanje oluka i slivnika na kišnu kanalizaciju, edukacija korisnika kanalizacije i drugo.

Kako je teško potpuno eliminisati uticaje priliva infiltracije i kišnih voda, mogu se u pojedinim slučajevima kao mera primeniti i retenzije na kanalizaciji, primenom nekih relevantnih preporuka za analizu i projektovanje. Jedan takav je nemački tehnički standard ATV A 117 koji se odnosi na projektovanje i rad retenzionih rezervoara u kanalizaciji. On pruža smernice za planiranje, dimenzionisanje i rad ovih retenzija koji se koriste u kanalizacionim sistemima i procesima prečišćavanja otpadnih voda.

4. Preliminarna ocena stanja u Srbiji

U gotovo svim kanalizacionim sistemima u Srbiji gde su viršena merenja kvaliteta i protoka upotrebljenih otpadnih voda detektovana je razblažena otpadna voda, povećani priliv infiltracije, povremena ispuštanja industrijskih otpadnih voda van propisanog kvaliteta i drugi problemi. Ove pojave mogu značajno remetiti procese prečišćavanja otpadnih voda i povećati troškove kanalisanja i prečišćavanja, i sa izgradnjom kanalizacionih sistema i novih postrojenja za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda ovi problemi postoju jasno vidljivi.

Trenutno je na kanalizaciju priključeno preko 60% stanovništva Srbije, ali evidentno zaostajanje u izgradnji kišne kanalizacije je dovelo u velikom broju naselja do priključenja kišnih voda na kanalizaciju za upotrebljene vode. Ako se ovome doda činjenica da se u skoro svim javnim kanalizacionim sistemima kod nas ne obavljaju redovna merenja protoka otpadnih voda, i da su podaci o stanju i karakteristikama sistema često nedovoljni i

neopouzdani, jasno je da se hitno mora započeti sa ovim aktivnostima. Ovo će zahtevati reformu ovog sektora, uz jačanje kapaciteta svih učesnika. Naročito je važno definisanje vlasničkog i upravljačkog statusa kišne kanalizacije u naseljima, koja je kod nas različito rešena u različitim jedinicama lokalne samouprave, ali svima je zajednička nejasna upravljačka struktura, nedovoljni izvori finansiranja rada i održavanja kišne kanalizacije i nedostatak strateškog planiranja povezanog sa urbanističkim uređenjem i razvojem naselja.

Važnu komponentu u ovom procesu treba da zauzme i edukacija korisnika kanalizacije o njenim pravilnom korišćenju, jer jedan deo uočenih problema u eksploataciji (prevezivanje oluka na kanalizaciju, odlaganje otpada u kanalizaciju i dr.) je posledica neadekvatnog ponašanja korisnika.

Zahvalnica

Istraživanja prikazana u ovom radu su podržana od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, broj ugovora 451-03-47/2025-01/200092

5. Literatura

[1] Ljubisavljević D, Đukić A, Babić B, Kujundžić B. Tehnika kanalisanja naselja. *Vodovodni i kanalizacioni sistemi*. Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, pp.125-212, 2011.

[2] Ryuichi Watanabe, Hidenori Harada, Hidenari Yasui, Tuan Van Le & Shigeo Fujii, Exfiltration and infiltration effect on sewage flow and quality: a case study of Hue, Vietnam, *Environmental Technology*, 42:11, 1747-1757, DOI: 10.1080/09593330.2019.1680739, 2021.

[3] Djukić A, Lekić B, Rajaković-Ognjanović V, Naunovic Z, Prodanović D. Build-up and characterisation of pollutants on urban impervious surfaces. *Water Science and Technology*. 77 (8), pp.2123-2133. DOI: 10.2166/wst.2018.128, 2018

[4] Djukić A, Lekić B, Rajaković-Ognjanović V, Veljović Đ, Vulić T, Djolić M, Naunović Z, Despotović J, Prodanović D. Further Insight into the Mechanism of Heavy Metals Partitioning in Stormwater Runoff. *Journal of Environmental Management*. (168), pp.104-110. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.11.035, 2016.

[5] Babić M, Đukić A. Prečišćavanje otpadnih voda Obrenovca. Zbornik radova *47. Konferencije o aktuelnim temama korišćenja i zaštite voda "VODA 2018"*, SDZV, 2018

[6] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th edition, McGraw Hill Inc, NY, USA, 2022.

[7] Tawfik, Ahmed & El-Kamah, Hala. Treatment of fruit-juice industry wastewater in a two-stage anaerobic hybrid (AH) reactor system followed by a sequencing batch reactor (SBR). *Environmental technology*. 33. 429-36. DOI: 10.1080/09593330.2011.579178, 2012.

[8] Zhichao Zhao, Hailong Yin, Zuxin Xu, Jian Peng, Ziwen Yu. Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model, *Water Research*, Volume 175, 115689, DOI:10.1016/j.watres.2020.115689, 2020.

Ognjen Govedarica[1], Marina Škondrić[2]
Filip Stanić[3], Aleksandar Đukić[4], Branislava Lekić[5]
Vladana Rajaković-Ognjanović[6]

Pregledni naučni rad
DOI: 10.5937/VIK25223G

PRIRODOM INSPIRISANA REŠENJA U URBANOM ODVODNJAVANJU: MOGUĆNOSTI I IZAZOVI POROZNOG POPLOČANJA

Rezime: Urbane sredine suočavaju se sa sve učestalijim pluvijalnim poplavama usled klimatskih promena i sve većeg udela nepropusnih površina. Tradicionalni sistemi kanalizacije često ne mogu efikasno da prihvate uvećane velike količine atmosferskih otpadnih voda, što dovodi do izlivanja vode u najnižim etažama objekata, zadržavanja vode na terenu i potencijalne kontaminacije prostora. Primena prirodom inspirisanih rešenja, poput poroznih betonskih popločanja, omogućava kontrolisanu infiltraciju i retenziranje atmosferskih voda, smanjujući vršne protoke, zapreminu otekle vode i povećavajući trajnost infrastrukture. Integracija prirodom inspirisanim rešenja i sive infrastrukture vodi ka uvećanom korišćenju recikliranih materijala što održivosti i rezilijentnosti urbanih sredina prema pluvjalnim poplavama.
Ključne reči: urbanizacija, pluvijalne poplave, porozni beton, zelena infrastruktura, održivo upravljanje vodama

NATURE-BASED SOLUTION IN URBAN DRAINAGE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF POROUS PAVING

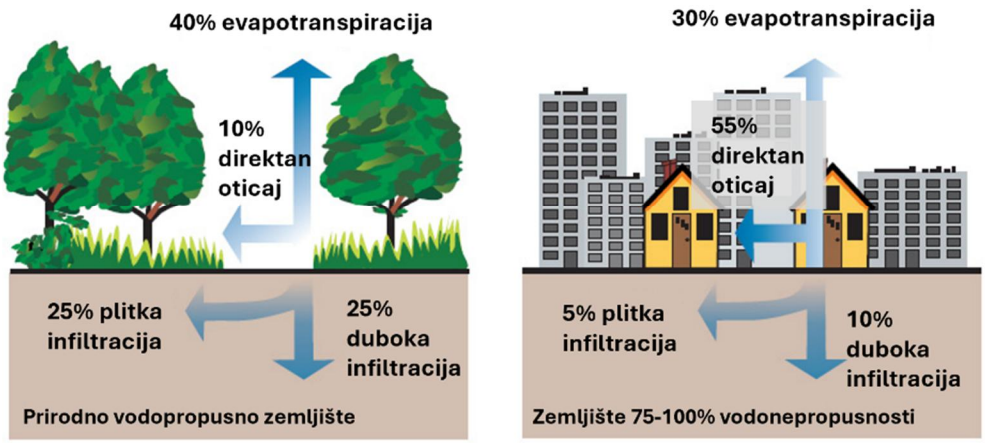
Abstract: Urban areas are increasingly challenged by pluvial flooding, driven by climate change and the expansion of impervious surfaces. Conventional sewer systems often lack the capacity to manage increased volumes of stormwater, resulting in water spills in the lowest floors of buildings, retention of water on the ground and potential contamination. Implementing nature-based solutions, such as porous concrete pavements, supports controlled infiltration and retention of stormwater, thereby reducing peak

[1] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakulet, Beograd, ogovedarica@grf.bg.ac.rs, ORCID:0000-0002-4995-3932*
[2] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakulet, Beograd, amarina@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-8911-5028*
[3] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakulet,Beograd, fstanic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0271-5993*
[4] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakulet, Beograd, djukic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3548-989X*
[5] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakulet, Beograd, branaj@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3360-2118*
[6] *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakulet, Beograd, vladana@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4895-7007*

flows, lowering runoff volumes, and improving infrastructure durability. The integration of nature-inspired solutions and gray infrastructure leads to an increased use of recycled materials for the sustainability and resilience of urban environments to flooding.
Key Words: urbanization, pluvial flooding, porous concrete, green infrastructure, sustainable water management

1. Uvod

U prirodnim uslovima priličan deo atmosferske vode ostaje na površini gde je koriste biljke ili isparava (evapotranspiracija), značajan deo infiltrira kroz zemljište prohranjujući podzemne vode ili otiče potpovršinskim tokom dok manji deo otiče površinom prema recipijentima (slika 1 levo). Međutim, ubrzana urbanizacija, podstaknuta intenzivnom migracijom stanovništva iz ruralnih u urbane sredine, rezultirala je naglim smanjenjem zelenih površina koje su zamenjene stambenim, industrijskim i infrastrukturnim objektima. Na taj način veliki deo tla prekriven je vodonepropusnim pvršinama, poput krovnih pokrivača, asfalta i betona, što značajno smanjuje mogućnost evapotranspiracije i infiltracije (slika 1 desno) [1, 2].



Slika 1. Uticaj urbanizacije na površinski oticaj: pre (levo) i nakon urbanizacije (desno) [3]
Figure 1. Urbanization impact on surface runoff: before (left) and after urbanization (right) [3]

Kao posledica urbanizacije, povećava se koeficijent oticaja, pa se veći deo atmosferske vode zadržava na površini i ubrzano sliva ka kanalizacionoj mreži, čiji kapaciteti sve češće nisu dovoljni da prihvate velike dotoke. To dovodi do akumulacije vode na kolovozima i trotoarima i učestalih pluvijalnih poplava u urbanim sredinama. Problem je posebno izražen tokom intenzivnih kiša, kada se površinski oticaj sa nepropusnih površina višestruko uvećava, uz proporcionalno povećanje brzine oticaja. Time se produžava vreme zadržavanja atmosferske vode u urbanim slivovima u poređenju sa prirodnim uslovima, što uzrokuje plavljenje nižih delova gradskog područja. [4, 5, 6] Povrh toga, u poslednjih nekoliko decenija klimatske promene dovode do sve učestalijih padavina visokog intenziteta i kratkog trajanja, što dodatno utiče na prirodne hidrološke procese.

Ograničenja postojećih konvencionalnih sistema, tzv. „sive infrastrukture“, za odvođenje atmosferskih voda nameću potrebu za primenom prirodom inspirisanih rešenja. Savremeni koncepti upravljanja atmosferskim vodama zasnivaju se na smanjenju pikova protoka i zapremina oticaja retenziranjem i infiltracijom atmosferskih voda, uz istovremeno unapređenje njihovog kvaliteta. Jedno od mogućih rešenja podrazumeva primenu polupropusne galanterije izrađene od poroznih betona, koji omogućavaju delimičnu infiltraciju padavina. Ovi materijali nalaze primenu pri izgradnji pešačkih staza, saobraćajnica manjeg opterećenja i drugih urbanih površina, čime se smanjuje direktan dotok atmosferskih voda u kanalizacione sisteme. [7, 8, 9]

2. Ograničenja konvencionalnih sistema i potreba za novim pristupima

Tradicionalna praksa urbanog odvodnjavanja zasniva se pre svega na kanalisanju i povremenom, delimičnom retenziranju atmosferskih voda. Brza urbanizacija i povećanje udela nepropusnih površina često nisu praćeni adekvatnim razvojem infrastrukture, pa kapaciteti postojećih kanalizacionih sistema često nisu dovoljni da u kratkom vremenu prihvate velike količine atmosferskih optadnih voda, kako po zapremini tako i po vršnim protocima. Posledica su učestale pluvijalne poplave, uključujući plavljenje podruma kod opšteg sistema kanalisanja i zadržavanje vode na površini, sa rizicima po zdravlje ljudi i životnu sredinu. [10]

Atmosferske padavine spiraju akumulirana zagađenja sa urbanih površina, pri čemu u površinskom oticaju mogu biti prisutne masti i ulja, suspendovane materije, teški metali, organski spojevi, pesticidi, soli, patogeni organizmi i druge supstance. Poreklo ovih zagađujućih materija nije isključivo antropogeno jer deo ovih materija potiče od rastvaranja prirodnih supstanci sa zemljišta ili iz atmosfere. Pored prirodnih izvora, značajan doprinos zagađenju daju saobraćaj, industrijska proizvodnja, akcidentni izlivi, te emisije zagađujućih materija u atmosferu koje se talože na urbane površine. Poseban izazov predstavlja činjenica da voda koja se sliva sa vodonepropusnih površina može nositi štetne materije direktno u rečne tokove, potencijalno ugrožavajući biodiverzitet. Upravo zato je primena prirodom inspirisanih rešenja od ključnog značaja jer ona smanjuju oticaj i spiranje zagađenja na mestu njihovog nastanka – deo kišnice se na mestu padavina infiltrira u tlo i/ili zadržava. [11]

Ograničenja postojećih sistema urbanog odvodnjavanja, i u pogledu kvantiteta i u pogledu kvaliteta voda, podstiču interesovanje za prirodom inspirisanim rešenjima, čija primena može ublažiti efekte urbanih poplava. Metode koje doprinose razvoju prirodom inspirisanih rešenja obuhvataju očuvanje i proširenje zelenih površina, koje osim što prirodno regulišu oticanje atmosferskih voda, poboljšavaju kvalitet vazduha, povećavaju biodiverzitet i služe kao prostori za rekreaciju. Neka od prirodom inspirisanih rešenja su [4, 12]:

- Kišne bašte i bioretenzioni vrtovi, sa sistemima filtracije kroz zemljište i vegetaciju, omogućavaju zadržavanje i kontrolisano oticanje vode, dok zeleni krovovi usporavaju i filtriraju padavine koje dospeju na njih.
- Drenažni kanali i burad za prikupljanje kišnice doprinose smanjenju površinskog oticaja, dok veštačke močvare funkcionišu kao prirodni filteri, apsorbujući vodu u zemljište.
- Propusni betoni i asfalti omogućavaju prolazak vode kroz podlogu u drenažni sloj, često u kombinaciji sa cevovodnim sistemima za odvod viška vode.

- Restauracija rečnih korita, vraćanjem krivudavih oblika i raznovrsne vegetacije, povećava kapacitet korita za prihvat atmosferskih voda.

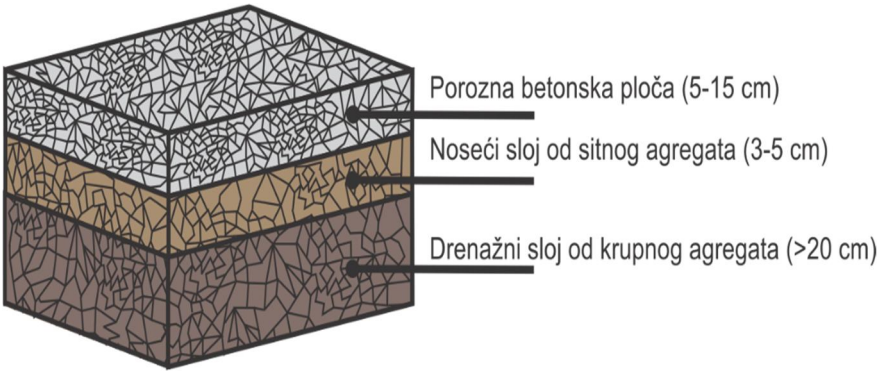
3. Porozna betonska popločanja – mogućnosti primene i izazovi

U okviru saobraćajne infrastrukture, primena principa održivog razvoja zahteva transformaciju tradicionalnih, energetski zahtevnih procedura izgradnje u cilju obnavljanja prirodne sposobnosti površina da apsorbuju kišnicu. Jedno od efikasnih rešenja koje se primenjuje globalno je uvođenje poroznih popločanja u urbanim sredinama. Najčešći tipovi poroznih popločanja su: porozni asfalt, betonske raster ploče, porozni beton i porozne behaton ploče (slika 2). Razlika između ovih proizvoda ogleda se u mehanizmu propustljivosti: neki materijali sadrže pore sposobne da transportuju značajne količine vode, dok su drugi postavljeni tako da kišnica prolazi kroz prostore između elemenata popločavanja [7, 8, 9, 13].

Slika 2. Najčešći tipovi poroznih popločanja
Figure 2. The most common types of porous pavements

Porozni beton se proizvodi od krupnog agregata, vode i veziva, pri čemu izostavljanje finih čestica poput peska omogućava stvaranje većeg procenta krupnih pora. Ovakvi materijali su idealni za pešačke i biciklističke staze, kao i za parkinge, pri čemu opterećenje utiče na debljinu i strukturu ploča. Propusne betonske ploče moraju zadovoljiti dva osnovna, ali suprotstavljena kriterijuma: omogućiti prolaz vode kroz šupljine uz zadržavanje finih čestica, i istovremeno izdržati saobraćajna opterećenja, iako porozna struktura smanjuje njihovu čvrstoću pri pritisku. Preporučeni procenat šupljina kreće se između 15% i 30% kako bi se postigla zadovoljavajuća vodopropusnost i nosivost. Osim poroznosti, na svojstva propusnog betona utiču odnos vode i cementa, svojstva cementne paste, veličina agregata i dodaci u smeši [14].

Za pravilno funkcionisanje poroznih površina, važna je i konstrukcija celokupnog sistema, koja uključuje više slojeva. Prorozna betonska ploča, izložena je spoljnim uslovima, treba da ima dovoljnu nosivost i trajnost, sa debljinom obično od 5 do 15 cm i poroznošću 15–25%. Ispod njega izvodi se nevezani noseći sloj od agregata manje krupnoće (4/8 mm) debljine 3–5 cm, a potom sloj krupnijeg agregata (npr. 31.5/63 mm) koji služi kao drenažni sloj sa poroznošću 20–40% i debljinom preko 20 cm (slika 3). Nevezani sloj se obično odvaja geotekstilnom membranom kako bi se sprečio transport sitnih čestica. Za staze sa manjim opterećenjem debljina slojeva može biti manja [15].



Slika 3. Presek sistema poroznog popločanja
Figure 3. Porous pavement cross-section

Prečnik pora u propusnom betonu treba da bude između 2 i 8 mm, a struktura uključuje tri vrste pora: zatvorene, otvorene i povezane. Otvorene pore omogućavaju prodor vode unutar betona i utiču na čvrstoću, dok povezane pore omogućavaju drenažu. Ukupna poroznost obično uključuje 10–20% zatvorenih i 80–90% efektivnih pora. Broj, oblik i veličina pora direktno utiču na disipaciju energije pod opterećenjem – veće pore povećavaju koncentraciju napona i smanjuju žilavost, pa je važno odabrati odgovarajuću cementnu pastu i agregat kako bi propusni beton ispunio svoju osnovnu funkciju [16].

Usvajanje i primena principa cirkularne ekonomije, kroz korišćenje otpadnih i recikliranih materijala u građevinarstvu, jedna je od aktuelnih tema u naučnim istraživanjima u oblasti građevinskih materijala i održive izgradnje [17]. Širok spektar industrijskih nusproizvoda moguće je upotrebiti za proizvodnju građevinskih materijala, između ostalog i poroznih betonskih ploča.

Delimična zamena cementa i prirodnog agregata, čak i u manjim procentima, doprinosi značajnom smanjenju efekata staklene bašte, očuvanju prirodnih resursa i podstiče održivi razvoj. Delimična zamena cementa nekim od otpadnih materijala (eng. Supplementary cementitious materials, SCM), koji najčešće završavaju na deponiji, pruža višestruke koristi ukoliko se implementira na način koji ne utiče značajno na ključna svojstva finalnog proizvoda [18].

Iako porozni betoni i propusne podloge pružaju značajne prednosti u infiltraciji atmosferskih voda i smanjenju površinskog oticaja, njihova primena ima i određene izazove. Smanjena čvrstoća u odnosu na konvencionalni beton može ograničiti upotrebu u oblastima sa velikim saobraćajnim opterećenjem, dok dugoročna funkcionalnost zavisi od redovnog održavanja, jer pore mogu biti začepljene sedimentima, lišćem ili drugim česticama.

Klimatski ekstremi, poput smrzavanja, odmrzavanja i velikih količina padavina, mogu dodatno uticati na trajnost i efikasnost ovih površina. Takođe, početni troškovi izgradnje i kompleksnost instalacije često su veći nego kod standardnih betonskih ili asfaltnih površina, što zahteva pažljivo planiranje i optimizaciju dizajna kako bi se ostvarila dugoročna održivost i funkcionalnost sistema [6, 15, 19, 20].

4. Zaključak

Urbanizacija i klimatske promene dovode do sve učestalijih pluvijalnih poplava u gradskim sredinama, prvenstveno zbog smanjene evapotranspiracije i infiltracije atmosferskih voda i povećanog površinskog oticaja sa vodonepropusnih površina.

Tradicionalni sistemi kanalizacije često nisu u stanju da prihvate velike količine padavina u kratkom vremenu, što izaziva akumulaciju vode na površinama i transport zagađujućih materija u recipijente. U tom kontekstu, prirodom inspirisana rešenja i zelena infrastruktura postaju ključni pristupi za ublažavanje negativnih efekata urbanih poplava, kroz zadržavanje, filtraciju i kontrolisano oticanje atmosferskih voda.

Porozne betonske i asfaltne podloge, uz pravilnu konstrukciju slojeva, kontrolisanu poroznost i izbor agregata, omogućavaju efikasnu apsorpciju kišnice, smanjenje vršnih protoka i očuvanje nosivosti površina. Integracija ovih rešenja sa drugim elementima zelene infrastrukture, poput kišnih bašta, bioretenzionih vrtova i drenažnih sistema, dodatno poboljšava kapacitet gradskih slivova za prihvat atmosferskih voda.

Primena recikliranih i otpadnih materijala u izradi poroznih podloga doprinosi održivosti, smanjenju emisije CO_2 i očuvanju prirodnih resursa, čineći ih ključnim elementom u razvoju ekološki otpornijih i održivijih urbanih sredina.

Zahvalnica

Ovo istraživanje finansirano je od strane UNDP programa „EU za Zelenu agendu u Srbiji – Cirkularna ekonomija za efikasno korišćenje resursa i industrijsku simbiozu“, kroz projekat „Zero–waste porozne površine kao alternativa za gradove otporne na poplave“ (ID: 00139323/00129089/2023/3); Fonda za inovacionu delatnost Republike Srbije, u okviru Programa saradničkih grantova, kroz projekat „ECO FLOW prefabrikovani porozni betonski elementi“ (ID: 52553)

5. Literatura

[1] Blenkinsop S, Muniz L, Smith A. J. P. Climate Change Increases Extreme Rainfall and the Chance of Floods. *ScenceBrief Review* in: Critical Issues in Climate Change Science, edited by: C. Le Quéré, P. Liss & P. Forster, https://doi.org/10.5281/zenodo.4779119, 2021.

[2] Winston R. J, Arend K, Dorsey J. D. and Hunt W.F. *Water Quality Performance of a Permeable Pavement and Stormwater*, 2020.

[3] Sullivan S, Bowers R. *Low-Impact Development: Concrete Options for Porous Pavements*. Construction Canada. 2013.

[4] Deletic, A, Qu, J, Bach P. M, Liu, G., Wang, A., & Zhang, K. *The multi-faceted nature of Blue-Green Systems coming to light. Blue-Green Systems*, 2(1), 186–187. https://doi.org/10.2166/BGS.2020.002, 2020

[5] Kisser J, Wirth M, de Gusseme B, van Eekert M, Zeeman G, Schoenborn A, Vinnerås B, Finger D. C, Repinc S. K, Bulc T. G, Bani A, Pavlova D, Staicu L. C, Atasoy M, Cetecioglu Z, Kokko M, Haznedaroglu B. Z, Hansen J, Istenič D, … Beesley, L. *A review of nature-based solutions for resource recovery in cities. Blue-Green Systems*, 2(1), 138–172. https://doi.org/10.2166/-BGS.2020.930, 2020.

[6] O'Donnell E, Thorne C, Ahilan S, Arthur S, Birkinshaw S, Butler D, Dawson D, Everett G, Fenner, R, Glenis V, Kapetas L, Kilsby C, Krivtsov V, Lamond J, Maskrey S, O'Donnell G, Potter K, Vercruysse K, Vilcan T. & Wright, N. The blue-green path to urban flood resilience. *Blue-Green Systems*, 2(1), 28–45. https://doi.org/10.2166/BGS.2019.199/868261/BGS2019199.PDF, 2020.

[7] Debnath, B., & Sarkar, P. P. (2018). Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(12), 1516–1531. https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217

[8] Antunes L. N, Ghisi E. & Severis R. M. Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building. *Science of The Total Environment*, 746, 141087. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141087, 2020.

[9] Guan X, Wang J. & Xiao F. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127022. https://doi.org/-10.1016/J.JCLEPRO.2021.-127022, 2021.

[10] Đukić A, Lekić B, Babić B, Govedarica O. & Rajaković-Ognjanović V. Prirodom inspirisana rešenja infrastrukture urbanog odvodnjavanja – Mogućnosti primene i ograničenja. *Voda i sanitarna tehnika*, LII(4), 15-24, 2024..

[11] Djukić A, Lekić B, Rajaković-Ognjanović V, Naunović Z, Prodanović D. Build-up and characterisation of pollutants on urban impervious surfaces, *Water Science & Technology*, Vol. 77.8, 2123-2133. doi: 10.2166/wst.2018.128, 2018.

[12] Holm A, Holm, K. E., Shelton, D. P., Rodie, S. N., Feehan, K. A. & Franti, T. G. Stormwater Mangement: What Stormwater Management Is and Why It Is Important. University of Nebraska, Lincoln, „Report on Pervious Concrete," American Concrete Institution, 2014.

[13] Sprouse C. E, Hoover C, Obritsch O. & Thomazin H. Advancing Pervious Pavements through Nomenclature, Standards, and Holistic Green Design. *Sustainability 2020*, Vol. 12, Page 7422, 12(18), 7422. https://doi.org/10.3390/SU12187422, 2020.

[14] Muttuvelu D. V, Wyke S. & Vollertsen J. Are Permeable Pavements a Sustainable Solution? A Qualitative Study of the Usage of Permeable Pavements. *Sustainability 2022*, Vol. 14, Page 12432, 14(19), 12432. https://doi.org/10.3390/SU141912432., 2022

[15] Ramadhansyah P. J, Mohd Ibrahim M. Y, Mohd Rosli H, Mohd Haziman W. I. A Review of Porous Concrete Pavement: Applications and Engineering Properties, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 554, 2014.

[16] Sprouse E. C. III, Hoover C, Obritsch O, Thomazin H. Advancing Pervious Pavements through Nomenclature, Standards and Holistic Green Design, MDPI, *Jornals/Sustainability*, Volume 12, 2020 Issue 18, 10.3390/ su12187422, 2020.

[17] Ahmed T, Hoque S. Study on pervious concrete pavement mix designs, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 476, 012062, doi:10.1088/1755-1315/476/1/012062, 2020.

[18] Harber P. *Applicability of No-Fines Concrete as a Road Pavement*, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2015.

[19] Nodehi M. & Taghvaee V. M. Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics. *Circular Economy and Sustainability* 2022 2:3, 2(3), 987–1020. https://doi.org/10.1007/S43615-022-00149-X, 2022.

[20] Khankhaje E, Kim T, Jang H, Kim C. S, Kim J. & Rafieizonooz M. Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: A review. *Developments in the Built Environment,* 14, 100130. https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2023.100130, 2023.

[21] Singh A, Sampath P. V. & Biligiri K. P. (2020). A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. *Construction and Building Materials*, 261, 120491. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120491, 2020.

Жарко Сретеновић[1], Лазар Радивојевић[2]
Марко Ђурчић[3], Миодраг Поповић[4]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25231S

ПРИМЕНА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛИРАЊА У ПЛАНИРАЊУ АТМОСФЕРСКЕ КАНАЛИЗАЦИЈЕ – НАСЕЉА СЕВЕРНО ОД КАНАЛА СЕБЕШ

Резиме: У раду су приказани резултати хидрауличког моделирања система атмосферске канализације за сливно подручје северно од канала Себеш (Борча, Овча, насеље Збег). Модел је развијен коришћењем софтверског пакета MIKE+, уз примену синтетичких рачунских киша формираних методом Chicago Design Storm. Анализирано је више варијантних решења, а избор оптималне конфигурације распореда колектора и пумпних станица спроведен је применом AHP методе вишекритеријумске анализе. Добијени резултати модела омогућили су прецизно димензионисање система и његову оптимизацију. Рад потврђује значај математичког моделирања у савременом урбаном планирању и заштити од плављења, али наглашава и друге важне факторе који су неопходни за успешну имплементацију техничког решења.
Кључне речи: атмосферска канализација, математичко моделирање, заштита од плављења

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN STORMWATER NETWORK PLANNING – SETTLEMENTS NORTH OF THE SEBEŠ CANAL

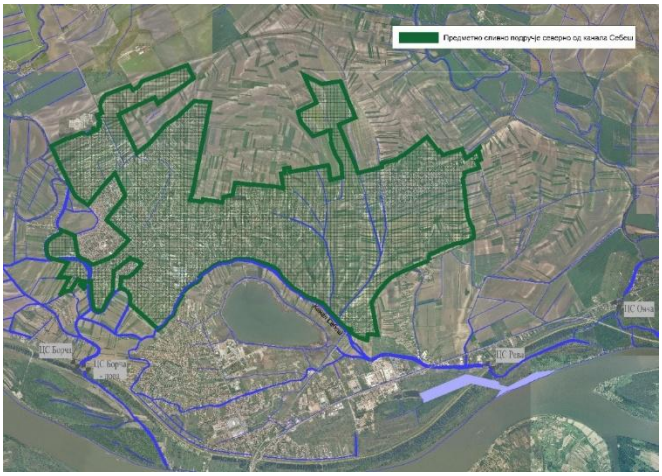
Abstract: The paper presents the results of hydraulic modeling of the stormwater drainage system for the catchment area north of the Sebeš Canal (Borča, Ovča, Zbeg settlement). The model was developed using the MIKE+ software package, applying synthetic design storms generated by the Chicago Design Storm method. Several alternative solutions were analyzed, and the optimal configuration of collectors and pumping stations was selected using the AHP multi-criteria analysis method. The obtained model results enabled precise system dimensioning and optimization. The paper confirms the importance of mathematical modeling in modern urban planning and flood protection, while also emphasizing other key factors necessary for the successful implementation of the proposed technical solution.
Key Words: stormwater drainage, mathematical modeling, flood protection

[1] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, zarko.sretenovic@jcerni.rs; ORCID: 0000-0002-3931-6569*
[2] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, lazar.radivojevic@jcerni.rs*
[3] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, marko.curcic@jcerni.rs*
[4] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, miodrag.popovic@jcerni.rs*

1. Увод

Банатски канализациони систем обухвата леву обалу Дунава и на њему је заснован сепарациони систем одвођења отпадних и атмосферских вода. Према постојећем Плану генералне регулације Града Београда, на простору који је предвиђен за урбанизацију и индивидуално становање, планирано је одвођење атмосферских вода зацевљеном мрежом колектора. На овај начин би се атмосферске воде гравитационо евакуисале ка локацијама на којима су црпне станице, а које би служиле за препумпање кишних вода у мелиоративне канале – реципијенте атмосферских вода предметног подручја. Главни одводни канали на предметној територији су мелиоративни канали: Себеш, Каловита, Визељ и Ботош. Сва вода из мелиорационих канала се доведи до мелиорационих црпних станица МЦС „Рева“, МЦС „Борча“ и МЦС „Овча“, одакле се препумпава у Дунав.

У оквиру радова на проширењу Банатског канализационог система, планирано је пројектовање и изградња атмосферске канализације насеља северно од канала Себеш. Дефинисано је подручје од око 2.000 ha (слика 1) у оквиру којег је потребно планирати изградњу атмосферске канализације. Изградња атмосферске канализације имаће значајан утицај на живот и сигурност грађана ове урбане целине. Системом кишне канализације омогућиће се брже и ефикасније одвођење вишка атмосферских вода са улице и других урбаних површина, чиме се смањује ризик појаве штете од поплава и осталих непријатности које могу настати као последица прекомерних падавина. Изградња атмосферске канализације допринеће побољшању квалитета живота у овим градским насељима, спречавањем стварања локација које су подложне задржавању воде, настанку непријатних мириса као и појаве инсеката. Очекивано је да наведени позитивни ефекти допринесу повећању вредност некретнина и земљишта у оквиру предметног подручја, и да ову област учине атрактивнијом за живот и инвестирање.



Слика 1. Предметно сливно подручје северно од канала Себеш
Figure 1. The catchment area north of the Sebeš Canal

2. Приступ у анализи и планирању атмосферске канализације

Полазну основу за конципирање решења представљали су урбанистички планови и подлоге којима је, између осталог, дефинисан будући развој и диспозиција канализационе мреже на подручју северно од канала Себеш. Коришћена је релевантна планска и студијска документација (актуелни ПГР-ови и ПДР-ови, Студија уређења вода Панчевачког рита и План развоја канализационог система општине Палилула) што је омогућило сагледавање просторних и хидротехничких услова за одвођење атмосферских вода.

На основу урбанистичких података и геодетских истражних радова, извршена је анализа терена и идентификација карактеристичних подсливова. Формиране су независне сливне целине које представљају природне и технички условљене јединице за прикупљање и одвођење атмосферских вода. Свака целина је дефинисана у односу на границе непропусних површина, постојеће или планиране инфраструктурне капацитете и реципијент.

Након сагледавања праваца развоја атмосферске канализационе мреже из наведених подлога, формирана су варијантна решења каналисања. У процесу дефинисања варијанти анализирана су и постојећа искуства са функционисањем канализационих система у другим деловима града, пре свега на примеру Новог Београда, са аспекта усвојених техничких решења, капацитета и експлоатационих карактеристика. Метода аналитичких хијерархијских процеса (AHP) је коришћена за постављање приоритета, вредновање варијантних решења и одабира техничког решења.

Хидролошке подлоге засноване су на важећим подацима о падавинама за подручје града Београда. Коришћене су ИТП (интензитет–трајање–повратни период) криве, на основу којих су формирани синтетички хидрограми типа Chicago Design Storm (CDS) за различите повратне периоде. Подаци су добијени применом Гумбелове методе на серију од 25 година мерења, што је омогућило прорачун висина и интензитета киша кратког трајања. На основу ових кривих дефинисани су сценарији хидролошког оптерећења за потребе димензионисања и провере функционисања система кишне канализације.

За симулацију рада канализационе мреже примењен је софтвер MIKE+, интегрисана платформа за хидродинамичко моделирање урбаних система, која омогућава хидродинамичку симулацију протока и нивоа воде при неустаљеном течењу у цевима, у системима атмосферске и фекалне канализације.

3. Анализа варијантних решења

3.1. Разматрана варијантна решења

Варијанта 1 представља 12 независних система, иницијално подељених сливних подручја који формирају независне целине величине од око 200 ha. Пројектовано је гравитационо одвођење кишних вода, а пошто је терен претежно равничарски неизбежно је и дубоко укопавање канализације. Услед тога, овим решењем дефинисана је и изградња 12 канализационих црпних станица. За локације црпних станица биране су

парцеле које су у државном власништву или које су пољопривредно земљиште на којем нема изграђених објеката. Као реципијенти за кишне воде предвиђени су најближи мелиорациони канал у односу на локације црпних станица.

Варијанта 2 садржи 10 независних система. Решење је базирано на идеји да се максимално искористи једна од главних саобраћајница овог подручја – Зрењанински пут. Планом детаљне регулације дела Зрењанинског пута са контактним подручјем, од канала Себеш до саобраћајнице Северна тангента, планирана је његова реконструкција и проширење. Реконструисан Зрењанински пут служио би као траса главног правца сакупљања и одвођења кишних вода из најгушће насељеног и највише урбанизованог дела предметног подручја. Ово решење предвиђа два велика кишна колектора, у левој и десној траси пута, који се простиру све до канала Себеш, где се помоћу централне црпне станице сакупљена вода препумпава у канал. Остале сливне целине су предефинисане, услед груписања сливних подручја око Зрењаниског пута.

3.2. Критеријуми приликом избора оптималног решења

Приликом избора оптималног решења, разматрани критеријуми и ограничења су:

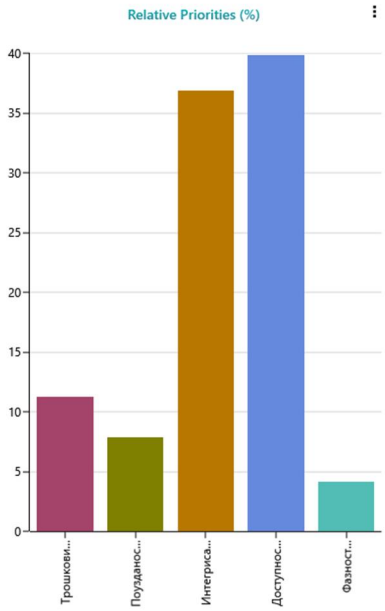
- Трошкови изградње, управљања и одржавања,
- Поузданост система,
- Интегрисаност са постојећом инфраструктуром и урбанистичким плановима,
- Доступност земљишта и парцела,
- Фазност изградње и брзина реализације.

Критеријум трошкови изградње, управљања и одржавања анализира трошкове изградње објеката канализације, уградње опреме, њеног одржавања, управљања, као и остале погонске трошкове.

Поузданост система представља вероватноћу да ће систем исправно функционисати током одређеног временског периода. Код оваквог система са већим бројем црпних станица у функционисању, поузданост се посматра кроз анализу површина плавних зона у случају испада из рада црпних станица. Критеријум интегрисаности са постојећом инфраструктуром и урбанистичким плановима процењује компатибилност решења са постојећим објектима као и хармонизацију са важећим урбанистичким подлогама. Доступност земљишта и заузеће парцела оцењује могућност да се обезбеди потре-бни простор за изградњу објеката канализације са аспекта доступности земљишта за продају или откуп. Фазност изградње и брзина реализације анализира колико је пројектовано решење флексибилно у смислу парцијалне изградње и брзине каналисања одређених делова насеља, независно од реализације целокупног пројекта.

3.3. Резултати АНР анализе варијајтних решења

Варијантна решења вреднована су на основу дефинисаних критеријума, споменутих у претходном поглављу. Одређени су приоритети за критеријуме, према мерама релативне важности. Након тога, приступило се вредновању варијантних решења и процени корисности решења.



Слика 2. Тежина дефинисаних критеријума за вредновање
Figure 2. Weighting of Defined Evaluation Crite

Табела 1. Вредновање варијантних решења према појединачним критеријумима
Table 1. Evaluation of Alternative Solutions According to Individual Criteria

Критеријум	Варијанта 1	Варијанта 2
Трошкови	0.33	0.67
Поузданост система	0.67	0.33
Интегрисаност система	0.25	0.75
Заузеће парцела	0.25	0.75
Фазност изградње	0.67	0.33

На основу спроведене анализе, закључено је да је Варијанта 2 – оптимална варијанта решења. Она је детаљно разрађена и анализирана кроз математички модел.

3.4. Опис усвојеног техичког решења

Будући систем атмосферске канализације насеља северно од канала Себеш заснован је на 10 независних сливних целина, од којих највећу представља слив КЦС „Зрењанински пут“ (437 ha), а најмању слив „Железничка станица“ (38,62 ha). Сваки слив завршава се кишном црпном станицом, одакле се, након пречишћавања у сепараторима уља и масти, вода испушта у мелиорационе канале (Мокри Себеш, Борчански Преток, Визељ, Стојкова бара и Сибница). Укупно је планирано 10 црпних станица,

разврстаних у три типа према капацитету: тип 1 – велики капацитет (8.000 l/s), тип 2 – средњи капацитет (2.200–4.000 l/s), 3 – мали капацитет (400–1.000 l/s). Црпне станице су шахтног типа, са уливним грађевинама, утопним пумпама, дистрибутивним шахтовима и сепараторима уља и масти. За транспорт већих количина атмосферске воде предвиђена је комбинација аутоматских и ручних решетки, преливних грађевина и потисних цевовода.

4. Формирање математичког модела

4.1. Софтвер за хидрауличко моделирање MIKE+

У оквиру интегрисане платформе за моделирање MIKE+, развијене од стране Данског хидрауличког института (DHI), симулације је могуће спроводити као појединачне догађаје или као континуиране појаве одређеног трајања. Процес моделирања обухватио је следеће кораке: дефинисање физичких података о мрежи, постављање граничних услова, подешавање параметара, покретање симулације и, на крају, анализу резултата.

Математички модел је обухватио примарну и секундарну мрежу, укључујући црпне станице, колекторе и изливе. Проток и ниво воде симулирани су решавањем Saint–Venant једначина методом коначних разлика, што је омогућило реалистичан приказ понашања система при различитим хидролошким оптерећењима.

4.2. Моделирање површинског отицаја

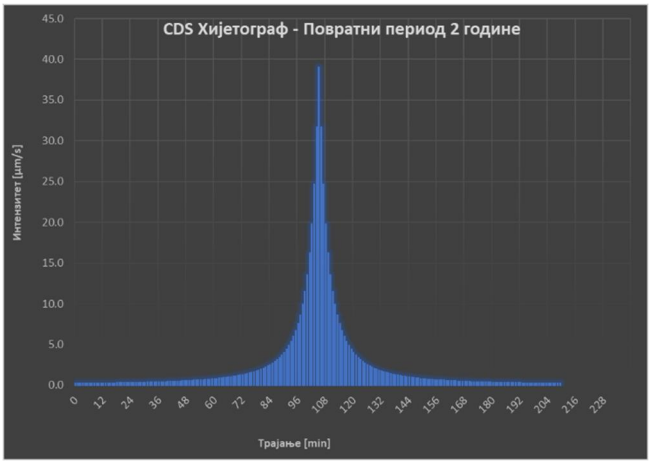
За симулацију површинског отицаја атмосферске воде примењен је Time–Area модел, заснован на методи време–површина. Модел одређује хидрограм отицаја на основу процента непропусних површина, фактора хидролошке редукције, почетног губитка влажења, као и времена концентрације које се аутоматски израчунава за сваки подслив уз помоћ GIS алата.

4.3. Гранични и почетни услови модела

Да би модел могао функционисати, осим физичких елемената модела, морају се дефинисати и гранични услови у моделу. Највећи део граничних услова представљају различита хидрауличка оптерећења (падавине, инфилтрација, отпадне воде, итд.). Главна карактеристика ових граничних услова је да садрже транспортно средство – воду.

4.4. Рачунска киша – Chicago Design Storm

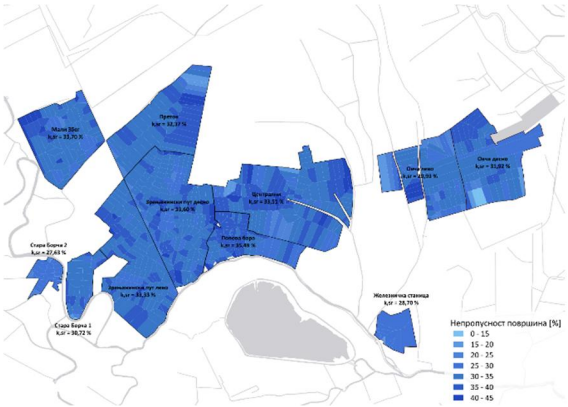
За анализу и димензионисање система кишне канализације насеља северно од канала Себеш примењују се синтетички хијетограми типа Chicago Design Storm, развијени на основу ИТП кривих за Београд. Ови хијетограми обухватају трајања киша од 5 до 210 минута, при чему се максимално трајање од 210 минута сматра довољним за обухват критичних услова појаве максималних протока. Хијетограми су развијени у минутним интервалима (нпр. 211 тачака за кишу трајања 210 минута), са симетричном расподелом интензитета око централне тачке. Израчунавање интензитета изведено је оптимизационим моделом који минимизује одступања у односу на ИТП криву.



Слика 3. CDS за подручје Београда, трајања 210 минута и повратног периода 2 године
Figure 3. CDS for the Belgrade area, duration 210 minutes and return period of 2 years

4.5. Карактеристике сливова и подсливова хидролошког модела

Делинеација на основне сливне јединице урађена је уз помоћ GIS – ових алата у MIKE + софтверу по правилу поделе на Тиесенове полигоне. На основу прорачуна падавине отицај (rainfall-runoff) јединичних сливова, урађен је хидраулички прорачун и димензионисање атмосферске канализационе мреже.



Type of Development	C
Urban business	0.70–0.90
Commercial office	0.50–0.70
Residential development	
Single-family homes	0.30–0.50
Condominiums	0.40–0.60
Apartments	0.60–0.80
Suburban residential	0.25–0.40
Industrial development	
Light industry	0.50–0.80
Heavy industry	0.60–0.90
Parks, greenbelts, cemeteries	0.10–0.30
Railroad yards, playgrounds	0.20–0.40
Unimproved grassland or pasture	0.10–0.30

Слика 4. Непропусност сливних површина (лево) и коефицијенти отицаја према подручју одводњавања (десно)
Figure 4. Imperviousness of subcatchments (left) and runoff coefficients by drainage area (right)

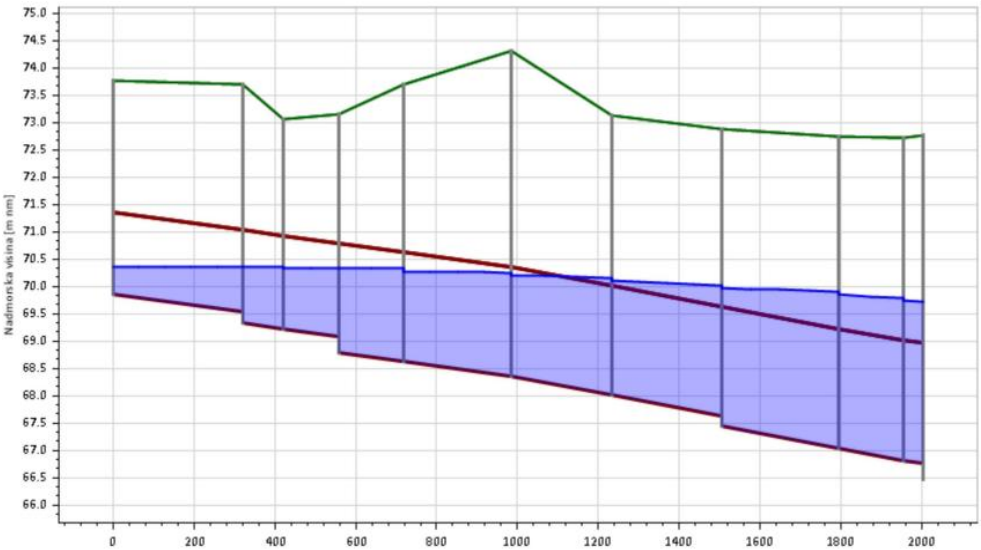
Након дигитализације Плана намена површина из Урбанистичких подлога, свакој дефинисаној намени површина придодељен је одређени степен учешћа непропусних површина. На основу софтверског алата, а користећи GIS платформу, подсливовима је

додељен одређени степен (проценат) непропусности у функцији учешћа свих намена површина на конкретном подсливу. Овим поступком добијене су сумарне вредности непропусности површина за целокупно предметно подручје. Приликом процене степена непропусности површина, који је неопходан податак за потребе хидрауличког моделирања у софтверу MIKE+ и примену хидролошког модела Time – Area, као базни ослонац коришћени су подаци у литератури везани за коефицијенте отицаја и примену рационалне методе. Коефицијенти отицаја посматрани су према опису подручја као и према врсти површине са које се врши одводњавање.

5. Резултати хидрауличког модела

Хидрауличко моделирање омогућило је оптимизацију траса и профила цевовода, као и детаљну анализу ретензионих способности примарне и секундарне атмосферске канализационе мреже. На тај начин, запремина цевовода је искоришћена као додатни ретензиони простор који задржава дозвољену количину атмосферске воде пре њеног препумпавања у реципијенте.

Оваквим приступном постигнуте су значајне уштеде у погледу капацитета црпних станица, што је резултирало индиректно и смањеним просторним захтевима као и нижом енергетском потрошњом токо експлоатације. Истовремено, моделирање је потврдило успешан избор предложене концепције решења и обезбедило поуздану основу за даље фазе пројетковања и реализације.



Слика 5. Попречни профил атмосферског колектора у Зрењанинском путу приликом киша повратног периода T=2год

Figure 5. Longitudinal profile of the stormwater collector along Zrenjaninski put during rainfall with return period of T = 2 years

6. Закључна разматрања

Примена математичког моделирања неизбежна је у савременом планирању система атмосферске канализације, јер омогућава реалистично сагледавање понашања система у различитим сценаријима оптерећења. Развијени хидролошко–хидраулички модел у софтверу MIKE+, уз примену синтетичких киша CDS и Time–Area модела површинског отицаја, показао је да се запремина цевовода може искористити као додатни ретензиони простор. На тај начин, значајно се смањује оптерећење црпних станица, постижу се уштеде у броју и капацитету пумпних агрегата, смањују просторни захтеви и обезбеђује енергетска ефикасност система.

Ипак, математичко моделирање представља тек једну фазу ка успешној реализацији техничког решења. Пре пуштања у рад будућег система атмосферске канализације, неопходно је реконструисати и измуљити канале који ће бити реципијенти, као и прилагодити партерно уређење јавних површина (улице, тргове, тротоаре) ради ефикасног гравитационог одвођења кишних вода ка сливницима. Ови задаци су нарочито изазовни у непланski изграђеним насељима, каква су насеља северно од канала Себеш.

Посебан акценат је и на неопходности паралелне изградње фекалне канализације, у супротном постоји реалан од нелегалних прикључака и испуштања фекалних вода у атмосферску канализацију.

Узимајући у обзир ефекат климатских промена, све чешћих појава екстремних киша већег интензитета и краћег трајања, као и убрзану урбанизацију предметног подручја, јасно је да будућа стратегија мора бити усмерена на смањење кишног отицаја на месту његовог настанка.

Интеграција зелене инфраструктуре (кишне баште, зелени кровови, пропусне подлоге, биоретензије) и локалних решења (сакупљање кишнице, преусмеравање олука на пропусне површине) доноси директне и тренутне користи – смањење оптерећења система, унапређење квалитета животне средине и повећање отпорности урбаних средина на поплавне ризике.

Да би се то постигло, потребно је у урбанистичким планским документима развити јасне смернице, прописати мере и резервисати простор за примену зелене инфраструктуре. Тиме се обезбеђује интеграција традиционалних и одрживих решења, што представља основ за дугорочну, отпорну и еколошки прихватљиву урбану инфраструктуру.

7. Литература

[1] Schaake J. C, Geyer J. C, and Knapp J. W, *Experimental examination of the rational method*, ASCE, 1967.

[2] DHI: *MIKE+Release 2024 Update 1*, Danish Hydraulic Institute (DHI). Hørsholm, Denmark,2024.

[3] Урбанистички завод Београда: План генералне регулације грађевинског подручја седишта јединице локалне самоуправе - Град Београд (целине I - XIX), *Сл. лист града Београда* бр. 91/23, 2016.

[4] Урбанистички завод Београда: План детаљне регулације дела Зрењанинског пута са контактним подручјем, од канала Себеш до саобраћајнице Северна тангента, *Сл. лист града Београда* бр. 59/24, 2022.

[5] Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, *Студија уређења вода на подручју Панчевачког рита*, Београд, 2020.

Ivan Milojković[1]

Pregledni naučni rad
DOI: 10.5937/VIK25241M

NOVA VARIJANTA METODE ZA VIŠEKRITERIJUMSKO ODLUČIVANJE FAZI-AHP-VIKOR

Rezime: Nakon prethodne analize i eksperimentalnog rada pristupa se određivanju metode optimizacije pri primeni konsalting usluga. Nova metoda se posmatra u okviru „key study“ na primerima projektovanja građevinskih komunalnih hidrotehničkih objekata za evakuaciju otpadnih voda. Razvija se nova varijanta metode za višekriterijumsko odlučivanje (MCDM) FAZI-AHP-VIKOR. Nova varijanta metode se razvija u svrhu rešavanja složenih problema upravljanja projektima određivanjem optimalnog projektantskog rešenja.
Ključne reči: FAZI, AHP, VIKOR

A NEW VARIANT OF THE METHOD FOR MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING FUZZY-AHP-VIKOR

Abstract: After the previous analysis and experimental work, the determination of the optimization method in the application of consulting services is approached. The new method is observed within the "key study" on examples of the design construction of communal hydrotechnical facilities for the evacuation of wastewater. A new variant of the multi-criteria decision-making method (MCDM) FAZI-AHP-VIKOR is being developed. A new variant of the method is developed for the purpose of solving complex project management problems by determining the optimal design solution.
Key Words: Fuzzy, AHP, VIKOR

1. Uvod

Analizira se optimalno upravljanje projektima objekata za evakuaciju otpadnih voda sa stanovišta projektanta i razvoj nove varijante FAZI-AHP-VIKOR metode sa primenom na primeru projektovanja i izgradnje pumpne stanice atmosferskih voda za kompleks Makiš. Razmatrani su cevovodi i šahtovi oko tretmana i pumpne stanice potrebni za pravilno funkcionisanje sistema kao i cevovod od pumpne stanice do recipijenta.

Problem naučnog istraživanja je razvoj nove varijante FAZI-AHP-VIKOR metode koja se razvija zbog određivanja optimalnog rešenja projektovanja građevinskih objekata u svrhu rešavanja složenih problema upravljanja projektima. Nova varijanta metode se upoređuje sa AHP i VIKOR metodama. Daje se doprinos primeni razvoja metode višekriterijumske optimi-

[1] *Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, ivan.milojkovic@jcerni.rs, ORCID: 0000-0003-4108-7774*

zacije u fazi izrade prethodnih studija opravdanosti i studija opravdanosti koje po važećem Zakonu o planiranju i izgradnji podrazumevaju obaveznu izradu idejnih rešenja i idejnih projekata. Takođe u izradi samih idejnih rešenja, idejnih projekata i druge dokumentacije u fazi razrade i odabira konačnih projektantskih rešenja gde se naročito primenjuju metode višekriterijumske optimizacije i gde je neophodno pronaći i predložiti optimalna rešenja za projektovanje izgradnje objekata, razvoj nove varijante metode višekriterijumske optimizacije nalazi svoju punu primenu.

Istražuje se upravljanje projektima hidrotehničkih objekata za evakuaciju otpadnih voda sa gledišta projektanta koji obuhvata primenu naučnih metoda za rešavanje kompleksnih problema upravljanja i organizacije privrednih, administrativnih, kompleksnih problema upravljanja i organizacije privrednih, adnimistrativnih, vojnih i drugih kibernetičkih sistema u upravljanju projektovanjem hidrotehničkih objekata. To je interdisciplinarna oblast u kojoj se primenjuju razne kvantitativne metode i tehnike za pronalaženje optimalnih ili za korisnika najprihvatljih rešenja za donošenje upravljačkih odluka. Teorija fazi logike koja se takođe razmatra, ima za cilj da obezbedi matematički okvir za tretiranje nepreciznosti i neodređenosti imanentne čovekovim sajznajnim procesima kao što su mišljenje i rezonovanje. Razmatraju se sistemi za kanalisanje, tretman i odvođenje otpadnih voda koji se obrađuju i metodom VIKOR (Višekriterijumsko Kompromisno Rešenje ili VIšekriterijumsko Kompromisno Rangiranje) – to je metoda koja je razvijena za određivanje višekriterijumskog optimalnog rešenja [15].

Predmet naučnog istraživanja je višekriterijumsko odlučivanje (multi-criteria-decision-making: MCDM) i razvoj nove varijante FAZI-AHP-VIKOR metode (Fazi metoda, proces analitičke hijerarhije – optimizacija sa više kriterijuma i kompromisno rešenje) [14], metoda sa fazi pristupom koja se razvija u svrhu rešavanja složenih problema upravljanja projektima. Na primeru projektovanja kanalizacionih sistema u okviru konsalting usluga – stručnih usluga koje zainteresovanim korisnicima mogu pružiti nezavisne i samostalne stručne organizacije i pojedini stručnjaci, koristeći stručno znanje i iskustvo, te sistemski i analitički pristup u upoznavanju i rešavanju praktičnih problema, istražuje se i razvija napred navedena metoda operacionih istraživanja, i razmatraju se naročito metode višekriterijumskih optimizacija poput AHP metode i VIKOR metode, kao i proučavanje upotrebe fazi logike u rešavanju problema u upravljanju projektima hidrotehničkih objekata za evakuaciju otpadnih voda sa gledišta projektanta. U ovom istraživanju koristi se i istražuje ocena prema Saaty-jevoj skali (Zhu i ostali, 2020) i vrednosti rasplinutog broja ocene kriterijuma i alternativa, s obzirom da su alternative i kriterijumi procenjeni korišćenjem rasplinutih brojeva.

Metod analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP), kao i druge metode sa više kriterijuma, [15, 5, 11, 12] se koristi za određivanje prioriteta faktora rizika u građevinskim projektima. Modeli [17, 18, 19] služe za izbor odgovarajuće metode projektovanja i konstruisanja objekata zasnovanih na fazi AHP sa trouglastim i trapezoidnim rasplinutim brojevima (elementi rasplinutih skupova) sa konceptiom α reza. Praščević N. i Praščević Ž. [18, 19] razmatrali su problem izbora konstruktivnog sistema za izgradnju industrijske hale prema propisanim kriterijumima.

VIKOR metoda je razvijena za određivanje višekriterijumskog optimalnog rešenja. Konačnu odluku donosi donosilac odluke koji ima složenu strukturu i nedovoljno izraženu

preferenciju u postupku optimizacije [1, 4,]. Mogućnosti metode AHP-VIKOR korišćene su za različita istraživanja [2, 13, 16]. Meniz i Ozkan [13] koriste ovu metodu za selekciju vakcine za COVID-19 metod AHP i novu varijantu VIKOR fazi pristupa. Ozekencija [16] za identifikaciju ključnih faktora uspeha e-logistike u Turskoj koristi integrisanu metodologiju AHP-VIKOR. Akmaludin i drugi [2] prestavlja sistem za podršku odlučivanju za odabir pametnog telefona sa preporukama AHP-VIKOR metode.

Teorija fazi logike ima za cilj da obezbedi matematički okvir za suočavanje sa nepreciznošću i neodređenošću imanentnim ljudskim kognitivnim procesima kao što su mišljenje i rasuđivanje [6]. Nova varijanta FAZI-AHP-VIKOR metode [14] dobija se povezivanjem i spregom različitih pomenutih metoda na realnim podacima o projektima uz stabilna kompromisna rešenja.

2. Metode i eksperiment

2.1. Prikupljanje podataka

Tokom naučnog istraživanja važno je da istraživač razlikuje pojave i procese od činjenica i podataka [8]. Pojave i procesi deo su objektivne stvarnosti, činjenice su osetilni doživljaji te stvarnosti, a podaci su simbolički registrovane činjenice. Metodama za prikupljanje podataka istraživač „osluškuje“ delove stvarnosti o kojima razmišlja, kako bi o njima dobio osetilne informacije. Registracijom osetilnih informacija dolazi do podataka koji su iskustvena evidencija o varijablama. Osnovne tehnike za prikupljanje podataka u procesu naučno-istraživačkog rada su posmatranje, anketa i intervju.

2.2. Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP)

U okviru Operacionih istraživanja [7, 20], Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP), poput drugih višekriterijumskih metoda [3, 5, 12,] se koristi za dobijanje prioriteta faktora rizika u građevinskim projektima.

2.3. Fazi (Fuzzy) metoda

Teorija fazi logike ima za cilj da obezbedi matematički okvir za tretiranje nepreciznosti i neodređenosti imanentne čovekovim saznajnim procesima kao što su mišljenje i rezonovanje. Nepreciznosti imanentne rečima onemogućuju jednostavnu ili čak primenu opšte teorije dvovrednosne logike i klasičnu teoriju skupova.

2.4. Metoda VIKOR

Ova metoda je razvijena i predložena od strane prof. dr Serafima Opricovića za rešavanje višekriterijumskih problema optimizacije u različitim oblastima privrede, projektovanja i sl. Metoda VIKOR, koja se ovde prikazuje, razvijena je za određivanje višekriterijumski optimalnog rešenja. Konačnu odluku donosi donosilac odluke koji ima složenu strukturu i nedovoljno izraženu preferenciju u postupku optimizacije. Metoda VIKOR je razvijena na takvim metodološkim osnovama da se donosiocu odluke predlaže alternativa (ili rešenje) koja:

a) predstavlja kompromis između želja i mogućnosti

b) predstavlja kompromis između različitih interesa učesnika u odlučivanju.

3. Nova varijanta FAZI-AHP-VIKOR metode

Za određivanje višekriterijumskog optimalnog rešenja koristi se nova varijanta FAZI–AHP–VIKOR metode [14]. AHP-VIKOR metodu proučavali su pojedini autori [2, 13, 16]. Konačnu odluku donosi donosilac odluke koji ima složenu strukturu i nedovoljno izraženu preferenciju u postupku optimizacije.

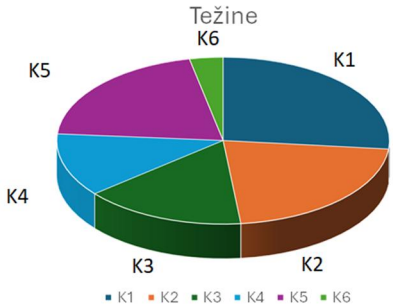
Metod zahteva da su vrednosti kriterijumskih funkcija poznate, formira se matrica za sve alternative sprovođenjem algoritma AHP metode gde se određuju jednokritijumske vrednosti ocena alternativa po kriterijumima:

$$|f_{ij}|_{nxJ} \qquad (1)$$

gde je i redni broj kriterijuma i = 1, …, n, a j redni broj varijante j=1, …, J.

4. Rezultati i diskusija

U analizi, u razvoju i primeni nove varijante FAZI-AHP-VIKOR metode razmatrana su alternativna rešenja tretmana atmosferskih voda za kompleks Makiš, cevovodi i šahtovi oko tretmana i pumpne stanice što je sve opisano u projektu: Izrada projekta za izvođenje i izgradnja pumpne stanice i objekata za tretman i odvođenje atmosferskih voda - Makiš (2020) Idejno rešenje, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd.



Slika 1. Upotrebljene težine kriterijuma u novoj varijanti FAZI-AHP-VIKOR metode
Figure 1. Criterion weights used in the new variant Fuzzy – HP – VIKOR methods

Konkretno, u ovom radu analizira se projektovanje i izvođenje objekta pumpne stanice (PS) i cevovoda od pumpne stanice do recipijenta – kanal Strugara. Za prikupljanje podataka pored prikupljanja, posmatranja i upotrebe projektne dokumentacije korišćena je i DELFI metoda. Sa obzirom da se radi o veoma usko stručnoj oblasti istraživanja izabran je neveliki broj eksperata koji se bave projektovanjem objekata u komunalnoj hidrotehnici za specifične slučajeve građevina kao što je prikupljanje i tretman atmosferskih otpadnih voda u zoni izvorišta vodosnabdevanja što je slučaj posmatranog primera projektovanja KCS Makiš. Na kraju, u nastavku su data rešenja korišćenjem nove varijante FAZI – AHP- – VIKOR metode [14] uz procenu ocene kriterijuma i alternativa s obzirom na rezultate Delfi metode, prvo korišćenjem koeficijenta ν=0,5. Određivanje težina je izvršeno korišćenjem AHP algoritama za određivanje težina.

Tabela 1. Dobijeno rešenje primenom nove varijante FAZI – AHP – VIKOR metode
Table 1. Obtained solution using a new variant Fuzzy – AHP – VIKOR methods

Kompromisno rešenje		
A2-A1	A1-A3	A3-A4
0,028	0,600	0,371

5. Zaključak

U prikazanom postupku višekriterijumske optimizacije u projektovanju primenom nove varijante metode FAZI-AHP-VIKOR dobijeno je kao optimalno rešenje: u slučaju KCS Makiš: Varijanta 4 – ovom alternativom predviđeno je da se pumpna stanica izvodi kao otvoren keson – bunarski sa izlivom pod uglom u odnosu na osu kanala, koje se nakon detaljne analize napred pomenutim metodama višekriterijumske optimizacije (VKO) smatra boljim od ostalih varijanti.

Proces projektovanja je u neraskidivoj vezi i od presudnog i najvećeg uticaja na ukupne troškove projekta. U dosadašnjoj praksi ustanovljeno je da se kvalitetnom kontrolom troškova budućeg projekta u procesu projektovanja može ostvariti ukupna ušteda na projektu od 85% do 90 %. Uštede od 10 % do 15 % obično se ostvaruju pri samoj izgradnji objekata i realizaciji ostalih radova na terenu [10]. Na taj način primenjena nova varijanta višekriterijumske optimizacije FAZI – AHP – VIKOR metode daje veliki doprinos konačnom izboru projektantskog rešenja.

Rezultati projektovanja imaju odlučujući uticaj na konačan finansijski uspeh projekta posmatrano sa stanovišta investitora i sa stanovišta izvođača.

6. Literatura

[1] Abbas A. T, Sharma N, Soliman M. S, El Rayes M. M, Sharma R. C, Elkaseer A. Effect of Wiper Edge Geometry on Machining Performance While Turning AISI 1045 Steel in Dry Conditions Using the VIKOR-ML Approach, *Machines* 11, 719. https://-doi.org/10.3390/-machines11070719, 2023.

[2] Akmaludin, Suriyanto D. A, Iriadi N, Santoso B, Sukendar T. Decision Support System for SmartPhone Selection with AHP-VIKOR Method Recommendations, Sinkron: *Jurnal dan Penelitian Tekvk Informatika*, Volume 8, Number 2, April. https://doi.org/-10.33395/sinkron.-v8i2.11845, 2023.

[3] Alessio I, Ashraf L. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations, *ORI-nsight*, 22 (4), 201–220. https://pure.port.ac.uk/ws/portalfiles/portal/42847/ORI-preprint-AIshiza-ka.pdf, 2009.

[4] Anđić D, Đurović R. The use of VIKOR Method in Finding the Optimal Solution for a Special-Purpose Geodetic Network Design, *Geodestski vestnik* 67 (2), 196-212. https://doi.org/10.15292/-geodetski-vestvk.2023.02.196-212, 2023.

[5] Athawale V. M, Chakraborty S. Facility Layout Selection Using PROMETHEE II Method. The IUP *Journal of Operations Management*, 9(1-2): 81–98, 2010.

[6] Bennajeh A. & Ben Said L. Autonomous agent adaptive driving control based on fuzzy logic theory and normative behavior. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 43, 5973–5983. doi:10.3233/JIFS-213498. Available from: https://dl.acm.org/doi/abs/10.3233/JIFS-213498, 2022.

[7] Din V. B. Operaciona istraživanja u istraživanjima i razvoju zbornik radova sa konferencije održane u Case Institutu za tehnologiju, „Savremena administracija“, Beograd; Naslov originala: Operations research in research and development proceedings of a conference at Case Institute of Technology, Edited by Burton V. Dean, Copyrigth By John Wiley & Sons, Inc, New York, London, 1968.

[8] Gaćinović, R. Prikupljanje podataka u procesu naučnog istraživanja, *Politička revija*, godina (XXIX) XVI, vol=52, br. 2 / 2017, str. 137-156. https://www.ips.ac.rs/wp-content/uploads/2018/-03/PR-52-9.pdf, 2017.

[9] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, *Izrada projekta za izvođenje i izgradnja pumpne stanice i objekata za tretman i odvođenje atmosferskih voda – Makiš*, Idejno rešenje, 2020.

[10] Ivković B, Popović Ž. *Upravljanje projektima u građevinarstvu*, Građevinska knjiga, Beograd, ISBN 86-395-0447-4, 2005.

[11] Jaskowski P, Biruk S, Bucon, R. Assessing contractor selection criteria weights with fuzzy AHP method applica- tion in group decision environment, *Automation in Con- struction* 19: (2010) 120–126. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.12.014, 2010.

[12] Kessili A, Benmamar S. Prioritizing sewer rehabilitation projects using AHP-PROMETHEE II ranking method. *Water Science & Technology*, 73(2): 283–291, 2016.

[13] Meniz B, Özkan M. E. Vaccine selection for COVID-19 by AHP and novel VIKOR hybrid approach with interval type-2 fuzzy sets, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 119 105812. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105812, 2023.

[14] Milojković I, Prascevic N. Project management using the developed AHP–VIKOR method with the fuzzy approach, *Water Science & Technology*, Vol 90 No 2, 578 doi: 10.2166/wst.2024.204 https://doi.org/10.2166/wst.2024.204, 2024.

[15] Opricović, S. 2009 Compromise in Cooperative Game and the Vikor Method, *Yugoslav Journal of Operations Research*. Volume 19. Number 2. 225-238. DOI:10.2298/YUJOR0902225O https://-doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-02430902225O, 2009.

[16] Özekencia E. K. Identifying The Key Success Factors of E-Logistics in Turkey: AHP-VIKOR Integrated Methodology, *International Journal of Economics, Business and Politics*, 7 (1) 92-103 https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2867301, 2023.

[17] Pan, N. F. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method, *Automation in Construction*, 17: 958–965. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.005, 2008.

[18] Prascevic N, Prascevic Z. Application of fuzzy AHP method on eigenvalues for decision making in construction industry, *Technical Gazette*, 23(1): 57–64, 2016.

[19] Prascevic, N., Prascevic, Z. Application of fuzzy AHP for ranking and selection of alternatives in construction project management, *Journal of civil engineering and management*, ISSN 1392-3730 / eISSN 1822-3605, Volume 23(8): 1123–1135 https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1388278, 2017.

[20] Trbojević, B. *Organizacija građevinskih radova*, Naučna knjiga, Beograd, 1992.

[21] Zhu X, Meng X. & Chen Y. A novel decision-making model for selecting a construction project delivery system. *Journal of Civil Engineering and Management,* 26 (7), 635–650. https://doi.org-/10.3846/jcem.2020.12915, 2020.

Željka Ostojić[1], Strahinja Nikolić[2]
Sanja Marčeta[3], Nemanja Rak[4]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25247O

STUDIJA ŽIVOTNOG CIKLUSA SISTEMA ZA UPRAVLJANJE KIŠNIM OTICAJEM

Rezime: Osnovni cilj primene LCA studija u upravljanju kišnim oticajem je izbor između rešenja koja nude klasični sistemi kišne kanalizacije sa pretežno transportnom funkcijom i korišćenjem podzemnih kolektora i rešenja koja podrazumevaju primenu elemenata SUDS, kojima se osim transporta postiže i regulacija proticaja i smanjenje ukupne zapremine površinskog oticaja. Poteškoću za primenu LCA studija predstavlja izbor jedinstvene funkcionalne jedinice za poređenje varijantnih rešenja upravljanja kišnim oticajem. Naime, uporedive varijante i jedinstvena funkcionalna jedinica podrazumevaju da je za sve varijante koje poredimo zadovoljen primarni cilj sistema za upravljanje kišnim oticajem, a to je sprečavanje plavljenja u slivu za usvojeni nivo bezbednosti. U radu je dat pregled tipičnih ulaznih podataka potrebnih za primenu različitih LCA studija u upravljanju kišnim oticajem. Naime, LCA metodologije vrednovanja varijantnih projektnih rešenja imaju sve veću primenu u savremenoj projektantskoj i upravljačkoj praksi.
Ključne reči: studija životnog ciklusa, upravljanje kišnim oticajem

LCA STUDY OF STORM WATER MANAGEMENT SYSTEMS

Abstract: The main goal of applying LCA studies in storm water management is to make choice between solutions offered by classic rainwater drainage systems with predominantly transport function and underground collectors usage and solutions with SUDS elements application, achieving flow regulation and the total volume of surface runoff reduction, in addition to transport function. The difficulties in the LCA studies is how to make the proper choice of a unique functional unit for the comparison of variant solutions in runoff management. Namely, the comparable variants and the unique functional unit means that for all of them the the primary goal of the rainwater management system, namely prevention of flooding in the catchment limits for the adopted safety level the is satisfied. The paper provides an overview of typical input data required for the application of various LCA studies in stormwater runoff management. Namely, LCA methodologies for evaluating variants of design solutions are in common use in modern design and management practice.
Key Words: LCA study, storm water management

1. Upravljanje kišnim oticajem kao integralni deo upravljanja rizikom od poplava u urbanim sredinama

U urbanim sredinama je upravljanje kišnim oticajem povezano sa procenom rizika od poplava. Razmatranje 3PA Three Points Approach scenarija za padavine različitog povratnog

[1] *Hidroprojekat saobraćaj, Beograd, zeljka.ostojic61@gmail.com, ORCID:0009-0000-5492-8179*
[2] *Hidroprojekat saobraćaj, Beograd, strahinja.nikolic@hps.rs, ORCID:0009-0003-3906-1601*
[3] *Hidroprojekat saobraćaj, Beograd, sanja.marceta@hps.rs, ORCID:0009-00007-7129-1238*
[4] *Hidroprojekat saobraćaj, Beograd, nemanja.rak@hps.rs, ORCID:0009-0008-4196-8890*

perioda, trajanja i intenziteta (svakodnevni D-D nivo, projektni D nivo, ekstremni E nivo), uz primenu projektnih rešenja koja integrišu konvencionalne metode i elemente plavo-zelene infrastrukture je trenutno najperspektivniji pristup za davanje jasnih smernica za projektantsku praksu, što porazumeva saradnju i razmenu znanja između inženjera, urbanista, članova lokalnih zajednica i dr. Zeleni krovovi, zasadi pored puteva, kišne bašte, propusno popločanje, vertikalne bašte i sakupljanje kišnice pretvaraju kišnicu od izvora zagađenja u resurs za stvaranje urbanih oaza, uz istovremeno poboljšanje kvaliteta voda, ozelenjavanje urbanog pejzaža, hlađenje i čišćenje vazduha, smanjenje troškova grejanja i hlađenja i dr.

Slika 1. Bioretenzije kao produžetak ivičnjaka
Figure 1. Bioretention in form of curb extention
https://nacto.org, https://wiki.sustainabletechnologies.ca, https://www.cityofpaloalto.org

Za rešavanje lokalnih problema oticaja od pljuskova povratnog perioda 2 - 10 godina (D - D scenario) korišćenje vegetacije i zemljišta kao prirodnih sunđera koji hvataju i zadržavaju oticaj je od najvećeg značaja, jer se na ovaj način sprečava plavljenje saobraćajnica i omogućava pravilan rad sistema kišne kanalizacije i drenažnih, uz korišćenje procesa koji podražavaju prirodne procese retenziranja, filtracije, infiltracije i eksfiltracije. Problemi zaštite kritične infrastrukture uz sprečavanje velikih poremećaja u životu urbane sredine (D scenario – pljuskovi povratnog perioda 10 - 20 godina), kao i minimiziranje štete i žrtava tokom ekstremnih događaja (E scenario – pljuskovi povratnog perioda 50 - 100 godina) podrazumevaju korišćenje mera odbrane od poplava - nasipi, mobilne barijere i zidovi, sistemi ranog upozoravanja, planovi za reagovanje u vanrednim situacijama.

Functional unit

Primary function	
Rain domain	**Flood safety level**
Everyday	*No water on surface*
Design	*No uncontrolled water on surface*
Extreme	*Max. 10cm water on surface*

Spatial scope	
Catchment area	*100 ha*

Temporal scope	
Planning period	*25 years*

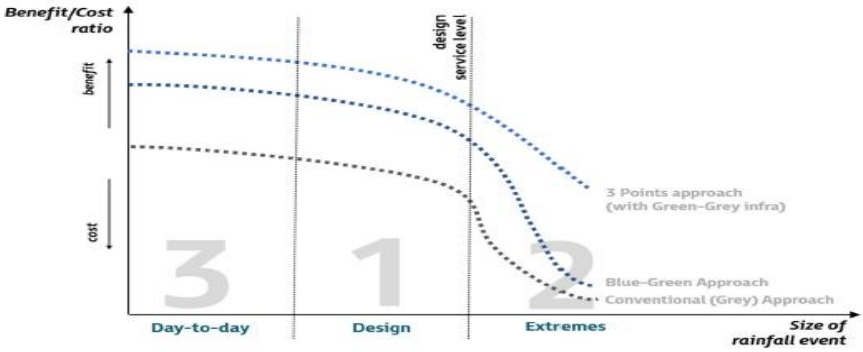
Slika 2. Predložena definicija funkcionalne jedinice za LCA SWM sistem, koja se sastoji od primarne funkcije i vremenskog i prostornog opsega. Uobičajne vrednosti su date kurzivom [1]
Figure 2. Proposed definition of the functional unit for LCA of SWM systems, consisting of the primary function and the temporal and spatial scope. Exemplary values are given *in italic*.

Za urbana područja je karakterističan zahtev da ne bude površinskog plavljenja u slučaju realizacije scenarija D-D, da postoje područja u kojima je dozvoljeno neznatno, kontrolisano površinsko plavljenje bez područja sa nekontrolisanim plavljenjem u slučaju realizacije scenarija D, odnosno sa maksimalno dozvoljenih 10 cm vode na površini u slučaju da se realizuje ekstremni E scenario. Prilikom definisanja funkcionalne jedinice za sprovođenje LCA analize su potrebni i podaci o površini sliva i planiranom projektnom periodu sistema (slika 2).

Svako od razmatranih rešenja sistema za upravljanje kišnim oticajem predstavlja izvor uticaja na životnu sredinu, koji se kvantifikuju na jedan od sledećih načina:

- Razmatranje uticaja tokom životnog veka infrastrukture čiji su sastavni deo.
- Razmatranje uticaja kroz emisiju zagađenih kišnih voda u periodu rada sistema.

Odnos koristi i troškova govori u prilog primene rešenja zelene infrastrukture za kišne epizode domena DD i D. Za ekstremne padavine odnos koristi i troškova se drastično smanjuje, a uticaj primenjenog koncepta odvodnjavanja ima sve manje uticaja na ovaj odnos (slika 3).



Slika 3. Konceptualna slika troškova i koristi za slučajeve primene konvencionalnog sivog pristupa upravljanju rizikom od poplava, plavo-zelenog pristupa i pristupa tri tačke uz korišćenje koristeći zeleno-sivu infrastrukturu sa razvojem u tri domena [5]

Figure 3. Conceptual image of costs and benefits of the conventional grey approach to flood risk management, the blue-green approach and the 3 points approach using green-grey infrastructure as they develop over the three domains of rainfall sizes [5]

Osim definicije funkcionalne jedinice (slika 2), prilikom izrade uporednih LCA analiza sistema za upravljanje kišnim oticajem je potrebno analizirati i sekundarne funkcije primenjenih sistema upravljanja. Ovo se odnosi na uključivanje informacija o efikasnosti prečišćavanja, koristi od uključivanja rekreativne funkcije, uticaju na kvalitet vode i životnu sredinu, smanjenje prelivanja i nekontrolisanog oticaja za nizvodne slivove. Kada postoje standardi za dimenzionisanje kanalizacionih sistema, kao što je slučaj u Danskoj, treba primenjivati njihove odredbe, time se najlakše obezbeđuje uporedivost varijantnih rešenja LCA analize. U slučaju kada nema standarda uporedivost varijantnih rešenja sistema odbrane od poplava, kao i upravljanja kišnim oticajem kao njegovog integralnog dela je obezbeđena

ako su za sva 3 scenarija isti nivoi bezbednosti od poplava i to za različite varijante razvoja sistema upravljanja kišnim oticajem, sa ili bez primene zelene i sive infrastrukture. Tek se tada za sprovođenje LCA analize može definisati funkcionalna jedinica koja predstavlja „kamen temeljac“ LCA studije**.**

3. LCA studije sistema za upravljanje kišnim oticajem

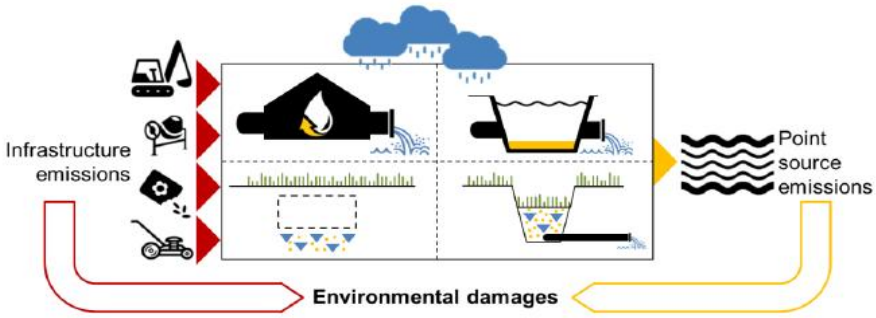
Za izradu LCA studija ne postoji univerzalna metodologija, što je razumljivo s obzirom na raznolikost tema i načine dostizanja osnovnog cilja ovakvih studija - obezbeđivanje nepristrasnog poređenja varijantnih rešenja. Metodologija izrade LCA je često osporavana od strane kritičara „Previše je komplikovano...“, „Možete dobiti bilo koji rezultat koji želite...“ [6], [7], ali interesovanje za primenu LCA raste kao i potreba za obezbeđivanjem sveobuhvatne i pouzdane procene svih aspekata životne sredine, uz primenu ISO 14040 standarda. Osnovni tipovi LCA studija su:

- Cradle-to-grave uticaji na životnu sredinu se prate počevši od ekstrakcije sirovog materijala „kolevka“ do faze odlaganja posle upotrebe „grob“.
- Cradle-to-gate razmatra deo životnog ciklusa proizvoda od ekstrakcije sirovog materijala „kolevka“ do „kapije“ - proizvodnog pogona.
- Cradle-to-cradle razmatra uticaje na životnu sredinu svih proizvoda koji se na kraju svog životnog veka istinski recikliraju (upcikliraju) to je sistem zatvorene petlje koju otpad nikad ne napušta, već se pretvara u biološke ili tehničke hranljive materije za nove proizvode.
- Gate to-gate se koristi za LCA jednog proizvodnog koraka ili procesa.

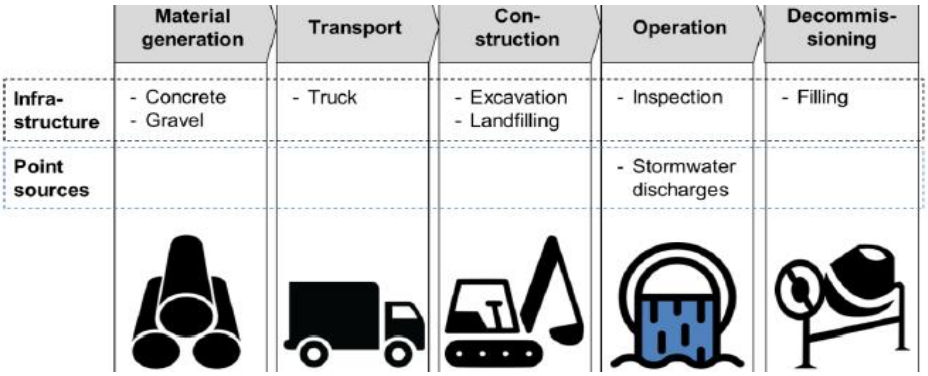
U najvećem broju LCA studija sistema za upravljenje kišnim oticajem se razmatra ciklus cradle-to-grave, od implementacije (proizvodnja materijala, transport i izgradnja), preko rada i održavanja, do kraja životnog veka (dekomisija, odlaganje ili reciklaža), u skladu sa odredbama ISO, 2006a, 2006b [3], [4]. Osnovni koraci za izradu LCA studije za upravljanje kišnim oticajem su:

- Definisanje funkcionalne jedinice (osnovna jedinica mere usluge u odnosu na zadatu funkciju koju sistem ispunjava) i granica sistema u skladu sa ISO 14041, tako da obim i detaljnost studije budu dovoljni za postizanje utvrđenog cilja, a svi procesi usklađeni u okviru LCA studije (slika 2, 4).
- Formiranje inventara životnog ciklusa proizvoda u skladu sa ISO 14041 kojim se definišu ulazni podaci i emisije za svaki proces, što podrazumeva prikupljanje podataka o količinama upotrebljenih sirovina, transportnim razdaljinama, potrošnji energije, emisijama u vazduh, vodu i zemljište, opasnom i biološkom otpadu. Ecoinvent baza uključuje podatke o potrošnji energije, emisijama i otpadu od proizvođača ili dobavljača, kao i podatke o materijalu, sirovinama i transportnim razdaljinama. Programi koji se najviše koriste među istraživačima za obradu podataka dobijenih iz baze podataka su Simapro, Gabi i OpenLCA, a za kompleksne sisteme EASETECH.
- Procena uticaja životnog ciklusa u skladu sa odredbama ISO 14042 uz povezivanje inventara sa uticajima na životnu sredinu uz klasifikaciju podataka iz inventara LCA i

tipizaciju u okviru kategorija uticaja, uz poređenje dobijenih vrednosti sa jediničnim uticajima na životnu sredinu, radi sagledavanja njihovog značaja i uticaja pojedinih kategorija. Koriste se različite metode verifikovane od strane Evropske komisije. Rezultati LCIA su u okviru usvojenih mehanizama zaštite životne sredine i indikatora (Evropska komisija, 2010c) (slika 5) i to za različite nivoe uticaja. U ReCiPe metodi je definisano 18 kategorija srednjih uticaja i 3 kategorije konačnih uticaja (slika 6).



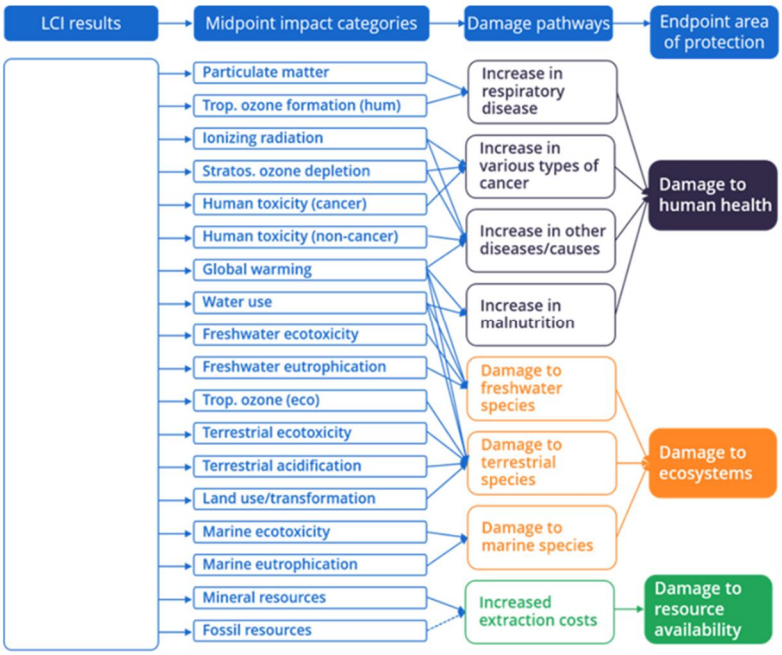
Slika 4. Uticaj SWM sistema na životnu sredinu – emisije zagađenja tačkasti izvori i infrastruktura [7]
Figure 4. Environmental impact of SWM systems – pollution emissions from point sources and infrastructure emissions [7]



Slika 5. Procesi povezani sa životnim ciklusom betonske cevi [7]
Figure 5. Processes associated with the life cycle of a concrete pipe [7]

Srednje kategorije uticaja su pojedinačni ekološki problemi kao što su globalno zagrevanje, oštećenje ozonskog omotača ili eutrofikacija. Putevima oštećenja, ovi ekološki problemi utiču na konačne kategorije uticaja - ljudsko zdravlje, ekosisteme i dostupnost resursa (slika 6). Konačne kategorije je lakše tumačiti, ali je važno napomenuti da to uvodi veću neizvesnost u dobijene rezultate, pa kompromis treba uzeti u obzir pri određivanju

ciljeva LCA studije. Tumačenja rezultata se može olakšati ponderisanjem pojedinih kategorija ili metodama interne/eksterne normalizacije.



Slika 6. Okvir ReCiPe metode: Odnos između rezultata LCI, kategorije uticaja srednje tačke i kategorije uticaja krajnje tačke [13]

Figure 6. Framework of the ReCiPe method: Relationship between LCI results, midpoint impact category and endpoint impact category [13]

Interpretacija rezultata studija je objedinjavanje rezultata u jedinstvenu ocenu, najčešće radi upoređivanja varijanti u formi zaključaka ili preporuka usklađenih sa predmetom istraživanja, uobičajno je poštovanje odredbi standarda ISO 14043.

Uticaji infrastrukture i emisija iz tačkastih izvora mogu se tumačiti odvojeno ili u kombinaciji, pri čemu zajedničko tumačenje ima prednost jer omogućava zaključke o ukupnoj održivosti sistema. Odvojeno tumačenje izvora emisija povezanih sa infrastrukturom i sa emisijama iz tačkastih izvora omogućava prepoznavanje kompromisa u procesu donošenja odluka.

3. Primer LCA studija koja prati tipologiju elemenata separacionog sistema

Primena separacionog sistema kanalisanja u urbanim područjima, uz upravljanje atmosferskim vodama je poželjan kocept zasnovan na principima održivog razvoja Smanjivanje opterećenja recipijenata i postrojenja za prečišćavanje nosi sa sobom i brojne ekološke i socio-ekonomske koristi.

Osnovni kriterijumi dimenzionisanja i modeliranja elemenata ovih sistema se vezuju za tip objekta i njegovu hidrološko-hidrauličku funkciju u sistemu za prikupljanje, odvođenje i prečišćavanje kišnog oticaja, što odgovara određivanju funkcionalne jedinice u LCA studiji. U okviru ovog rada prikazani su rezultati LCA studije kojom se određuje udeo pojedinih faza životnog ciklusa sistema za upravljanje kišnim oticajem u ukupnom uticaju. [10].

Studija procene uticaja i troškova pojedinih faza životnog ciklusa [10] urađena je za 4 glavne faze životnog ciklusa različitih sistema za odvodnjavanje saobraćajnica. Prva faza životnog cikllusa je ekstrakcija agregata i drugih neobrađenih sirovina za proizvodnju građevinskog materijala i gorivo, druga faza je transport materijala i opreme, treća faza je izgradnja drenažnog sistema/građevinski radovi, a četvrtoj fazi životnog ciklusa pripadaju eksploatacija, održavanje i kraj životnog veka drenažnog sistema. Analizom je obuhvaćeno 10 različitih drenažnih sistema i 7 kategorija uticaja životnog ciklusa ovih sistema. Da bi rezultati primene različitih sistema odvodnjavanja bili uporedivi pretpostavljeno je da je svih 10 sistema odvodnjavanja konstruisano za odvođenje atmosferskih voda vezanih za isti deo kolovoza od 1 km i da su sistemi nezavisni od voda sa drugih delova kolovoza ili gradskih otpadnih voda. Neki od razmatranih sistema su projektovani za odvođenje atmosferskih voda (ivičnjaci i slivnici), a drugi kao sistemi za skladištenje atmosferskih voda (retenzija). Da bi se eliminisala ova razlika u sistemima odvodnjavanja, LCIA i LCC analize su urađene korišćenjem normalizovanih jediničnih uticaja i troškova na osnovu: 1. dužine i 2. zapremine sistema odvodnjavanja. Razmatrani tipovi drenažnih sistema sa usvojenim mernim jedinicama za procenu uticaja su dati u nastavku, a razmatrane kategorije uticaja su date u tabeli 1.

Tabela 1. Kategorije uticaja i jedinice mere [10]
Tabele 1. Impact categories and measurement units [10]

Broj	Kategorija uticaja	Jedinica mere
1	Climate change potential Potencijal za klimatske promene (GWP)	kg CO_2 / m^1 ili kg CO_2/m^2
2	Ozone depletion potential Potencijal oštećenja ozonskog omotača (ODP)	kg CFC_{11}/ m^1 ili CFC_{11}/m^2
3	Acidification potential of soil and water Potencijal zakiseljavanja zemljišta i vode/acidifikacija/potencijal generisanja H+	kg SO_2/m^1 ili kg SO_2/m^2
4	Eutrophication potential Potencijal eutrofikacije/ograničenja za obogaćivanje zemljišta nutrijentima azota i fosfora	kg PO_4/m^1 ili kg PO_4/m^2
5	Photochemical oxidant formation Fotohemijsko formiranje oksidansa	kg C_2H_2/m^1 ili kg C_2H_2/m^2
6	Depletion of abiotic resources-elements Iscrpljivanje obnovljivih abiotskih resursa-elemenata	kg Sb/m^1 ili kg Sb/m^2
7	Depletion of abiotic resources-fossil fuels Iscrpljivanje neobnovljivih abiotskih resursa - fosilna goriva	MJ/m^1 ili MJ/m^2

1. Rovovi ispunjeni šljunkom sa perforiranom cevi za odvod (filtracioni rovovi) filter drains uskladištena zapremina (m^3).

2. Infiltracioni rovovi u poroznim sredinama infiltration trenches, sa uskladištenom zapreminom (m^3).

3. Eksfiltracioni rovovi u sredinama sa smanjenom poroznošću soakaways, sa uskladištenom zapreminom (m^3).

4. Porozni kolovozi permeable pavement, sa površinom poroznog kolovoza (m^2).

5. Infiltracioni bazeni infiltration basin, sa zadržanom zapreminom (m^3).

6. Močvare wetland, sa prečišćenom zapreminom (m^3).

7. Retenzije retention ponds, sa prečišćenom zapreminom (m^3).

8. Plitki kanali za infiltraciju swales, sa površinom kanala (m^2).

9. Trake sa stalnom vegetacijom za smanjivanje kontaminacije voda filter strip, sa površinom trake (m^2).

10. Ivičnjaci i slivnici kerb and gully sa dužinom (m^1).

Rezultati sprovedenih LCA analiza pokazali su da je svođenje uticaja i troškova na jedinicu mere dužine ili površine drenažnih sistema prikladnije za drenažne sisteme kod kojih je primarna funkcija transport oticaja (npr. ivičnjaci i slivnici).

Kod drenažnih sistema sa malim kapacitetom protoka koji su projektovani za infiltraciju i/ili retenziranje oticaja, potrebno je svođenje uticaja na životnu sredinu i troškova na kapacitet skladištenja koji se izražava jedinicama zapremine.

Kod gradskih drenažnih sistema važi da su uticaji drenažnih sistema sa većim građevinskim radovima i transportom materijala i većim količinama neobrađenog agregata (filterski rovovi) značajno veći od uticaja sistema koji koriste ograničene količine građevinskog materijala (plitki kanali za infiltraciju) na okolinu. Propusni kolovoz je u ovoj studiji jedini sistem koji, osim za drenažu i za oticanje vode služi i kao površina kolovoza.

Najmanji uticaji na životnu sredinu i trošak životnog ciklusa imaju plitki kanali za infiltraciju, močvare i retenziona jezera. Sistemi za odvodnjavanje sa značajnijom upotrebom materijala i izvođenjem građevinskih radova na širem području imaju negativniji uticaj na ljudsko zdravlje, ekosisteme i resurse.

4. Zaključak

Sadašnji način upravljanja vodom kao resursom nije dugoročno rešenje za budući rast populacije i urbanizaciju. Iako je primarni cilj upravljanja atmosferskim vodama trenutno zaštita ljudi i imovine od poplava i zagađenja, uz unapređivanje lokalnih ekonomija, aktuelna je promena prioriteta u ovoj oblasti.

Najvažniji pokretači promena su povećana urbanizacija i razvoj, promene u učestalosti ekstremnih padavina kao rezultat klimatskih promena, promene javnog mnjenja vezane za uticaj atmosferskih voda na životnu sredinu i društvo, promene u dostupnim tehnologijama koje omogućavaju primenu ekološki ispravnijih i održivijih rešenja.

Promena prioriteta u upravljanju kišnim vodama podrazumeva prelazak sa isključivog fokusiranja na odvodnjavanje na holistički pristup koji uzima u obzir ekološke, društvene i ekonomske koristi (smanjenje zapremine oticaja uz poboljšanje kvaliteta oticaja, primena decentralizovanih rešenja, veštačkih močvara za kompenzaciju kišnice, praćenje efikasnosti primenjenih rešenja).

To znači davanje prioriteta održivim rešenjima poput infrastrukture zasnovane na prirodi (NatureBasedSolution). Promena prioriteta u upravljanju zahteva i primenu novih metodologija za procenu varijantnih rešenja, kao što su metode LCA I LCAI, čija je mogućnost primene prikazana u ovom radu.

5. Literatura

[1] Brudler S, Arnbjerg-Nielsen K, Hauschild M. Z, Rygaard M, Life cycle assessment of stormwater management in the context of climate change adaptation. *Water Research*, 106, p. 394-404, 2016.

[2] IDA Spildevandskomiteen, Funktionspraksis for afløbssystemer under regn. Skrift, 2005.

[3] ISO, 2006a. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines - ISO 14044, ISO 14040:2006. Brussels, Belgium, 2006.

[4] ISO, 2006b. Environmental Management- Life Cycle Assessment- Principles and framework - ISO 14044, ISO 14044:2006. Brussels, Belgium, 2006.

[5] Frans H. M. van de Ven, Chris Zevenbergen, Mila Avellar Montezuma, Zihang Ding, William Veerbeek, Shiyang Chen, The Three-Points Sponge Policy approach towards an enhanced multi-level resilence strategy, *Frontiers in Water*, 2024.

[6] Sarah Brudler, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Michael Zwicky Hauschild, Christian Ammitsøe, Justine Hénonin, Martin Rygaarda, Life cycle assessment of point source emissions and infrastructure impacts of four types of urban stormwater systems a,b, Water Research, 2019.

[7] Sarah Brudler, *Life Cycle Assessment of Stormwater Management Systems Quantification of environmental impacts for decision support*, PhD Thesis, January 2019, DTU Environment, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, 2019.

[8] Laurent A, Hauschild M. Z, Normalisation, in: Hauschild M. Z, Huijbregts M. A. J. (Eds.), *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer Press, pp. 271–300, doi:10.1007/978-94-017-9744-3_14, 2015.

[9] Itsubo N, Weighting, in: Hauschild, M. Z, Huijbregts, M. (Eds.), LCA Compendium - *The Complete World of Life Cycle Assessment*. pp. 301–330, 2015.

[10] Alireza Fathollahi, Stephen J, Life Cycle Assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: Quantifying the contribution of different life cycle phases, Science of The Total Environment, 2021.

[11] http://www.watersecuritynetwork.org/ Managing run off from urban roads:an analysis of two competing methodologies using Life Cycle Assessment

[12] Gouda H, Urban Water Security: LCA and sanitary waste management, *Environmental Scientist - Water Security*, 23 (3). pp. 18-23, 2014.

[13] *4th Life Cycle Innovation Conference* 2024. July 3 -5 in Berlin, Germany, 2024.

Милена Обрадовић[1], Данијела Смиљанић[2]
Марија Марковић[3], Милица Ожеговић[4]
Александра Даковић[5]

Прегледни научни рад
DOI: 10.5937/VIK25257O

БЕНТОНИТИ МОДИФИКОВАНИ СУРФАКТАНТИМА У УКЛАЊАЊУ НЕСТЕРОИДНИХ АНТИИНФЛАМАТОРНИХ ЛЕКОВА ИЗ ВОДА

Резиме: Нестероидни антиинфламаторни лекови (НСАИЛ) доспевају у животну средину током њихове производње, употребе и одлагања, угрожавајући на тај начин водене екосистеме. Они представљају значајан еколошки проблем јер се не уклањају ефикасно конвенционалним методама које се користе у постројењима за пречишћавање вода. Стога је неопходно развити нове методе за третман отпадних вода. Адсорпција се издваја као ефикасна, економична, еколошки прихватљива и једноставна метода. Модификовани природни минерали, као што су глине (бентонит, каолин) и зеолити, показују високу ефикасност у уклањању НСАИЛ из водених средина, пружајући могуће решење овог проблема. У овом раду приказан је преглед резултата истраживања уклањања НСАИЛ на бентонитима модификованим различитим сурфактантима.
Кључне речи: бентонит, сурфактанти, адсорпција, НСАИЛ, отпадне воде

BENTONITES MODIFIED WITH SURFACTANTS IN THE REMOVAL OF NON-STEROIDAL ANTI-INFLAMMATORY DRUGS FROM WATER

Abstract: Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) enter the environment during their production, use, and disposal, thereby threatening aquatic ecosystems. They represent a significant environmental issue because they are not effectively removed by conventional methods used in wastewater treatment plants. Therefore, it is necessary to develop new methods for wastewater treatment. Adsorption stands out as an efficient, economical, environmentally friendly, and simple method. Modified natural minerals, such as clays (bentonite, kaolin) and zeolites, have shown high efficiency in removing NSAIDs from aquatic environments, offering a potential solution to this

[1] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, m.obradovic-@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1349-1924*
[2] *Институт за технологију нуклеарних и других минерални хсировина, Београд, d.smiljanic-@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3560-1415*
[3] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, m.markovic-@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0001-6787-1933*
[4] *Институт за технологију нуклеарних и других минерални хсировина, Београд, m.ozegovic-@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7544-6785*
[5] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, a.dakovic-@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-7385-0458*

problem. This paper presents a review of research results on the removal of NSAIDs using bentonites modified with various surfactants.
Key Words: bentonite, surfactants, adsorption, NSAIDs, wastewater

1. Увод

Присуство одређених фармацеутских једињења у воденим екосистемима може изазвати озбиљне еколошке проблеме чак и када се јављају у ниским концентрацијама. У последњим деценијама, фармацеутици се све више препознају као загађујуће супстанце у животној средини, што је пре свега последица њихове све учесталије примене, непотпуне метаболичке разградње у организму, као и отпорности на конвенционалне методе које се користе у постројењима за пречишћавање вода. Посебну групу ових контаминаната чине нестероидни антиинфламаторни лекови (НСАИЛ), као што су ибупрофен, напроксен, кетопрофен и диклофенак натријум, који се користе у великом обиму због својих аналгетских, антипиретских и антиинфламаторних својстава. НСАИЛ представљају једну од најчешће детектованих класа загађујућих супстанци у површинским и отпадним водама [1].

С обзиром на њихову хемијску стабилност и ниску биоразградивост, често не долази до значајне редукције концентрације НСАИЛ пречишћавањем конвенционалним методама, што резултира њиховим присуством у површинским, подземним и чак пијаћим водама, у концентрацијама које могу достићи и неколико милиграма по литру [2]. Овакво присуство НСАИЛ у воденој средини представља ризик по водене организме, нарушавајући тако њихове физиолошке процесе, али представља и ризик по људско здравље кроз потенцијалну кумулативну изложеност и фармаколошке ефекте ниских доза у дужем временском периоду [3]. Имајући у виду наведене чињенице, постаје јасно да постојећи системи за пречишћавање нису адекватни за ефикасно уклањање микрополутаната као што су фармацеутици. Стога се интензивно развијају и истражују напредне методе третмана отпадних вода (укључујући фотокатализу, озонизацију, адсорпцију, као и методе засноване на ензимским или микробиолошким процесима) са циљем постизања веће ефикасности, економичности и еколошке одрживости. Развој и примена ових савремених технологија од кључног је значаја за очување водених ресурса и заштиту јавног здравља у условима све већег фармацеутског загађења животне средине.

2. Методе за уклањање НСАИЛ из вода

Уклањање фармацеутских једињења из вода представља све значајнију тему истраживања која обухвата различите научне области. Број научних публикација посвећених овој области је у константном порасту. Током последње две деценије, испитано је више метода и техника за уклањање НСАИЛ из вода. Ове методе укључују напредне оксидационе процесе као што су фотодеградација [4], озонизација [5], оксидација [6], сонохемијски [7], електрохемијски [8] и Фентон процеси [9]; биолошке процесе као што су биодеградација [10] и мембрански биореактори [11]; мембранске сепарационе методе као што су микрофилтрација [12], нанофилтрација [13], ултра-

филтрација [12] и реверзна осмоза [13]; као и адсорпционе процесе [3,14]. Напредни оксидациони процеси функционишу кроз генерисање слободних радикала, односно изузетно реактивних врста које могу да разграде молекуле лекова [15]. Иако ове методе показују висок ниво ефикасности у уклањању НСАИЛ, проблем представљају потенцијално токсични нуспродукти [16], као и потреба за хемикалијама за формирање радикала што отежава прелазак са лабораторијског на индустријски ниво примене [17].

Биолошке методе су еколошки прихватљиве, али захтевају веће кострукције апаратура и дуже време третмана да би биле ефикасне. Мембранске сепарационе методе обезбеђују добар степен уклањања, али високи радни притисци доводе до велике потрошње енергије. Због тога се адсорпција сматра погоднијом методом за уклањање лекова из вода. Адсорпција је обећавајућа због својих бројних предности као што су једноставност примене, ниски трошкови, висока ефикасност, еколошка прихватљивост и могућност лаког руковања.

За примену адсорпције у третману вода важно је узети у обзир неколико критеријума, укључујући приступачност и ниску цену адсорбената, висок капацитет адсорпције, брзу кинетику, високу селективност и могућност поновне употребе материјала [18, 19]. Најчешће коришћени адсорбенти за уклањање НСАИЛ из вода су активни угаљ, биомаса, угљеничне нанотубе, полимерни материјали, зеолити и глине [20]. Активни угаљ је комерцијално распрострањен адсорбент, али његова употреба је ограничена због високих трошкова производње и недостатка селективности [19].

Као обећавајућа алтернатива истичу се природни минерали (зеолити и глине - каолин, бентонит, илит и сепиолит) који су еколошки прихватљиви, приступачни и широко доступни [21]. Међу њима, бентонитска глина је често коришћена минерална сировина за адсорпцију због својих својстава као што су способност бубрења у води, адсорпције и интеркалације неутралних или поларних (јонских) органских молекула [21,22]. Међутим, природне глине генерално имају веома мали афинитет за адсорпцију слабо поларних молекула.

3. Модификовани бентонит

3.1. Бентонит

Бентонит је глина природног порекла, која је од великог значаја за бројне индустријске гране, због својих физичкохемијских карактеристикама и као и различитих могућности примене. Основни минерал бентонитске глине је монтморионит, минерал из групе смектита са 2:1 типом слоја. Ову структуру карактеришу два тетраедарска слоја између којих се налази један октаедарски слој, што формира такозвани ТОТ (тетраедар-октаедар-тетраедар) слој.

У структури монтморионита долази до изоморфне супституције, најчешће замене Si^{4+} са Al^{3+} у тетраедарском, односно Al^{3+} са Mg^{2+} или Fe^{2+} у октаедарском слоју. Ове супституције доводе до вишка негативног наелектрисања унутар кристалне решетке, које се уравнотежава присуством измењивих катјона у међуслојном простору, попут Na^{+}, K^{+} Ca^{2+} и Mg^{2+} [23].

Природни бентонити могу бити натријумског или калцијумског типа, у зависности од тога који катјон преовлађује у међуслојном простору њихове структуре. Натријумски бентонит има изразито висок капацитет катјонске измене (ККИ), који се креће од 80 до 130 meq/100 g и има способност да у контакту са водом набубри до величине неколико пута веће од свог почетног волумена, због формирања више хидратационих слојева воде између слојева монтморионита. Насупрот томе, калцијумски бентонит има нижи ККИ (40 до 70 meq/100 g) и има мању способност бубрења [23].

Особина бентонита да мења свој волумен и реолошка својства у присуству воде, као и његова способност да измењује катјоне, чине га веома корисним у бројним индустријским и технолошким применама. У бушењу нафтних и гасних бушотина користи се као компонента бушотинских течности, у грађевинарству за хидроизолацију и стабилизацију тла, док у области заштите животне средине служи за израду геосинтетичких баријера и сорбената за тешке метале. Бентонити се такође користе у фармацији, козметици, агроиндустрији, па чак и у прехрамбеној индустрији, као средство за пречишћавање и стабилизацију [22].

Захваљујући слојевитој структури и присуству измењљивих катјона, монтморионит у саставу бентонита омогућава интеркалацију не само воде већ и других поларних органских молекула у његов међуслојни простор. Ово својство омогућава модификацију бентонита у органофилне глине, које имају значајну улогу у уклањању органских загађујућих супстанци [24, 25]. Простор између слојева, као и присуство пора различитих величина (микро-, мезо- и макропоре), доприносе укупној површинској активности бентонита и његовој великој адсорпционој способности.

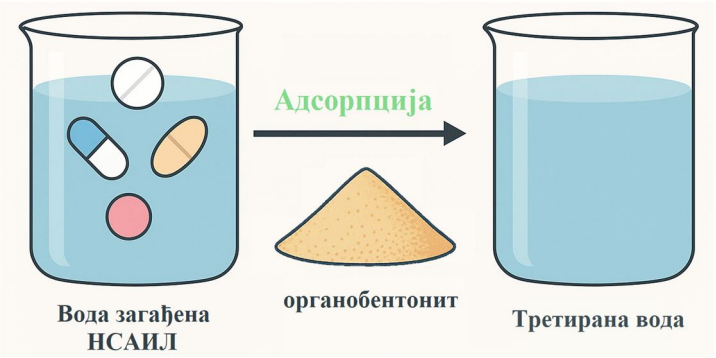
3.2. Модификација бентонита катјонским сурфактантима

Бентонит има способност измене катјона захваљујући негативно наелектрисаним површинама, што га чини погодним за уклањање катјонских загађивача из вода, попут амонијум јона или тешких метала [26]. Ради побољшања адсорпционих својстава и примене у различитим областима (катализа, нанокомпозити, премази и сл.), бентонит се може модификовати јонском изменом, интеркалацијом, органским и неорганским везивањем или пилареньем [27]. Један од најчешћих начина модификације бентонита је употреба катјонских сурфактаната - кватернерних амонијум соли. Ови јони замењују неорганске катјоне у међуслојном простору и на спољашњој површини, при чему површина из хидрфилне прелази у хидрофобну [28]. Када је бентонит модификован катјонским сурфактантом у количини мањој од ККИ вредности, адсорпција се одвија путем механизма катјонске измене, при чему су алкилни ланци сурфактаната у међуслојном простору оријентисани паралелно. При концентрацијама сурфактанта приближним вредности ККИ, преовлађују хидрофобне интеракције, што доводи до гушћег паковања молекула унутар слојева. У случају да количина сурфактанта прелази ККИ, адсорпција се одвија углавном путем хидрофобних интеракција, уз значајно ширење међуслојног простора. У зависности од количине и распореда сурфактаната, катјони могу формирати различите конфигурације унутар међуслојног простора органобентонита, укључујући монослој, двослој, псеудо-тримолекулски слој или

парафински тип структуре. Органомодификација бентонита доводи до повећаног афинитета према органским загађивачима, што унапређује његова својства у процесима пречишћавања загађених вода. Органобентонити се стога испитују као адсорбенти за уклањање фенола, боја, пестицида и анјона из водених раствора [29–32], и на тај начин показују значајан потенцијал за примену у области заштите животне средине.

4. Адсорпција НСАИЛ на модификованим бентонитима

Међу најзаступљенијим фармацеутским загађивачима у водама су нестероидни антиинфламаторни лекови, као што су диклофенак натријум (ДЦФ) и ибупрофен (ИБУ), који се тешко уклањају конвенционалним методама пречишћавања. Због њихове хемијске постојаности и утицаја на водене екосистеме све више се испитују алтернативни приступи, међу којима се издваја примена органобентонита – смектитских глина модификованих катјонским сурфактантима, који побољшавају њихову способност селективне адсорпције органских загађивача. Шематски приказ уклањања НСАИЛ из загађених вода адсорпцијом на органобентонитима приказан је на слици 1.



Слика 1. Процес уклањања НСАИЛ из вода адсорпцијом на органобентониту
Figure 1. The process of NSAIDs removal from water by adsorption on organobentonite

Велики број истраживачких радова и студија бави се синтезом, карактеризацијом и применом бентонита модификованих различитим типовима сурфактаната с циљем побољшања њихових адсорпционих својстава. Адсорпција лекова на органобентонитима зависи од типа и концентрације коришћеног сурфактанта, а одговарајуће адсорпционе изотерме могу имати линеарни или нелинеарни облик (за чије се моделовање најчешће користе Лангмиров и Фројндлихов модел адсорпционе изотерме).

Ghemit и сарадници су за модификацију користили цетилтриметиламонијум-бромид у различитим концентрацијама и закључили да је бентонит модификован у количини 200% ККИ имао највећи капацитет адсорпције – чак 600,6 mg/g за ДЦФ и 194,9 mg/g за ИБУ [14]. Процес адсорпције испитиваних лекова карактерише брза кинетика, добијене су нелинеарне адсорпционе изотеме које добро описују модели адсорпционих изотерми по Лангмиру и Фројндлиху. Такође, утврђено је да узорак

задржава ефикасност и након више циклуса употребе, што га чини погодним за практичну примену.

França и сарадници су, са друге стране, примењивали пиридинијумске сурфактанте и микроталасну синтезу, чиме су значајно скратили време модификације бентонита [21]. Њихов рад показује да структура сурфактанта и његова организација унутар међуслојног простора глине директно утичу на ефикасност адсорпције, при чему је максимална вредност за ДЦФ износила 91,13 mg/g. Поред електростатских, уочене су и хидрофобне и π–π интеракције као важан део механизма уклањања лекова.

De Oliveira и Guegan су испитивали адсорпцију ДЦФ на органобентонитима у присуству мицела сурфактаната у раствору [33]. Комбинација интеркалираних и слободних сурфактаната у систему довела је до побољшане адсорпције, при чему је утврђено да не долази до засићења, што указује на могућност континуираног уклањања контаминаната. У даљем истраживању, исти аутори су показали да је адсорпција ДЦФ изразито осетљива на pH и температуру – најбољи резултати су добијени при pH већем од 4,5 и температурама испод 35°C [34]. Електростатске интеракције су доминантне, док хемијска структура сурфактанта има мањи утицај на укупну ефикасност.

Chu и сарадници су модификовали монтморионит бензилдиметилхексадециламонијум-хлоридом и добили значајно боље резултате у односу на немодификовану глину [35]. Постигнути су капацитети адсорпције од 125,55 mg/g за ДЦФ и 81,64 mg/g за ИБУ, при чему је адсорпција ДЦФ најбоље описана Лангмировим моделом, а ИБУ Фројндлиховим.

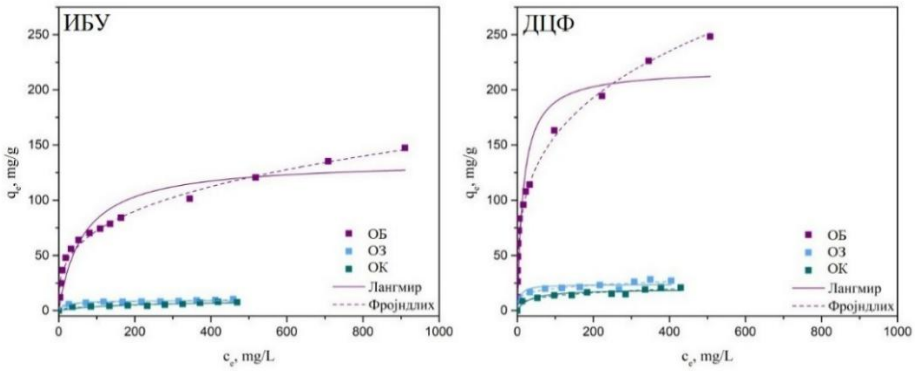
Kryuchkova и сарадници упоредили су адсорпцију лекова (ИБУ, карбамазепина и парацетамола) на немодификованом и модификованом монтмориониту [36]. Модификовани монтморионит показао је способност адсорпције и адсорпциони капацитет преко 90% за карбамазепин и ИБУ, док је за парацетамол био око 63–67%. Адсорпција је најбоље описана Фројндлиховим моделом, а најефикасније услове представљали су pH=6 и температура 25°C.

Martin и сарадници синтетисали су два материјала, природни монтморионит и синтетички лискун модификоване октадециламином и испитивали њихову могућу примену као адсорбената за уклањање ИБУ из водених раствора [37]. Методе карактеризације су показале да се ИБУ адсорбује у међуслојном простору, и на спољашњој површини испитиваних материјала.

Анализа адсорпционих изотерми показала је да је Лангмиров модел најбоље описивао адсорпцију на модификованом монтмориониту, док је на модификованом лискуну бољи био Фројндлихов модел. Време достизања адсорпционе равнотеже је било знатно краће код модификованог монтморионита (мање од 5 минута) у поређењу са модификованим лискуном (око 60 минута).

Martinez-Costa и сарадници су у свом истраживању показали да органобентонит засићен ДЦФ-ом има и афинитет за уклањање тешких метала као што је кадмијум, што указује на потенцијал ових материјала за мултифункционалну примену у третману воде [38].

У студији коју су спровели Обрадовић и сарадници испитана је примена различитих природних минерала – бентонита, каолина и зеолита модификованих катјонским сурфактантом октадецилидиметилбензиламонијум-хлоридом (ОДМБА), за уклањање ДЦФ и ИБУ из водених раствора [39]. Органомодификација је спроведена јонском изменом неорганских катјона у минералима са ОДМБА јонима, чиме су добијени органобентонит (ОБ), органокаолин (ОК) и органозеолит (ОЗ). Кинетичка испитивања су показала да се на испитиваним материјалима адсорпција оба лека дешава брзо, при чему је за ОК равнотежа достигнута у року од неколико минута од почетка процеса, док је за ОЗ и ОБ равнотежа достигнута након 30 минута. Равнотежни адсорпциони подаци су се у најбоље уклопили у Фројндлихов модел (слика 2), што упућује на хетерогеност површине адсорбената. Механизам уклањања обухвата више типова интеракција, и то хидрофобне интеракције између алкилних ланаца сурфактанта и неполарних делова молекула лекова, електростатске интеракције између анјонских облика ДЦФ и ИБУ и катјонских група у сурфактанту, као и замену јона из мицела ОДМБА са анјонима лекова. Физичкохемијска карактеризација потврдила је присуство лекова у структури адсорбената, без значајних структурних промена адсорбената. Важно је истаћи да је студија показала да ОБ има знатно већу адсорпциону способност за уклањање оба испитивана лека у поређењу са ОК и ОЗ. Ова разлика се приписује већем садржају адсорбованог сурфактанта на површини ОБ, као и његовој структури која омогућава бољу интеракцију са молекулима лекова.



Слика 2. Адсорпционе изотерме за адсорпцију ИБУ и ДЦФ на органоминералима [39]
Figure 2. Adsorption isotherms for the adsorption of ibuprofen and diclofenac sodium on organominerals [39]

У литератури су за адсорпцију лекова испитивани и комерцијани органобентонити. У раду Maia-е и сарадника испитан је комерцијални органобентонит Spectrogel® за уклањање ДЦФ из водених раствора [40]. Адсорпција је била израженија при вишим температурама, што указује на ендотермни карактер процеса. Максимални адсорпциони капацитет износио је 0,133 mmol/g на температури од 50°C. Методе карактеризације пре и након адсорпције су показале да није дошло до значајних промена у структури адсорбента, што указује на његову стабилност током процеса.

Сумирајући ове резултате, може се закључити да модификација бентонита сурфактантима значајно побољшава његову селективност и ефикасност за уклањање анјонских и хидрофобних фармацеутика из водених средина. Може се закључити да органобентонити, независно од врсте коришћеног сурфактанта, представљају ефикасан адсорбент за уклањање фармацеутских загађивача попут ДЦФ и ИБУ. Њихова ефикасност зависи од количине и структуре сурфактанта, њиховог међуслојног распореда, као и услова средине (pH и температура). Механизми уклањања углавном укључују комбинацију електростатичких и хидрофобних интеракција. Ипак, да би се ови материјали применили на индустријском нивоу, неопходна су додатна истраживања о стабилности, регенерацији, ефикасности у реалним узорцима и потенцијалу за десорпцију контаминаната у контролисаним условима. У наставку је представљена табела 1. у којој су приказани радови у којима су глине на бази смектитског минерала монтморионита коришћени у адсорпцији НСАИЛ.

Табела 1. Приказ радова у којима су као адсорбенти за уклањање ИБУ и ДЦФ из водених средина коришћене органоглине на бази монтморионита
Table 1. Overview of studies in which organoclays based on montmorillonite were used as adsorbents for the removal of ibuprofen and diclofenac sodium from aqueous media

Лек	Адсорбент*	Концентрација (mg/L)	Капацитет адсорпције (mg/g)	Референца
ИБУ	МТ-ОДА 200%	0,5 – 80	64	[41]
	БТ-ХДТМА 50% / 100% / 200%	10 – 1000	63,4 / 108,3 / 194,9	[14]
	МТ-БДХМА 160%	20 – 150	81,6	[35]
	БТ-ОДМБА 100%	50 – 1500	147,4	[39]
ДЦФ	МТ-БДХМА 160%	40 – 200	125,5	[35]
	БТ-ХДТМА 50% / 100% / 200%	10 – 1000	120,1 / 193,4 / 600,6	[14]
	МТ-БДТМА 40% / 100% / 400%	10 – 2000	16,6 / 37,8 / 60,4	[34]
	МТ-ХДТМА 400% МТ-БДТМА 400%	10 – 2000	49,3 60,4	[33]
	БТ-ДДП 100% / 200% БТ-ХДП 100% / 100%	1 – 500	13,0 / 19,3 25,5 / 91,1	[21]
	МТ-ХДТМА 50% / 100% / 200%	159 – 1590	105,0 / 143,1 / 318,1	[42]
	МТ-ОДМБА	50 – 1500	248,3	[39]
	Комерцијални органобентонит	31,8 – 954,4	42,3	[40]

*Ознаке адсорбената у табели укључују: монтморионит (МТ), бентонит (БТ) и сурфактанте октадециламин (ОДА), хексадецилтриметиламонијум (ХДТМА), бензилдиметилхексадециламонијум (БДХМА), бензилдиметилтетрадециламонијум (БДТМА), додецилпиридинујум (ДДП), хексадецилпиридинујум (ХДП) као и количину коришћеног сурфактанта (%) у односу на ККИ вредност глине

Из табеле 1 примећује се да је генерално јако тешко поредити резултате из различитих студија. Уочава се да услед различитих коришћених полазних концентрација лекова, као и различитих експерименталних услова који су коришћени, максимални капацитети адсорпције ИБУ и ДЦФ значајно варирају, и то за ИБУ од 63,4 до 194,9 mg/g, док за ДЦФ варирају од 13,0 до 600,6 mg/g. За узорке са истом полазном сировином се уочава да адсорбована количина лекова расте са порастом количине органске фазе у адсорбенту.

Приказани резултати из датог прегледа литературе указују на значајан потенцијал модификованих органоглина на бази монтморионита као адсорбената за уклањање лекова (ИБУ и ДЦФ) из водених раствора. Оптимизација модификације и карактеризација модификованих природних материјала дају увид у специфичне интеракције између синтетисаних адсорбената и лекова. Испитивања адсорпције лекова при различитим експерименталним условима (количине адсорбента - дозе, полазне концентрације лекова, време контакта и температуре) омогућавају да се кроз одређивање кинетичких и термодинамичких параметара, као и капацитете адсорпције дефинише механизам адсорпције. Резултати оваквих истраживања кључни су за развој ефикасних и економски исплативих адсорбената за уклањање лекова ИБУ и ДЦФ из водених раствора.

5. Закључак

Бентонити модификовани катјонским сурфактантима представљају ефикасне и економичне адсорбенте за уклањање НСАИЛ из водених средина. Модификовани бентонити показују високу ефикасност у уклањању лекова као што су ДЦФ и ИБУ, што је потврђено кроз бројне студије. Кључни фактори који утичу на ефикасност адсорпције укључују врсту и количину сурфактанта, pH вредност раствора, температуру, као и присуство других загађивача. Механизми адсорпције најчешће укључују хидрофобне и електростатичке интеракције, али и специфичне интеракције између молекула лека и површине адсорбента. Посебно је значајно то што су неки модификовани бентонити способни за вишекратну употребу без значајног губитка ефикасности, што их чини погодним за примену у реалним условима третмана отпадних вода. Обећавајући резултати добијени у лабораторијским условима указују на велики потенцијал органобентонита као адсорбената у процесима третмана фармацеутски контаминираних вода. Ипак, за њихову пуну примену у пракси потребна су даља истраживања која би обухватила дугорочну стабилност, утицај комплексних матрица реалних отпадних вода, као и технолошку и економску одрживост на већем, индустријском нивоу.

Захвалница

Овај рад је подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (број Уговора 451-03-136/2025-03/200023).

6. Литература

[1] T. Rodríguez-Álvarez, R. Rodil, J. B. Quintana, S. Triñanes, R. Cela, Oxidation of non-steroidal anti-inflammatory drugs with aqueous permanganate, *Water Res.* 47, 3220–3230. https://doi.org/-10.1016/j.watres.2013.03.034, 2013.

[2] V. Manzo, L. Honda, O. Navarro, L. Ascar, P. Richter, Microextraction of non-steroidal anti-inflammatory drugs from waste water samples by rotating-disk sorptive extraction, *Talanta.* 128 486–492. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.06.003, 2014.

[3] N. C. Huynh, T. T. T. Nguyen, D. T. C. Nguyen, T. Van Tran, Occurrence, toxicity, impact and removal of selected non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): A review, *Sci. Total Environ*. 898, 165317. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165317, 2023.

[4] Y. Ye, H. Bruning, D. Yntema, M. Mayer, H. Rijnaarts, Homogeneous photosensitized degradation of pharmaceuticals by using red light LED as light source and methylene blue as photosensitizer, *Chem. Eng. J.* 316, 872–881. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.053, 2017.

[5] K. H. Hama Aziz, H. Miessner, S. Mueller, D. Kalass, D. Moeller, I. Khorshid, M.A.M. Rashid, Degradation of pharmaceutical diclofenac and ibuprofen in aqueous solution, a direct comparison of ozonation, photocatalysis, and non-thermal plasma, *Chem. Eng. J.* 313, 1033–1041. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.137, 2017.

[6] J. R. de Andrade, M. G. A. Vieira, M. G. C. da Silva, S. Wang, Oxidative degradation of pharmaceutical losartan potassium with N-doped hierarchical porous carbon and peroxymonosulfate, *Chem. Eng. J*. 382, 122971. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122971, 2020.

[7] K.H. Chu, Y.A.J. Al-Hamadani, C.M. Park, G. Lee, M. Jang, A. Jang, N. Her, A. Son, Y. Yoon, Ultrasonic treatment of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in water: A review, *Chem. Eng. J.* 327, 629–647. https://doi.org/10.1016/j.cej.-2017.06.137, 2017.

[8] B. Feier, A. Florea, C. Cristea, R. Săndulescu, Electrochemical detection and removal of pharmaceuticals in waste waters, *Curr. Opin. Electroche*m. 11, 1–11. https://doi.org/10.1016/-j.coelec.2018.06.012, 2018.

[9] S. Hussain, E. Aneggi, S. Briguglio, M. Mattiussi, V. Gelao, I. Cabras, L. Zorzenon, A. Trovarelli, D. Goi, Enhanced ibuprofen removal by heterogeneous-Fenton process over Cu/ZrO2 and Fe/ZrO2 catalysts, *J. Environ. Chem. Eng*. 8, https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103586, 2020.

[10] O. Muter, I. Perkons, T. Selga, A. Berzins, D. Gudra, I. Radovica-Spalvina, D. Fridmanis, V. Bartkevics, Removal of pharmaceuticals from municipal wastewaters at laboratory scale by treatment with activated sludge and biostimulation, *Sci. Total Environ*. 584–585, 402–413. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.023, 2017.

[11] S. Prasertkulsak, C. Chiemchaisri, W. Chiemchaisri, K. Yamamoto, Removals of pharmaceutical compounds at different sludge particle size fractions in membrane bioreactors operated under different solid retention times, *J. Hazard. Mater.* 368, 124–132. https://-doi.org/-10.1016/j.jhaz-mat.2019.01.050, 2019.

[12] C. Fonseca Couto, L.C. Lange, M.C. Santos Amaral, A critical review on membrane separation processes applied to remove pharmaceutically active compounds from water and wastewater, *J. Water Process Eng.* 26, 156–175. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.010, 2018.

[13] K. P. M. Licona, L. R. d. O. Geaquinto, J. V. Nicolini, N.G. Figueiredo, S.C. Chiapetta, A.C. Habert, L. Yokoyama, Assessing potential of nanofiltration and reverse osmosis for removal of toxic pharmaceuticals from water, *J. Water Process Eng*. 25, 195–204. https://doi.org/-10.1016/-j.jwpe.2018.08.002, 2018.

[14] R. Ghemit, A. Makhloufi, N. Djebri, A. Flilissa, L. Zerroual, M. Boutahala, Adsorptive removal of diclofenac and ibuprofen from aqueous solution by organobentonites: Study in single and binary systems, Groundw. *Sustain. Dev.* 8, 520–529. https://doi.org/10.1016/-j.gsd.2019.02.004, 2019.

[15] T. Velempini, E. Prabakaran, K. Pillay, Recent developments in the use of metal oxides for photocatalytic degradation of pharmaceutical pollutants in water - a review, Mater. *Today Chem.* 19, 100380. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100380, 2021.

[16] A. Rastogi, M. K. Tiwari, M. M. Ghangrekar, A review on environmental occurrence, toxicity and microbial degradation of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs), *J. Environ. Manage*. 300, 113694. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113694, 2021.

[17] A. Michelon, J. Bortoluz, C.S. Raota, M. Giovanela, Agro-industrial residues as biosorbents for the removal of anti-inflammatories from aqueous matrices: An overview, *Environ. Adv*. 9, 100261. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100261, 2022.

[18] I. Alessandretti, C. V. T. Rigueto, M. T. Nazari, M. Rosseto, A. Dettmer, Removal of diclofenac from wastewater: A comprehensive review of detection, characteristics and tertiary treatment techniques, *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 106743. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106743, 2021.

[19] D. B. França, L. S. Oliveira, F. G. N. Filho, E. C. S. Filho, J. A. Osajima, M. Jaber, M. G. Fonseca, The versatility of montmorillonite in water remediation using adsorption: Current studies and challenges in drug removal, *J. Environ. Chem. Eng.* 10, 107341. https://doi.org/10.1016/-j.jece.2022.107341, 2022.

[20] M. J. Ahmed, Adsorption of non-steroidal anti-inflammatory drugs from aqueous solution using activated carbons: Review, *J. Environ. Manage*. 190, 274–282. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.073, 2017.

[21] D. B. França, P. Trigueiro, E. C. Silva Filho, M. G. Fonseca, M. Jaber, Monitoring diclofenac adsorption by organophilic alkylpyridinium bentonites, *Chemosphere.* 242, 125109. https://-doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125109, 2020.

[22] G. Lagaly, Chapter 5 Colloid Clay Science, *Dev. Clay Sci.* 1, 141–245. https://doi.org/10.1016/-S1572-4352(05)01005-6, 2006.

[23] H. H. Murray, Chapter 2 Structure and Composition of the Clay Minerals and their Physical and Chemical Properties, *Dev. Clay Sci.* 2, 7–31. https://doi.org/10.1016/S1572-4352(06)02002-2, 2006.

[24] M. F. Brigatti, E. Galán, B. K. G. Theng, *Structure and Mineralogy of Clay Minerals*, https://-doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00002-X, 2013.

[25] S. Pavlidou, C. D. Papaspyrides, A review on polymer-layered silicate nanocomposites, *Prog. Polym. Sci.* 33, 1119–1198. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.07.008, 2008.

[26] S. Gu, X. Kang, L. Wang, E. Lichtfouse, C. Wang, Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review, *Environ. Chem. Lett.* 17, 629–654. https://doi.org/10.1007/-s10311-018-0813-9, 2019.

[27] M. F. Brigatti, Relationships between composition and structure in Ferich smectites, *Clay Miner.* 18, 177–186. https://doi.org/10.1180/claymin.1983.018.2.06, 1983.

[28] J. L. Bonczek, W. G. Harris, P. Nkedi-Kizza, Monolayer to bilayer transitional arrangements of hexadecyltrimethylammonium cations on Na-montmorillonite, *Clays Clay Miner.* 50, 11–17. https://doi.org/10.1346/000986002761002612, 2002.

[29] H. B. Senturk, D. Ozdes, A. Gundogdu, C. Duran, M. Soylak, Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto organomodified Tirebolu bentonite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic study, *J. Hazard. Mater.* 172, 353–362. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.019, 2009.

[30] T. S. Anirudhan, M. Ramachandran, Adsorptive removal of basic dyes from aqueous solutions by surfactant modified bentonite clay (organoclay): Kinetic and competitive adsorption isotherm, *Process Saf. Environ. Prot*. 95, 215–225. https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.03.003, 2015.

[31] E. Durán, S. Bueno, M.C. Hermosín, L. Cox, B. Gámiz, Optimizing a low added value bentonite as adsorbent material to remove pesticides from water, *Sci. Total Environ.* 672, 743–751. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.014, 2019.

[32] A. A. Atia, Adsorption of chromate and molybdate by cetylpyridinium bentonite, Appl. Clay Sci. 41, 73–84. https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.09.011, 2008.

[33] T. De Oliveira, R. Guégan, Coupled Organoclay/Micelle Action for the Adsorption of Diclofenac, *Environ. Sci. Technol.* 50, 10209–10215. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03393, 2016.

[34] T. De Oliveira, R. Guégan, T. Thiebault, C. Le Milbeau, F. Muller, V. Teixeira, M. Giovanela, M. Boussafir, C. Le Milbeau, F. Muller, V. Teixeira, M. Giovanela, M. Boussafir, Adsorption of diclofenac onto organoclays: Effects of surfactant and environmental (pH and temperature) conditions, *J. Hazard. Mater.* 323, 558–566. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.001, 2017.

[35] Y. Chu, Y. Dai, M. Xia, X. Xing, F. Wang, Y. Li, H. Gao, The enhanced adsorption of diclofenac sodium (DCF) and ibuprofen (IBU) on modified montmorillonite with benzyldimethylhexa-decylammonium chloride (HDBAC), *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp*. 681, 132764. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132764, 2024.

[36] M. Kryuchkova, S. Batasheva, F. Akhatova, V. Babaev, D. Buzyurova, A. Vikulina, D. Volodkin, R. Fakhrullin, E. Rozhina, Pharmaceuticals removal by adsorption with montmorillonite nanoclay, *Int. J. Mol. Sci.* 22, https://doi.org/10.3390/ijms22189670, 2021.

[37] J. Martín, M. del Mar Orta, S. Medina-Carrasco, J.L. Santos, I. Aparicio, E. Alonso, Evaluation of a modified mica and montmorillonite for the adsorption of ibuprofen from aqueous media, *Appl. Clay Sci.* 171, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.02.002, 2019.

[38] J. I. Martinez-Costa, R. Leyva-Ramos, E. Padilla-Ortega, Sorption of diclofenac from aqueous solution on an organobentonite and adsorption of cadmium on organobentonite saturated with diclofenac, *Clays Clay Miner.* 66, 515–528. https://doi.org/10.1346/CCMN.2018.064119, 2018.

[39] M. Obradović, A. Daković, D. Smiljanić, M. Ožegović, M. Marković, G.E. Rottinghaus, J. Krstić, Ibuprofen and diclofenac sodium adsorption onto functionalized minerals: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *Microporous Mesoporous Mater.* 335, 111795. https://doi.org/-10.1016/j.micromeso.2022.111795, 2022.

[40] G. S. Maia, J. R. de Andrade, M. G. C. da Silva, M. G. A. Vieira, Adsorption of diclofenac sodium onto commercial organoclay: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study, *Powder Technol.* 345 (2019) 140–150. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.097, 2019.

[41] J. L. Malvar, J. Martín, M. del M. Orta, S. Medina-Carrasco, J.L. Santos, I. Aparicio, E. Alonso, Simultaneous and individual adsorption of ibuprofen metabolites by a modified montmorillonite, *Appl. Clay Sci.* 189, 105529. https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105529, 2020.

K. Sun, Y. Shi, H. Chen, X. Wang, Z. Li, Extending surfactant-modified 2:1 clay minerals for the uptake and removal of diclofenac from water, *J. Hazard. Mater.* 323, 567–574. https://doi.org/-10.1016/j.jhazmat.2016.05.038, 2017.

Давид Митриновић[1], Жарко Сретеновић[2]
Предраг Војт[3], Марија Поповић[4]
Миодраг Поповић[5]

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25269M

МЕТОДОЛОГИЈА ОДРЕЂИВАЊА УЛАЗНИХ ПАРАМЕТАРА ХИДРАУЛИЧКОГ И ОРГАНСКОГ ОПТЕРЕЋЕЊА ППОВ

Резиме: На основу анализе прикупљене техничке документације везане за постојећи канализациони систем, статистичких података о броју становника прикључених на канализациони систем, упитника попуњених од стране јавног комуналног предузећа и индустријских привредних субјеката, резултата мерења протока и узорковања отпадних вода и испитивања њених физичко-хемијских карактеристика утврђује се стање постојећег канализационог система, средња вредност и екстреми хидрауличког оптерећења за суво и кишно време, органско оптерећење и кључни параметри квалитета отпадних вода. У зависности од стања канализационог система и планираних реконструкција и доградњи на њему, демографских, као и пројекција привредног развоја бира се алгоритам израчунавања улазних параметара меродавних за димензионисање будућег постројења.
Кључне речи: канализација, органско оптерећење, хидрауличко оптерећење, baseline

METHODOLOGY FOR DETERMINING INPUT PARAMETERS OF HYDRAULIC AND ORGANIC LOAD WWTP

Abstract: The condition of the existing sewerage system, the mean value and extremes of hydraulic loads for dry and rainy weather, organic load and key parameters of wastewater quality are determined based on the analysis of the collected technical documentation related to the existing sewerage system, statistical data on the number of inhabitants connected to the sewerage system, questionnaires filled out by the public utility company and industrial enterprises, the results of flow measurements and sampling of wastewater and testing of its physico-chemical characteristics. The algorithm for calculating the input parameters relevant for the dimensioning of the future plant is then selected depending on the

[1] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, david.mitrinovic@jcerni.rs, ORCID: 0000-0002-8097-2998*

[2] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, zarko.sretenovic@jcerni.rs, ORCID: 0000-0002-3931-6569*

[3] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, predrag.vojt@jcerni.rs, ORCID: 0009-0003-9975-3896*

[4] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, marija.popovic@jcerni.rs*

[5] *Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, miodrag.popovic@jcerni.rs, ORCID: 0000-0001-7544-4130*

condition of the sewerage system and the planned reconstructions and extensions, demographic, as well as projections of economic development.
Key Words: sewage, organic load, hydraulic load, baseline

1. Увод

Основни резултат кампање мерења протока, узорковања и лабораторијских анализа отпадне воде је број еквивалената становника (ЕС) градског канализационог система, одређен на основу израчунатог масеног протока *ХПК* или *БПК*$_5$ и специфичних оптерећења са *ХПК* или *БПК*$_5$ према стандарду ATV DVWK A 131 (120 gO_2/c/d и 60 g O_2/c/d, респективно) [1], и процента целокупног јавног канализационог система који захватају сливови мерних места у оквиру њега. Анализу резултата треба започети поређењем са бројем становника сада прикључених на канализациони систем, на основу процента становништва прикљученог на канализациони систем и резултата последњег пописа. Концентрације кључних показатеља састава отпадних вода указују и на степен инфилтрације површинских или подземних вода и да ли су у питању отпадне воде које продукује становништво или њихов значајан део чине и отпадне воде из производних процеса. Анализа резултата мерења протока, узорковања и лабораторијских анализа отпадне воде служи као одлично дијагностичко средство за процену стања канализационог система.

2. Метод

2.1. Број ЕС значајно мањи од броја становника прикључених на канализациони систем на коме су потребни опсежни радови на реконструкцији, доградњи и раздвајању фекалне и кишне канализације

Велики дотицај површинских вода проузрокује често вишеструко повећање протока отпадних вода које може проузроковати значајно повећање процуривања овако разблажене отпадне воде на оштећеним деловима колектора и спојева, услед већег притиска и оквашене површине цеви. На тај начин велики део протока и масеног биланса оптерећења остаје нерегистрован. Интензивна инфилтрација подземних вода у нижим деловима канализационог система и истовремена ексфилтрација отпадних вода у вишим (узводним) деловима канализационог система, такође могу да узрокују мање регистровано оптерећење и велику разблаженост отпадних вода.

Могуће је такође и да слив мерних места покрива мањи део канализационог система него што је процењено, да има знатно мање канализационих прикључака него што је наведено у документацији, или да је присутно знатно мање становника него што је процењено. Због наведених узрока не може се ослонити на резултате анализа кампање мерења, узорковања и одређивања квалитета отпадних вода у процесу одређивање улазних параметара за пројектовање постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ), тзв. одређивање baseline-а, већ они могу послужити за одређивање тренутног стања канализационог система. Ако индустријске отпадне воде нису праћене на одвојеном испусту, овакви резултати указују на то да нема значајнијих емитера индустријских отпадних вода.

2.2. Број ЕС је значајно већи од броја становника прикључених на канализациони систем на коме су потребни опсежни радови на реконструкцији, доградњи и раздвајању фекалне и кишне канализације

Могући узрок знатно већег оптерећења од очекиваног према броју становника је да је на канализациони систем прикључен један или више значајних индустријских емитера отпадних вода који нису регистровани или продукују много веће оптерећење него што је прелиминарно процењено. Могуће је и да слив мерних места покрива већи део канализационог система него што је процењено, као и да је присутно знатно више становника него што је процењено. Ако се индустријско оптерећење накнадно довољно тачно одреди, или величина слива исправно коригује, резултати кампање мерења могу се користити у процесу одређивања улазних параметара за пројектовање ППОВ.

2.3. Број ЕС је приближно једнак броју становника прикључених на канализациони систем на коме су потребни опсежни радови на реконструкцији, доградњи и раздвајању фекалне и кишне канализације

Када нема већих несагласности између резултата кампање мерења, узорковања и лабораторијских физичко-хемијских анализа отпадних вода са процењеним бројем тренутно прикључених становника то значи да је канализациони систем у довољно добром стању да прикупља скоро све отпадне воде које продукује становништво и спроводи их до испуста, без већих истицања из канализационе мреже. Ако индустријске отпадне воде нису посебно праћене на месту испуштања у јавну канализацију или реципијент потребно је проверити да ли су неке значајније количине укључене у резултате праћења квалитета и квантитета отпадних вода. Резултати кампање мерења се могу делимично користити у процесу дефинисања улазних параметара за пројектовање ППОВ.

2.4. Канализациони систем је у добром стању и потребни су само радови мањег обима на реконструкцији

Када нема већих несагласности између резултата кампање мерења, узорковања и лабораторијских физичко-хемијских анализа отпадних вода са процењеним бројем тренутно прикључених становника, удео инфилтрираних вода је мали и канализациона мрежа покрива цело насеље може се очекивати да неће бити даљих значајнијих промена, и резултати кампање мерења се могу директно користити у процесу дефинисања улазних параметара за пројектовање ППОВ. Ако индустријске отпадне воде нису посебно праћене на месту испуштања у јавну канализацију или реципијент потребно је проверити да ли су неке значајније количине укључене у резултате праћења квалитета и квантитета отпадних вода.

3. Резултати

На основу утврђеног стања канализационог система и броја и врсте емитера отпадних вода бира се поступак за одређивање улазних параметара за пројектовање ППОВ.

3.1. Број ЕС значајно мањи од броја становника прикључених на канализациони систем на коме су потребни опсежни радови на реконструкцији, доградњи и раздвајању фекалне и кишне канализације

На основу специфичних оптерећења загађујућим материјама према ATV DVWK A 131 ($M_{p,st}$) и специфичне продукције отпадних вода (израчунава се нпр. из норме потрошње воде за пиће (q_{spec}) од 150 l/st/g и удела отпадних вода (x) од 80 до 95% (који треба проценити према типу насеља и амплитуди сезонских промена у потрошњи воде за пиће) израчунати концентрације параметара квалитета (p) у неразблаженој отпадној води (C_p^0).

$$C_p^0 = \frac{M_{i,st}}{x * q_{spec}} \tag{1}$$

Да би се проценило стање канализационог система треба одредити удео инфилтриране воде, према односу концентрације *БПК*$_5$ у прорачунској неразблаженој отпадној води и узоркованој отпадној води (c_p).

$$Q_{inf} = Q_{sr,}^h \left(1 - \frac{c_p}{C_p^0}\right) \tag{2}$$

Системи који имају проблеме који су описани у подпоглављу 2.1 морају бити реконструисани и дограђени, па је потребно рачунски добити оптерећење отпадним водама у новом систему.

Потребно је прво проценити интензитет инфилтрације (Q_{inf}) за канализациони систем након реконструкције, раздвајања кишне и фекалне мреже и доградње (користећи стандарде за линијску, површинску, или специфичну инфилтрацију по прикљученом становнику).

Проток неразблажених отпадних вода $Q_{sr.god.st.}$ треба израчунати на основу будућег броја прикључених становника (N_{st}) и специфичне продукције отпадних вода. Број прикључених становника треба проценити на основу демографских пројекција и динамике изградње канализационог система и прикључивања на њу. За израчунавање максималног дневног (Q^{dn}_{max}), максималног часовног (Q^h_{max}) и минималног часовног протока (Q^h_{min}) по сувом времену преузети из стручне литературе вредности часовног коефицијента неравномерности k_h, коефицијента дневне неравномерности k_d и коефицијента минималног часовног отицаја у сувом времену k_{min}. За кишно време могу се на пример користити стандарди за дотицај по шахту ($q_{kiša,n}$) да би се одредио проток кишне воде у фекалној канализацији.

$$Q_{sr,god,st} = N_{st} * x * q_{spec} \tag{3}$$

$$Q_{sr,god} = Q_{sr,god,st} + Q_{inf} \tag{4}$$

$$Q^{dn}_{max} = Q^{dn}_{max,st} + Q_{inf} = Q_{sr,god,st} * k_d + Q_{inf} \tag{5}$$

$$Q^h_{max} = Q^h_{max,st} + Q_{inf} = Q_{sr,god,st} * k_d * k_h + Q_{inf} \tag{6}$$

$$Q^h_{min} = Q^h_{min,st} + Q_{inf} = Q_{sr,god,st} * k_{min} + Q_{inf} \tag{7}$$

$$Q_{kiše} = q_{kiša,n} * n + Q_{sr,god} \quad (8)$$

Из вредности укупног средњег дневног протока отпадне воде, средњег дневног протока неразблажених отпадних вода и концентрације параметара квалитета у неразблаженој отпадној води, израчунати концентрације параметара квалитета комуналних отпадних вода.

$$C_p = \frac{Q_{sr,god,st}}{Q_{sr,god}} C_p^0 \quad (9)$$

3.2. Број ЕС значајно већи од броја становника прикључених на канализациони систем на коме су потребни опсежни радови на реконструкцији, доградњи и раздвајању фекалне и кишне канализације

Потребно је установити колико је оптерећење од извора индустријских отпадних вода, и на основу граничних вредности за квалитет индустријских отпадних вода које се евакуишу у систем јавне канализације (Уредба о граничним вредностима емисије загађујућих материја у воде и роковима за њихово достизање [2]) и података о садашњем квалитету ових вода претпоставити квалитет након будућег предтретмана. За вредности параметара изнад граничних претпоставити да ће бити сведене на граничне, за оне испод граничних претпоставити колико би предтретман могао да их промени.

У случају да је могуће да се накнадно спроведе кампања мерења, узорковања и одређивања квалитета индустријских отпадних вода, треба израчунати средње масене протоке *ХПК*, *БПК*$_5$ и осталих параметара квалитета, и средње запреминске протоке отпадне воде становништва одузимањем индустријског оптерећења ($M_{p,ind}$, $Q_{sr.god.ind}$) од вредности добијених на основу теренске кампање (M_p', $Q'_{sr.god.}$). У следећем кораку треба проценити средње концентрације параметара квалитета у узорцима на основу у претходном кораку израчунатих средњих масених протока параметара квалитета и средњег запреминског протока комуналне отпадне воде.

$$M_p = M_p' - M_{p,ind} \quad (10)$$

$$Q_{sr,god} = Q'_{sr.god.st} - Q_{sr.god.ind} \quad (11)$$

$$C_p = \frac{M_p}{Q_{sr,god}} \quad (12)$$

У случају да није могуће накнадно спровести кампању мерења, узорковања и одређивања квалитета индустријских отпадних вода, потребно је рачунски издвојити ток индустријских из комуналних отпадних вода. То је могуће учинити ако је теренска кампања спровођена и у другим суседним насељима са сличним канализационим системом, и/или испустима других канализационих сливова истог насеља у којима нема индустријских отпадних вода. Полази се од претпоставке да је специфична продукција домаћих отпадних вода приближно иста за групу насеља или сливова испуста (*M* насеља/испуста), као и да су стања канализационих система и удели инфилтрираних вода слични. На основу ових претпоставки, прорачунски часовни протоци домаћих отпадних вода у насељу са значајним уделом индустријских отпадних

вода ($Q^h_{st,calc,M+1}$) се израчунава као производ броја становника према попису ($N_{M+1.}$), претпостављеног удела становника прикључених на канализациони систем (x_{M+1}) и специфичне продукције отпадних вода (са инфилтрацијом) за суседна насеља/сливове без индустријских отпадних вода. Часовна специфична продукција отпадних вода (са инфилтрацијом) за насеља без индустрије израчунава се дељењем збира измерених часовних протицаја (Q^h_i) збиром броја еквивалената становника за ова насеља ($N_{ES,\,i}$). Часовни протицаји индустријских отпадних вода ($Q^h_{ind,calc.}$) се израчунавају одузимањем израчунатих часовних протицаја отпадних вода становништва од измерених часовних протицаја.

$$Q^h_{st,calc,M+1} = \frac{\sum_{i=1}^{M} Q^h_i}{\sum_{i=1}^{M} N_{ES,i}} \cdot N_{M+1} \cdot x_{M+1} \qquad (13)$$

$$Q^h_{ind,calc.} = Q^h_i - Q^h_{st,calc,M+1} \qquad (14)$$

Средње вредности параметара квалитета (за суво време) за групу насеља се израчунавају помоћу масеног биланса – вредности параметра у сваком двадесет-четворочасовном композитном узорку (K_i) сваког насеља/слива без индустријских отпадних вода се множе са одговарајућим средњим дневним протоцима и сабирају, а овај збир се дели са збиром свих средњих дневних протока.

$$C_{p,sr} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{K_i} Q^{24h}_{i,j} \cdot C_{p,i,j}}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{K_i} Q^{24h}_{i,j}} \qquad (15)$$

Полазећи од средње вредности параметара квалитета домаћих отпадних вода ($C_{p,sr}$) и дневних протока који одговарају периодима узимања композитних узорка ($Q^{24h}_{i,j}$) одређених током кампање мерења, узорковања и анализе отпадних вода, прорачунатог дневног протока домаћих отпадних вода ($Q^{24h}_{st.calc,j}$) и прорачунатог протока индустријских отпадних вода ($Q^{24h}_{ind,calc,j}$) израчуната је преко масеног биланса средња вредност кључних параметара квалитета ($C_{p,sr,ind}$) индустријских отпадних вода.

$$C_{p,sr,ind} = \frac{1}{K_{M+1}} \cdot \sum_{j=1}^{K_{M+1}} \frac{C_{p,j} \cdot Q^{24h}_{M+1,j} - C_{p,sr} \cdot Q^{24h}_{st.calc,M+1,j}}{Q^{24h}_{ind,calc,j}} \qquad (16)$$

Након издвајања индустријског оптерећења или установљавања фактора корекције за број прикључака на сливовима испуста може се наставити са прорачуном описаним у потпоглављу 3.3.

3.3. Број ЕС је приближно једнак броју становника прикључених на канализациони систем на коме су потребни опсежни радови на реконструкцији, доградњи и раздвајању фекалне и кишне канализације

У овом случају треба усвојити средње масене протоке *ХПК*, *БПК*$_5$ и осталих кључних параметара, као и број ЕС, добијене на основу теренске кампање као полазну основу за дефинисање пројектних критеријума за изградњу ППОВ, због тога што се они могу сматрати поузданим податком, док ће се концентрације и протоци значајно променити након свих потребних радова на канализационој мрежи. На основу демографских пројекција треба помножити одговарајућим фактором масене протоке и ЕС.

$$C_i^0 = \frac{M_{i,st}}{x * q_{spec}} \quad (17)$$

$$Q_{inf} = Q_{sr,god}\left(1 - \frac{C_i}{C_i^0}\right) \quad (18)$$

Израчунати проток неразблажених отпадних вода,

$$Q_{sr,god,st} = Q_{sr,god}\frac{C_i}{C_i^0} \quad (19)$$

На основу протока неразблажених отпадних вода и броја ЕС израчунати специфичну продукцију отпадних вода,

$$x * q_{spec} = \frac{Q_{sr,god,st}}{\frac{Mi}{M_{i,st}}} \quad (20)$$

Понављати рачуницу док се претпостављена специфична продукција не поклопи са израчунатом.

Применом једначина од (3) до (8) се даље израчунавају протоци.

Концентрације кључних компонената загађења се добијају дељењем масених протока увећаних пропорционално планираном повећању броја прикључених становника средњим годишњим протоком.

Индустријске отпадне воде у будућности би сходно легислативи [2] требало да буду предтретманом пречишћене до минималног прописаног нивоа квалитета који се захтева за испуштање у јавну канализацију. Може се због тога претпоставити да ће вредности параметара изнад горње границе бити сведене на максимално дозвољену, а за остале треба проценити да ли и колико ће бити смањене. Емисије из садашњих капацитета се умањују пропорционално променама после предтремана. Потребно је проценити и прогнозиране емисије из будућих индустријских погона, на пример за одређени проценат увећавајући постојеће емисије. Вредности k_h, k_d и k_{min} треба проценити на основу резултата кампање праћења, података о сменском раду и технолошком процесу и предвиђеног броја различитих погона (већи број смањује временску неравномерност емисија).

Протоци се сабирају са протоцима отпадне воде становништва, а концентрације се израчунавају на основу масеног биланса и укупног запреминског протока.

3.4. Канализациони систем је у добром стању и потребни су само радови мањег обима на реконструкцији

У овом случају, поред масених протицаја параметара квалитета отпадних вода, поуздан податак за планирање будућег ППОВ су и концентрације параметара квалитета отпадних вода и протоци отпадних вода.

У овом случају могу се усвојити средње концентрације *ХПК*, *БПК*$_5$ и осталих кључних параметара (C_p) установљене током кампање мерења протока, узорковања, и лабораторијских анализа отпадних вода.

Средње дневне запреминске и масене протоке установљене током кампање мерења протока, узорковања, и лабораторијских анализа отпадних вода треба модифи-

ковати сходно планираном повећању броја прикључених становника и демографским пројекцијама,

$$Q_{sr.god.} = Q'_{sr.god.} \frac{N_{st}}{N_{st}^0} \quad (21)$$

$$M_i = M_i' \frac{N_{st}}{N_{st}^0} \quad (22)$$

Максимални дневни, максимални часовни и минимални часовни проток по сувом времену се такође могу одредити из резултата кампање мерења протока, након процене њихове поузданости и репрезентативности. Препоручљиво је израчунати протоке и на основу из стручне литературе преузетих вредности k_h, k_d и k_{min}. На крају треба усвојити најнеповољније вредности.

Број ЕС се израчунава из масеног протока БПК$_5$ и специфичног оптерећења загађујућим материјама према ATV DVWK A 131.

$$ES = \frac{M_i}{M_{i,st}} \quad (23)$$

Што се тиче индустријских отпадних вода емисије из садашњих индустријских капацитета се умањују пропорционално променама после предтремана, на шта се додају и прогнозиране емисије из будућих индустријских погона. Вредности k_h, k_d и k_{min} треба проценити на основу резултата кампање праћења, података о сменском раду и технолошком процесу и предвиђеног броја различитих погона (већи број смањује временску неравномерност емисија).

Протоци се сабирају са протоцима отпадне воде становништва, а концентрације се израчунавају на основу масеног биланса и укупног запреминског протока.

4. Закључак

Добро испланиран и дефинисан програм мерења протока, узорковања и анализе отпадних вода је почетни корак у одређивању улазних параметара меродавних за димензионисање будућег ППОВ. Даљи след прорачуна зависи од стања канализационог система, планова и пројеката за његову доградњу и реконструкцију, пројекција привредног развоја и демографских пројекција.

5. Литература

[1] https://kh.aquaenergyexpo.com/wp-content/uploads/2022/11/Dimensioning-of-Single-Stage-Activated-Sludge-Plants.pdf

[2] https://www.paragraf.rs/propisi/uredba-granicnim-vrednostima-emisije-zagadjujucih-materija-u-vode.html

Darko Vuksanović[1], Jelena Šćepanović[2]
Dragan Radonjić[3]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25277V

ANALIZA UTICAJA OTPADNIH VODA NA POVRŠINSKE VODE RIJEKA ZETA I MORAČA

Rezime: Ekstremni i enormni razvoj čovječanstva na svim područjima, a naročito na polju tehnologije, za posljedicu ima razvoj naselja i povećanje broja stanovnika, što uslovljava zagađenje čovjekove okoline, a među najteže oblike spada i zagađenje voda. Svakako da se povećanjem broja stanovnika povećava potrošnja vode, a samim tim se povećava i količina otpadnih voda [1]. Glavni izvori zagađenja rijeka Zeta i Morača su svakako sanitarne i fekalne otpadne vode, koje se ispuštaju u ove površinske tokove bez prethodnog adekvatnog tretmama. Ovo je posebno izraženo u opštini Danilovgrad i glavnom gradu Podgorica. Naime, opština Danilovgrad nema izgrađeno postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda, dok je postojeće postrojenje u Podgorici neodgovarajućeg kapaciteta. Opština Nikšić posjeduje PPOV kapaciteta 110.000 ES, na kojim se primjenjuju tri vrste obrade: primarni, sekundarni i tercijarni tretman kojim se vrši uklanjanje N, S i P. Na ovom PPOV-u se vrši i dezinsekcija efluenta. Postojeće PPOV u Podgorici je kapaciteta 55.000 ES i ima dvije vrste obrade: primarni i sekundarni tretman. Na ovom postrojenju se ne vrši dezinfekcija efluenta. Svrha analize pritisaka i uticaja je da se identifikuju značajni pritisci koji utiču na tijela površinskih voda rijeka Zete i Morače.
Ključne reči: otpadne vode, postrojenje za prečišćavanje otpadne vode, životna sredina, rijeke Zeta i Morača

ANALYSIS OF THE EFFECT OF WASTEWATER ON THE SURFACE WATERS OF THE RIVERS ZETA AND MORAČA

Abstract: Due to the extreme and enormous development of mankind in all areas, especially in the field of technology, the result is the development of settlements and an increase in the number of inhabitants, which conditions the pollution of the human environment, and water pollution is among the most severe forms. Of course, the increase in the number of inhabitants increases the consumption of water, and thus the amount of waste water also increases [1]. The main sources of pollution of the Zeta and Morača rivers are certainly sanitary and fecal waste water, which is discharged into these sur-

[1] *Univerzitet Crne Gore, Metalurško-tehnološki fakultet, darkov@ucg.ac.me, ORCID: 0000-0003-0868-4649*

[2] *Univerzitet Crne Gore, Metalurško-tehnološki fakultet, jelenapj@ucg.ac.me, ORCID: 0000-0001-5841-4335*

[3] *Univerzitet Crne Gore, Metalurško-tehnološki fakultet, draganra@ucg.ac.me, ORCID: 0000-0002-2577-8244*

face streams without prior adequate treatment. This is especially pronounced in the Municipality of Danilovgrad and the Capital City of Podgorica. Namely, the Municipality of Danilovgrad does not have a wastewater treatment plant built, while the existing plant in Podgorica is of inadequate capacity. The municipality of Nikšić has a WWTP with a capacity of 110,000 EP, on which three types of treatment are applied: primary, secondary and tertiary treatment, which removes N, S and P. Disinsection of the effluent is also carried out at this WWTP. The existing WWTP in Podgorica has a capacity of 55,000 EP and has two types of treatment: primary and secondary treatment. Effluent disinfection is not carried out at this facility. The purpose of the analysis of pressures and impacts is to identify significant pressures affecting the surface water bodies of the Zeta and Morača rivers.
Key Words: wastewater, wastewater treatment plant, environment, rivers Zeta and Morača

1. Uvod

Rijeke Zeta i Morača pripadaju Jadranskom slivu. Tokom svog toka izložene su raznim uticajima i pritiscima, na osnovu kojih je i pripremljena ova analiza.

Rijeka Zeta izvire na Vidrovanu i u svom toku prolazi kroz tri opštine: Nikšić, Danilovgrad i Podgoricu. Takođe, rijeka Morača u svom toku protiče kroz teritoriju opština Kolašin, Podgorica i Zeta. Obzirom da opština Nikšić ima izgrađeno postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda, to je uticaj sanitarnih i fekalnih otpadnih voda smanjen na najmanju moguću mjeru, kada je rijeka Zeta u pitanju. Međutim, u daljem svom toku, rijeka Zeta prolaskom kroz opštinu Danilovgrad biva maksimalno opterećena otpadnim vodama, bilo da se radi o sanitarnim i fekalnim ili drugim otpadnim vodama koje se javljaju tokom rada privrednih subjekata na ovom prostor.

Jedan dio zagađenja rijeke Zete u opštini Danilovgrad potiče od privrednih subjekata, od kojih svi nemaju adekvatno riješeno pitanje tretmana otpadnih voda („Mermer“ a.d, Klanica „Primato“, Farma svinja „Voli“, Mljekara „Lazine“, D.O.O. „Šimšić Montmilk“, D.O.O. „Šišković“). Navedene kompanije ispuštaju otpadne vode direktno u rijeku Zetu sa djelimičnim tretmanom ili bez tretmana i na taj način narušavaju ekosistem rijeke i okolnog pojasa, a dovodi se i u pitanje stanje ihtiofaune.

Sa ovakvim stanjem uticaja na kvalitet vode rijeke Zete, ista se uliva u Moraču. Jedan od najvećih uticaja na površinsku vodu rijeke Morače je postojeće postrojenje u Podgorici, koje je nekada bilo odgovarajućeg kapaciteta, a u današnje vrijeme je postalo veoma malog kapaciteta, jer je projektovano za kapacitet od 55.000 ES i vrši biološko sekundarno prečišćavanje sa primarnom sedimentacijom i procesom aktivnog mulja. Ugušćivanje i odvodnjavanje mulja se vrši pomoću centrifuga i skladišti se na lokaciji PPOV-a. Prvobitna digestija mulja nikada nije stavljena u funkciju.

Zbog ograničenog kapaciteta postrojenja, približno 50% sakupljenih otpadnih voda se ispušta u rijeku Moraču, uzvodno od postrojenja, bez bilo kakvog prečišćavanja, a od preostale količine se jedna frakcija ispušta nakon samo primarnog mehaničkog prečišćavanja. Ispuštanje neprečišćenih i samo djelimično prečišćenih efluenata značajno utiče na kvalitet rijeke Morače.

Kada je rijeka Zeta u pitanju, važno je znati da dio njenog toka prolazi kroz područje koje je proglašeno parkom prirode, što još više obavezuje sve potencijalne zagađivače da vrše adekvatan tretman otpadnih voda koje stvaraju, prije njihovog ispuštanja u istu. Neki

autori [2] su definisali pojam otpadne vode na sledeći način: „Voda koja je zagađena i onečišćena na bilo koji način jeste otpadna voda“. Autori rada [3] su između ostalog obrađivali kako zagađujuće materije dospijevaju do vode direktnim i indirektnim putevima, kao i postupke prečišćavanja otpadnih voda.

Postoji značajan broj tehnoloških postupaka prečišćavanja komunalnih otpadnih voda. Tehnologije prečišćavanja komunalnih otpadnih voda obrađivali su i autori rada [4].

Tehnologije za proizvodnju čiste vode i čiste energije dobile su globalnu pažnju zbog nedostatka vode, iscrpljivanja resursa i globalnog zagrijavanja [5]. Izlučeni efluent iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda može postati sirovina za proizvodnju obnovljive energije, pretvarajući hemijski sadržaj energije u organskim zagađivačima sirovih komunalnih otpadnih voda u korisnu osnovu za energiju [6].

Komunalne otpadne vode su najrasprostanjenija vrsta otpadnih voda koja spada u kategoriju otpadnih tokova male čvrstoće, koje karakterišu niska organska čvrstoća i visok sadržaj čestica organske materije [7].

Tipični konvencionalni anaerobno-aerobni sistemi tretmana koji se komercijalno koriste su: bazeni za stabilizaciju, lagune, kao i prirodni i vještački močvarni sistemi. Aerobni tretman se dešava u donjem kraju. Tipično organsko opterećenje je 0,01 kg BPK (biološka potreba za kiseonikom)/m^3 dnevno, a vrijeme zadržavanja varira od nekoliko dana do 100 dana [8, 9].

2. Karakteristike postojećih postrojenja u Nikšiću i Podgorici

2.1. PPOV Nikšić

PPOV Nikšić dnevno prečisti sve količine otpadnih voda koje dolaze na postrojenje. Kao rješenje za tehnološki proces prečišćavanja otpadne vode uzet je: intenzivan proces sa niskoopterećenim aktivnim muljem i višestrukom recirkulacijom aktivnog mulja – anaerobno-anoksično-oksični (Aerobni) proces.

Zbog visokih ekoloških standarda, odnosno zahtjeva za kvalitetom prečišćene vode, predviđen je kompletan tretman sirove otpadne vode, koji uključuje sisteme za preliminarni, primarni, sekundarni (biološki) i tercijarni tretman. Osim oksidacije ugljenikovih jedinjenja, vrši se i denitrifikacija – uklanjanje azota, kao i uklanjanje fosfora (biološko i hemijsko). Na liniji završnog tretmana predviđena je primjena mikrosita i dezinfekcija efluenta UV zracima.

Što se tiče tretmana otpadnog mulja, predviđeno je zgušnjavanje primarnog i aktivnog mulja, anaerobna stabilizacija mulja, kondicioniranje polimerom i mehanička dehidratacija mulja. Prilikom stabilizacije mulja, u procesu anaerobne digestije proizvodi se biogas, koji se može koristiti kao izvor toplotne i električne energije. Predviđeno je odlaganje dehidratisanog mulja na deponiju i/ili trajna destrukcija dehidratisanog mulja sagorijevanjem u specijalnim pećima.

Kolektor kojim se otpadna voda transportuje do PPOV je profila DN=800 mm.

Na slici 1 prikazano je postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda u Nikšiću.

Slika 1. Postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda u Nikšiću
Figure 1. Wastewater treatment plant in Nikšić

2.2. PPOV Podgorica

Obzirom na to da postrojenje trenutno ne može obraditi cjelokupnu količinu otpadnih voda i teret zagađenja koji se sakuplja u kanalizacionoj mreži, dio ulazne sirove otpadne vode se kontinuirano ispušta u rijeku Moraču, uzvodno od PPOV-a (slika 2). Drugi dio otpadnih voda se ispušta nakon mehaničkog predtretmana i prečišćavanja (primarna sedimentacija) unutar postrojenja. Preostali dio se prečišćava u postrojenju u cilju uklanjanja zagađenja ugljenikom. PPOV nije projektovano za uklanjanje nutrijenata (N i P).

Slika 2. Obilazni kanal i ispuštanje sirovih otpadnih voda u rijeku Moraču, uzvodno od PPOV-a
Figure 2. Bypass canal and discharge of raw wastewater into the Morača River, upstream of the WWTP

Na slici 3 prikazan je ulaz u PPOV sa grubom rešetkom i pužnim pumpama, a na slici 4 prečišćivač, primarni taložnik i bazen za aeraciju.

Slika 3. Ulaz u PPOV sa grubom rešetkom i pužnim pumpama
Figure 3. Entrance to the WWTP with coarse grating and screw pumps

Slika 4. Prečišćivač, primarni taložnik i bazen za aeraciju
Figure 4. A clarifier, a primary settling tank and an aeration basin

3. Rezultati ispitivanja

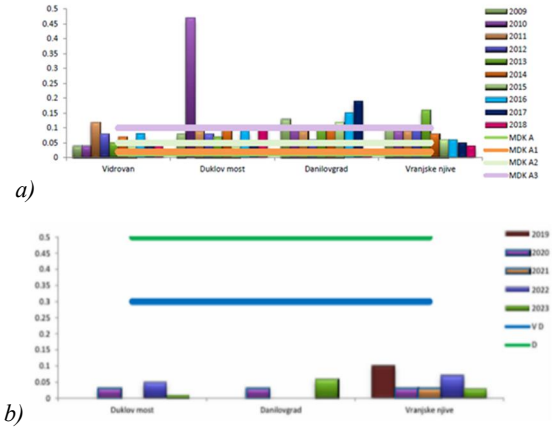
Stalna kontrola kvaliteta površinskih voda u Crnoj Gori obavlja se radi procjene kvaliteta vode vodotoka, praćenja trenda zagađenja i očuvanja kvaliteta vodnih resursa. Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih voda rijeka Zeta i Morača preuzeti su iz Informacije o stanju životne sredine za 2023. godinu koju je uradila Agencija za zaštitu životne sredine Crne Gore [10].

Mjerni parametri: Biološka potrošnja kiseonika (BPK), Fostafi, Nitrati

Biološka potrošnja kiseonika (BPK) je količina kiseonika koja je potrebna da se izvrši biološka oksidacija prisutnih, biološki razgradljivih, sastojaka vode. Stepen zagađenosti vode organskim jedinjenjima definisan je, pored ostalih, i ovim parametrom (BPK) i osnovni je parametar za ocjenu zagađenosti površinskih voda organskim materijama.

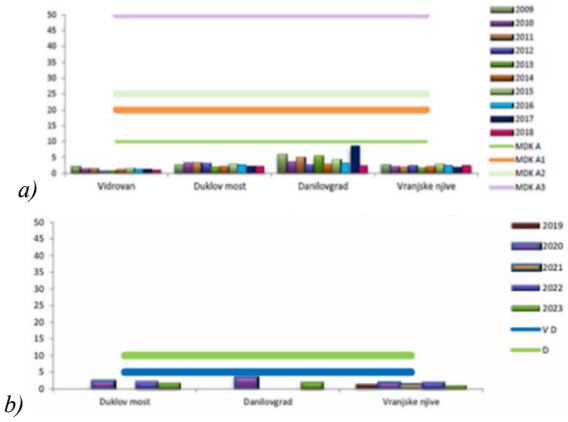
Najznačajniji izvor zagađenja ortofosfata potiče iz komunalnih i industrijskih otpadnih voda i poljoprivrede. Fosfati mogu oštetiti vodenu okolinu i narušiti ekološku ravnotežu u vodama, te njihov povećan sadržaj može izazvati eutrofikaciju, što ima za posledicu ubrzano

razmnožavanje algi i viših biljaka i stvaranje nepoželjne promjene ravnoteže organizama prisutnih u vodi, kao i samog kvaliteta vode. Jedinjenja koja sadrže azot, u vodi se ponašaju kao nutrijenti i izazivaju nedostatak kiseonika, a time utiču na izumiranje živog svijeta. Glavni izvori zagađenja azotnim jedinjenjima su komunalne i industrijske otpadne vode, septičke jame, upotreba azotnih vještačkih đubriva u poljoprivredi i životinjski otpad. Na slici 5 dat je histogramski prikaz sadržaja fosfata u rijeci Zeti, a na slikama 6 i 7 sadržaj nitrata i BPK_5.



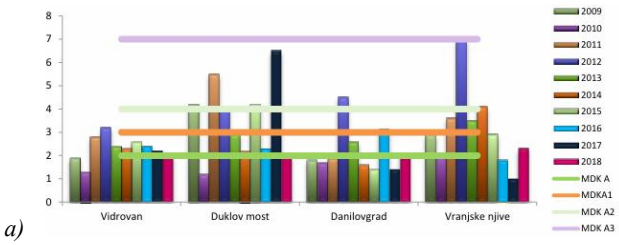
Slika 5. Sadržaj ortofosfata(fosfata) u rijeci Zeti (mg/l) (period od 2009.-2018. (a) i od 2019-2023. godine (b)

Figure 5. Content of orthophosphate (phosphate) in the Zeta River (mg/l) (period from 2009-2018. (a) and from 2019-2023. (b)

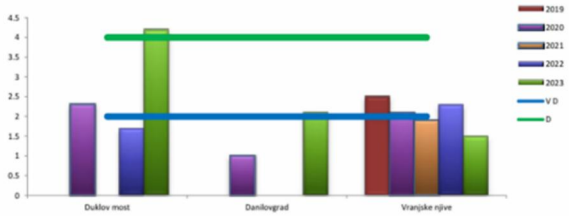


Slika 6. Sadržaj nitrata u rijeci Zeti (mg/l) (period od 2009.-2018. (a) i od 2019.-2023. godine (b))

Figure 6. Nitrate content in the Zeta River (mg/l) (period from 2009-2018 (a) and from 2019-2023. (b))



a)



b)

Slika 7. BPK_5 u rijeci Zeti (mg O_2/l) (period od 2009.-2018. (a) i od 2019.-2023. godine (b))
Figure 7. BOD_5 in the Zeta River (mg O_2/l) (period from 2009-2018 (a) and from 2019-2023 (b))

Prikazani rezultati ispitivanja kvaliteta voda rijeka Zeta i Morača pokazuju da je u periodu od 2009-2018. godine korišćena metodologija gdje su rezultati upoređivani sa MDK, dok je za period 2019-2023. godina korišćena metodologija gdje su korišćene norme za kvalitet vodnog tijela (dobar i vrlo dobar). Na osnovu ispitivanih lokaliteta rijeka Zeta i Morača, ukupno stanje voda bilo je izvan zadovoljavajućeg statusa i to kao: loš status na lokalitetima Zeta-Duklov most; Zeta-Danilovgrad; Zeta-Vranjske njiva; Morača-Zlatica; Morača-ispod Vukovaca. Svi dobijeni rezultati pokazuju veoma značajan uticaj otpadnih voda koje se bez prethodnog odgovarajućeg tretmana ispuštaju u ove vodotoke.

4. Zaključak

Na osnovu prezentovanih rezultata ispitivanja kvaliteta površinskih voda rijeka Zeta i Morača mogu se isvesti sledeći zaključci:

1. Uticaj komunalnih i industrijskih otpadnih voda predstavlja jedan od glavnih kontaminenata površinskih i podzemnih voda, jer se na pojedinim vodotocima direktno ulivaju u recipijente bez prečišćavanja.

2. Analiza pokazuje da je neophodno što prije riješiti pitanje prečišćavanja otpadnih voda iz Danilovgrada, Spuža i glavnog grada Podgorice u cilju zaštite obje rijeke, a samim tim i Skadarskog jezera kao konačnog recipijenta.

3. Sve ostale potencijalne zagađivače treba obavezati da vrše adekvatan tretman otpadnih voda koje stvaraju, prije njihovog ispuštanja u površinske tokove rijeka Zeta i Morača.

4. Zadatak svih u Crnoj Gori je da se sačuvaju vode rijeka Zeta i Morača, koje predstavljaju izuzetno značajan dio vodnih resursa.

5. Literatura

[1] Jokanović M, Pajkić J, Proces prečišćavanja otpadnih voda*, 3rd International scientific conference Conference on mechanical engineering technologies and applications COMETa 2016*, East Sarajevo, Jahorina 2016.

[2] Jahić M, *Urbani vodovodni sistemi*, Udruženje za tehnologiju vode, Beograd, 1988.

[3] Kitanović R, Šušteršič V, Tretman otpadnih voda, *Vojno-tehnički glasnik,* vol. LXI, No. 3, 2013.

[4] Sikosana M, Sikhwivhilu K, Moutloali R, Madyira D, Municipal wastewater treatment technologies: A review, *2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing* (SMPM 2019), Procedia Manufacturing 35, 2019.

[5] Chung T. S, Li XOng R. C, Ge G, Wang Han H, Emerging Forward Osmosis (FO) Technologies and Challenges Ahead for Clean Water of Energy Application, *Current Opinion in Chem. Eng,* 1, 2012.

[6] Shizas I, Bagley D. M, Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams, *J. Energy Eng.* 130, 2004.

[7] Lier J. B, High-rate anaerobic treatment: diversifying from end-of-the-treatment to resource-oriented conversion techniques, *Water Sci. Technol*. 5, 2008.

[8] Chan Y. J., Chong M. FLaw C. L, Hassell D. G, A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, *Chem. Eng. J.* 155, 2009.

[9] Wang L. K, *Waste Treatment in the Process Industries*, CRC Press, 2005.

[10] Agencija za zaštitu životne sredine Crne Gore: Informacija o stanju životne sredine u Crnoj Gori za 2023. godinu, 2024.

Драгана Божић[1], Љиљана Аврамовић[2]
Вања Трифуновић[2], Зоран Стевановић[4]
Емина Пожега[5], Весна Марјановић[6], Зоран Аврамовић[7]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK25285B

НЕУТРАЛИЗАЦИЈА ОТПАДНИХ ВОДА ДОБИЈЕНИХ НАКОН ПРОЦЕСА ЦЕМЕНТАЦИЈЕ

Резиме: Овај рад истражује процес неутрализације отпадних вода које настају након цементације у процесима металургије бакра. Узорак отпадних вода мешан је са проточним индустријским водама из постројења за пречишћавање отпадних вода у различитим односима (10:1 и 20:1). Мешавине су неутралисане до pH 8,5 додавањем 10% раствора $Ca(OH)_2$, уз накнадно додавање флокуланта. Резултати су показали значајно смањење концентрација бакра, цинка, хрома и гвожђа. Код мешавина у односу 20:1, концентрације свих испитиваних метала биле су испод прописаних граничних вредности емисије (ГВЕ). Истраживање потврђује да је неутрализација $Ca(OH)_2$ ефикасан метод за обезбеђење усклађености са еколошким стандардима пре испуштања отпадних вода у природне реципијенте.
Кључне речи: пречишћавање отпадних вода, цементација, неутрализација, тешки метали, заштита животне средине

NEUTRALIZATION OF WASTEWATER OBTAINED AFTER THE CEMENTATION PROCESS

Abstract: This study investigates the neutralization of wastewater generated after the cementation process in copper metallurgy. Samples of wastewater were mixed with influent wastewater from the industrial wastewater treatment plant at different ratios (10:1 and 20:1). The mixtures were neutralized with 10% $Ca(OH)_2$ solution to pH 8.5, followed by the addition of a flocculant. The results demonstrated

[1] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, dragana.bozic@irmbor.co.rs,* ORCID:0000-0003-1055-8449
[2] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, ljiljana.avramovic@irmbor.co.rs,*ORCID:0000-0002-3747-1530
[3] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, vanja.trifunovic@irmbor.co.rs,* ORCID:0000-0003-4839-8751
[4] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, zoran.stevanovic@irmbor.co.rs,* ORCID:0000-0001-5317-6884
[5] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, emina.pozega@irmbor.co.rs,* ORCID: 0000-0001-6797-2435
[6] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, vesna.marjanovic@irmbor.co.rs,* ORCID: 0000-0001-8005-5244
[7] *Институт за рударство и металургију Бор, Бор, zoran.avramovic@irmbor.co.rs,* ORCID: *0009-0006-7585-976X*

that the concentrations of copper, zinc, chromium, and iron decreased significantly. For mixtures at a 20:1 ratio, the concentrations of all examined metals were below the prescribed emission limit values (ELVs). The study confirms that neutralization with $Ca(OH)_2$ is an effective treatment method for ensuring compliance with environmental standards before discharge into natural recipients.
Key Words: wastewater treatment, cementation, neutralization, heavy metals, environmental protection

1. Увод

Индустријске отпадне воде представљају један од највећих изазова савремене металургије и заштите животне средине. У процесима добијања и прераде метала настају значајне количине ефлуента који, уколико се не третирају, могу да угрозе квалитет површинских и подземних вода. Посебно су проблематичне отпадне воде које садрже тешке метале, јер они показују високу токсичност, биоакумулативни потенцијал и дуготрајну постојаност у екосистемима [1]. Због тога су у већини земаља прописане веома строге граничне вредности за њихов садржај у пречишћеним водама. Цементација се широко примењује у хидрометалургији бакра као ефикасан поступак за издвајање бакра из раствора [2]. Међутим, након цементације у растворима заостају одређене концентрације бакра и других метала (нпр. Zn, Cr, Fe), што захтева додатни третман пре испуштања у реципијенте. Неутрализација алкалним реагенсима, најчешће калцијумхидроксидом, једна је од најједноставнијих и најефикаснијих метода за смањење концентрације растворених метала, јер доводи до њиховог таложења у облику хидроксида. Поред тога, додатак флокуланата омогућава побољшано уклањање суспендованих и колоидних честица.

У овом раду испитивана је ефикасност неутрализације отпадних вода добијених након процеса цементације. Посебан акценат стављен је на утицај односа мешања са дотоком из постројења за пречишћавање отпадних вода и на могућност постизања прописаних граничних вредности за метале Cu, Zn, Cr и Fe [3]. Резултати истраживања треба да допринесу унапређењу поступака третмана отпадних вода у металуршкој индустрији и бољој заштити животне средине.

2. Материјали и методе

Коришћена су два типа узорака:

- киселе воде након цементације
- испирне воде након цементације

Ови узорци мешани су са проточним индустријским водама на улазу у постројење за пречишћавање отпадних вода у односима 10:1 и 20:1 (проточне воде: постцементационе воде).

Свакој мешавини запремине 1 L додаван је раствор $Ca(OH)_2$ концентрације 10% до pH 8,5. Почетне вредности pH кретале су се од 3,0 до 5,6. Утрошак реагенса кретао се у распону од 1,7 до 20 mL. Сваком узорку додато је и 6 mL флокуланта, након чега су вршене анализе после 30 минута. Концентрације метала (Cu, Zn, Cr, Fe) одређене су стандардним аналитичким методама и упоређене са прописаним граничним вредностима емисије (ГВЕ).

3. Резултати и дискусија

Ефикасност процеса неутрализације испитивана је у четири експеримента (I–IV). Почетне и коначне концентрације метала приказане су у табели 1.

Табела 1. Утицај односа мешања на ефикасност процеса неутрализације
Table 1. The influence of mixing ratio on the efficiency of the neutralization process

Експеримент	Однос	Почетне конц, mg/L			Концентрације на крају, mg/L			ГВЕ, mg/L		
		Cu	Zn	Cr	Cu	Zn	Cr	Cu	Zn	Cr
I	10:1	18,5	200	7,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	1,0	0,5
II	20:1	11,7	109	3,1	<0,1	0,11	<0,1	0,5	1,0	0,5
III	10:1	35,2	146	0,56	0,42	3,3	<0,1	0,5	1,0	0,5
IV	20:1	25,5	105	0,47	<0,1	0,43	<0,1	0,5	1,0	0,5

На слици 1. приказан је изглед узорка током процеса неутрализације. Уочено је да након додавања $Ca(OH)_2$ и флокуланта долази до интензивног таложења и издвајања суспендованих честица, што потврђује ефикасност процеса уклањања јона метала (3).

Слика 1. Неутрализација узорка након цементације
Figure 1. Neutralization of the sample after cementation

Видљиво је формирање пахуљастог талога и смањење мутноће раствора, што одговара резултатима хемијских анализа које показују значајно смањење концентрација Cu, Zn, Cr и Fe.

Резултати показују значајно смањење концентрација тешких метала након неутрализације:

- Cu: у свим експериментима концентрације су смањене испод ГВЕ.
- Zn: у експерименту III (однос 10:1) добијена је вредност од 3,3 mg/L, што је изнад ГВЕ, док су у осталим случајевима резултати били у складу са прописима.
- Cr: у свим експериментима концентрације су биле испод ГВЕ.

- Fe: концентрације гвожђа (неспецифициране у табели обзиром да је гвожђе додато приликом процеса цементације) такође су се значајно смањиле – са неколико стотина mg/L на мање од 2 mg/L.
- Уочава се да је однос мешања имао пресудан утицај. При односу 20:1 (експерименти II и IV), добијени су потпуно усаглашени резултати са прописаним граничним вредностима.

4. Закључак

Спроведена истраживања показала су да је неутрализација $Ca(OH)_2$-ом ефикасан метод за третман отпадних вода које настају након процеса цементације. Концентрације бакра, цинка, хрома и гвожђа значајно су смањене, а у случају мешања у односу 20:1 добијени су резултати који у потпуности задовољавају законски прописане ГВЕ за испуштање у реципијенте.

Овај метод, у комбинацији са правилним избором односа мешања и додавањем флокуланта, представља практично решење за унапређење еколошке заштите у металуршким постројењима.

Захвалница

Овај рад је финансијски подржан од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, по Уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада Института за рударство и металургију Бор у 2025. години, број: 451-03-136/2025-03/200052.

5. Литература

[1] Fu F, Wang Q, Removal of heavy metal ions from wastewater: a review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418, 2011.

[2] Habasi F, *Hidrometalurgija*. Metallurgie Extractive Quebec, 1999.

[3] Правилник о граничним вредностима загађујућих материја у отпадним водама *Службени гласник РС*, бр. 67/2011, 48/2012.

Бојана Вујовић[1]

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25289V

РАЗУМЕВАЊЕ МИКРОБИОЛОГИЈЕ АКТИВНОГ МУЉА – КЉУЧ ЗА ЕФИКАСНО УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ ПРЕЧИШЋАВАЊА ОТПАДНИХ ВОДА

Резиме: Активни муљ чини сложена заједница микроорганизама различитх трофичких нивоа, формирана под утицајем бројних фактора спољашње средине, а чија екологија и физиологија имају кључну улогу у третману отпадних вода. Разумевање законитости ових односа омогућава селекцију микроорганизама чије особине и метаболизам доприносе ефикасном пречишћавању отпадне воде. У пракси, проблеми попут надувавања, испливавања и слабог таложења муља често су последица нарушене структуре биоценозе активног муља. Циљ рада је да прикаже значај познавања, праћења и управљања микробиолошким саставом активног муља за унапређење поузданости и ефикасности процеса третмана отпадних вода.
Кључне речи: биоценоза активног муља, третман отпадних вода, селекција микроорганизама

ACTIVATED SLUDGE MICROBIOLOGY – A KEY TO EFFICIANT WASTEWATER TREATMENT PROCESS MANAGEMENT

Abstract: Activated sludge is a complex community of microorganisms at different trophic levels, shaped by various environmental factors. Their ecology and physiology play a crucial role in wastewater treatment. Understanding these interactions enables the selection of microorganisms with favorable metabolic traits for effective purification. In practice, issues like bulking, foaming, and poor sludge settling often result from an imbalanced activated sludge biocenosis. This paper highlights the importance of identifying, monitoring, and managing the microbial composition of activated sludge to improve the reliability and efficiency of wastewater treatment processes.
Key Words: activated sludge biocenosis, wastewater treatment, microorganism selection

1. Увод

Активни муљ је најчешће коришћена технологија у третману комуналних и отпадних вода високо оптерећених органском материјом у свету. Активни муљ представља конзорцијум микроорганизама различитих трофичких нивоа. Реактор са активним муљем можемо посматрати као вештачки екосистем где су различити микроорганизми под сталним утицајем различитих абиотичких и биотичких еколошких фактора. Биоценозу активног муља чине бактерије, протозое и метазое различитих трофичких ниова. Бактерије чине око 95% биомасе активног муља и представљају примарне разлагаче органске материје, одговорне за деградацију свих биодеградабил-

[1] *4waters doo, Beograd, b.vujovic@4waters.rs*

них растворених једињења у отпадној води. Бактеријама из муља се хране једноћелијске протозое на тај начин доприносе пречишћавању отпадне воде. Такође, метазое, као вишећелијски микроскопски организми, доприносе пречишћавању посредно, хранећи се слободнопливајућим бактеријама [2] [8].

Бактеријска заједница у активном муљу је бројна и разноврсна, изграђена из различитих група бактерија, међу којима су аеробне хетеротрофне бактерије, нитрификатори, денитрификатори, ферментативне бактерије и полифосфат-акумулирајуће бактерије. Основна разлика између ових заједница је у катаболичком метаболизму, те бројност појединих група детерминише доступност и врста једињења које користе као извор нутритивних и енергетских потреба (донор електрона) и оксичност услова средине (акцептор електрона) [6].

Процес пречишћавања отпадне воде започиње пуштањем отпадне воде у биореактор. У зависности од тога која врста органске материје је присутна (лако или споро биодеградабилна), услова средине и времена задржавања, долази до умножавања одређених група бактерија које постају доминанте. Флокулација, односно груписање бактерија је њихово природно својство. Сматра се да у природи, бактерије не живе као планктонски организми, него у заједницама изграђених из једне или више врста бактерија, које су слепљене међу собом и заштићене слузавим омотачем. На исти начин, бактерије у биолошком реактору се природно слепљују међу собом, формирајући пахуље или флокуле муља што омогућава сепарацију бактерија од пречишћене воде [6], [7], [8]. Слепљивање бактерија се одвија захваљујући способности лучења различитих екстрацелуларних полисахарида које поспешују слепљивање, али такође обезбеђују заштитни матрикс у које су бактерије урођене и на тај заштићене од променљивих спољашњих утицаја. Екстрацелуларни матрикс такође служи као депо нутритивних елемената, због чега количина и развијеност матрикса представља један од значајних показатеља услова који владају у биореактору [6], [7], [8].

Величина, облик, структура и постојаност флокула муља зависи од диверзитета бактерија које учествују у њиховој изградњи и детерминисана је условима који владају у биореактору. Од карактеристика флокула муља у највећој мери зависи успешност пречишћавања отпадних вода, укључујући сепарацију пречишћене воде од муља у фази финалног таложења [8], [9].

Активни муљ је такође насељен бројном и разноврсном заједницом протозоа и метазоа. Ови организми су крупни, лако видљиви и препознатљиви под микроскопом. Иако је њихов биоиндикаторски значај по некада неконзистентан, многи аутори наглашавају њихов значај у управљању процесом пречишћавања отпадних вода [1], [7] [8], [11]. Као најразвијенији микроорганизми присутни у муљу, они су и најосетљивији на недостатак кисеоника и присуство токсичних супстанци, због чега њихова бројност, диверзитет или изненадни нестанак свих јединки често означава акутни или хронични стрес који постоји у систему [1], [2], [15]. Такође, њихов развој је детерминисан старошћу муља, па претстављају добре индикаторе зрелости и старости муља у систему [7].

Филаментозне бактерије су нормално присутна бактеријска заједница у активном муљу. Због свог специфичног кончастог изгледа, оне су видљивије у систему, а због утицаја на процес третмана, често су у фокусу интересовања. Уколико су присутне у

мањем броју, ове бактерије служе као арматура која одржава флокулу муља чврстом и компактном. Међутим, уколико су присутне у већем броју, те уколико њихов раст није ограничен само на површину флокуле, него излази и изван, или ако су развијене и у течности између флокула муља, ове бактерије значајно отежавају пречишћавање, пре свега јер отежавају, успоравају или потпуно онемогућавају сепарацију муља од пречишћене воде у финалном степену пречишћавања. Такође, стварање пене на биолошким реакторима или таложницима је често последица масовног развоја неких од ових бактерија [7], [8], [10].

Циљ рада је да се кроз приказ резултата, оригиналних микрографија и доступних литературних података прикаже значај познавања односа и динамике односа у биолошком реактору, а који утичу на ефикасност и економичност процеса пречишћавања. Најчешћи проблеми у процесу третмана отпадних вода су проузроковани лошом микробном структуром активног муља, а која је са друге стране последица услова који су успостављени у биолошком реактору и као такви подложни промени.

2. Материјал и методе рада

Микроскопска анализа активног муља обухвата преглед свежих, нативних и фиксираних препарата активног муља. Свежи препарати се прегледају при увеличању светлосносг микроскопа од 100 – 400x, док се за обојене користи имерзиони објектив. На нативном препарату се при увеличању објектива од 10 и 40x уочава величина, облик, структура и диверзитет пахуља муља, абунданција филамената, као и квалитативно и квантитативно присуство протозоа и метазоа. Прегледом претходно обојених препарата (по Граму, Нејсеру, индија инком или метиленско плавим) је могуће уочити различите детаље, као што је развијеност екстрацелуларног матрикса, морфолошке карактеристике присутних филамената, уз могућност да се уради њихова идентификација употребом дихотомих кључева идентификације [7] [8].

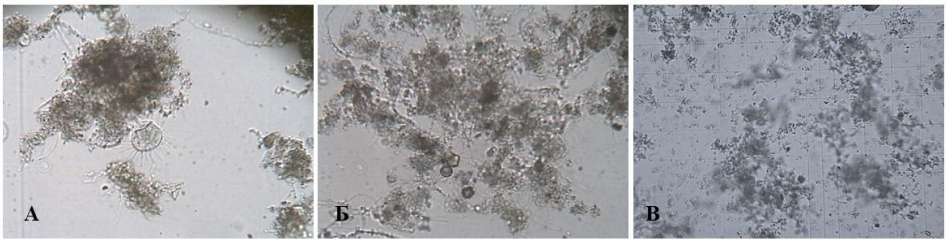
3. Резултати рада и дискусија

Велики број аутора наглашава значај микроскопских анализа активног муља у управљању процесом пречишћавања. Међутим, резултати испитивања и биоиндикаторска вредност и значај појединих микроорганизама је различито вреднована. Микроскопским прегледом нативног препарата муља уочавају се главне основне карактеристике квалитета активног муља.

Морфологија флокула се карактерише присуством флокула различитих величина, облика, структуре и постојаности. Типично, флокуле се димензија између 50 – 500 μm, облика који може варирати од облог, овалног до потпуно неправилног облика. Структура флокула може бити отворена или затворена, у зависности да ли су флокулоформирајући организми спојени у компактну заједницу или она има „паучинасту структуру“. Постојане флокуле се карактеришу флокулама на чијим ивицама нема неповезаних, слободнопливајућих ћелија (слика 1).

Морфолошке карактеристике флокула муља су детерминисане квалитетом улазне отпадне воде, примењеним технолошким поступком, процесним параметрима и

другим факторима. Флокуле ситних величина, неправилног облика и структуре се спорије и непотпуно одвајају од пречишћене воде, узрокујући погоршање квалитета ефлуента [8], [9].



Слика 1. Морфолошке карактеристике флокула муља (нативни препарат): А – заобљен облик, компактна структура, Б - неправилан облик, компактна структура, В – неправилан облик, отворена структура

Figure 1. Morphological characteristics of activated sludge flocs (native slide): А – oval shape, compact structure, Б – irregular shape, compact structure, В – irregular shape, open structure

Присуство великог броја слободнопливајућих бактеријских ћелија, као и бактерија спиралног облика (спирила и спирохета) су лако уочљиви знаци недостатка кисеоника, присуства високе концентрације органске материје у реакторима или знаци „гладујућег муља“ [8].

Међу једноћелијским протозоама, у муљу су присутне амебе, амебе са љуштурицом, флагелате и цилијате. Амебе су једноћелијске животиње препознатљиве по својим псеудоподијама или „лажним ножицама“ којима се крећу, хватају плен, истовремено мењајући облик свог тела. У муљу су видљиве крупне амебе (слика 2Б), као и ситне, а њихова појава је везана за присуство веће количине хране у води, било због високе концентрације растворене органске материје у почетном периоду рада постројења, или у условима велике старости муља и распадања постојећих флокула [7] [8].

Амебе са љуштурицом се разликују према облику љуштурице изграђене из калцијум-карбоната испод које по некада извиру танке псеудоподије. Флагелате су једноћелијски организми који се карактеришу присуством бича или флагеле. Осим *Euglena* sp. која је крупна, остали представници су ситни, често означене као ситне безбојне флагелате и препознатљиве по свој типичном брзом кретању кроз воду [7] [8].

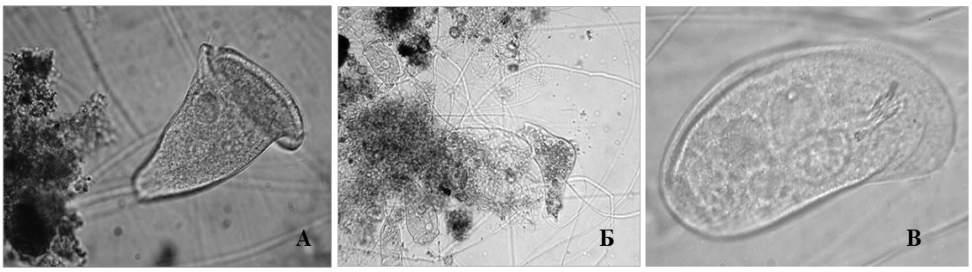
Цилијатне протозое су најсложеније и најосетљивији једноћелијски организми у активном муљу, због чега се присуство, бројност или одсуство неких од представника има највећи биоиндикаторски значај [3] [12]. Ови организми не учествују директно у трансформацији органске материје у активном муљу, али хранећи се планктонским бактеријама доприносе бистрењу воде и производњи квалитетнијег ефлуента [7] [8].

У муљу су цилијатне протозое диференциране према трофичкој ниши коју заузимају:

- Слободнопливајуће цилијате се крећу између флокула муља и хране се бактеријским ћелијама које су присутне као планктони у течности (слика 2В),

- Брстеће цилијате које насељавају површину флока и хране се бактеријама одвојеним од флока у близини ивице флока и

Причвршћене цилијате које воде сесилни начин живота причвршћене за површину флокуле (слика 2А). Управо причвршћене цилијате се сматрају најбољим биоиндикаторима, јер због свог сесилног начина живота, нису у могућности да промене станиште приликом погоршања услова живота. У муљу су присутни представници родова *Vorticella* sp, *Opercularia* sp, *Epystilis* sp, *Charchesium* sp. и други. Иако се сматрају индикаторима зрелог, радно активног, добро аерисаног муља, велики број аутора наводи да се бројно присуство *Opercularia* и *Vorticella microstoma* јавља и у условима који се сматрају лимитирајућима за раст цилијата. Елошки посматрано, на добре услове и стабилан систем указује умерена бројност и велики диверзитет ове групе животиња, док велики раст само једне врсте упућује на услове који су ограничавајући (недостатак кисеоника, pH, присуство токсичних или тешко разградивих супстанци и слично) [3], [11], [12], [15].



Слика 2. Протозое у активном муљу (нативни препарат): А – Vorticella convallaria, Б - Amoeba, В – Colpidium sp.
Figure 2. Activated sludge protozoa (native slide): А – Vorticella convallaria, Б - Amoeba, В – Colpidium sp.

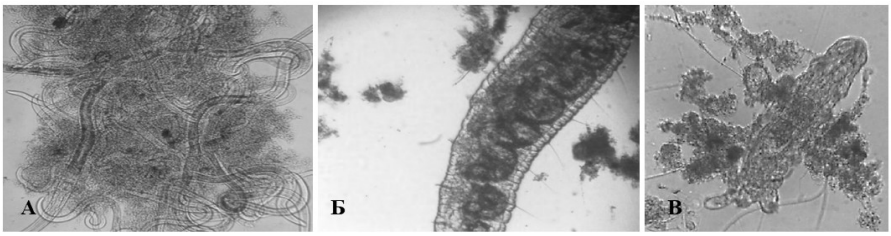
Метазое активног муља су више животиње микроскопских величина. У муљу се могу видети нематоде, ротаторије, олигохете и тардиграде, а њихов висок број у муљу увек указује на муљ велике старости (слика 3). Контрола старости муља је од великог значаја за успостављање енергетски ефикаснијег и економичнијег процеса третмана отпадних вода [16].

Филаментозне бактерије су специфична група бактерија издуженог, кончастог облика. У муљу је присутно око 30 различитих врста ових организама, које се разликују по својим морфолошким, физиолошким и еколошким карактеристикама, те такође имају висок биоиндикаторски значај у технологији пречишћавања [7], [8], [10].

Најчешће неправилности у раду постројења за третман отпадних вода су мутан ефлуент, отежано таложење муља у финалним таложницима, немогућност сепарације муља од пречишћене отпадне воде (набујавање муља), појава пене у биолошким реакторима или финалним таложницима, испливавање погача муља у финалном таложнику су проузроковани неправилном структуром активног муља [4], [10], [13], [14].

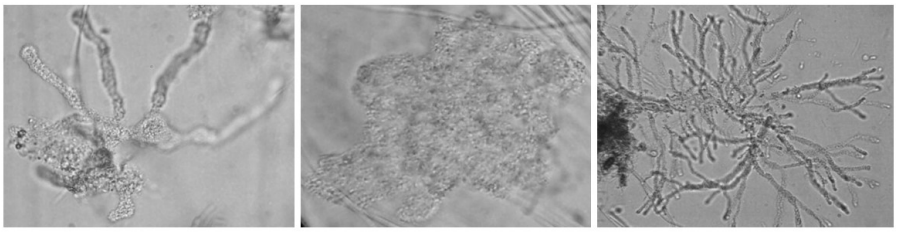
Већина ових појава је везана за композицију активног муља [7], [8]:

- Ситне флокуле и велики број слободнопливајућих бактерија доводе до продукције замућеног ефлуента уз повећану концентрацију укупних суспендованих материја;



Слика 3. Метазое у активном муљу (нативни препарат): А – Nematoda, Б - Oligochaeta, В – Tardigrada
Figure 3. Activated sludge metazoa (native slide): А – Nematoda, Б - Oligochaeta, В – Tardigrada

- Висока вредност филаментозног индекса указује на масован раст филаментозних (кончастих) бактерија и немогућности сепарације муља од пречишћене воде;
- Бројно присутне *Zooglea* или друге моноколоније доводе до присуства веће количине екстрацелуларних полисахарида и масивније развијеног слузавог омотача око формираних флокула, што узрокује повећање вискозности муља, отежаног таложења и обезводњавања овог муља (слика 4);



Слика 4. Различити облици Zooglea моноколонија (нативни препарат)
Figure 4. Different shapes of Zooglea monocolonies (native slide)

- Висока бројност филамената *Nocardia* spp., *Microthrix parvicella* i Tip 1863 доводи до стварања велике количине пене или скраме на површини биолошких реактора и/или финалних таложника [4], [5];
- Муљ са видљивим знацима старости укључујући присуство већих зона са израженим знацима труљења, доминантно присутне метазое, малобројне и оштећене јединке причвршћених цилијата доводи до одвајања и испливавања муља у финалним таложницима, односно појаве познате као „rising sludge“ [8].

4. Закључак

Микроскопска анализа муља је брза, јефтина и поуздана метода за праћење рада биолошких реактора. Активни муљ је екосистем изграђен из различитих популација

микроорганизама, различите сложености и трофичких нивоа под сталним утицајем абиотичких еколошких фактора. Успешност њиховог прилагођавања променљивим и често рестриктивним условима средине, условљава упешност целокупног третмана отпадних вода и квалитета пречишћене воде. Екологија активног муља је условљена условима средине, те познавање микроорганизама и њихових биолошких карактеристика омогућава подешавање и усклађивање услова у складу са потребама оне физиолошке групе чији раст је пожељан. Праћење биолошких карактеристика активног муља под микроскопом се омогућава увид у услове реактора, а који обједињују подате о физичко-хемијском квалитету инфлуента, ефикасности предтретмана, квантитету и доступности присутних нутритивних елемената, физичко-хемијском квалитету садржаја биореактора, старости муља и другим процесним параметрима. Сви проблеми који могу настати се на овај начин могу благовремено уочити и спровођењем превентивних мера спречити.

5. Литература

[1] Babko R, Kuzmina T, Lagod G, Jaromin-Glen K. Changes in the structure of activated sludge protozoa community at the different oxygen condition, *Chem didact ecol metrol*. 19 (1-2): 87-95, 2014.

[2] Benyelles M. B, Slimane M, Belgharbi A, Tir Toul M. A, Microbiological aspects of the aeration tanks of an activated sludge treatment plant during dysfunction: consequences on its treatment performance, *Lebanese Science Journal*, Vol.23, No 1, 2022.

[3] Berger F, Foissner W, III-2.1 Illustrated guide and ecological notes to ciliate indicator species (Protozoa, Ciliophora) in running waters, *Lakes, and sewage plants*, 2003.

[4] Burger B, Effect of *Microthrix parvicella* growth in domestic wastewater treatment plant of the city of Subotica, *7th Balkan Congress of Microbiology*, Belgrade, Proceedings, 2011.

[5] Бургер Б, Сезонска динамика раста *Microthrix parvicella* на ППОВ у Суботици током 2011 године, *41. Конференција о актуелним проблемима коришћења и заштите вода „Вода“,* Зборник радова (ISBN 978-86-904241-9-1), pp. 321-326, 2012.

[6] Chen G, Van Loosdrecht, Mark C. M, Ekama G.A, Brdjanovic D, *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design* – 2nd edition, IWA Publishing, 2023.

[7] Eikelboom D. H, *Process control of activated sludge plants by microscopic investigation*, 2000.

[8] Jenkins D, Richard M. G, Daigger G, *Manual of the causes and control of activated sludge bulking, foaming, and other solids separation problems* – 3rd edition, CRC Press LLC, 2004.

[9] Liwarska-Bizukojc E, Klepacz-Smolka A, Andrzejczak O, Variations of morphology of activated sludge flocs studied at full-scale wastewater treatment plants, *Envrionmental Technology*, 36(9): 1-26, 2014.

[10] Madoni P, Davoli D, Gibin G, Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated sludge plants in Italy, *Wat. Res.* 34(6), 1767-1772, 2000.

[11] Martin-Cereceda M, Perez-Uz B, Serrano S, Guinea A, Dynamics of protozoan and metazoan communities in a full scale wastewater treatment plant by rotating biological contactors, *Microbiol.Res,* 156, pp. 225-238, 2001.

[12] Милошевић Д, Борота Б, Фејзулахи Б, Вујовић Б, Диверзитет цилијата на ППОВ Руменка, Ковиљ и Степановићево у 2022. години, *52. Конференција о актуелним темама коришћења и заштите вода, „Вода 2022“*, Зборник радова pp. 299-304, 2023.

[13] Милошевић Д, Борота Б, Фејзулахи Б, Вујовић Б, Доминантно присутне филаментозне бактерије на ППОВ Руменка у периоду од августа 2022 године до фебруара 2023. године, *52. Конференција о актуелним темама коришћења и заштите вода, „Вода 2022“*, Зборник радова, pp. 305-310, 2023.

[14] Милошевић Д, Борота Б, Вујовић Б, Структура заједнице филаментозних бактерија у пречистачима комуналне отпадне воде и њихов индикаторски значај у биолошким реакторима, *54. Конференција о актуелним темама коришћења и заштите вода, „Вода 2025“*, Зборник радова, pp. 359-366, DOI: 10.46793/VODA25.351M, 2025.

[15] Nicolau A, Dias N, Mota M, Lima N, Trends in the use of protozoa in the assessment of wastewater treatment, *Res. Microbiol*. 152, 621-630, 2001.

[16] Рех Ж, Бургер Б, Економски значај биолошких анализа активног муља у вођењу технолошког процеса пречишћавања отпадних вода, *XIV Научно-стручни скуп о природним вредностима и заштити животне средине Екоист 07*, Сокобања, Зборник радова, pp. 382-385, 2007.

Марија Копривица[1], Марија Симић[2]
Јелена Петровић[3], Марија Ерцеговић[4]
Јелена Димитријевић[5], Ивана Микавица[6]

Прегледни научни рад
DOI: 10.5937/VIK25297K

УКЛАЊАЊЕ ЈОНА ТЕШКИХ МЕТАЛА ИЗ ВОДЕНИХ РАСТВОРА ПОМОЋУ УГЉЕНИЧНИХ МАТЕРИЈАЛА ДОБИЈЕНИХ ИЗ ОТПАДНЕ БИОМАСЕ

Резиме: Отпадна биомаса представља вредан ресурс за производњу функционалних угљеничних материјала који се могу успешно применити у уклањању јона тешких метала из отпадних вода. У овом прегледном раду укратко су приказане најчешће коришћене биомасе за добијање биочађи и хидрочађи, њихова својства и ефикасност у уклањању загађивача из водених раствора. Биочађи и хидрочађи иако имају различите механизме деловања и адсорпциону ефикасност углавном уклањају металне јоне комплексирањем, разменом јона и електростатичким привлачењем. Резултати бројних студија показују да је биочађ најчешће ефикаснија за уклањање метала попут Cd^{2+} и Pb^{2+}, док хидрочађ имају предност у погледу функционалније и еколошке производње. Будућа истраживања треба усмерити на оптимизацију, модификацију и класификацију материјала према циљаним применама.
Кључне речи: пречишћавање вода, отпадна биомаса, биочађ, хидрочађ, јони тешких метала, механизми адсорпције

REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS USING CARBON MATERIALS FROM WASTE BIOMASS – A REVIEW

Abstract: Waste biomass is a valuable resource for the production of functional carbon materials that can be successfully applied in the removal of heavy metal ions from wastewa ter. This review briefly presents the most commonly used biomasses for the production of biochar and hydrochar, their proper-

[1] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Франше д'Епереа 86, Београд, m.koprivica@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1451-5959*

[2] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, m.petrovic@itnm.ac.rs, ORCID 0000-0003-1717-7796*

[3] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина , j.petrovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4841-1899*

[4] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина m.ercegovic@itnms.ac.rs, ORCID 0000-0002-7145-8671*

[5] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, j.dimitrijevic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3830-2392*

[6] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, i.mikavica@itnms.ac.rs, ORCID 0000-0001-9533-136*

ties and efficiency in the removal of pollutants from aqueous solutions. Although biochar and hydrochar have different mechanisms of action and adsorption efficiency, they mainly remove metal ions by complexation, ion exchange and electrostatic attraction. The results of numerous studies show that biochar is most often more effective for the removal of metals such as Cd^{2+} and Pb^{2+}, while hydrochar have the advantages in terms of more functional and environmentally friendly production. Future research should be directed towards the optimization, modification and classification of materials according to the targeted applications.
Key Words: water purification, waste biomass, biochar, hydrochar, heavy metal ions, adsorption kinetics

1. Увод

Значајне количине отпадне биомасе свакодневно се одлажу на депонијама, иако овај ресурс има значајан потенцијал да се користи у различите технолошке и еколошке сврхе. Традиционални приступи управљања овом врстом отпада попут компостирања, спаљивања или депоновања на отвореном често доводе до негативних последица по животну средину. Употреба биомасе без предтретмана је ограничена због њене ниске хемијске и физичке стабилности, високог садржаја влаге и слабог енергетског потенцијала. Међутим, развој термохемијских и хидротермалних технологија омогућава трансформацију отпадне биомасе у функционалне угљеничне материјале са широким спектром примене [1].

Међу најистраженијим продуктима ових процеса налазе се биочађ и хидрочађ тј. угљенични материјали добијени пиролизом односно хидротермалном карбонизацијом (ХТЦ) [1, 2, 3]. Биочађ се формира термичким разлагањем биомасе без присуства кисеоника, док се хидрочађ добија реакцијом биомасе са водом при повишеним температурама и притисцима [1, 3, 4]. Обе врсте материјала одликују се развијеном порозношћу, великим специфичним површинама и присуством функционалних група на површини [5, 6]. Ове особине чине их погодним за примену у адсорпцији различитих загађивача, а нарочито јона тешких метала из водених раствора. Њихова ефикасност зависи од врсте почетне биомасе, услова процеса (температура, време, пХ, додатак катализатора), као и од циљаног загађивача [2, 5].

2. Преглед отпадних биомаса које се користе за добијање угљеничних материјала

Принос масе добијених производа умного зависе од састава почетне биомасе. У складу са тим, отпадне биомасе које се најчешће користе за добијање биочађи и хидрочађи углавном су богате лигно-целулозним једињењима као што су лигнин, целулоза и хемицелулоза [1, 5, 6]. Поред лигно-целулозних једињења, протеини и липиди су исто значајни у добијању квалитетнијих угљеничних материјала [6]. Почетне биомасе могу се груписати у пет група по пореклу:

1) Агроиндустријски отпад – пиљевина, шећерна трска, кокосова љуска, мискантус, комине грожђа, коштице воћа и слични материјали;
2) Пољопривредни остаци – слама житарица, сунцокретова стабљика, окласак кукуруза и др;
3) Шумски и други остаци из паркова, ливада – лишће, грање, плодови;

4) Комунални отпади – канализациони муљ, животињски стајњак и остаци из пречишћених отпадних вода.
5) Алге и други материјали пореклом из водене средине.

Табела 1. Примери отпадне биомасе коришћене за добијање угљеничних материјала, адсорбената загађивача из отпадних вода
Table 1. Examples of waste biomass used to obtain carbon materials, adsorbents of pollutants from wastewater

Врста биомасе	Тип производа	Метода конверзије	Тип загађивача	Напомене
Napier трава	Биочађ	Пиролиза	Cd^{2+}, Pb^{2+}	Поређење са хидрочађима
Пиљевина	Биочађ	Пиролиза	Тешки метали и боје	Висока порозност
Пиринчана слама	Биочађ	Пиролиза	Cu2+, Cd^{2+}, Pb^{2+}	Могућност активације
Кокосова љуска	Биочађ	Пиролиза	Тешки метали и пестициди	Мултифункционална примена
Канализациони муљ	Биочађ	Пиролиза	Тешки метали	Углавном муљ из био-дигестора
Канализациони муљ	Хидрочађ	ХТЦ	Тешки метали	Еколошки изазовни материјали
Napier трава	Хидрочађ	ХТЦ	Cd^{2+}, Pb^{2+}	Нижи капацитет од биочађи
Комина грожђа	Хидрочађ	ХТЦ	Pb^{2+}	Алкална мофикација
Лишће Пауловније	Хидрочађ	ХТЦ	Pb^{2+}	Алкална мофикација
Окласак кукуруза	Хидрочађ	ХТЦ	Cu2+ и Cr6+	Модификација са NH4Cl
Бамбус	Хидрочађ	ХТЦ	Cr6+	Активација амино групом

3. Ефиксност уклањања тешких метала са угљеничним материјалима

Многе студије приказују да се биочађи и хидрочађи могу успешно користити за адсорпцију тешких метала из отпадних вода и да успешно могу заменити активни угаљ који се комерцијално користи (табела 2) [3, 4, 6]. Биочађи су у већини случаја ефикасније за уклањање тешки метала из воде у односу на хидрочађ [5, 6, 7, 9]. Међутим, разним методама активације хидрочађи показују побољшан адсорпциони капацитет [1]. Пример су модификоване хидрочађи са KOH или Ni/Fe за успешно отклањање Pb^{2+} [1, 2, 9], или са CO_2 за побољшану адсорпцију Cu^{2+} [2], такође модификације са фосфорном и азотном киселином значајно побољшавају капацитет адсорпције Cd^{2+} јона [9]. Биочађи се могу унапредити различитим методама модификације, укључујући примену каолинита, органских функционалних група, минералних адитива, као и

наноматеријала, попут ZnS, чиме се адсорпциони капацитет може повећати и до десет пута [4, 10]. Избор почетне биомасе и процесни услови директно утичу на перформансе оба материјала.

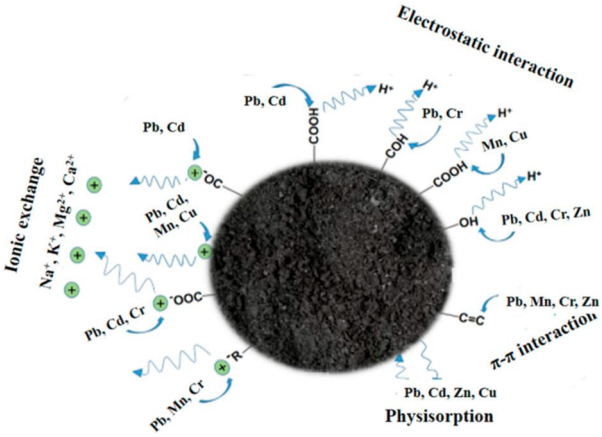
Промена температуре процеса утиче на садржај ароматичне структуре и на порозност, док промена pH утиче на јонску измену са металима и на садржај киселих функционалних група адсорбенса [2, 6]. Активација тј. модификација умногоме мењају ефикасност адсорпције тешких метала јер могу знатно повећати површинску област, порозност, број функционалних група на површини угљеничних материјала [4, 10].

Табела 2. Адсорпциони капацитети за неке загађиваче коришћењем биочађи и хидрочађи добијених из различитих биомаса
Table 2. Adsorption capacities for some pollutants using biochar and hydrochar obtained from different biomasses

Биомаса/тип материјала	Тип загађивача	Адсорпциони капацитет (mg/g)	Метода конверзије	Реф.
Napier трава (биочађ)	Cd^{2+}	~71,5	Пиролиза (300-500 °C)	[7]
Napier трава (хидрочађ)	Cd^{2+}	40-50	ХТЦ (200-240 °C)	[7]
Пиринчана слама (биочађ)	Cd^{2+}	50-70	Пиролиза и мофикација	[3]
Пиљевина (биочађ)	Cu^{2+}	45-75	Пиролиза и мофикација	[5]
Пиљевина (биочађ)	Zn^{2+}	30-60	Пиролиза и мофикација	[5]
Пиљевина (хидрочађ)	Zn^{2+}	227.3	ХТЦ и мофикација	[1]
Канализациони муљ (биочађ)	Pb^{2+}	60-110	Пиролиза	[3]
Канализациони муљ (хидрочађ)	Pb^{2+}	40-80	ХТЦ	[3]
Лишће Пауловније (хидрочађ)	Pb^{2+}	~174	ХТЦ и модификација	[8]
Бамбус (хидрочађ)	Cr6+	~ 523	ХТЦ и модификација	[1]
Окласак кукуруза (хидрочађ)	Cr6+	~ 104	ХТЦ и модификација	[1]

Механизми адсорпције угљеничних материјала углавном укључују електростатичко привлачење, размена јона, комплексирање преко функционалних група (слика 1) [6]. Иако оба материјала имају богату угљеничну структуру, механизам адсорпције биочађи и хидрочађи се међусобно до неке мере и разликују [2, 9]. Биочађ ефикасно уклања тешке метале захваљујући већој порозности, богатом ароматичном и минералном саставу што олакшава физичку адсорпцију, π-везивање и јонску интеракцију са металима [5, 6, 9].

Са друге стране, хидрочађ има виши однос O/C и H/C односно више садржи кисеоничне функционалне групе на површини честице, за које се могу везати јони метала, комплексирати и у мањој мери јонски изменити [2, 9]. Осим у погледу ефикасности, хидрочађи имају већи масени принос и добијају се на економичнији и еколошки прихватљивији начин што треба узети у обзир приликом одабира између ова два угљенична материјала [1, 2].



Слика 1. Механизам адсорпције тешких метала на површини угљеничних материјала [1]
Figure 1. Mechanism of heavy metals adsorption on the surface of carbon materials [1]

4. Закључак

Захваљујући високом капацитету адсорпције, ниској цени производње и могућој активацији, биочађи и хидрочађи представљају одржива, еколошки прихватљива решења у третману вода загађених тешким металима. Добрим одабиром почетне биомасе, оптимизованим поступком као и укљученим успешним модификацијама добијају се ефикасни адсорбенти тешких метала на бази угљеничких материјала.

Захвалница

Аутори су захвални Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије на финансијској подршци у складу са уговором са регистрационим бројем (нпр. 451-03-136/2025-03/200023).

6. Литература

[1] Petrović J, Ercegović M, Simić M, Koprivica M, Dimitrijević J, Jovanović A, Janković Pantić J, Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: A Review of Hydrochar Preparation and Environmental Application, *Processes*, 207, 12, 2024.

[2] Mihajlović M, Petrović J, Stojanović M, Milojković J, Lopičić Z, Koprivica M, Lačnjevac Č, Hydrochars, perspective adsorbents of heavy metals: A review of the current state of studies, *Zaštita materijala,* 488–495, 57, 2016.

[3] Enaime G, Baçaoui A, Yaacoubi A, Lübken M, Biochar for Wastewater Treatment-Conversion Technologies and Applications, *Appl. Sci;* 3492, 10, 2020.

[4] Al-Swadi H, Al-Farraj A, Al-Wabel M, Ahmad M, Ahmad J, Mousa M. A, Rafique M. I, Usama M, Kaolinite-Composited Biochar and Hydrochar as Low-Cost Adsorbents for the Removal of Cadmium, Copper, Lead, and Zinc from Aqueous Solutions, *Sustainability,* 15978, 15, 2023.

[5] Zhao J, Shen X. J, Domene X, Alcañiz J. M, Liao X, Palet C. Comparison of biochars derived from different types of feedstock and their potential for heavy metal removal in multiple-metal solutions, *Scientific Reports,* 9869. 9, 2019.

[6] Liu Z, Wang Z, Chen H, Cai T, Liu Z, Hydrochar and pyrochar for sorption of pollutants in wastewater and exhaust gas: A critical review, *Environmental Pollution*, 268, 115910, 2021.

[7] Wang J, Wang Y, Wang J, Du G, Khan K. Y, Song Y, Cui X, Cheng Z, Yan B, Chen G, Comparison of cadmium adsorption by hydrochar and pyrochar derived from Napier grass. Chemosphere 308, 2022, 136389.

[8] Koprivica M, Simić M, Petrović J, Ercegović M, Dimitrijević J, Evaluation of Adsorption Efficiency on Pb(II) Ions Removal Using Alkali-Modified Hydrochar from Paulownia Leaves. *Processes,* 11, 1327, 2022.

[9] Huang J, Feng Y, Xie H, Wu P, Wang M, Wang B, Zhang Q, Zhang S, Liu Z, A bibliographic study reviewing the last decade of hydrochar in environmental application: history, status quo, and trending research paths, *Biochar,* 5:12, 2023.

[10] Ahuja R, Kalia A, Sikka R, Chaitra P, Nano Modifications of Biochar to Enhance Heavy Metal Adsorption from Wastewaters: A Review, *ASC Omega,* 7, 45825-45836, 2022.

Јелена Димитријевић[1], Јелена Петровић[2]
Марија Копривица[3], Марија Симић[4]
Александар Јовановић[5]
Ивана Микавица[6], Сања Јевтић[7]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK25303D

ФУНКЦИОНАЛНИ β-ЗЕОЛИТ СА -NH_2 ГРУПАМА КАО ВИСОКОЕФИКАСАН АДСОРБЕНТ ЗА ТРЕТМАН ВОДА КОНТАМИНИРАНИХ КАДМИЈУМОМ И ЦИНКОМ

Резиме: У овом раду испитивана је адсорпциона способност модификованог синтетског β-зеолита за уклањање јона тешких метала, цинка (Zn^{2+}) и кадмијума (Cd^{2+}), из водених раствора. У циљу побољшања површинских карактеристика и повећања броја активних места за везивање металних јона, β-зеолит је функционализован (3-аминопропил)триетоксисиланом (АПТЕС). Резултати експеримената указују на значајно побољшање адсорпционих капацитета модификованог материјала – са 17,5 на 38,7 mg/g за Zn^{2+}, и са 21,2 на 59,3 mg/g за Cd^{2+}. Кинетичка анализа показује да процес адсорпције прати кинетички модел псеудо-другог реда ($R^2 > 0,99$), што сугерише да хемисорпција представља доминантни механизам везивања јона метала на функционализованој површини адсорбента.
Кључне речи: β-зеолит, аминосиланизација, адсорпција, тешки метали, кинетика

FUNCTIONALIZED β -ZEOLITE WITH –NH_2 GROUPS AS A HIGHLY EFFICIENT ADSORBENT FOR THE TREATMENT OF WATER CONTAMINATED WITH CADMIUM AND ZINC

Abstract: This study investigates the adsorption performance of modified synthetic β-zeolite for the removal of heavy metal ions, specifically zinc (Zn^{2+}) and cadmium (Cd^{2+}), from aqueous solutions. To

[1] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, j.dimitrijevic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3830-2392*

[2] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, j.petrovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4841-1899*

[3] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, m.koprivica@itnms.ac.rs, ORCID 0000-0002-1451-5959*

[4] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, m.simic@itnm.ac.rs, ORCID 0000-0001-9518-7709*

[5] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, a.jovanovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0001-9867-9282*

[6] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, i.mikaca@itnms.ac.rs, ORCID 0000-0001-9533-1360*

[7] *Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Београд,, sanja@tmf.bg.ac.rs*

enhance the surface properties and increase the number of functional sites suitable for metal ion binding, β-zeolite was functionalized with the organosilane agent (3-aminopropyl)triethoxysilane. The obtained results revealed a substantial improvement in adsorption capacity – from 17.5 mg/g to 40.7 mg/g for Zn^{2+}, and from 21.2 mg/g to 62.3 mg/g for Cd^{2+} – following the applied modification. Kinetic analysis indicated that the adsorption process follows a pseudo-second-order model with a high correlation coefficient ($R^2 > 0.99$), suggesting that chemisorption is the dominant mechanism governing the metal ion uptake on the surface of the modified adsorbent..
Key Words: β-zeolite, aminosilanization, adsorption, heavy metals, kinetics

1. Увод

Савремени процеси индустријализације и урбанизације доприносе све већем оптерећењу животне средине, при чему загађење водених екосистема представља једно од најургентнијих питања одрживог развоја. Индустријске отпадне воде, обогаћене токсичним и неразградивим контаминантима, нарочито тешким металима, представљају озбиљан ризик по квалитет површинских и подземних вода, као и по целокупан акватични биодиверзитет. Међу најчешће детектованим контаминантима у отпадним водама налазе се цинк (Zn^{2+}) и кадмијум (Cd^{2+}), који потичу из разноврсних индустријских сектора, укључујући галванизацију, производњу легура, боја, пластике, пестицида, као и из рударских и хемијских процеса. Њихова токсичност, висока мобилност и тенденција акумулације у живим организмима чине их посебно опасним загађујућим материјама, са потенцијално озбиљним последицама по људско здравље, као што су нефротоксичност, остеопатије и канцерогени ефекти [1, 2].

Због наведених проблема, развој ефикасних метода за уклањање Zn^{2+} и Cd^{2+} јона из загађених вода постаје приоритет у савременој екотехнологији. Иако се конвенционалне методе као што су хемијска преципитација, коагулација, јонска размена и мембранске сепарације и даље широко примењују, оне су често праћене високим трошковима, стварањем секундарног отпада и ниском селективношћу према специфичним јонима. У том контексту, адсорпционе технике представљају одрживу алтернативу захваљујући једноставности примене, високој ефикасности и могућности регенерације адсорбената [3]. Међу различитим класама материјала који се истражују као адсорбенти, зеолити заузимају истакнуто место због своје кристалне структуре, велике специфичне површине, способности јонске размене и селективне адсорпције. Посебан значај има β-зеолит, високо-силикатни зеолит са тродимензионалним каналима који омогућавају функционализацију површине са органским молекулима ради повећања афинитета према циљним полутантима. Површинска модификација β-зеолита помоћу силанских агенаса као што је (3-аминопропил)триетоксисилан (АПТЕС) омогућава увођење додатних функционалних група ($–NH_2$), које повећавају број активних места за координацију металних јона и побољшавају његову адсорпциону способност [3–5].

Циљ овог истраживања је испитивање кинетичких карактеристика адсорпције Zn^{2+} и Cd^{2+} јона на АПТЕС-модификованом β-зеолиту, са циљем оптимизације процеса уклањања ових токсичних контаминаната из водених средина и потенцијалне примене у третману индустријских отпадних вода.

2. Материјали и методе

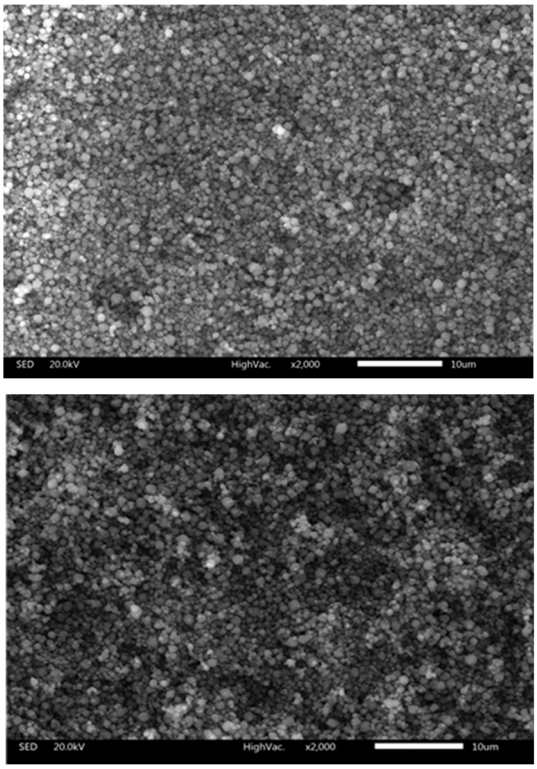
У овом истраживању коришћен је синтетски β-зеолит, произведен од стране компаније Clariant, са молским односом SiO_2/Al_2O_3 једнаким 25. Пре функционализације, материјал је подвргнут термичком третману на 550°C у трајању од 2 сата, у циљу уклањања присутних нечистоћа и адсорбоване влаге са површине и из пора зеолита. Након калцинације, узорак је хлађен у ексикатору до собне температуре и складиштен у херметички затвореним стакленим посудама како би се очувала стабилност површине. Површинска модификација β-зеолита изведена је употребом (3-аминопропил)триетоксисилана (АПТЕС, 99%, Sigma-Aldrich) ради увођења амино-функционалних група. Поступак је спроведен тако што је 5,00 g претходно припремљеног зеолита суспендовано у 50 ml апсолутног етанола (99%), након чега је у систем додато 2 ml АПТЕС-а. Реакција је вођена под константним мешањем на магнетној мешалици, на температури од 70°C током 24 сата, како би се омогућило везивање силанских група на површину зеолита. Добијени материјал је потом више пута испиран етанолом, филтриран и сушен у лабораторијској сушници на 50°C током 6 сати. Тако припремљен модификовани узорак чуван је у ексикатору до даље употребе [6, 7].

Адсорпциони експерименти су спроведени у шаржним условима при температури од 25°C, уз константну pH вредност 5,0, што одговара оптималним условима за истовремену адсорпцију Zn^{2+} и Cd^{2+} јона. Раствори испитиваних метала припремљени су коришћењем цинк-нитрата $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ и кадмијум-нитрата $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, при чему су коришћене хемикалије биле аналитичког квалитета. Почетне концентрације металних јона у растворима износиле су 50 mg/L за Zn^{2+} и 100 mg/L за Cd^{2+}. Током испитивања, 0,02 g модификованог β-зеолита додавано је у 40 ml припремљеног раствора, а суспензије су биле непрекидно мешане на орбиталном шејкеру брзином од 250 rpm, у временском интервалу од 15 до 1440 минута, ради праћења утицаја контактног времена на ефикасност уклањања метала. Након сваког експерименталног интервала, суспензије су филтриране, а преостале концентрације Zn^{2+} и Cd^{2+} јона у филтратима одређене су помоћу атомске апсорпционе спектро-фотометрије (AAS, PerkinElmer Analyst 300). За испитивање површинске морфологије узорка пре и после модификације, као и након адсорпције, коришћена је скенирајућа електронска микроскопија (СЕМ) на уређају Tescan Mira 3 FEG.

3. Резултати и дискусија

Морфолошке карактеристике модификованог β-зеолита анализиране су применом скенирајуће електронске микроскопије (СЕМ), с циљем процене евентуалних промена насталих услед функционализације површине. СЕМ снимци су показали да хемијска модификација није довела до видљивих поремећаја у структури честица β-зеолита. Површина је задржала свој препознатљив грануларни изглед, без знакова агломерације, пуцања или деградације морфолошке структуре. Ови налази указују на то да примењени метод модификације успешно уводи функционалне групе без нарушавања структурног интегритета материјала. Очување изворне морфологије и стабилности

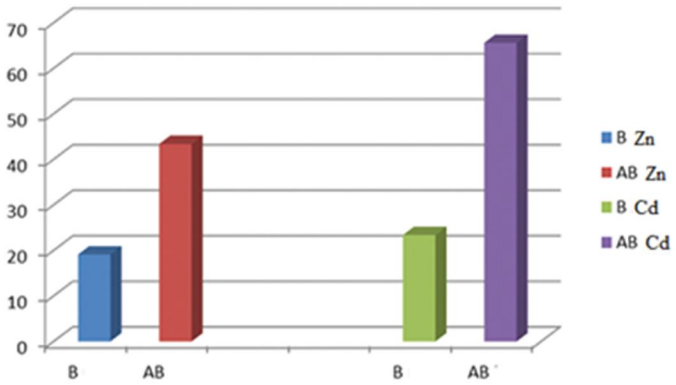
честица омогућава поуздану даљу примену модификованог β-зеолита у процесима адсорпције и хетерогене катализе, где је механичка и хемијска постојаност адсорбента кључна за дугорочну ефикасност [8].



Слика 1. Приказ нативног и модификованог β-зеолита фотокатализатора
Figure 1. Decrease in methyl violet concentration with time, depending on the added mass of photocatalyst

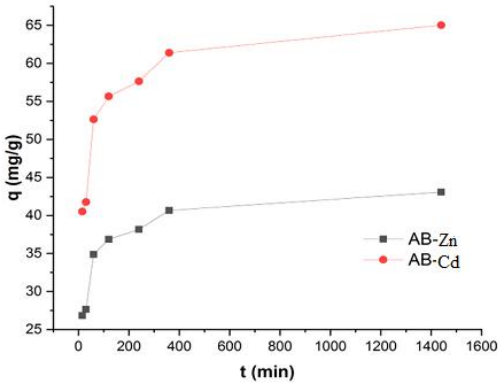
Адсорпциони експерименти спроведени су како би се испитала способност модификованог β-зеолита да ефикасно уклања јоне Cd^{2+} и Zn^{2+} из водених раствора. На основу добијених података након 24 h контакта између адсорбента и раствора, утврђено је да модификовани β-зеолит показује капацитет адсорпције од 62,3 mg/g за Cd^{2+} и 40,7 mg/g за Zn^{2+} јоне. Насупрот томе, резултати добијени коришћењем немодификованог β-зеолита указују на знатно нижу ефикасност – 21,2 mg/g за кадмијум и 17,5 mg/g за цинк. Ове разлике у капацитетима јасно потврђују да функционализација зеолита значајно доприноси повећању броја активних места погодних за везивање металних јона, при чему је ефекат израженији код Cd^{2+}. Повећана афинитетна селективност према кадмијуму може се објаснити већим јонским пречником и јачим интеракцијама са амино-функционалним групама на површини модификованог адсорбента. Ови резултати потврђују ефикасност модификације у унапређењу адсорпционих

својстава β-зеолита, посебно када је у питању уклањање високо токсичних јона као што је Cd^{2+}.



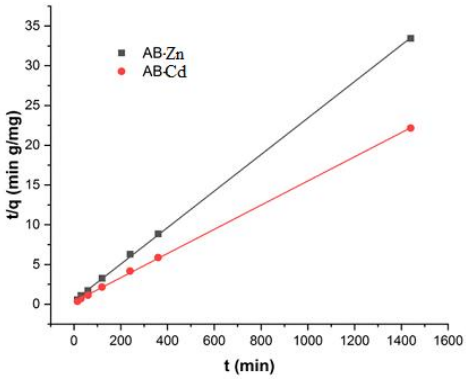
Слика 2. Резултати адсорпционих тестова за јоне Zn^{2+} и Cd^{2+}
Figure 2. Adsorption test results for Zn^{2+} and Cd^{2+} ions.

Праћењем промене концентрације Zn^{2+} и Cd^{2+} јона у раствору током времена, у интервалу од 15 до 1.440 минута, уочено је да процес адсорпције започиње интензивно, са израженим порастом адсорпције у првих неколико сати, док се након приближно шест сати успорава и достиже адсорпциону равнотежу. Брза иницијална фаза адсорпције може се приписати високој доступности слободних активних места на површини модификованог β-зеолита. Временом, како се та места прогресивно засићују, брзина адсорпције опада, све док се не успостави динамичка равнотежа између адсорбованих и преосталих јона у раствору [9, 10].



Слика 3. Утицај времена на масу везаних јона Zn^{2+} и Cd^{2+} помоћу модификованог β-зеолита (AB)
Figure 3. Effect of contact time on the mass of bound Zn^{2+} and Cd^{2+} ions using modified β-zeolite (AB)

Ради дубљег разумевања механизма адсорпције Zn^{2+} и Cd^{2+} јона на модификованој површини β-зеолита, спроведена је детаљна кинетичка анализа. Експериментални подаци обрађени су применом најчешће коришћених кинетичких модела – псеудо-првог и псеудо-другог реда – у циљу идентификације процеса који доминира током уклањања јона из раствора.



Слика 4. Криве адсорпције јона Zn^{2+} и Cd^{2+} на модификованом β-зеолиту (AB)
Figure 4. Adsorption curves of Zn^{2+} and Cd^{2+} ions on modified β-zeolite (AB)

Прикази експерименталних и моделираних кинетичких кривих дати су на слици 4, док су израчунати кинетички параметри сумирани у табели 1. Добијени резултати јасно указују да се кинетика адсорпције за оба метална јона знатно боље описује моделом псеудо-другог реда, што имплицира да је механизам уклањања примарно заснован на хемијској интеракцији између Cd^{2+} и Zn^{2+} јона и функционалних група (нпр. $–NH_2$) присутних на површини функционализованог адсорбента. Ова претпоставка додатно је потврђена изузетно високим вредностима коефицијената корелације ($R^2 \geq 0{,}998$), као и добром подударношћу експериментално одређених равнотежних капацитета са онима предвиђеним путем модела псеудо-другог реда. Наведени налази снажно подржавају тезу о доминацији хемисорпције као кључног процеса у систему β-зеолит–метални јон [11, 12].

Табела 1. Кинетички параметри
Table 1. Kinetic parameters

	AB-Zn	AB-Cd
$q_{eq,\,exp}$ [mg/g]	40,4	62,6
Pseudo-Prvi model		
$q_{eq,cal}$ [mg/g]	39,5	59,4
k_1 [1/min]	41,34	45,72
R^2	0,97759	0,98844
Pseudo-Drugi model		
$q_{eq,cal}$ [mg/g]	46,7	69,9
k_2 [g/mg min^{-1}]	0,0064	0,0017
R^2	0,9978	0,9998

3. Закључак

У оквиру овог истраживања испитана је могућност примене функционализованог синтетског β-зеолита као ефикасног адсорбенса за уклањање токсичних јона кадмијума (Cd^{2+}) и цинка (Zn^{2+}) из водених раствора. Ради повећања адсорпционог капацитета, β-зеолит је модификован помоћу (3-аминопропил)триетоксисилана, чиме су на његовој површини уведене амино-функционалне групе са израженом способношћу везивања металних јона.

Експериментални подаци јасно указују на то да модификација значајно унапређује адсорпциону ефикасност у поређењу са немодификованим зеолитом, при чему је израженији афинитет забележен за Cd^{2+} јоне, што је у складу са њиховом већом токсичношћу и хемијском реактивношћу. Резултати кинетичке анализе показали су да се процес адсорпције најпрецизније описује моделом псеудо-другог реда, што сугерише да хемисорпција представља доминантни механизам везивања, условљен специфичним интеракцијама између функционалних група адсорбента и јона метала.

Поред високог адсорпционог капацитета, важна предност модификованог β-зеолита огледа се у очувању његове морфолошке и структурне стабилности након функционализације, што потврђује његову погодност за дуготрајну примену у системима за пречишћавање воде. Добијени резултати истичу значајан потенцијал овог материјала за индустријску употребу у третману отпадних вода контаминираних Zn^{2+} и Cd^{2+} јонима, доприносећи развоју ефикасних и еколошки одрживих технологија за санацију водених ресурса.

4. Литература

[1] Simić M, Petrović J, Šoštarić T, Ercegović M, Milojković J, Lopičić Z, Kojić M, A Mechanism Assessment and Differences of Cadmium Adsorption on Raw and Alkali-Modified Agricultural Waste, *Processes*, 10(10), 1957, 2022.

[2] Rajic N, Stojakovic Đ, Jevtic S, Zabukovec Logar N, Kovacc J, Kaucic V, Removal of aqueous manganese using the natural zeolitic tuff from the Vranjska Banja deposit in Serbia, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 172, Issues 2–3, 30 December 2009, Pages 1450-1457, 2009.

[3] Jevtić S, Arčon I, Rečnik A, Babić B, Mazaj M, Pavlović J, Matijašević D, Nikšić M, Rajić N, The iron(III)-modified natural zeolitic tuff as an adsorbent and carrier for selenium oxyanions, *Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 197, Pages 92-100, October 2014.

[4] Brazovskaya E. Yu, Golubeva O. Yu, Study of the Effect of Isomorphic Substitutions in the Frameworkof Zeolites with a Beta Structure on Their Porosity and Sorption Characteristics, *Glass Physics and Chemistry*, Volume 43, pages 357–362, 2017.

[5] Aguilar G. L. D, Rodríguez Miranda P. J, Miller A. X. M, Astudillo M. I. R, Muñoz E. A. J. Removal of Zn(II) in Synthetic Wastewater Using Agricultural Wastes. *Metals*, 10, 1465, 2020.

[6] Xu H, Dong C, Wang W, Liu Y, Li B, Liu, F. Machine learning prediction of deep eutectic solvents pretreatment of lignocellulosic biomass. *Ind. Crops Prod.* 196, 116431, 2023.

[7] Jelić A, Sekulić M, Travica M, Gržetić J, Ugrinović V, Marinković A. D, Božić A, Stamenović, M, Putić S, Determination of Mechanical Properties of Epoxy Composite Materials Reinforced with Silicate Nanofillers Using Digital Image Correlation (DIC), *Polymers,* 14(6), 1255, 2022.

[8] Özel C, Akat C, Alosmanov R. A; Kahveci A, M. U, Emir C, Yücel S, Surface modification of zeolite and kaolin with 3-(aminopropyl) triethoxysilane and 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate; *Bulgarian Chemical Communications*, Volume 53, Issue 4 (pp. 464 - 470), 2021.

[9] Zendelska A, Golomeova M, Jakupi Š, Kuvendziev S, Lisichkov K, Marinkovski M, Characterization and application of clinoptilolite for removal of heavy metal ions from water resources, *Eologica Macedonica*, Vol. 32, No. 1, pp. 21–32, 2018.

[10] Dimitrijević J, Jevtić S, Marinković A, Simić M, Koprivica M, Petrović J, Ability of Deep Eutectic Solvent Modified Oat Straw for Cu(II), Zn(II), and Se(IV) Ions Removal. *Processes,* 11(5), 1308, 2023.

[11] Petrović J, Stojanović M, Milojković J, Petrović M, Šoštarić T, Laušević M, Mihajlović L. M, Alkali modified hydrochar of grape pomace as a perspective adsorbent of Pb 2+ from aqueous solution. *J. Environ. Manag*. 182, 292–300, 2016.

[12] Jevtić S, Arčon I, Rečnik A, Babić B, Mazaj M, Pavlović J, Matijašević D, Nikšić M, Rajić N, The iron(III)-modified natural zeolitic tuff as an adsorbent and carrier for selenium oxyanions. *Microporous Mesoporous Mater*. 197, 92–100, 2014.

Александар Јовановић[1] Милица Мишић[2]
Јелена Димитријевић[3], Димитрије Анђић[4]
Марија Стојановић[5], Јелена Петровић[6], Мирослав Сокић[7]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK25311J

ФОТОКАТАЛИЗОВАНО УКЛАЊАЊЕ КАТЈОНСКЕ БОЈЕ ИЗ ОТПАДНИХ ВОДА ТЕКСИЛНЕ ИНДУСТРИЈЕ

Резиме: У овом раду, извршена је разградња боје метил љубичасте из воденог раствора применом фотокатализованих реакција. У ту сврху, коришћен је ZnO као фотокатализатор, а све реакције су вршене под дејством зрачења лампе која имитира Сунчево зрачење. Испитан је утицај концентрације фотокатализатора на ефикасност процеса, као и дистанца УВ лампе од раствора. Кинетика деградације је праћена путем УВ-Вид спектрофотометрије. Смањење концентрације катјонске боје је праћено на таласној дужини од 580 nm. Проценат разградње боје био је преко 90% након 2 h реакције. Прелиминарни тестови су показали да преложени систем поседује могућност потенцијалне примене у одређеним индустријским системима за третман отпадних вода.

Кључне речи: фотокатализа, метил љубичаста, УВ-Вид спектрометрија, ZnO

PHOTOCATALYZED REMOVAL OF CATIONIC DYE FROM TEXTILE WASTEWATER

Abstract: In this work, the degradation of methyl violet dye from an aqueous solution was performed using photocatalyzed reactions. For this purpose, ZnO was used as a photocatalyst, and all reactions were carried out under the influence of a lamp that imitates solar radiation. The influence of the photocatalyst concentration on the efficiency of the process, as well as the distance of the UV lamp from

[1] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, a.jovanovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0001-9867-9282*

[2] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, m.misic@itnms.ac.rs, ORCID: 0009-0001-8274-3136*

[3] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, j.dimitrijevic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3830-2392*

[4] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, d.andjic@itnms.ac.rs, ORCID: 0009-0001-6824-5202*

[5] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, marija.stojanovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0009-0005-8042-2661*

[6] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, j.petrovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4841-1899*

[7] *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, m.sokic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4468-9503*

the solution, was examined. The kinetics of degradation were monitored by UV-Vis spectrophotometry. The decrease in the concentration of the cationic dye was monitored at a wavelength of 580 nm. The percentage of dye degradation was over 90% after 2 h of reaction. Preliminary tests have shown that the proposed system has potential application in certain industrial wastewater treatment systems.
Key Words: photocatalysis, methyl violet, UV-Vis spectrometry, ZnO

1. Увод

Вода представља један од најважнијих обновљивих ресурса. Захваљујући циклусу кружења у природи, она представља незамењиву ставку у исхрани, индустрији и пољопривреди. Развојем различитих грана привреде, у води је детектовано присуство разних органских загађујућих материја. Посебну групу чине боје, због количина и потенцијалних штетних ефеката по живи свет. Боја метил љубичаста пронашла је широку примену у индустрији боја, текстилној индустрији, микробиолошкој и здравственој примени [1].

Литературно су пронађени различити начини уклањања ове боје из отпадних вода. Поред адсорпције [1] и коагулације [2], посебно место заузима фотокаталитички процес [3]. Фотокатализа се заснива на генерисању оксидационих врста које потпомогнуте УВ зрачењем могу да разграде присутно органско или неорганско загађење. Карактеришу је одсуство потребе за додатком хемикалија и настајања нуспроизвода који захтевају даљи третман [4].

Различити оксиди метала су пронашли примену као фотоактивни материјали у третману вода. Посебну пажњу истраживача привукао је цинк-оксид (ZnO) због својих физичкохемијских карактеристика. ZnO је полупроводнички материјал са широким енергетским процепом, обично око 3,37 eV [5]. ZnO коришћен је у различитим фотокаталитичким системима за деградацију боја [3], пестицида [6], фармацеутика [7], УВ филтера [8], заслађивача [9], итд.

Циљ овог рада је испитивање фотокаталитичких перформанси цинк-оксида (ZnO) као фотокатализатора за разградњу катјонске боје метил љубичасто под дејством УВ зрачења. У прелиминарним експериментима, варирани су почетна концентрација фотокатализатора и дистанца лампе од фотокаталитичког система. Добијени резултати треба да помогну у даљим испитивањима потенцијалне примене оваквих система у третману отпадних вода из текстилне индустрија.

2. Материјали и методе

2.1. Материјали

У фотодеградационим експериментима, коришћени су ZnO (Fisher Chemicals, САД), дестилована вода (18.2 MΩ cm^{-1}), метил љубичаста (Sigma Aldrich, САД). За реакције је коришћен стаклени реактор са плаштом запремине 100 ml.

2.2. Методе

Фотодеградационе реакције су извођене по претходно објављеном раду Јовановић и сар. [10]. Укратко, у реактор са магнетним зрном су редом додати одређена маса

катализатора и водени раствор боје метил љубичасте. Реакција се првих 30 min одвијала у потпуном мраку уз мешање, након чега је укључена УВ лампа. У одређеним временским интервалима, раствор боје је узоркован и анализиран помоћу УВ-Вид спектрофотометрије (Shimadzu 1600, Јапан) на карактеристичном пику од 580 nm.

2.3. Прорачун кинетике

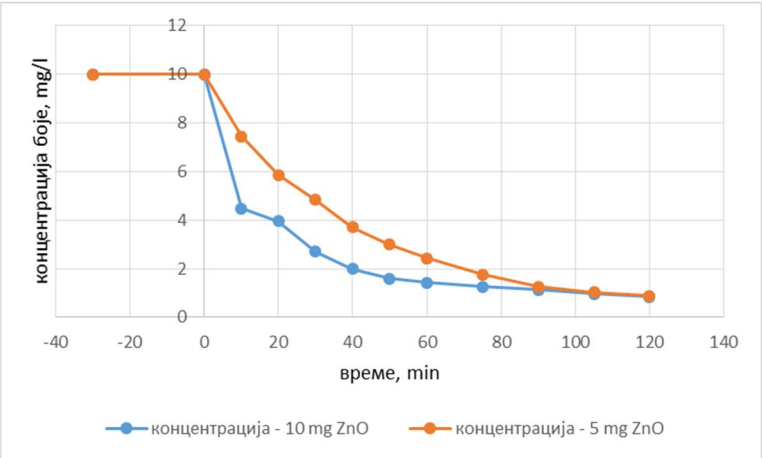
Кинетика фотокатализованих реакција праћена је применом Ленгмир-Хиншелвудовог модела, чијим се поједностављењем добија следећа једначина:

$$ln(c/c_0) = -k \cdot t \qquad (1)$$

где су c и c_0 концентрације загађујуће материје у раствору, у одређеном тренутку мерења t (min) и на почетку реакције, k (min^{-1}) је константа брзине реакције. Уз прорачун константе брзине дати су коефицијенти корелације (R^2).

3. Резултати и дискусија

На слици 1 приказане су криве деградације метил љубичасте у зависности од додате масе фотокатализатора у посматраном систему.



Слика 1. Смањење концентрације метил љубичасте са временом, у зависности од додате масе фотокатализатора

Figure 1. Decrease in methyl violet concentration with time, depending on the added mass of photocatalyst

Са графика се види да обе криве имају сличан облик, с тим да се деградација при већој маси ZnO (10 mg) одиграва брже. Овај феномен се може објаснити чињеницом да при већој маси фотокатализатора долази до формирања већег броја локација на површини цинк-оксида за генерисање парова електрон/шупљина (e^-/h^+). На овај начин се подстиче одигравање фотооксидационих реакција при површини додатог фотокатализатора, а тиме се умањују време за одигравање реакције, а убрзава распад присутних молекула катјонске боје.

У табели 1 су приказани резултати кинетичких прорачуна фотокатализованих реакција.

Табела 1. Константе брзина посматраних реакција
Table 1. Rate constants of observed reactions

Маса фотокатализатора	Константа брзине (min^{-1})	R^2 (%)
10 mg	0,032	0,98
5 mg	0,018	0,97

Резултати прорачуна кинетичких параметара потврђују претходно добијене резултате праћења смањења концентрације метил љубичасте у посматраном реакционом раствору.

Када је испитан утицај дистанце УВ лампе од реактора, утврђено је да се на удаљености од 15 cm од површине раствора боје, у реактору постиже највећа ефикасност. На већим растојањима, пут који фотони треба да пређу је био дужи, самим тим њихов број који допре до раствора је био мањи. На мањим растојањима, примећено је испаравање присутне суспензије, те се ове дистанце нису даље испитивале.

4. Закључак

Употреба фотокатализованих процеса нашла је свој значај у уклањању бројних органских и неорганских полутаната из отпадних вода. Главне предности овог процеса у односу на конвенцијалне процесе пречишћавања су: одигравање реакција при атмсферским условима, немање потребе за додатком хемијских реагенаса, могућност варирања извор зрачења, лако раздавање фаза након завршетка реакција, не настајање нус-продуката који захтевају даљи третман.

Да би се проширила употреба фотокатализе у постројењима за пречишћавање отпадних вода, овај рад би требало да подстакне даље континуиране дискусије међу стручњацима. Добијени резултати прелиминарних испитивања показују да предложени систем ефикасно може да уклони посматрану катјонску боју метил љубичасту под дејством имитирајућег Сунчевог зрачења додатком цинк-оксиида као фотокатализатора.

Захвалница

Овај рад је подржало Министарством науке, технолошког развоја и иновација (број Уговора 451-03-136/2025-03/200023).

5. Литература

[1] Ali Nisreen S, Noor M. Jabbar, Saja M. Alardhi, Hasan Sh Majdi, and Talib M. Albayati. Adsorption of methyl violet dye onto a prepared bio-adsorbent from date seeds: Isotherm, kinetics, and thermodynamic studies. *Heliyon 8*, no. 8, 2022.

[2] Goudjil, Sarah, Saadia Guergazi, Djamel Ghernaout, Djamel Temim, and Toufik Masmoudi. Brilliant green and methyl violet 2B dyes removal using aluminium sulfate (AS) in single and binary systems. *Desalination and Water Treatment* 319, 100539, 2024.

[3] Shokry F, M. El-Gedawy, S. A. Nosier, and M. H. Abdel-Aziz. Optimizing photocatalytic degradation of methyl violet dye in a recirculating slurry-type reactor. *Results in Chemistry* 13 101980, 2025.

[4] Jovanović A. Aleksandar, Mladen D. Bugarčić, Miroslav D. Sokić, Tanja S. Barudžija, Vladimir P. Pavićević, and Aleksandar D. Marinković. Photodegradation of thiophanate-methyl under simulated sunlight by utilization of novel composite photocatalysts. *Hemijska industrija* 78, no. 3 227-240, 2024.

[5] Baig Alishay, Mohsin Siddique, and Sandeep Panchal. A Review of Visible-Light-Active Zinc Oxide Photocatalysts for Environmental Application. *Catalysts* 15, no. 2, 100, 2025.

[6] Khan Samreen Heena, and Bhawana Pathak. Zinc oxide based photocatalytic degradation of persistent pesticides: A comprehensive review. Environmental nanotechnology, *Monitoring & management* 13, 100290, 2020.

[7] Majumder Soma, Somenath Chatterjee, Parita Basnet, and Jaya Mukherjee. ZnO based nanomaterials for photocatalytic degradation of aqueous pharmaceutical waste solutions–A contemporary review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 14, 100386, 2020.

[8] Soto-Vazquez, Loraine, Maria Cotto, Carmen Morant, Jose Duconge, and Francisco Marquez. Facile synthesis of ZnO nanoparticles and its photocatalytic activity in the degradation of 2-phenylbenzimidazole-5-sulfonic acid. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 332, 331-336, 2017.

[9] Wang Zhao, Giang Nguyen Song Thuy Thuy, Varsha Srivastava, Indu Ambat, and Mika Sillanpää. "Photocatalytic degradation of an artificial sweetener (Acesulfame-K) from synthetic wastewater under UV-LED controlled illumination. *Process Safety and Environmental Protection* 123, 206-214, 2019.

[10] Jovanović Aleksandar, Marija Stevanović, Tanja Barudžija, Ilija Cvijetić, Slavica Lazarević, Anđelka Tomašević, and Aleksandar Marinković. Advanced technology for photocatalytic degradation of thiophanate-methyl: Degradation pathways, DFT calculations and embryotoxic potential. *Process Safety and Environmental Protection* 178, 423-443, 2023.

Јована Благојевић[1], Горан Орашанин[2]
Будимирка Мариновић[3], Стојан Симић[4]

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25317B

ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ У ПОСТРОЈЕЊИМА ЗА ПРЕЧИШЋАВАЊЕ ОТПАДНИХ ВОДА

Резиме: Рад анализира потрошњу енергије и могућности оптимизације у постројењима за пречишћавање отпадних вода (ППОВ). Посебан фокус стављен је на идентификацију кључних фактора који утичу на потрошњу енергије у различитим фазама третмана отпадних вода, укључујући прелиминарни, примарни, секундарни и терцијарни третман. Рад такође разматра стратегије повећања енергетске ефикасности кроз примјену напредних технологија, оптимизацију аерације, контролу процесних параметара у реалном времену и коришћење нуспроизвода, посебно муља, за производњу биогаса. На основу прегледане литературе и студија случаја, наглашава се потенцијал трансформације постројења у енергетски самоодрживе системе, са смањењем оперативних трошкова и емисија гасова са ефектом стаклене баште, уз очување квалитета третиране воде.
Кључне речи: пречишћавање отпадних вода, потрошња енергије, енергетска ефикасност, самоодржива постројења

ENERGY EFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Abstract: Paper analyzes energy consumption and optimization potentials in wastewater treatment plants (WWTPs). The папер focuses on identifying key factors affecting energy use across different treatment stages, including preliminary, primary, secondary, and tertiary treatment. Strategies for improving energy efficiency are also discussed, such as the implementation of advanced technologies, aeration optimization, real-time process control, and the utilization of by-products, especially sludge, for biogas production. Based on literature review and case studies, the paper highlights the potential for transforming WWTPs into energy self-sufficient systems, reducing operational costs and greenhouse gas emissions while maintaining the quality of treated water.
Key Words: wastewater treatment, energy consumption, energy efficiency, self-sufficient plants

[1] *Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет, jovana.blagojevic@ues.rs.ba ORCID: 0000-0001-8124-9868*

[2] *Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет, goran.orasanin@ues.rs.ba, ORCID:0000-0002-1513-3645*

[3] *Универзитет у Источном Сарајеву, Факултет за производњу и менаџмет Требиње, budimirka.marinovic@fpm.ues.rs.ba, ORCID:0000-0001-5509-0056*

[4] *Универзитет у Источном Сарајеву, Машински факултет, stojan.simic@ues.rs.ba*

1. Увод

Постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) карактеришу се високом потрошњом електричне енергије [1]. Ипак, она имају кључну улогу у заштити животне средине јер уклањају штетне материје из отпадних вода прије испуштања у природне водотоке. На тај начин спрјечавају загађење, омогућавају опоравак екосистема и одржавају еколошку равнотежу, што је важно за очување разноликог биљног и животињског свијета те несметано одвијање природних процеса [2].

У контексту глобалних изазова климатских промјена и одрживог управљања ресурсима, ППОВ су препозната као важан елемент спровођења циљева „зелене агенде“ [3]. Ова стратегија наглашава потребу смањења емисија гасова са ефектом стаклене баште, повећања енергетске ефикасности и преласка на обновљиве изворе енергије. Будући да ППОВ спадају међу највеће потрошаче електричне енергије у комуналном сектору, оптимизација њихове потрошње представља значајан корак ка остваривању ових циљева.

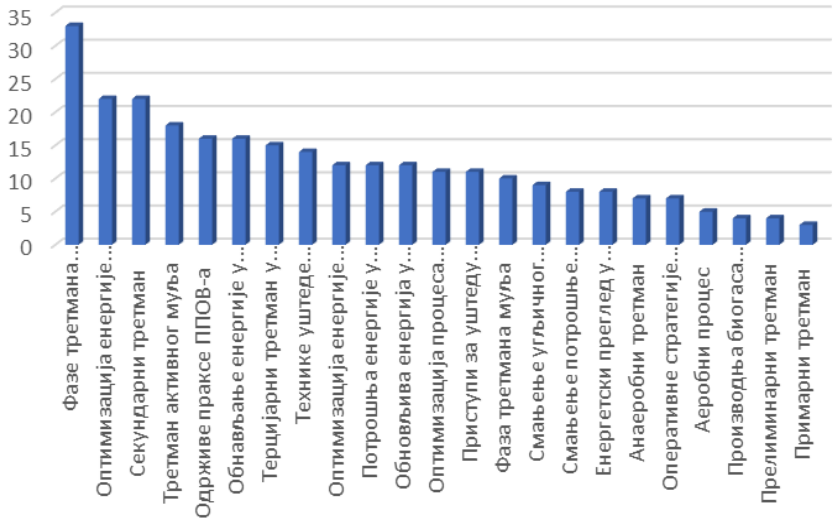
Пораст свјетске популације и процјене да ће до 2050. године 64% земаља у развоју и 86% развијеног свијета бити урбанизовано [4], заједно са све строжијим захтјевима за квалитет воде која се испушта у реципијент, доводе до увођења напреднијих и сложенијих технологија у процес пречишћавања отпадних вода [5, 6]. Иако ефикасније у уклањању загађивача, ове технологије захтијевају знатно веће количине електричне енергије, што повећава укупну потрошњу у сектору вода. Будући да се производња електричне енергије у многим земљама и даље ослања на фосилна горива, већа потрошња енергије у ППОВ директно повећава емисије угљен-диоксида (CO_2), главног покретача глобалног загријавања и климатских промјена [7, 8, 9].

Због тога је кључно пронаћи баланс између обезбјеђивања високог квалитета третмана отпадних вода и смањења енергетске потрошње постројења. Унапрјеђење енергетске ефикасности кроз примјену напредних технологија, оптимизацију процеса и коришћење енергије произведене у самим процесима пречишћавања омогућава смањење трошкова рада и емисија CO_2. Такав приступ не само да доприноси еколошкој одрживости, већ и ублажава притисак на животну средину, осигуравајући истовремено ефикасну и поуздану услугу третмана отпадних вода [10].

2. Преглед истраживања о енергетској ефикасности у третману отпадних вода

Процјена енергетске ефикасности у третману отпадних вода представља отворену и актуелну истраживачку област која је посљедњих година привукла значајну пажњу научне заједнице. Истраживања се фокусирају на смањење трошкова рада, повећање производње енергије унутар постројења те искориштавање нуспроизвода процеса за добијање материје и енергије. У индустријској пракси спроводе се експерименти и пилот-пројекти који имају за циљ унапрјеђење стратегија управљања енергијом и повећање укупне ефикасности система за пречишћавање отпадних вода. Како би стекли детаљан увид у обрасце потрошње енергије и идентификовали могућности за побољшање, истраживачи примјењују различите методологије процјене и оптимизације енергетске ефикасности [11].

Tsalas и сарадници 2024. [2] спровели су опсежну анализу доступне литературе, укључујући научне радове, техничке извјештаје, поглавља књига и зборнике са конференција, обухвативши укупно 114 релевантних извора објављених у периоду од 2007. до 2023. године. Њихов циљ био је класификовати литературу према кључним темама које се односе на постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) и њихову енергетску ефикасност. Систематском категоризацијом идентификоване су најзаступљеније области истраживања: фазе третмана отпадних вода (33 извора), оптимизација енергије аерације у ППОВ (22), секундарни третман (22), третман активног муља (18) и одрживе праксе у ППОВ (16). Такође, значајан број радова посвећен је обнови енергије (16), терцијалном третману (15), техникама уштеде енергије (14) и оптимизацији процеса (11). Остале обрађене теме укључују смањење угљеничног отиска, енергетске прегледе, анаеробни третман и производњу биогаса, што указује на широк спектар приступа усмјерених ка повећању енергетске ефикасности и одрживости у постројењима за пречишћавање отпадних вода (слика 1).



Слика 1. Објављена литература према кључним темама [2]
Figure 1. Published literature by key topics [2]

3. Потрошња енергије у ППОВ

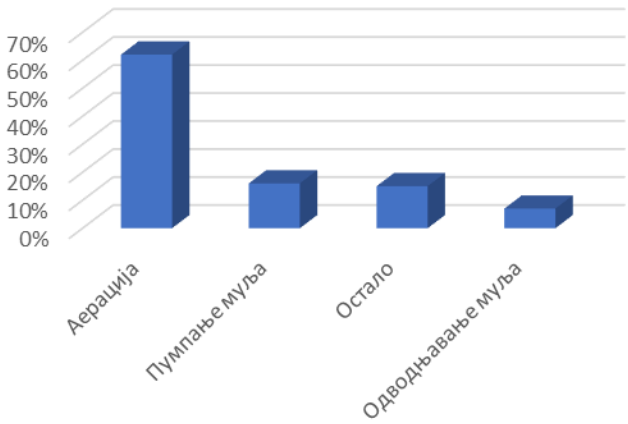
Процес пречишћавања отпадних вода обухвата низ поступака којима се уклањају или разграђују загађујуће материје присутне у води, како би се вода довела у стање безбједно за испуштање у природу или поновно коришћење. Овај процес комбинује физичке, хемијске и биолошке методе, које заједно омогућавају уклањање чврстих честица, органских и токсичних материја, патогених микроорганизама, као и вишка хранљивих материја попут азота и фосфора. Свака фаза третмана има специфичну

улогу – од механичког уклањања већих нечистоћа, преко хемијских реакција које неутрализују штетне супстанце, до биолошких процеса у којима микроорганизми разграђују преостале органске материје. На тај начин значајно се смањује негативан утицај отпадних вода на животну средину и омогућава очување квалитета водних ресурса.

Постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) обично се дијеле на четири фазе третмана: прелиминарни, примарни, секундарни и терцијарни [12, 13, 14]. Прелиминарни третман подразумијева уклањање крупних чврстих материја попут грана, комада дрвета, папира, тканина, пластике, метала и стакла, као и пијеска, шљунка, уља и масти. Ефикасан прелиминарни третман штити накнадне фазе процеса, смањује оштећења опреме и одржава хигијенске стандарде у постројењу [15]. Примарни третман фокусира се на уклањање суспендованих органских и неорганских материја процесима таложења и/или флотације. Иако прелиминарни третман уклања веће честице, вода и даље садржи фине суспендоване материје, претежно органске. Примарни третман дјелимично смањује БПК (биолошка потрошња кисеоника) оптерећење, олакшавајући ефикасност секундарног третмана [16]. Секундарни третман примарно користи биолошке методе за разградњу преостале органске материје, у аеробним или анаеробним условима, уз често уклањање нутријената попут азота и фосфора. Заједно с примарним третманом, значајно смањује БПК и концентрацију суспендованих материја. Терцијарни третман примјењује се када је потребно додатно уклањање специфичних или тешко разградивих загађивача. Иако мање заступљен у земљама у развоју, ова фаза омогућава постизање стандарда квалитета за испуштање или поновну употребу воде. Поред обраде воде, многи ППОВ имају и линију за обраду муља, као пету фазу, која се користи за смањење запремине муља, стабилизацију и евентуалну производњу енергије [17].

Електрична енергија, примарно кроз електромоторне погонске системе, користи се у свим фазама третмана за погон кључне опреме – компресора, пумпних станица, мијешалица, вентилатора, преса и друге механичке опреме. Такође, електрична енергија омогућава освјетљавање и гријање техничких и административних објеката, као и производњу топлоте за дигесторе и сушење муља. Укупна потрошња енергије у ППОВ зависи од низа фактора. То укључује количину и квалитет отпадне воде, концентрацију отпадне воде загађујућим материјама, одабрани ниво третмана, циљне стандарде квалитета и тип постројења (централизовано или децентрализовано). Додатно, енергетске потребе повећавају обим система, врста колектора (одвојени или комбиновани), потреба за радом пумпи и локални климатски услови. Енергија се такође користи за кондиционирање и стабилизацију муља кроз анаеробну дигестију, компостирање или спаљивање, што доприноси смањењу запремине, неутрализацији патогена и, у неким случајевима, производњи корисне енергије [18, 19].

Специфична потрошња енергије се најчешће изражава у киловат-сатима по кубном метру третиране воде (kWh/m³), што омогућава поређење енергетских захтјева различитих технологија без обзира на капацитет постројења [20]. Овај индикатор је посебно користан у оптимизацији рада постројења и праћењу побољшања енергетске ефикасности током времена.



Слика 2. Потрошња енергије [2]
Figure 2. Energy consumption [2]

Потрошња енергије у постројењима за пречишћавање отпадних вода значајно зависи од типа примијењеног процеса. Најнижу потрошњу имају лагуне, гдје се енергија користи углавном за повремено мијешање или рад пумпи, и износи до 0,1 kWh/m³. Триклинг филтери троше око 0,15 kWh/m³, док напредни третмани који укључују уклањање нутријената, дезинфекцију и сличне процесе захтијевају око 0,25–0,3 kWh/m³.

Конвенционални аерацијски третман (Activated Sludge Process ASP) троши приближно 0,45 kWh/m³, а када се исти комбинује с анаеробном дигестијом муља, потрошња прелази 0,5 kWh/m³. Јасно је да са сложеношћу процеса расте и енергетска потрошња, при чему ASP и посебно ASP с анаеробном дигестијом спадају у енергетски најзахтјевније опције. Код ASP процеса највећи удио потрошње отпада на аерацију, што га чини кључном тачком за оптимизацију и смањење укупне енергетске потрошње (слика 2) [2].

Просјечна потрошња енергије за третман отпадних вода варира широм свијета: САД - 0,52 kWh/m³, Кина - 0,31 kWh/m³, Јапан - 0,304 kWh/m³, Кореја - 0,243 kWh/m³ и Европа - 0,42 до 0,53 kWh/m³ [2,21].

4. Потенцијали оптимизације енергетске ефикасности у ППОВ

С обзиром на значајан удио енергије који постројења за пречишћавање отпадних вода троше током различитих фаза третмана, као и на разлике у потрошњи међу примијењеним технологијама и типовима процеса, јасно је да постоји велики простор за оптимизацију. Анализа потрошње енергије пружа основу за идентификацију кључних тачака у процесу које утичу на укупну ефикасност, попут аерације, рада пумпи и третмана муља. Ова сазнања омогућавају примјену стратегија и технологија

које не само да смањују енергетске захтјеве, већ и користе присутне ресурсе унутар постројења, чиме се постиже већа самоодрживост и смањује негативан утицај на животну средину.

Оптимизација енергетске ефикасности у постројењима за пречишћавање отпадних вода може се постићи комбинацијом поврата енергије из самог процеса третмана и примјеном технологија које омогућавају значајне уштеде енергије [22]. За разлику од постројења за пречишћавање питке воде, постројења за пречишћавање отпадних вода располажу ширим спектром могућности за производњу енергије, првенствено захваљујући присуству органске материје у дотоку, која се може искористити за производњу биогаса путем анаеробне дигестије. На тај начин, ова постројења имају потенцијал да се трансформишу у самоодржива постројења, гдје не само да се отпадне воде пречишћавају, већ се нуспроизводи третмана, попут муља, биогаса или топлоте, поново користе. Трансформацијом постројења у енергетски самоодржива може се побољшати његова профитабилност, смањити емисија гасова стаклене баште, повећати енергетска и водна сигурност, побољшати заштита јавног здравља и животне средине [23]. Такође, постројења за пречишћавање отпадних вода могу бити важан дио циркуларне економије захваљујући интеграцији производње енергије и опоравка ресурса током производње чисте воде [24]. Оваквим приступом смањује се количина отпада који се одлаже, док се преостали материјали претварају у сировину за нове производне процесе, чиме се затвара циклус материјала и енергије [25].

Научници и истраживачи су вршили различита истраживања, развијали методологије и сценарија кроз које би постројење за пречишћавање отпадних вода могло постићи енергетски неутралан или позитиван статус.

Gikas 2016. [26] предлаже енергетски ефикасан процес третмана отпадне воде који се заснива на комбинацији физичко-хемијских метода, с циљем уклањања што већег дијела укупних суспендованих чврстих материја прије укључивања биолошких третмана. Овакав приступ, уз ефикасно одводњавање биочврстих материја и примјену биофилтрације с ниским енергетским захтјевима, значајно смањује потрошњу енергије у поређењу са конвенционалним процесом третмана активним муљем и то до 85%. Поред уштеде енергије, разматра и производњу енергије кроз анаеробну дигестију или гасификацију прикупљених биочврстих материја, чиме је могуће остварити нето производњу од приближно 0,172 kWh/m³ електричне енергије. На овај начин, процес не само да смањује оперативне трошкове, већ доприноси и одрживости, претварајући отпадне материјале у вриједан енергетски ресурс.

Avilés и сарадници 2019. [27] развили су методологију за контролу енергије у постројењима за пречишћавање отпадних вода, засновану на три међусобно повезане фазе: процес, инсталацију и систем управљања. Прва фаза, која се односи на процес, подразумијева идентификацију кључних технолошких параметара који највише утичу на потрошњу енергије, попут потребе за кисеоником у биолошком третману или интензитета рециркулације муља. Друга фаза, инсталација, фокусира се на техничке карактеристике и ефикасност опреме, при чему се предлаже оптимизација рада пумпи, компресора, аерационих система и других потрошача енергије. Трећа фаза, систем управљања, укључује имплементацију аутоматизованог надзора и контроле одабраних

процесних промјенљивих у реалном времену, прилагођених специфичним потребама постројења. Примјеном овог интегрисаног приступа могуће је постићи смањење укупне потрошње енергије инсталације у првој фази за више од 15%, првенствено кроз оптимизацију дотока кисеоника и смањење односа рециркулације, без нарушавања квалитета третмана отпадне воде.

Sarpong и сарадници 2020. [28] истичу да први корак ка побољшању енергетске ефикасности постројења за пречишћавање отпадних вода (ППОВ) подразумијева замјену застарјеле опреме високоефикасним уређајима. У њиховој студији показано је да већа ефикасност примарног третмана смањује потребу за оксидацијом, што доводи до мање потрошње енергије, али и веће производње исте. Будући да аерација представља највећег потрошача енергије у ППОВ, значајне уштеде могуће је постићи повећањем њене ефикасности – нпр. замјеном постојећих аерационих система технологијама с мањим енергетским захтјевима, попут триклинг филтера. Додатно, предлаже се примјена кодигестије уз додатак високо биоразградивог отпада, чиме се повећава производња биогаса. Koch и сарадници 2016. [29] процјењују да би извођењем кодигестије са 10% отпадне хране и замјеном застарјелих когенерацијских јединица производња енергије могла порасти са 25% на чак 78%.

Yang и сарадници 2020. [30] су, истражујући корелацију између унутрашње енергије отпадних вода, потрошње енергије и потенцијала за поврат енергије на постројењима за пречишћавање отпадних вода, развили модел нето потрошње енергије (NEC– net energy consumption) за предвиђање нивоа енергетске самоодрживости постројења. Студија је заснована на анализи података са 347 постројења у Кини, а као мјере за производњу енергије разматрани су спаљивање муља, фотонапонска технологија и примјена топлотних пумпи.

Фотонапонска производња енергије могла би задовољити од 12,2% до 19,3% укупне потражње за енергијом, док је степен енергетске самоодрживости за топлотну енергију износио од 35,2% до 253,5%. Постројења која карактеришу већи протоци и мања концентрација ХПК (хемијска потрошња кисеоника) имају мању потрошњу енергије и већи потенцијал за постизање енергетске самоодрживости. Према NEC моделу, постројења у Кини могу постићи енергетску самоодрживост, јер ХПК на њима износи између 200 и 400 mg/l, а проток отпадне воде прелази 55 450 m³/дан.

Masło и сарадници 2020. [31] наглашавају значај коришћења свих доступних извора енергије у постројењима за пречишћавање отпадних вода ради смањења укупне потрошње енергије из ванских извора. Један од најважнијих таквих ресурса је муљ из отпадних вода, који се може искористити за производњу биогаса путем анаеробне дигестије. Биогас, чији главни састојци су метан (CH_4) и угљен-диоксид (CO_2), може се користити за производњу топлотне и електричне енергије унутар самог постројења, чиме се значајно смањују оперативни трошкови и емисије стакленичких гасова.

Овакав приступ не само да доприноси енергетској самоодрживости, већ омогућава и смањење количине отпада који се мора одлагати, јер се током процеса дигестије запремина и маса муља знатно смањују. Поред анаеробне дигестије, разни истраживачи истичу и могућности допуњавања овог процеса кодигестијом са другим

органским отпадом (нпр. отпадном храном), чиме се повећава принос биогаса и додатно побољшава енергетска биланса постројења.

5. Закључак

Постројења за пречишћавање отпадних вода представљају кључну компоненту заштите животне средине, али истовремено захтијевају значајну потрошњу енергије, нарочито код сложенијих процеса попут аерације и анаеробне дигестије муља. Анализа потрошње енергије у различитим фазама третмана показује да оптимизација и примјена енергетски ефикасних технологија имају кључну улогу у смањењу оперативних трошкова и емисија стакленичких гасова, без нарушавања квалитета третиране воде.

Трансформацијом постројења у енергетски самоодрживе системе, укључујући поврат енергије из муља, анаеробну дигестију, кодигестију и примјену обновљивих извора енергије, могуће је смањити укупну потрошњу енергије и повећати енергетску и еколошку одрживост. Такав приступ омогућава постројењима да постану активни учесници у циркуларној економији, претварајући нуспроизводе третмана у вриједне ресурсе, чиме се постиже баланс између високог квалитета третмана и минималне енергетске потрошње.

6. Литература

[1] Алексић Н, Шуштершич В, Ракић Н, Гордић Д, Потрошња енергије и примена обновљивих извора енергије у постројењима за третман отпадних вода; *Енергија, економија, екологија*, год. XXIV, бр.3. 2022.

[2] Tsalas N, Spyridon K. Golfinopoulos S. K, Samios S, Katsouras G, Peroulis K, Optimization of energy consumption in a wastewater treatment plant: An overview; *Energies* 2024, 17, 2808, 2024.

[3] Ђукић А, Предлог нове директиве Европске Уније о пречишћавању градских отпадних вода. *Грађевински календар 2022* 54. 2022.

[4] Hamawand I, Energy Consumption in Water/Wastewater Treatment Industry—Optimisation Potentials, *Energies 2023*, 16, 2433. 2023.

[5] Hernández-Sancho F, Molinos-Senante M, Sala-Garrido R, Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach, *Science of the Total Environment*, 409(14), 2693-2699. 2011.

[6] Di Fraia S, Massarotti N, Vanoli L, A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants, *Energy Conversion and Management*, 163, 304-313. 2018.

[7] Hao X, Liu R, Huang X, Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China, *Water Research*, 87, 424-431. 2015

[8] Wang H, Yang Y, Keller A. A, Li X, Feng S., Dong Y, et al, Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany China and South Africa. *Appl Energy* 2016;184:873–81. 2016.

[9] Vaccari M, Foladori P, Nembrini S, Vitali F, Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants–a survey of over 200 plants in Italy, *Water Science and Technology*, 77(9), 2242-2252, 2018.

[10] Cardoso B. J, Rodrigues E, Gaspar A. R, Gomes, Á, Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review, *Journal of Cleaner Production*, 322, 129107. 2021.

[11] Lia Z, Lub J, Luc J, Energy efficiency evaluation and optimization for wastewater treatment plant, *Desalination and Water Treatment* 319, 100487, 2024.

[12] Sonune A, Ghate R, Developments in wastewater treatment methods, *Desalination*, 167, 55-63, 2004.

[13] Gaonkar G. V, A Review onWastewater Treatment Techniques. *J. Emerg. Technol. Innov. Res*. 6, 102–109, 2019.

[14] Silva J. A, Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review, *Sustainability*, 15, 10940, 2023.

[15] Moore L. W, *Preliminary Wastewater Treatment*. доступно: https://www.epa.gov/system /files /documents/2023-10/tawebinar preliminarywastewatertreatment 230725.pdf, 2023.

[16] Partners G, Macero E, Guyer J. P, *An Introduction to Preliminary Wastewater Treatment*; Continuing Education and Development Inc.: New York, NY, USA, 2011.

[17] Crini G, Lichtfouse E, Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment, *Environmental Chemistry Letters* 17:145–155, 2019.

[18] Liu, Y. J, Gu, J, Liu Y, Energy Self-Sufficient Biological Municipal Wastewater Reclamation: Present Status, Challenges and Solutions Forward, *Bioresour. Technol.* 2018, 269, 513–519. 2018.

[19] Masłoń A, Czarnota J, Szaja A, Szulżyk-Cieplak J, Łagód G, The enhancement of energy efficiency in a wastewater treatment plant through sustainable biogas use: Case study from Poland, *Energies,* 13(22), 6056, 2020.

[20] Blagojević J, Jovović A, Midžić-Kurtagić S, Overview and analysis of electric energy consumption indicators in wastewater treatment plants, *Thermal science:* Year 2025, Vol. 29, No. 3B, pp. 1-12, 2025.

[21] Tang J, Zhang C, Shi X, Sun J, Cunningham J. A, Municipal Wastewater Treatment Plants Coupled with Electrochemical, Biological and Bio-Electrochemical Technologies: Opportunities and Challenge toward Energy Self-Sufficiency, *J. Environ. Manag*. 234, 396–403, 2019.

[22] Gu Y, Li Y, Li X, Luo P, Wanga H, Robinson Z. P, Wang X, Wu J, Li F, The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants, *Applied Energy* 204, p.p. 1463 – 1475, 2017.

[23] Soares R. B, Memelli M. S, Roque R. P, Gonçalves R. F, Comparative analysis of the energy consumption of different wastewater treatment plants, *International Journal of Architecture, Arts and Applications*, 3(6), 79-86, 2017.

[24] Neczaj E, Grosser A, Circular economy in wastewater treatment plant–challenges and barriers, *In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, Vol. 2, No. 11, p. 614. 2018.

[25] Орашанин Г, Мариновић Б, Water supply systems and circular economy, In 45. *Међународна конференција "Водовод и канализација '24"*, зборник радова, Организациони и економски аспекти јавних комуналних предузећа водовода и канализације пп. 71-78, 2024.

[26] Gikas P, Towards energy positive wastewater treatment plants, *Journal of Environmental Managemen*t, Volume 203, Part 2, p.p. 621 – 629, 2016,

[27] Avilés A. B. L, del Cerro Velázquez F, del Riquelme M. L. P, *Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants*. Phase I: Control of the Best Operating Conditions, Sustainability 2019, 11, 3919, 2019.

[28] Sarpong G, Gude V. G, Magbanua B .S, Truax D. D, Evaluation of energy recovery potential in wastewater treatment based on codigestion and combined heat and power schemes, *Energy Conversion and Management*, Volume 222, 113147, 2020.

[29] Koch K, Plabst M, Schmidt A, Helmreich B, Drewes J. E, Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: comparison of batch tests and full-scale experiences, *Waste Management*, 47, 28-33, 2016.

[30] Yang X, Wei J, Ye G, Zhao Y, Li Z, Qiu G, Li F, Wei C, The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: An assessment of the energy balance, *Science of The Total Environment*, Volume 714, 136655, 2020.

[31] Masło A, Czarnota J, Szaja A, Szulzyk-Cieplak J, Łagód G, The Enhancement of Energy Efficiency in a Wastewater Treatment Plant through Sustainable Biogas Use: Case Study from Poland, *Energies*, 13, 6056, 2020,

Ivana Mitrović[1], Žarko Nestorović[2]

Pregledni stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25327M

VLAŽNA ZEMLJIŠTA KAO PRIRODNI PREČIŠĆIVAČI OTPADNIH VODA I ODRŽIVI RAZVOJ

Rezime: Vlažna zemljišta su prirodna staništa koja su povremeno ili stalno zasićena vodom. Mogu se koristiti kao ekonomičan i ekološki prihvatljiv način pročišćavanja otpadnih voda. Ova zemljišta imaju karakteristične ekološke uslove zbog prisustva vode i specifičnih vrsta biljaka i životinja koje su se prilagodile tim uslovima. Mogu imati višestruku namenu, a njihova dominantna uloga ogleda se u mogućnosti prečišćavanja otpadnih voda. Način funkcionisanja vlažnih zemljišta daje doprinos ciljevima održivog razvoja. U ovom istraživanju sagledana je njegova uloga iz ugla prirodnog prečišćivača otpadnih voda u skladu sa načelima održivog razvoja sa teoriskog stanovišta.
Ključne reči: vlažna zemljišta, održivi razvoj, prečišćavanje

WETLANDS AS NATURAL WASTEWATER PURIFIERS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Abstract: Wetlands are natural habitats that are either occasionally or permanently saturated with water. They serve as an economical and environmentally friendly method for purifying wastewater. These areas feature unique ecological conditions due to the presence of water and various plant and animal species that have adapted to these environments. Wetlands can fulfill multiple purposes, with their primary role being the purification of wastewater. Their functioning supports the goals of sustainable development. This research examines the role of wetlands as natural wastewater purifiers from a theoretical perspective, in alignment with the principles of sustainable development.
Key Words: Wetlands, sustainable development, purification

1. Uvod

U ovom radu istražuje se funkcija vlažnih zemljišta u kontekstu održivog razvoja sa teorijskog aspekta. Polazna pretpostavka autora u ovom radu je da su vlažna zemljišta u funkciji održivog razvoja (slika 1).

Rad je zasnovan i koncipiran na istraživanju literature i dostupnih podataka. Struktura rada zasniva se na predstavljanju relevantnih pojmova u vezi sa vlažnim zemljištima i pristupom održivog razvoja.

[1] *Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Ogranak HE „Đerdap“, ivana.mitrovic@eps.rs, ORCID:0009-0005-1746-0032*

[2] *Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Ogranak HE „Đerdap“, zarko.nestorovic@eps.rs, ORCID: 40-0002-7928-7416*

Slika 1. Odnos namenski uređenih vlažnih zemljišta i održivog razvoja [1]
Figure 1. The relationships specialy managed wetlands and sustainable development [1]

Vlažna zemljišta predstavljaju mesta na kojima se omogućava prihvatanje atmosferskih i/ili otpadnih voda, njihovo oslobađanje od potencijalno štetnih materija (potpuno ili delimično), kao i gajenje biljaka koje imaju visoku potrebu za vodom i koje se mogu, po završetku njihovog biološkog ciklusa, koristiti u različite svrhe. Vlažna zemljišta imaju ulogu u hidrološkom ciklusu, kruženju i zadržavanju hemijskih i bioloških materija kao i očuvanju biološke raznovrsnosti [2] Zaštita okoline od nekontrolisanog širenja zagađenih voda na odabranom području uključujući izmenu (obogaćivanje) biološke raznovrsnosti je njihova primarna funkcija u ekosistemima u kojima se formiraju.

Prema deklaraciji iz Rio de Žaneira [3] održivi razvoj se temelji, na više principa od kojih treći princip glasi da svaka generacija ima pravo na razvoj ne ugrožavajući pri tome isto pravo budućim generacijama. Navedeni princip implicitno uspostavlja zahtev da postojeći resursi moraju biti korišćeni na odgovoran način i da budu samoodrživi u što dužem vremenskom periodu. Takođe Agenda o održivom razvoju 2030 usvojena 2015. godine precizirana su kroz 17 ciljeva Ujedinjenih nacijama o održivom razvoju [4]. Vlažna zemljišta u kontekstu održivog razvoja mogu imati značaj za više ciljeva kao što su: obezbeđivanje čiste vode, održavanja biološke raznovrsnosti na zemlji i u vodi kao i obezbeđivanje čiste energije, jer se biljni ostaci prisutni na vlažnim zemljištima mogu koristiti za proizvodnju energije na biomasu.

Vlažna zemljišta se u literaturi nalaze i pod nazivom „mokra polja“. U ovom radu će ta dva naziva biti korišćeni kao sinonimi, iako pojedini autori insistiraju na razlikama u značenju ova dva termina.

2. Način primene u kontekstu održivog razvoja

U svetu, mokra polja su uspostavljena u Evropi, SAD, Kanadi, Australiji i nekim delovima Azije. U razvijenim zemljama, konstruisana mokra polja su čest izbor za prečišćavanje manjih i srednjih količina otpadnih voda, naročito u ruralnim područjima i mestima gde je pristup tradicionalnim postrojenjima ograničen.

Razlozi za češću primenu su uglavnom niska cena izgradnje i održavanja u poređenju sa konvencionalnim postrojenjima, ekološki prihvatljiv pristup koji doprinosi biorazno-likosti, mogućnost integracije u pejzaž i zelene površine kao i energetskoj efikasnosti (niske potrebe za energijom kada se umesto postrojenja koja koriste električnu energiju za

prečišćavanje uspostavljaju vlažna zemljišta koja se baziraju na prirodnim procesima). Ograničenja koja utiču na primenu mogu biti potreba za velikom površinom zemljišta, što nije uvek dostupno u urbanim sredinama, efikasnost zavisi od klimatskih uslova i zahteva redovno održavanje, nije pogodno za velike industrijske otpadne vode bez prethodnog tretmana. Vlažna zemljišta za prečišćavanje otpadnih voda predstavljaju prirodne tehnologije koje efikasno prečišćavaju razne vrste zagađene vode, zato se smatraju ekološki prihvatljivim i održivim rešenjima za prečišćavanje otpadnih voda. U njima biljke prečišćavaju vodu kroz niz prirodnih procesa koji uključuju fizičko filtriranje, apsorpciju hranjivih materija i razgradnju zagađivača pomoću mikroorganizama u korenovoj zoni.

3. Struktura vlažnih zemljišta

Biljke u močvari prečišćavaju vodu kroz niz prirodnih procesa koji uključuju fizičko filtriranje, apsorpciju hranjivih materija i razgradnju zagađivača pomoću mikroorganizama u korenovoj zoni. Močvarne biljke, poput trske (Phragmites australis), šaša (Carex) i rogoza (Typha), usporavaju protok vode. Time se omogućava da se čestice mulja, peska i druge suspendovane (lebdeće) čestice materije talože. Biljke putem korena apsorbiraju nitrate (nitrite), fosfate i teške metale iz vode. Time smanjuju eutrofikaciju, tj. prekomjerni rast algi izazvan viškom hranjivih materija. Zonu korenja (tzv. rizosfera), biljke mogu obogatiti kiseonikom koji pogoduje mikroorganizmima čija je uloga da razgrađuju organske zagađivače, razlažu organsku materiju uključujući fekalije, ostatke hrane i hemikalija. Biljke emituju rastvorene organske materije u vodu (dissolved organic matter- DOM). To mogu biti lako rastvorive materije i postati važan izvor ugljenika za mikrobe ili refaktorni-teško razgradiva materija, hemijski su stabilniji i teže se razlažu i imaju sposobnost vezivanja za teške metale uticajući na ekosistem a i na kvalitet vode nizvodno u prirodnim mokrim poljima [5]. Neke metale poput olova, kadmija i žive biljke mogu akumulirati, čime sprečavaju da završe u drugim delovima ekosistema. To je proces fitoremedijacije [6]. Makrofiti u močvarama imaju posebno anatomsko prilagođavanje - gasne kanale (lakune) - koji zauzimaju i do 70% ukupnog volumena biljke. Ovi kanali služe kao „cevni sistem“ za prenos gasova (kiseonika, ugljen-dioksida, metana, azota) između atmosfere i korena. U vlažnim, anaerobnim (bez kiseonika) sedimentima, kiseonik se brzo troši, pa je za korenje biljaka otežano dobijanje kiseonika iz tla. Gasni kanali omogućavaju kiseoniku da brzo dopre do korena, koji ga koriste za sopstveni metabolizam. Kada se prekine pristup kiseoniku (na primer, ako su listovi i korenje pod vodom bez kontakta sa vazduhom), biljke brzo propadaju i prelaze na fermentativni metabolizam - metabolički proces bez kiseonika, ovaj proces stvara toksične produkte npr.vodonik-sulfid (H_2S). Ovi produkti su štetni i za biljke i za druge organizme u zemljištu. Mikrorizosfera je mala zona oko korena biljke u kojoj biljka izbacuje kiseonik. Taj kiseonik stvara oksidacionu zonu. Međutim, količina kiseonika koju biljka može da izbaci u sediment je mala i uglavnom koristi korenu, a ne čitavom sediment [5]. Veličine BPK (biohemijska potrošnja kiseonika) - količina kiseonika potrebna mikroorganizmima da razgrade organsku materiju i HPK (hemijska potrošnja kiseonika) – količina kiseonika potrebna da se organska materija razgradi hemijski (ne samo biološki) pokazuju veličinu organskog zagađenja u vodi. Visok BPK/HPK znači da u vodi ima mnogo organskog zagađenja koje treba obraditi (razgraditi).

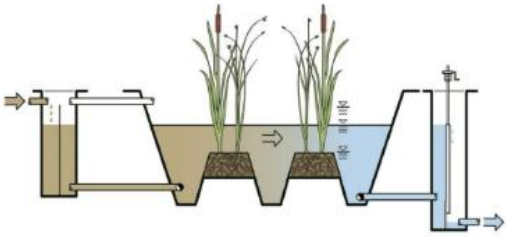
3.1. Namene i vrste vlažnih zemljišta

Zbog sposobnosti biljaka da zadržavaju, razgrađuju i apsorbiraju zagađivače, često se koriste u konstruisanim močvarama (engl. constructed wetlands) za prečišćavanje otpadnih voda. To su inženjerski sistemi koji su izgrađeni da iskoriste procese koji se odvijaju u prirodnim močvarama pomoću vegetacije, zemljišta i mikrobioloških procesa a sve u cilju tretmana otpadnih voda. Veštački močvarni sistemi (Constructed Wetlands - CWs) se koriste kao ekonomičan i ekološki prihvatljiv način za prečišćavanje otpadnih voda, u okviru tzv. ekološkog inženjeringa. To su veštački sistemi za prečišćavanje otpadnih voda, koji se mogu dizajnirati i kontrolisati. Mogu biti efikasan metod za uklanjanje zagađujućih materija, zahvaljujući zajedničkom delovanju zemljišta, močvarnih biljaka (makrofita) i mikroorganizama. Ove komponente zajedno utiču na fizičke, hemijske i biološke procese unutar sistema. Nihova pozitivna strana je što istovremeno mogu biti ekonomični, efikasni i ekološki prihvatljivi za tretman otpadnih voda. Mogu da prečiste različite vrste otpadnih voda, uključujući kanalizaciju, otpadne vode iz poljoprivrede i industrije. Uglavnom sastoje od: supstrata (matrica) – kao što su pesak, šljunak i sl. makrofita – biljke koje rastu u vodi ili na vlažnim mestima i mikroorganizama – koji razlažu zagađivače.

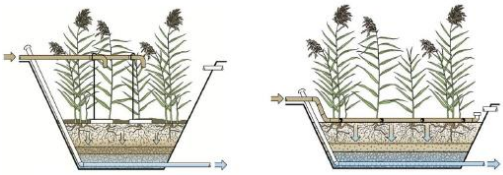
Proces funkcionisanja ovih sistema se sastoji od nekoliko faza. Taloženje čestica: Voda se usporava, a teže čestice se talože. Apsorpcija hranjivih materija: Koreni biljaka preuzimaju štetne supstance. Mikrobiološka razgradnja: Koreni i biljne materije pomažu bakterijama da razgrade zagađivače. Izlaz čiste vode: Nakon ovih procesa, voda izlazi znatno očišćena [7].

Vrste veštačkih močvarnih sistema (Constructed Wetlands - CWs):

Močvare sa površinskim protokom (Free Water Surface - FWS) gde voda teče iznad podloge (kao u prirodnoj močvari), a biljke rastu gusto i voda je izložena vazduhu [8].



Slika 2. Močvare sa površinskim protokom (Free Water Surface - FWS) [8]
Figure 2. Wetlands with surface flow (Free Water Surface - FWS) [8]



Slika 3. Močvare sa podzemnim protokom (Subsurface Flow - SF), horizontalan tok i vertikalan tok [8]
Figure 3. Wetlands with subsurface flow (SF), horoizontal flow and vertical flow [8]

Močvare sa podzemnim protokom (Subsurface Flow - SF) gde voda teče kroz porozni materijal ispod površine (npr. pesak, šljunak), a voda nije izložena direktno na površini [8].

Močvare sa podzemnim protokom se dalje dele na: Horizontalni tok (HF) – voda teče vodoravno kroz medijum i vertikalni tok (VF) – voda se raspršuje odozgo na dole kroz medijum. Da bi se sprečilo začepljenje filter materijala, HF i VF sistemi se obično koriste za sekundarni tretman (nakon što je otpadna voda već prethodno delimično prečišćena) [8].

Prirodne močvare nisu monokulture iako ponekad jedna ili dve vrste (npr. Typha – ševalj, Scirpus – slačura, Phragmites – trska) dominiraju naizgled, Unutar tih „monokulturnih“ zona ima mnogo drugih vrsta, naročito pod vodom (korenje, mikroorganizmi, semena drugih biljaka itd). Raznovrsnost je prisutna, čak i kada na površini deluje kao da dominira jedna vrsta. Makrofiti, vodene biljke koje su vidljive golim okom, imaju stalan ciklus starenja i odbacivanja tkiva. One mogu izranjati (rastu iz vode, kao trska), zatim mogu biti plutajuće (npr. lokvanj) ili biti potopljeni (npr. vodena papratica). Proces starenja kod ovih biljaka prati odbacivanje opalog lišća, delova korenja, stabljika koji završavaju u detritusu (razgrađenoj organskoj masi). Različiti „talasi“ rasta (kohorte) rastu i propadaju u različito vreme je proces koji traje u kontinuitetu na ovakvim staništima. Organska materija se delimično raspada u čestice, a veoma značajan deo u obliku rastvorene organske materije - ROM ulazi u vodu. Ona može da čini čak 30–40% ukupne produkcije i oslobađa se brzo – u roku od nekoliko sati nakon što biljka počne da stari ili se ošteti [8]. Zahvaljujući odnosima između biljaka, mikroorganizama, podloge i vode, imaju sposobnost da uklanjaju organske i mineralne materije, patogene mikroorganizme, teške metale i druge zagađujuće materije iz zagađenih voda.

Proces uzgajanja biljaka u vodi kontaminiranoj teškim metalima gde će one apsorbovati. Kako postaju zasićeni metalima, korenovi ili cele biljke se kose i uklanjaju. Biljka koja je pogodna za rizofiltraciju mora da toleriše visoke koncentracije ciljanog teškog metal, kao i da usvaja ciljani metal u velikim količinama, da brzo raste i da pri tome stvara veliku količinu biomase, te da omogućava transport usvojenog teškog metala iz korena u svoje nadzemne delove. Do danas je prijavljeno preko 400 biljnih vrsta koje mogu da akumuliraju metale. Kao najznačajnije izdvajaju se: trska, zuka, rogoz, barska perunika, sita, sočivica, vodena metvica, i vodena bokvica. Barska perunika u tretmanu otpadnih voda redukuje fenole i teške metale. Ima izvanredne sposobnosti u prečišćavanju kanalizacionih voda i uspešno redukuje teške metale poput Cr, Pb, Cd i druge. Vodena bokvica dobro uklanja teške metale, posebno Pb, Cd, Fe, Ni, Cr, Zn i Cu [9].

4. Zaključak

Kod sistematizacije vrsta mokrih polja, primećuje se osnovna podela na prirodna tj. prirodno postojeća močvarna područja, jezera, rečne delte i slični ekosistemi koji u određenoj meri prirodno pročišćavaju vode i veštačka ili konstruisana mokra polja tj. veštački sistemi posebno projektovani i građeni za tretman otpadnih voda, uz kontrolisane uslove protoka, biljnog pokrivača, dubine i trajanja zadržavanja vode. Osnovne karekteristike su da kod veštačkih postoji zanačajna kontrola nad procesima prečišćavanja voda, efikasnost se kontinuirano prati i usklađuje sa projektovanom i primarna upotreba im je kao planirani sistemi

za otpadne vode. Za prirodna mokra staništa karakteristična je niska kontrola nad procesom da im efikasnost prečišćavanja varira i manje je pouzdana, jer su to prirodni ekosistemi u kojima se odvijaju prirodne funkcije tog staništa i šireg ekosistema.

5. Literatura

[1] Đorđević D, Nestorović Ž, Ivana Mitrović, Nikola Stanković, O namenski uređenim vlažnim zemljištima i održivom razvoju; *Rudarstvo 2025 - održivi razvoj u rudarstvu i energetici*; Privredna komora Srbije, Zbornik radova,str.221-230; 2025.

[2] Đorđević D, Nestorović Ž, Marketinški pristup iskorišćenju vlažnih zemljišta, *33. Konferencija o aktuelnim problemima korišćenja i zaštite voda, VODA 2004*, Jugoslovensko društvo za zaštitu voda, Borsko jezero, Zbornik radova, str.63-68, 2004.

[3] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iau-hesd.net/sites/default/files/documents/rio_e.pdf (pristupljeno: 20.04.2025)

[4] https://sdgs.un.org/goals (pristupljeno: 20.04.2025)

[5] Gerald A Moshlri, Ph.D; *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*; First issued in paperback 2019,

[6] https://www.industrija.rs/biljke-koje-preciscavaju-povrsinske-vode(pristupljeno: 20.04.2025)

[7] Constructed Wetlands: A Review on the Role of Radial Oxygen Loss in the Rhizosphere by Macrophytes, Qian Wang, Yanbiao Hu, Huijun Xie, Zhongchen Yang ; 24 May 2018.

[8] Slađana Č. Alagić, Maja M. Nujkić, Mile D. Dimitrijević; *Strategije biljaka u borbi protiv fitotoksičnih koncentracija metala kao ključni preduslov uspešne fitoremedijacije: Ekskluderi i hiperakumulatori*, deo II, 2014.

[9] Gerald A. Moshiri, *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Institute for Coastal and Estuarine Research University of West Florida, 2019.

Stanko Stankov[1]

Pregledni naučni rad
DOI: 10.5937/VIK25333S

KONCEPCIJA VODA 4.0 – BUDUĆNOST VODOVODNOG SEKTORA

Rezime: Voda 4.0 stavlja digitalizaciju i automatizaciju u srž strategije za efikasno, fleksibilno i konkurentno upravljanje vodnim resursima. Koncept uključuje iste osnovne karakteristike i koristi iste termine povezane s revolucijom Industry 4.0, kao što su umrežavanje mašina, procesa, sistema za skladištenje, pametne mreže, Internet stvari i usluga, objedinjujući ih u sistemski kontekst upravljanja vodama. Prilikom implementacije Vode 4.0 korišćenjem sajber-fizičkih sistema postiže se optimalna veza virtuelnih i stvarnih vodnih sistema, pri čemu se planiranje, izgradnja i rad u velikoj meri obavljaju pomoću softvera. Ovo omogućava inteligentno povezivanje korisnika vode (poljoprivrede, industrije i domaćinstava) i komponenti vodovodnog sistema u održivu infrastrukturu sa životnom sredinom i lancem snabdevanja vodom, prateći holistički pristup tokom odvijanja procesa zahvatanja, prečišćavanja i distribucije vode.
Ključne reči: Voda 4.0, Internet stvari, digitalni blizanac, prečišćavanjevode, vodosnabdevanje

CONCEPT WATER 4.0 – the FUTURE of WATER SUPPLY

Abstract: Water 4.0 places digitalization and automation at the heart of the strategy for efficient, flexible and competitive management of water resources. The concept encompasses the same basic features and uses the same terms associated with the Industry 4.0 revolution, such as the networking of machines, processes, data storage systems, smart grids, the Internet of Things and services, and brings them together in the systemic context of water management. When implementing Water 4.0 with the help of cyber-physical systems, an optimal connection of virtual and real water systems is achieved, in which planning, construction and operation are largely taken over by software. This enables the intelligent connection of water users (agriculture, industry and households) and components of the water system to form a sustainable infrastructure with the environment and the water supply chain, taking a holistic approach across the entire process of water capture, treatment and distribution.
Key Words: Water 4.0, Internet of Things, digital twin, water purification, water supply

1. Uvod

Digitalizacija omogućava preduzećima u sektoru vodosnabdevanja i prečišćavanja otpadnih voda da se prilagode klimatskim, demografskim i strukturnim promenama. Fraza - život je nemoguć bez vode, koja zvuči kao kliše, uskoro bi mogla postati sumorna prognoza ukoliko se ostvare sadašnji statistički trendovi. U današnje vreme 3,6 milijardi ljudi se suočava s nedovoljnim pristupom vodi najmanje jedan mesec u toku godine. Nestašica vode

[1] *Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, e-mail: stanko.stankov@elfak.ni.ac.rs, ORCID: 0009-0002-4264-3111*

nije problem samo u sušnim, ruralnim ili nerazvijenim regionima, već sve više pogađa bogate nacije i urbana područja. Prema podacima UN-Water, broj gradskih stanovnika bez bezbedne vode za piće povećao se za više od 50% od 2000. godine [1]. Klimatske promene, urbanizacija i zagađenje iz poljoprivrede i industrije ugrožavaju kvalitet vode u jezerima, rekama i vodonosnim slojevima u mnogim regionima širom sveta, čineći čistu vodu sve oskudnijim i vrednijim resursom. Prema Beloj knjizi kompanije Global Water Intelligence vodovodne mreže su odgovorne za 135 miliona tona emisije CO_2. Smanjenje ove brojke za 30% izbegavanjem curenja značajno bi smanjilo ugljenični otisak vodovodne infrastrukture [2]. Nove tehnologije mogu pomoći u otkrivanju i lociranju curenja svih vrsta i veličina. Digitalna rešenja pružaju poboljšani monitoring sistema vodovodne i kanalizacione infrastrukture i optimizovan rad postrojenja i instalacija obezbeđujući pri tome usklađenost sa sve strožim regulatornim zahtevima u pogledu kvaliteta pijaće vode i otpadnih voda, kao i bezbednost i kvalitet snabdevanja. Umrežavanjem i integracijom procesnih, inženjerskih i operativnih podataka, ceo tehnički i organizacioni proces i lanac vrednosti vodovodne industrije može se predstaviti u obliku digitalnog modela. Ovo je tzv. digitalni blizanac – model vođen podacima koji uključuje sve projektne i operativne podatke za ceo životni ciklus postrojenja. Digitalni blizanac podržava kontinualnu optimizaciju postupaka projektovanja, rada i održavanja. Inteligentno povezivanje podataka o performansama postrojenja s globalnim podacima kao što su izveštaji o vremenu, u kombinaciji s naprednim metodama analize poput mašinskog učenja, omogućava vodovodnim preduzećima da optimizuju svakodnevni rad i bolje reaguju na neuobičajene događaje (npr. obilne padavine, curenja iz mreže itd). Takva rešenja su već danas dostupna [3, 4]. Jedna od primena digitalnih rešenja je optimizacija potrošnje električne energije pumpnih postrojenja. Pumpanje vode tokom transporta ili tretmana zahteva često pumpne agregate velike snage koji su odgovorni za veliki deo energije potrošene u vodoprivrednom sektoru. Stoga, optimizacija potrošnje energije pumpi može pomoći u značajnom smanjenju troškova i ugljeničnog otiska vodovodnih i kanalizacionih sistema. Pored toga, optimizovan rad instalacija smanjuje opterećenje opreme i povećava raspoloživost i vek trajanja pumpi i pratećih komponenti. Međutim, energetski efikasan rad ne bi trebalo da ide na uštrb bezbednosti. Zato moraju da se analiziraju podaci u realnom vremenu, kako iz instalacija tako i iz drugih izvora. Inteligentne aplikacije kao što je npr. SIWA Optim prikupljaju podatke iz sistema za upravljanje procesima i povezuju ih s podacima o komunalnim uslugama, prognozama potrošnje i dr. Aplikacija integriše sve parametre analize koristeći napredne algoritme, što rezultira smanjenjem operativnih troškova uz zaštitu snabdevanja i većoj bezbednosti resursa [5, 6]. Jedan od najčešćih uzroka nastajanja gubitaka vode širom sveta su curenja ili krađe, što predstavlja veliki problem za vodoprivredu. Ovo ne samo da utiče na ekonomske performanse vodovodnih preduzeća, već i povećava pritisak na prirodne vodne resurse. Pored toga, neprijavljena curenja otpadnih voda često su glavni izvor zagađenja i mogu uticati na kvalitet vode i stanje životne sredine. Iz tog razloga vodovodna preduzeća moraju biti u stanju da brzo i s velikom tačnošću otkriju i lociraju curenja. Koristeći tehnologiju sličnu onoj koja se koristi za otkrivanje vode na drugim planetama, sateliti mogu da obezbede slike koje pomažu u identifikaciji curenja u vodovodnim sistemima na Zemlji. Napredni alati kao što je aplikacija SIWA Leak koriste podatke iz postojećih sistema za merenje i automatizaciju i kombinuju različite metode merenja (protok, bilans mase, analiza pritiska, padovi pritiska)

kako bi otkrili curenja s minimalnim kašnjenjem i velikom tačnošću. Pored toga, aplikacije u oblaku kao što je SIWA LeakPlus kombinuju podatke iz mreže za distribuciju vode s računarstvom u oblaku, veštačkom inteligencijom i hidrauličnim simulacijama kako bi otkrili skrivene anomalije koje ukazuju na curenja. Koristeći ove digitalne alate mogu se otkriti curenja brže i preciznije nego ranije, smanjujući vreme i procenat curenja i do 50% [3, 4, 7, 8].

Digitalizacija takođe nudi prednosti u pogledu upravljanja kapacitetom, npr. za kanalizacione sisteme. Ovi sistemi su već pogođeni efektima klimatskih promena. Kada se površinsko oticanje i kanalizacija sakupljaju u kombinovani kanalizacioni sistem, obilne padavine (za koje se predviđa da će se češće javljati zbog klimatskih promena, posebno u Evropi) mogu dovesti do nekontrolisanog ispuštanja kontaminirane vode u prirodne vodene površine. Suše, zauzvrat, dovode do „suvih“ cevi u kojima nastaje sedimentacija, pri čemu se oslobađaju neprijatni mirisi iz kanalizacionog sistema. Da bi se nosili sa obilnim padavinama i nedovoljnim čišćenjem kanalizacije, vodovodnom sistemu je potrebno optimizovano upravljanje pumpnim postrojenjima i adekvatan kapacitet rezervoara.

Inteligentno centralizovano rešenje za upravljanje i kontrolu kanalizacije može omogućiti da se taj kapacitet u kanalizacionoj mreži koristi za rasterećenje rada cevi i izjednačavanje protoka do postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda. Aplikacije kao što je SIWA Sewer omogućavaju dinamičku onlajn optimizaciju rada kanalizacije na osnovu trenutnih nivoa u cevima, sabirnim i prelivnim rezervoarima. Ventilima i pumpama može se upravljati na osnovu trenutnih prognoza padavina kako bi se optimizovalo upravljanje kanalizacijom i povećala efikasnost prečišćavanja otpadnih voda, čime se sprečava nekontrolisano ispuštanje kanalizacije u životnu sredinu. [9–11].

Kao što ovi primeri pokazuju, digitalizacija može doprineti sigurnijem snabdevanju vodom za piće i odvođenju otpadnih voda, smanjenju potrošnje energije i nižim operativnim troškovima. Integracijom naprednih rešenja i usluga kao što su digitalni blizanci i mašinsko učenje, industrija može imati koristi od aplikacija i digitalnih usluga koje omogućavaju veću transparentnost tokom celog životnog ciklusa postrojenja i lanca vrednosti. Na taj način komunalna preduzeća povećavaju efikasnost i potencijal uštede u mnogim oblastima uz istovremeno obezbeđivanje pouzdanog snabdevanja. Da bi podržao ove napore Simens je razvio paket za industriju vodosnabdevanja i otpadnih voda. Kroz potpunu interoperabilnost aplikacija i sveobuhvatnu i fleksibilnu analizu podataka postrojenja u virtuelnom okruženju MindSphere aplikacija povećava dostupnost informacija tokom celog životnog ciklusa. Paket takođe uključuje Simensove aplikacije za vodu (SIWA), koje su razvijene posebno za industriju vodosnabdevanja i otpadnih voda, kombinujući digitalizaciju sa inženjerskim stručnim znanjem [9].

2. IoT tehnologije i protokoli komunikacije u sistemu vodovoda i kanalizacije

Potreba za usvajanjem inovativnih tehnologija kao što su Internet stvari (IoT-Internet of Things), virtuelizacija zasnovana na oblaku i modeliranje postaju sve važniji, posebno u oblasti prečišćavanja otpadnih voda. Upravljanje vodama je odgovoran proces u kome je margina za greške mala. Ako čak i jedan uređaj za praćenje u protokolu komunikacije izgubi

povezanost, to može dovesti do značajnog gubitka vode ili kvara na vodovodnoj mreži. Pouzdanost i izdržljivost komponenata su od najveće važnosti, kao i interoperabilnost između senzora i komunikacionih predajnika. Svi ovi faktori moraju biti prisutni da bi implementacija daljinskog monitoringa bila efikasna. U oblasti prečišćavanja vode, industrijski IoT sistemi nalaze primenu, npr. u praćenju sadržaja hlora u mrežama vodosnabdevanja u realnom vremenu, praćenju promena pritiska u cevima i korišćenju ultrazvučnih senzora koji rano upozoravaju operatere o predstojećim događajima [10, 11]. Sada organizacije u vodovodnom sektoru u velikoj meri zavise od sistema za akviziciju podataka, nadzor i upravljanje (SCADA) za praćenje određenih delova sistema za distribuciju vode. Međutim, praktično postavljanje tačaka za praćenje često ograničava primenu ovih rešenja. Napredak IoT u sektoru voda pomaže u poboljšanju upravljanja vodama obezbeđivanjem bežične automatizacije u celoj vodovodnoj mreži. IoT povezuje sve objekte i uređaje opremljene elektronskim senzorima u mreži i omogućava im da međusobno komuniciraju i izdaju komande aktuatorima za obavljanje različitih funkcija. Implementacija internet konekcije u industrijskim objektima sa disperzovanom distribucijom je posebno izazovan poduhvat. Industrijski IoT (IIoT) uređaji se obično raspoređuju na udaljenim lokacijama kako bi dosegli fizički nepristupačne lokacije i pružili informacije u realnom vremenu (npr. senzori koji se nalaze u udaljenim rezervoarima ili podzemnim šahtovima) [12].

Ovi uređaji moraju biti dovoljno robusni da izdrže korozivne hemikalije, agresivne gasove i tečnosti. Pored toga, da bi operateri mogli da primaju informacije u realnom vremenu u vodovodnom sistemu mogu biti potrebne stotine senzora. Svaki senzor zahteva pouzdano napajanje i komunikacionu mrežu da bi stalno radio. Pristupačnost je takođe izazov u mnogim slučajevima – npr. da bi se izgradila mreža za praćenje vodonik-sulfida (H_2S) u kanalizacionom sistemu, senzori moraju biti napajani baterijama koje imaju dug vek trajanja. Ako se to ne učini, dovešće do povećanih troškova održavanja. Nove IoT tehnologije koriste prednosti automatizacije kako bi smanjile potrebu za učešćem operatera. U upravljanju vodama koristi se koncept pametnih senzora instaliranih na različitim tačkama u vodovodnom sistemu. Oni mogu prikupljati podatke i slati ih nazad u sisteme za praćenje. Uz pomoć pametne IoT tehnologije implementirane u više komponenata vodovodne mreže, takođe se može osigurati da se gubici smanje. Implementacija ovog novog tehnološkog pristupa je u nekim slučajevima uslovljena i regulatornim zahtevima. Koncept IoT tehnologija u prečišćavanju vode zasniva se na pouzdanom komunikacionom sistemu koji se koristi za bežično slanje podataka sa fizičkih objekata na računar povezan sa oblakom, koji ima odgovarajući softver za analizu ovih informacija. Putem aplikacija za pametne telefone i tablete koje se povezuju sa oblakom, vodovodna preduzeća mogu pristupiti podacima sa IoT senzora u realnom vremenu. Ovi mobilni uređaji mogu, npr. pružiti korisne informacije o celoj mreži tehničarima, inženjerima i drugom osoblju odgovornom za upravljanje i održavanje postrojenjima za prečišćavanje vode [12, 13].

S pametnim senzorima za detekciju curenja, kvarovi poput pucanja cevi mogu se brzo i lako locirati. Kada se otkrije curenje, senzori generišu trenutno upozorenje i šalju ga na daljinski upravljački panel. Zahvaljujući blagovremenim korektivnim merama, šteta se može sprečiti i ograničiti, čime se smanjuju gubici. IoT tehnologije se takođe koriste u prečišćavanju otpadnih voda putem pametnih senzora za merenje količine preostalih hemikalija

nakon tretmana. Informacije koje pružaju mogu poslužiti za izračunavanje efikasnosti izabranog procesa tretmana i osiguravanje da količina ispuštenih hemikalija ostane u prihvatljivim granicama. Ova mreža senzora i komunikacionih tehnologija za pametno upravljanje vodama omogućava kompanijama da iskoriste prednosti analize velikih podataka, (big data) u oblaku i mobilnog računarstva, što doprinosi praktičnim poboljšanjima i smanjenju troškova. Uvođenje IoT-a u sektor voda omogućava da se operativni centri sistema za upravljanje i praćenje voda nalaze bilo gde [3, 4, 14].

Troškovi upravljanja vodama mogu se smanjiti poboljšanjem iskorišćenja opreme, efikasnosti i produktivnosti, kao i poboljšanjem usluga. Praćenje pritiska u vodovodnim mrežama omogućava sprečavanje havarija i ograničavanje gubitaka i šteta u slučaju pucanja i curenja cevovoda. Operateri vodosnabdevanja mogu koristiti praćenje pritiska kako bi osigurali da vrednost pritiska u sistemu vodosnabdevanja bude što je moguće niža. Pored toga, optimizovani pritisak pomaže u optimizaciji rada pumpnih stanica, što dovodi do smanjenja potrošnje energije. S druge strane, praćenje pritiska obezbeđuje efikasno upravljanje protokom vode i sprečava moguće povećanje količine vode koja se ispušta u kanalizaciju, dovodeći vodovodni sistem u skladu sa zahtevima regulatornih organa. Takođe, moderna rešenja za daljinsko praćenje zasnovana na IoT-u su znatno jeftinija od svojih prethodnika. Druge prednosti IoT tehnologija za vodovodni sektor su efikasnije održavanje i poboljšana usluga.

Odgovarajući programi za analizu podataka mogu značajno pomoći preduzećima u donošenju odluka i izradi preventivnih i prediktivnih strategija održavanja. Ovo može uključivati npr. merenje ukupnog sadržaja hlora u udaljenim rezervoarima kako bi se olakšalo blagovremeno mešanje ili doziranje hemikalija za sprečavanje nitrifikacije, ili određivanje nivoa podzemnih voda i njihove provodljivosti kako bi se pravilno modelirali podzemni vodonosni slojevi i sprečili eventualne havarije. Ove prednosti dodatno povećavaju performanse mreže i pomažu u ostvarivanju dodatnih smanjenja troškova. Efikasnije upravljane vodovodnom mrežom pruža bolju uslugu korisnicima obezbeđivanjem konstantnog pritiska u sistemu, manje prekida u vodosnabdevanju i pravilno hlorisanje.

3. Koncept Voda 4.0 u svetlu Industrije 4.0

Značaj digitalizacije stalno raste, pri čemu se popularizuju termini kao što su veliki podaci, Internet stvari – IoT, industrijski IIoT i sajber-fizički sistemi (CPS-Cyber-physical systems) [12]. Vodoprivreda stalno traži mogućnosti da se prilagodi promenljivim graničnim uslovima, kao i da pronađe efikasna rešenja za suočavanje s globalnim izazovima. Klimatske promene i urbanizacija, samo dve od važnih pokretačkih snaga u vodovodnom sektoru širom sveta kontinualno povećavaju potražnju za vodnim resursima koji su sve manji.

Voda 4.0 je koncept koji je nedavno prihvaćen kao budućnost vodoprivrede. Ali da bi se objasnila suština ove koncepcije prvo se moraju razmotriti principi Industrije 4.0. Industrija 4.0 je kolektivni termin za tehnologije i koncepte vezane za organizovanje lanaca vrednosti. Na osnovu tehnoloških koncepata sajber-fizičkih sistema, Interneta stvari i Interneta usluga, Industrija 4.0 pomaže u ostvarivanju vizije pametne fabrike. U okviru modularno strukturiranih pametnih fabrika sajber-fizički sistemi prate tekuće procese,

kreiraju virtuelne kopije fizičkog sveta i donose decentralizovane odluke. Ovi sistemi komuniciraju i sarađuju jedni s drugima, kao i s ljudima u realnom vremenu putem IIoT. Koncept Industrije 4.0 zasniva se na šest principa:

- interoperabilnost – sposobnost sajber-fizičkih sistema (tj. uređaje koji učestvuju u izradi određenih elemenata, montažnih traka i proizvoda), ljudi i pametnih fabrika da se povežu i komuniciraju jedni sa drugima putem Interneta stvari i Interneta usluga;
- virtuelizacija – virtuelna kopija pametne fabrike, kreirana povezivanjem podataka sa senzora koji detektuju parametre fizičkog procesa s virtuelnim i simulacionim modelima;
- decentralizacija – sposobnost sajber-fizičkih sistema da sami donose odluke;
- praćenje u realnom vremenu – sposobnost akvizicije i analize podataka i pružanja trenutnih zaključaka;
- orijentacija na usluge – ponuda usluga (sajber-fizičkim sistemima, ljudima i pametnim fabrikama) putem Internet usluga;
- modularnost – fleksibilno prilagođavanje pametnih fabrika promenljivim zahtevima pojedinačnih modula [15, 16].

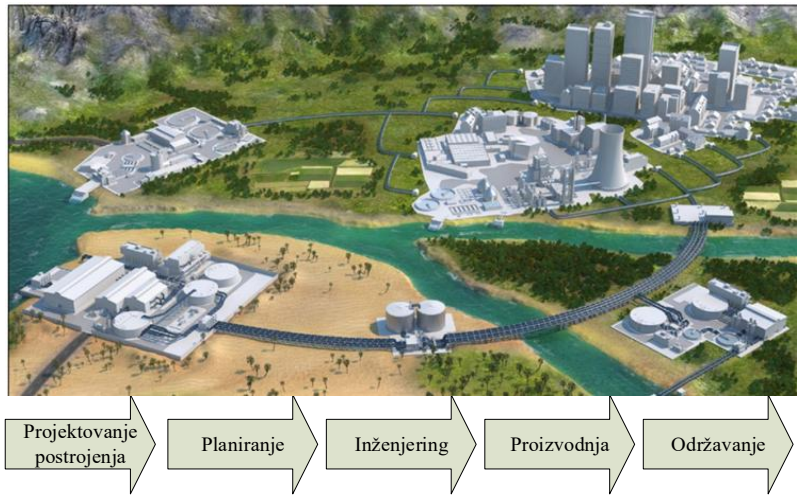
Svi koncepti od Industrije 1.0 do 4.0 odnose se na proizvodnu industriju, koja je relativno jednostavna: nešto se pravi i sklapa korišćenjem odvojenih delova. Na čelu koncepcije Voda 4.0 su digitalizacija i automatizacija, a cilj je efikasno, fleksibilno i konkurentno upravljanje vodnim resursima. Voda 4.0 pruža visok stepen transparentnosti za korisnike, čime pokriva trenutne potrebe i pruža mogućnosti za održive aktivnosti u upravljanju vodama. Implementacija Vode 4.0 putem sajber-fizičkih sistema postiže optimalnu vezu virtuelnih i stvarnih vodovodnih sistema, pri čemu se planiranje, izgradnja i rad u velikoj meri obavljaju pomoću softvera.

4. Realizacija koncepta Voda 4.0

Ostvarivanje koncepta Voda 4.0 (inteligentna vodoprivreda ili jednostavno efikasna eksploatacija vodnih resursa), koji je neophodan za budućnost sektora, može se postići primenom osnovnih principa Industrije 4.0. Međutim, postoji nekoliko prepreka uspešnoj implementaciji pristupa koje treba razmatrati ne na nivou kompanije, već na nivou industrije u celini. Prva od ovih prepreka odnosi se na protokole komunikacije - do sada su vodovodni i kanalizacioni sistemi uglavnom radili sa analognim signalima i Profibus protokolom u većim instalacijama, a budući koncepti su više fokusirani na Ethernet [10, 15, 16].

Veliki broj tehničko tehnoloških celina koji su u sastavu jednog vodovodnog sistema (izvorišta, brane, rečni vodozahvati, bunarska postrojenja, rezervari, pumpna postrojenja, transportni cevovodi i dr. često raspoređeni na velikim prostranstvima i međusobno udaljenim lokacijama) poseduju senzore za merenje raznih procesnih veličina i parametara (nivo, pritisak, protok, temperatura, koncentracija štetnih elemenata poput mangana, gvožđa, arsena i sl, hemikalija – hlora, fluora, aluminijum sulfata). Dostignuća u tehnologiji senzora i bežičnih protokola komunikacije omogućili su primenu IoT u raznim granama industrije. To je slučaj i sa sektorom vodovoda i kanalizacije. Podaci se sa senzora šalju preko bežičnih mreža do baznih stanica. U novije vreme sve veću popularnost i primenu ima LoRa (Long-

Range) protokol. Više stotina miliona IoT uređaja u više od sto zemalja povezano je u LoRa mrežni sistem komunikacije, koji omogućava prenos podataka na veće daljine (do 10 km) uz malu potrošnju energije. Prema predviđanjima preko 50% IoT uređaja koristiće LoRa protokol tokom 2026. godine LoRa radi sa spektrom frekvencijskih opsega. U našoj zemlji koriste se frekvencijski opsezi 433 MHz i 868 MHz, pri čemu nisu potrebne posebne dozvole ako se ne prelazi maksimalna dozvoljena transmisiona snaga. LoRa podržava upotrebu različitih širina propusnih opsega počevši (od 7,8 kHz do 500 KHz) čime je omogućen rad većeg broja nezavisnih mreža u različitim delovima frekvencijskog opsega. Brzina prenosa podataka proporcionalna je širini propusnog opsega. Najveće brzine prenosa postižu se korišćenjem propusnog opsega od 500 KHz, ali u tom slučaju moguć je rad maksimalno dve do tri nezavisne mreže po frekvencijskom opsegu. Treba imati u vidu da domet bežične komunikacije između predajnika i prijemnika zavisi od gubitaka na putanji prostiranja signala. Ovi gubici rastu s kvadratom razdaljine u prostoru bez prepreka, dok u brdskim ili urbanim područjima zbog raznih prepreka gubici rastu znatno brže, sa eksponentom koji je u opsegu od 3 do 5 [12]. Na slici 1 prikazana je konfiguracija vodovodnog sistema prema koncepciji Voda 4.0 [17].



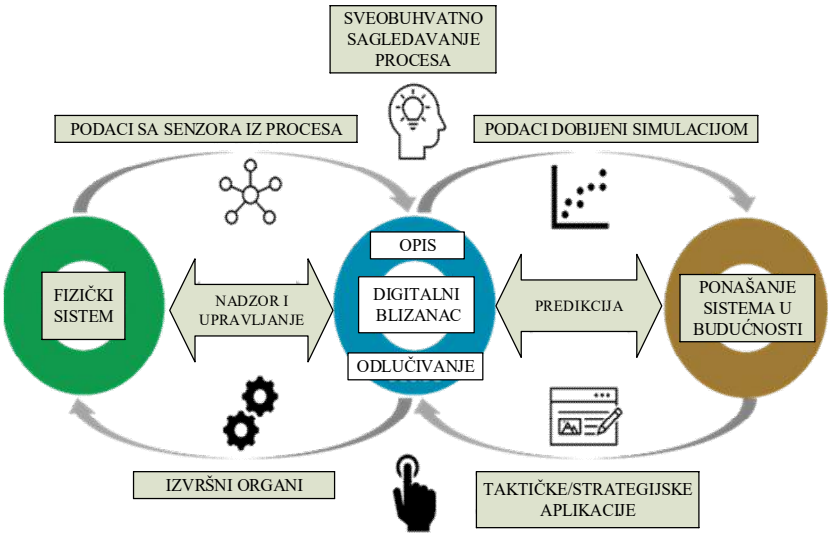
Slika 1. Voda 4.0 – Skica kompleksnog vodovodnog sistema
Figure 1. Water 4.0 - Sketch of a complex water supply system

Drugi problem je sajber bezbednost, koja postaje veoma ozbiljno pitanje. Obezbeđivanje potpune bezbednosti je apsolutna neophodnost za svakoga ko koristi cloud ili IoT okruženja. Problem postaje još važniji i relevantniji s obzirom na hakerske napade. Takvi napadi povezani npr. s doziranjem hemikalija, mogu imati ozbiljan uticaj na korisnike vodovodnih usluga ili životnu sredinu [18]. Treći izazov za implementaciju koncepta je kvalitet alata i podataka i eliminisanje situacija u kojima postoji mnogo dostupnih podataka, ali se ne izvlače korisne informacije. Vodoprivreda ima raznovrsnu opremu i uređaje koji generišu ogromnu količinu podataka, koji ne pružaju uvek osnovu za preduzimanje potrebnih akcija. Stoga je neophodno preći na pristup koji obezbeđuje dostupnost bogatih i tačnih

informacija, ali u razumljivom i lako dostupnom formatu. Ovo naravno zahteva ulaganje, instalaciju, upravljanje i pravilno održavanje odgovarajuće opreme. Voda 4.0 nudi ogroman potencijal za optimizaciju upravljanja sistemima vodoprivredne infrastrukture i postizanje racionalnog i efikasnijeg korišćenja resursa (npr. energije, vode, radne snage), u kombinaciji s poboljšanom bezbednošću vodosnabdevanja i prečišćavanja otpadnih voda. Studije pokazuju da je ključna tačka u umrežavanju i automatizaciji vodoprivredne infrastrukture povezana sa obrazovanjem, obukom i veštinama svih zaposlenih koji su uključeni u stvaranju vrednosti. Da bi se ispunili novi zahtevi, trebalo bi utvrditi koje su tačno veštine potrebne i kako usavršavati znanje uključenih subjekata. U budućnosti i iskusno i novozaposleno osoblje moraće da se nosi s novom situacijom, uz potrebu da se obrazovanje i obuka fokusiraju na aktuelne izazove. Implementacija Vode 4.0 je evolutivni proces - postojeće osnovne tehnologije i stručnost moraju se prilagoditi posebnim potrebama vodoprivrede, naročito u međunarodnom kontekstu.

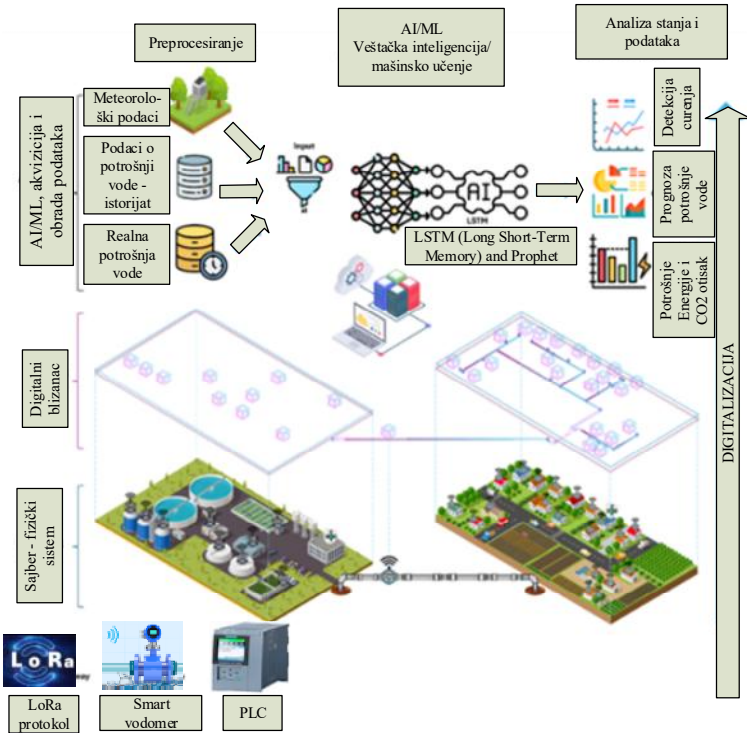
5. Digitalni blizanci u sektoru vodosnabdevanja i kanalizacije

U svojim nastojanjima da obezbede pouzdane, stabilne i pristupačne sisteme, kompanije za vodosnabdevanje i kanalizaciju suočavaju se s problemima kao što su rastuće cene električne energije, amortizovana infrastruktura, nestašice i gubici vode, prirodne katastrofe povezane s klimatskim promenama itd. Rešenja za ove probleme su podjednako brojna i raznolika – od javno-privatnih partnerstava do svesti o potrebi očuvanja vodnih resursa i primeni pametnih tehnologija.



Slika 2. Dijagram digitalnog blizanca, gde leva strana predstavlja operativne aplikacije (sadašnjost), a desna strana taktičke i strateške aplikacije (šta ako i budući scenariji)
Figure 2. Digital twin diagram, with the left side representing operational applications (present) and the right side tactical and strategic applications (what if and future scenarios)

Dostupnost kvalitetnih podataka je od fundamentalnog značaja za donošenje optimalnih odluka. Preduzeća u sektoru vodosnabdevanja i kanalizacije nastoje da pronađu efikasan način kako bi koristili podatke koje već imaju i one koji se redovno prikupljaju, a često su izolovani u nepovezanim IT rešenjima, tabelama i papirnim evidencijama. Digitalizacija podataka i poslovnih procesa koje ona podržava može pomoći pomenutim preduzećima da maksimalno iskoriste podatke prilikom donošenja odluka, povećaju efikasnost i kvalitet usluga koje nude. Jedan od najmoćnijih alata u ovoj oblasti je tehnologija digitalnih blizanaca. Na slici 2 prikazana je uloga digitalnog blizanca u kreiranju savremenog vodovodnog sistema [17].



Slika 3. Digitalni blizanac u konfiguraciji distributivne mreže vodovodnog sistema
Figure 3. Digital twin in configuration of the distribution network of water supply system

Slika 3 prikazuje ulogu digitalnog blizanca u platformi optimalne distribucije vode [17]. Digitalni blizanac je virtuelni prikaz fizičke opreme, procesa ili sistema. Kreiranje digitalnog blizanca sistema za vodosnabdevanje i kanalizaciju podrazumeva integraciju virtuelnih inženjerskih modela s realnim modelima i GIS podacima. Pored toga, digitalni blizanci se kontinualno ažuriraju operativnim podacima iz SCADA sistema, senzora, merača itd. To je ono što razlikuje digitalne blizance od statičkih 3D modela. Krajnji rezultat je inteligentan i povezan model digitalne infrastrukture koji podržava planiranje, projektovanje, izgradnju i rad pametnih vodovodnih i kanalizacionih mreža. Digitalni blizanci sistema za vodo-

snabdevanje i kanalizaciju pružaju tačne i pouzdane podatke koje preduzeća mogu koristiti za analize „šta ako“ i za donošenje odluka tokom životnog ciklusa sistema - od dugoročne prognoze npr. kapaciteta do neposrednog praćenja operativnih parametara i reagovanja u slučaju havarija. Uvođenjem modela hidrauličnih karakteristika sistema i kvaliteta vode koji odražava postojeće uslove, digitalni blizanci omogućavaju simulaciju događaja kao što su kvarovi cevovoda, nestanak struje, požari, zagađenje itd. Kao rezultat toga, vodovodna preduzeća mogu analizirati otpornost svojih sistema i proceniti odgovarajuće rizike. Digitalni blizanci efikasno koriste podatke iz različitih sistema upravljanja, čime podržavaju strateško upravljanje opremom na osnovu procene rizika. Ove prednosti doprinose optimizaciji troškova, produžavanju veka opreme i davanju prioriteta određenim projektima u cilju poboljšanja rada. Kontinualno ažuriranje digitalnih blizanaca s najnovijim operativnim podacima pomaže komunalnim preduzećima da lociraju potencijalna curenja i smanje gubitke vode.

Većina vodovodnih preduzeća već ima hidraulični model svog sistema, koji se koristi za planiranje i projektovanje. Integracijom hidrauličnih modela s podacima iz SCADA sistema digitalni blizanci omogućavaju određivanje svojstava sistema vodosnabdevanja koja se ne mogu direktno meriti. Ovo pruža potpuniji uvid u sistem, što može pomoći u povećanju bezbednosti i smanjenju havarija (npr. pucanja cevovoda).

6. Zaključak

S pojavom digitalizacije sve više procedura, alata i drugih resursa postaje dostupno, što doprinosi novoj eri u upravljanju vodama. Kao i druge industrije i vodoprivreda je u mogućnosti da dodatno poboljša svoju buduću konkurentnost savremenom automatizacijom. Kroz povećanu implementaciju IT tehnologija, senzora i aplikacija za modeliranje, stvaraju se mogućnosti za bolje razumevanje sistema upravljanja vodama u smislu njihove složenosti. Integracija procesa planiranja i rada uz pomoć inteligentnog hardvera, softvera i nezavisne razmene informacija (od potrošača do pojedinačnih komponenti pa sve do preduzeća za vodosnabdevanje i kanalizaciju) postaje sve neophodnija za postizanje visoke produktivnosti i efikasnog korišćenja resursa. Internet stvari i usluga takođe igra važnu ulogu u ovim sistemima u realnom vremenu, jer podatke o procesima i karakteristikama vezanim za vodu čine trajnijim, dostupnijim i upotrebljivijim kad god i gde god je potrebno. Takođe je moguće dalje umrežiti druge podatke (npr. kratkoročne i dugoročne informacije o vremenskim prilikama) kako bi se pripremile prognoze koje se mogu uneti u upravljačke algoritme za procese u vodovodnom sektoru. Važna karakteristika sadašnje faze razvoja kako Industrije 4.0 tako i Vode 4.0 je spajanje realnih i virtuelnih modela u sajber-fizičke sisteme. Ovo se ogleda u povezivanju senzora, računarskih modela i kontrolera u realnom vremenu sa stvarnim vodovodnim sistemima korišćenjem pametnih mreža i intraneta/interneta. Odvija se povezivanje procesa, mera i tehnologija u IT sistem, pri čemu se uključuju klasične, proverene metode, kao i novi, inovativni pristupi. Mogu se implementirati i kao centralizovana i kao distribuirana rešenja. Jedini preduslov je postojanje razmene podataka i informacija, koje se beleže onlajn ili unose oflajn (ručno) u digitalni model određenog sistema, kao i interakcije između virtuelnog i realnog sistema. Voda 4.0 je interakcija inovativnih, sadašnjih i budućih mrežnih tehnologija, u kojima se voda posmatra kao prirodni

resurs, proizvod ili sirovina, s ciljem održivog upravljanja, korišćenja i smanjenja rizika, uzimajući u obzir interese svih direktnih i indirektnih korisnika i zainteresovanih strana. Umrežavanje sistema upravljanja i merenja s rešenjima za analizu podataka i modeliranje dovodi do dobijanja informacija koje podržavaju ili pružaju osnovu za donošenje odluka, sprovođenje mera i praćenje njihovog funkcionisanja u vodovodnom sistemu. Pored toga, informacije prikupljene tokom vremena mogu pružiti nove načine za obezbeđivanje efikasnijeg korišćenja vode u različitim oblastima primene. Ovo čini Vodu 4.0 holističkim pristupom koji procenjuje digitalne podatke i koristi ih za predviđanja, oslanjajući se na podatke iz drugih tehničkih oblasti, omogućavajući tako donošenje održivih odluka. Koncept Voda 4.0 nije statičan, već prati tehnički razvoj i koristi nove mogućnosti koje se pružaju. Izbor prave komunikacione mreže takođe nije lak, zbog broja konkurentskih mreža dostupnih na tržištu. Iako moderne IIoT tehnologije čine daljinsko praćenje udaljenih lokacija pristupačnijim u poređenju sa zastarelim telemetrijskim rešenjima, investicija u njih je značajna. Pozitivna činjenica je da je period povrata investicije otprilike godinu dana. Međutim, sama onlajn infrastruktura predstavlja pretnju po bezbednost opreme vodovodnih kompanija i povezana je s rizikom od zloupotreba. Internet stvari može biti jedan od najvažnijih pristupa u razvoju upravljanja komunalnim sistemima, što će doprineti efikasnijem korišćenju vodnih resursa. IoT rešenja za praćenje i upravljanje vodom pružaju mogućnost prikupljanja podataka sa velikog broja uređaja, analize i slanja podataka ili obrađenih rezultata različitim aplikacijama ili drugim uređajima, što omogućava optimizaciju procesa upravljanja i sprečavanje ili ograničavanje mogućih havarija.

7. Literatura

[1] Stankov S, Control of Pumping Stations in Water Supply Systems, *Voda i sanitarna tehnika*, godina XLI, br. 3-4, juni–septembar 2011, str. 47-54, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo Beograd, 2011.

[2] https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:782cf8bb-2fe7-4232-9b0e-49a7fbcc2b64/vrws-b10003-00onepagerdigi-waterleakenus-144.pdf

[3] https://www.iwra.org/wp-content/uploads/2024/03/Bora-Helvaci_IWRA-digital-transformation.pdf

[4] https://www.vertexgrp.com/solutions/water/ai-monitoring/

[5] https://plm.sw.siemens.com/en-US/insights-hub/

[6] https://www. .com/us/en/industries/water.html

[7] https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/digital-applications-and-services-for-process-industries.html

[8] https://www.youtube.com/@SiemensKnowledgeHub

[9] https://www.sw.siemens.com/en-US/

[10] Stankov S, Sistem nadzora i upravljanja postrojenjem za prečišćavanje vode, *Vodoprivreda*, broj 4-6, vol. 50, str. 319-332, Srpsko društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje, Beograd, 2018.

[11] Stankov S, Water Purification in the Process Industry, *Trideset sedmi međunarodni kongres o procesnoj industriji PROCESING 24*, Beograd, 29–31 maj, Zbornik radova, str. 121-140, DOI: 10.24094/ptk.024.121, Izdavač: SMEITS, Društvo za procesnu tehniku Beograd, 2024.

[12] Stankov S, Modern Concepts of Supervisory Control Systems Based on PLC and SCADA Configuration, Part of the book *New Trends in Engineering Research 2024*, **v**ol. 1216**,** pp. 289–313, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-78635-8_24, Publisher: Springer, Cham. 2024.

[13] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-78635-8_24 Stankov S: Savremen način upravljanja procesom proizvodnje mineralne vune, časopis Hemijska industrija, vol. 67, br. 2, 2013, str. 375 - 384, DOI: 10.2298/HEMIND120428069S, Izdavač: Institut SANU, Beograd, Srbija, 2013. https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0367-598X/2013/0367-598X1302375S.pdf

[14] Stankov S, Big Data in Water Supply and Sewerage System, journal *Acta Technica Corviniensis–Bulletin of Engineering*, Tome XV, Fascicule 1 [January–March], pp. 21–25, University Politehnica Timisoara, Faculty of engineering Hunedoara, Romania, 2022. https://acta.fih.upt.ro/-pdf/2022-1/ACTA-2022-1-03.pdf

[15] Stankov S, Automation and Industry 4.0, *Journal Acta Technica Corviniensis–Bulletin of Engineering*, Tome XIV, Fascicule 2 [April–June], pp. 59-63, University Politehnica Timisoara, Faculty of engineering Hunedoara, Romania, 2021. https://acta.fih.upt.ro/pdf/2021-2/ACTA-2021-2-10.pdf

[16] Stankov S, Development of Automation in the Direction of Hyperautomation, *Journal Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, Volume XXI, fascicule 1, pp. 179-184, University politehnica Timisoara, Faculty of engine-ering Hunedoara, Romania, 2024. https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2024/ANNALS-2024-1-23.pdf

[17] https://germanwaterpartnership.de/wp-content/uploads/2019/05/GWP_Brochure_Water_4.0.pdf

[18] Stankov S, Security and protection of supervisory control systems in light of industry 4.0, 1*9th International Conference "Man and Working Environment" - Occupational and Environmental Safety Engineering & Management (OESEM)*, Proceedings, Faculty of Occupational Safety, University of Niš, Niš, November, pp. 299–306, 24–25. 2022. https://www.znrfak.ni.ac.rs-/oesem2022/assets/Proceedings/OESEM%202022%20Conference%20Proceedings.pdf

Ognjen Ivić[1]

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/VIK25345I

PROJEKCIJA I ANALIZA POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U VODOSNABDEVANJU NASELJA BAČKI VINOGRADI KORIŠĆENJEM ISTORIJSKIH PODATAKA I MODELA MAŠINSKOG UČENJA (2022–2024)

Rezime: Rad prikazuje projekciju i analizu potrošnje električne energije u vodosnabdevanju naselja Bački Vinogradi, Subotica (2022–2024). Korišćeni su istorijski podaci o VTA, NTA, VTR, NTR mesečnom obračunu struje i potisnute količine vode (m^3). Primenjeni su modeli Linearna i Polinomijalna regresija, K-Nearest Neighbors, Decision Tree, Random Forest, kao i ARIMA modeli vremenskih serija. Regresioni i mašinski modeli omogućavaju predviđanje mesečne potrošnje na osnovu parametra m^3 i prethodnih vrednosti reaktivne struje, dok ARIMA model koristi vremenske serije za dinamičku prognozu. Analiza uključuje upoređivanje predviđenih i realnih vrednosti, identifikaciju najpreciznijih modela i vizualizaciju rezultata radi optimizacije potrošnje.
Ključne reči: potrošnja energije, vodosnabdevanje, mašinsko učenje, regresioni modeli, ARIMA prognoza

PROJECTION AND ANALYSIS OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN THE WATER SUPPLY SYSTEM OF BAČKI VINOGRADI USING HISTORICAL DATA AND MACHINE LEARNING MODELS (2022–2024)

Abstract : This study presents the projection and analysis of electricity consumption in the water supply system of Bački Vinogradi, Subotica (2022–2024). Historical data were used for VTA, NTA, VTR, NTR, monthly electricity billing and pumped water volumes (m^3). For prediction, Linear and Polynomial Regression, K-Nearest Neighbors, Decision Tree, Random Forest, and ARIMA time series models were applied. Regression and machine learning models enable forecasting of monthly consumption based on the m^3 parameter and previous reactive power values, while the ARIMA model uses time series for dynamic forecasting. The analysis includes a comparison of predicted and actual values, identification of the most accurate models, and visualization of results aimed at optimizing consumption.
Key Words: Energy consumption, Water supply, Machine learning, Regression models, ARIMA forecasting

1. Uvod

Ovaj rad analizira, predviđa i planira potrošnju parametara procesa proizvodnje vode na primeru manje Fabrike za preradu pitke vode u naselju Bački Vinogradi u Subotici, u periodu

[1] *JKP „Vodovod i kanalizacija“ Subotica, ognjen@vodovodsu.rs, ORCID: 0009-0005-3005-512X*

2022–2024. Istorijski podaci koji se koriste uključuju potrošnju električne energije cele fabrike, izraženu u kilovat-satima (kWh) za aktivnu struju i kilovolt-amper reaktivne (kVArh) za reaktivnu struju, obračun troškova (u rsd) i količinu potisnute vode (m³). Aktivna struja (viša/niža tarifa -VTA/NTA) predstavlja energiju koja se stvarno troši za rad celokupne fabrike i pokretanje procesa potiskivanja vode u naselje, dok reaktivna struja (viša/niža tarifa - VTR/NTR) ne vrši koristan rad već je potrebna za održavanje elektromagnetnih polja u motorima i transformatorima. Praćenje oba tipa struje u odnosu na potisnutu količinu vode omogućava analizu efikasnosti fabrike i optimizaciju potrošnje energije. Podaci se kombinuju u jedinstvene vremenske serije, kako bi se omogućila precizna analiza.

Korišćenje istorijskih podataka omogućava modelima mašinskog učenja da iz stvarnih obrazaca potrošnje, identifikuju sezonske varijacije i predvide buduće vrednosti sa većom preciznošću nego jednostavne statističke metode. U radu se primenjuju različiti modeli, linearni i polinomski regresioni modeli, „stabla“ odluke, RandomForest, KNN i ARIMA model za vremenske serije. Ovo omogućava poređenje performansi, identifikaciju najboljih metoda za svaki tip podataka i smanjenje greške.

Algoritam je razvijen i implementiran u okviru programskg jezika Python, gde je moguće vršiti manipulaciju podacima i izvođenje matematičkih operacija nad nizovima podataka. Za izradu, treniranje i evaluaciju modela mašinskog učenja primenjene su različite metode iz „biblioteke“. Za analizu vremenskih serija korišćen je ARIMA model. Modeli se kasnije čuvaju i učitavaju, omogućavajući ponovno korišćenje najboljih modela bez potrebe za ponovnim treniranjem. Ovaj pristup omogućava autoru da kombinuje različite modele, analizira njihove performanse i obezbedi precizna predviđanja potrošnje energije i optimizaciju upravljanja resursima [1, 2, 3, 4].

2. Prikupljanje i priprema podataka

U pripremi podataka, prvobitno se kreiraju posebni skupovi podataka za svaku godinu (2022, 2023, 2024), gde su vrednosti mesečno raspoređene po kolonama: VTA, NTA, VTR, NTR, OBRACUN i potisnuta količina vode (m³). Za period 2022. godine prisutni su nedostajući podaci, označeni kao *NaN*, koji se naknadno popunjavaju tehnikama poput „backfill“ (popunjavanje vrednostima iz narednih meseci) ili zamenom nulom, kako bi se obezbedila potpuna i stabilna matrica podataka pogodna za treniranje modela. Mesečni podaci se kombinuju u jedinstvenu vremensku seriju koja obuhvata sve tri godine. Svakom mesecu dodeljuje se numerički kod (MesecNum od 1 do 12), što omogućava lakše korišćenje u regresionim i modelima vremenskih serija, jer algoritmi mogu direktno uočiti sezonske obrasce [2].

Za reaktivnu energiju, kreirane su i lag vrednosti prethodnog meseca (VTR_lag1 i NTR_lag1), koje se koriste kod ARIMA i regresionim modelima zavisnim od prošlih vrednosti. Lag vrednosti omogućavaju modelima da predvide buduće potrošnje na osnovu istorijskih obrazaca, čime se poboljšava preciznost sezonskih i vremenskih prognoza. Nakon konsolidacije, podaci se razdvajaju nazad u godišnje skupove (df_2022, df_2023, df_2024), što omogućava i uporedivu analizu po godinama, ali i pripremu ulaznih matrica (X) i izlaznih vektora (Y) za svaki cilj: VTA, NTA, VTR, NTR i OBRACUN. Za modele reaktivne energije (VTR, NTR) ulazne matrice uključuju i prethodnu vrednost (lag kolone), dok je za aktivnu

energiju i obračun dovoljan samo mesec i količina potisnute vode (m^3). Kombinacija više modela omogućava upoređivanje njihove tačnosti, uočavanje najbolje strategije u planiranju i optimizaciji troškova potrošnje u procesu vodosnabdevanja. Sve ove pripremne procedure osiguravaju da podaci budu čisti, kompletni i spremni za preciznu analizu.

3. Analiza i poređenje modela predviđanja potrošnje energije

Modeli predviđaju potrošnju energije i obračun na osnovu mesečnih podataka i potrošnje vode. Najbolji model se bira po najmanjem apsolutnom odstupanju predviđanja od realnih vrednosti.

3.1. Linear Regression (Linearna regresija)

Linearna regresija se koristi za direktne proporcionalnosti između nezavisnih promenljivih (mesec, m^3 vode) i zavisne promenljive (VTA, NTA, VTR, NTR, OBRACUN). Model se opisuje formulom: $y=\beta_0+\beta_{1x1}+\beta_{2x2}+\cdots+\beta_{nxn}+\epsilon$, gde su x_i ulazne promenljive, β_i koeficijenti regresije, a ϵ greška. Linearni model je pogodan za stabilne, linearnim obrascima potrošnje, posebno kod aktivne energije i obračuna.

3.2. Polynomial Regression (Polinomska regresija)

Polinomska regresija proširuje linearnu regresiju uključivanjem viših stepena promenljivih, što omogućava kreiranje nelinearnih obrazaca potrošnje: $y=\beta_0+\beta_1x+\beta_2 x^2+\cdots+\beta_d x^d+\epsilon$, gde d predstavlja stepen polinoma. Ovaj model se koristi kada se potrošnja menja sezonski ili nelinearno u zavisnosti od meseca i volumena potisnute vode.

3.3. Decision Tree (Drvo odlučivanja)

Decision Tree model pravi hijerarhijsku podelu podataka prema vrednostima ulaznih promenljivih i predviđa izlaz u listovima. Algoritam minimizira varijansu u listovima i može uhvatiti kompleksne nelinearne obrasce kada se koristi posebno za reaktivnu energiju (VTR, NTR), gde se odnosi ne manifestuju linearnom formom i prednost je jednostavnost interpretacije i sposobnost hvatanja interakcija između meseca i m^3 vode.

3.4. Random Forest (Slučajna šuma)

Random Forest kombinuje više Decision Tree modela kako bi smanjio varijansu i poboljšao tačnost. Svako stablo trenira se na nasumičnom uzorku podataka i podskupu promenljivih, a konačna vrednost se računa kao prosek predviđanja svih stabala:

$$\hat{y} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h_t(x)$$

gde je T broj stabala, a $ht(x)$ predviđanja unutar stabla t. Ovaj model je robustan i koristi se za sve varijable sa većom složenošću i sezonskim fluktuacijama.

3.5. K-Nearest Neighbors (KNN)

KNN predviđa vrednost zavisne promenljive kao prosečnu vrednost K najbližih suseda u prostoru ulaznih promenljivih:

$$\hat{y} = \frac{1}{K} \sum_{i \in Nk(x)} y_i$$

gde *Nk(x)* označava skup K najbližih suseda tačke *x*. KNN se koristi za reaktivnu energiju, gde obrasci zavise od lokalnih istorijskih vrednosti i teško ih je aproksimirati linearnim modelom.

3.6. ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)

ARIMA model predviđa buduće vrednosti vremenskih serija na osnovu prethodnih vrednosti (autoregresija), srednjih promena (integracija) i prosečnih grešaka (*moving average*):

$$yt = c + \phi_1 y_{t-1} + \cdots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \cdots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t$$

ARIMA se koristi za VTR i NTR sa *lag* vrednostima, kako bi se iskoristili sezonski i trendovski obrasci u potrošnji. Za analizu potrošnje električne energije i obračuna troškova fabrike vode primenjeni su različiti regresioni i modeli vremenskih serija, sa ciljem predviđanja buduće potrošnje i optimizacije troškova.

4. Prednosti i mane različitih modela predviđanja

Linearna regresija koristi se za podatke sa stabilnim, linearnim obrascima, poput aktivne energije i ukupnog obračuna. Prednost je jednostavnost i lakoća interpretacije, dok ne hvata nelinearne ili sezonske obrasce. Polinomska regresija proširuje linearnu regresiju i omogućava modelovanje sezonskih ili nelinearnih obrazaca potrošnje. Prednost je preciznije praćenje krive, a mana je osetljivost na preterano prilagođavanje podacima. Decision Tree modeli se mogu koristiti za reaktivnu energiju (VTR, NTR), hvatajući kompleksne interakcije između meseca i m^3 vode.

Prednost je interpretabilnost, a mana je osetljivost na male promene u podacima. Random Forest kombinuje više stabala radi veće tačnosti i otpornosti na šum, ali je slabije pregledan i sporije se trenira. K-Nearest Neighbors (KNN) predviđa vrednosti na osnovu proseka najbližih suseda, pogodan za lokalne istorijske obrasce. Prednost je fleksibilnost i jednostavnost, a mana spora obrada kod velikih skupova podataka. ARIMA se koristi za vremenske serije, predviđajući buduće vrednosti reaktivne energije i hvata sezonske i trendovske obrasce, ali zahteva stacionarnost podataka i pažljiv izbor parametara.

5. Princip rada modela i algoritma

Kada korisnik unese mesec, količinu vode (m^3) i stvarne vrednosti za svaku stavku (VTA, NTA, VTR, NTR, OBRACUN), program priprema podatke u odgovarajući oblik za svaki model. Za promenljive koje zavise od prethodnog meseca (VTR i NTR) dodaju se i *lag* vrednosti iz prethodnog perioda. Sklearn modeli se uče nad istorijskim podacima, gde ulaz predstavlja kombinaciju broja meseca (1–12) i potrošnje (m^3) za taj mesec. ARIMA modeli posebno uzimaju u obzir prethodne vrednosti ciljne promenljive za predviđanje vremenske serije. Evaluacija, ocena modela, sprovodi se deljenjem istorijskih podataka na trening i test skup. Trening skup služi za učenje modela, dok test skup omogućava procenu tačnosti predviđanja. Za kvantitativnu ocenu koriste se vrednosti greške:

- MAE (Mean Absolute Error) – prosečna apsolutna razlika između predviđenih i stvarnih vrednosti,
- RMSE (Root Mean Squared Error) – koren srednje kvadratne greške,
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – procentualna greška.

Pored numeričkih, vizualna evaluacija sprovodi se kroz grafički prikaz predviđanja, što omogućava procenu da li model prati trend stvarnih podataka. Za svaki cilj (VTA, NTA, VTR, NTR, OBRACUN) može postojati više modela. Odabir najboljeg modela vrši se na dva načina:

- Na osnovu apsolutne razlike između predviđene i stvarne vrednosti – model sa najmanjom apsolutnom razlikom koristi se za direktnu primenu na zadate ulazne vrednosti.
- Na osnovu ocene-evaluacije (MAE, RMSE, MAPE) – model sa najmanjim vrednostima predstavlja najbolji generalni model za predviđanje budućih vrednosti.

U prvom delu algoritma, svi modeli se prethodno treniraju i čuvaju zasebno, a ARIMA modeli kao nizovi sa istorijskim vrednostima. Korisnik bira ciljnu promenljivu i vidi predviđanja svih modela, pri čemu su najbolji modeli označeni i dostupni za dalje planiranje. Ovo omogućava kako trenutnu ocenu na osnovu stvarnih vrednosti, tako i korišćenje prethodno ocenjenih najboljih modela za automatsko predviđanje planiranja potrošnje u budućim periodima. U drugom delu koda implementiran je i grafički interfejs. Korisnik bira mesec, ciljnu promenljivu i model i unosi vrednosti planirane potrošnje vode za budućih 12 meseci. Planiranje i rezultati predviđanja se prikazuju tekstualno i grafički, omogućavajući vizualnu procenu trenda i odstupanja [3]. Ovaj pristup omogućava jednostavnu ocenu različitih modela i praktičnu primenu u praćenju i planiranju potrošnje željenog parametra, uz mogućnost proširenja ciljanih promenljivih i dodavanja novih modela bez značajnijih izmena koda.

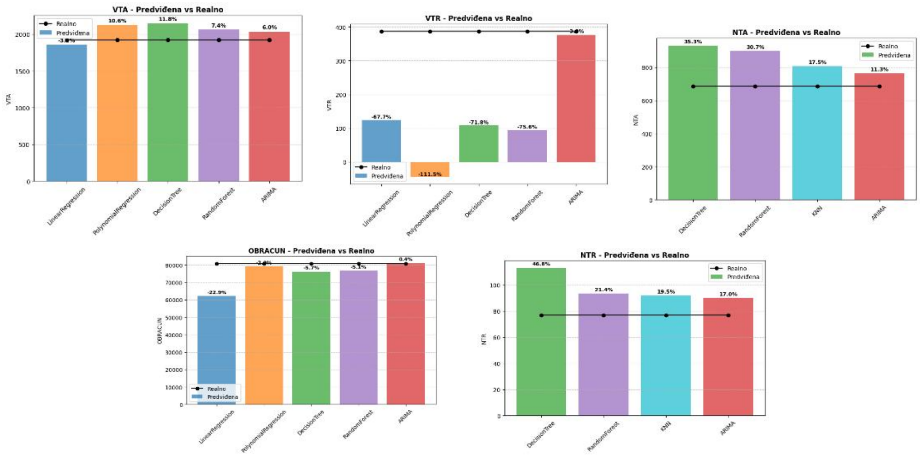
5.1. Dijagram predviđanja

Grafikoni „predviđanja/realno“ (slika 1), prikazuju predviđene vrednosti za različite modele u poređenju sa stvarnim vrednostima za odabrani mesec i količinu m³ (prime meseca januar 2025). Crna linija označava stvarnu vrednost koliko je očitano, dok ostale kolone („bar-ovi“) predstavljaju predviđanja pojedinih modela. Iznad svakog prikazana je procentualna razlika u odnosu na stvarnu vrednost (realnu).

Analiza procentualne apsolutne razlike, pokazuje koliko predviđanje svakog modela odstupa od stvarnih vrednosti u procentima. Za VTA, ARIMA model ima najmanju % razliku (6,03 %), što znači da je najprecizniji, dok Decision Tree i PolynomialRegression odstupaju preko 10 %, dajući manje tačne rezultate.

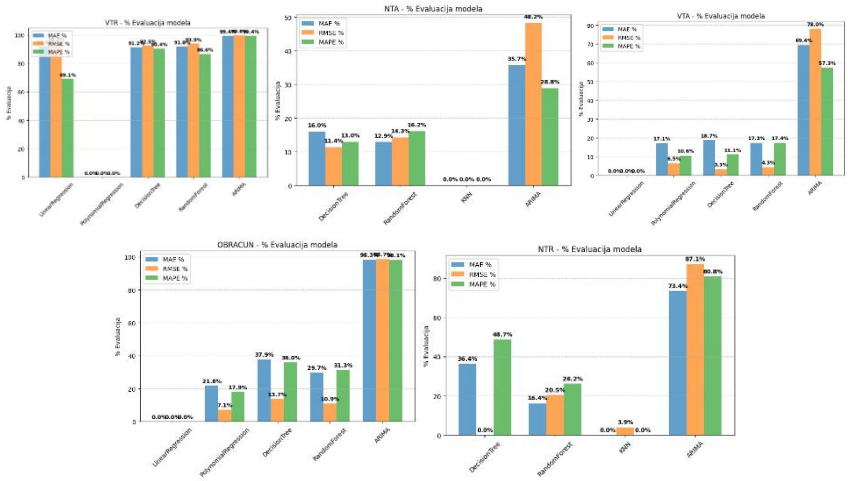
Kod NTA, ARIMA takođe ima najmanju % razliku (11,32 %), dok modeli poput Decision Tree i RandomForest pokazuju odstupanja preko 20–30 %. Kod VTR i NTR, linearni i složeni regresioni modeli pokazuju velike % razlike (VTR LinearRegression -67,74 %, PolynomialRegression -111 %), dok ARIMA model odstupa minimalno (-2,97 % za VTR, 16,98 % za NTR), što ukazuje na njegovu sposobnost u predviđanju promenljivih sa izraženim trendovima i sezonalnošću.

Za OBRACUN, ARIMA model odstupa samo 0,37 %, dok LinearRegression ima čak -22,89 %, što jasno pokazuje da % razlika omogućava brzo vizuelno i numeričko poređenje preciznosti modela — manja % razlika znači bolje predviđanje [4].



Slika 1. Dijagram predviđanja i realnih vrednosti na primeru mesec januar 2025.
Figure 1. Chart of predicted and actual values for the month of January 2025.

Ocena modela predviđanja (slika 2), rađena je pomoću MAE , RMSE i MAPE. Za VTA, Linear Regression ima najniže greške (MAE 0.0%, RMSE 0.0%, MAPE 0.0%), što pokazuje da su njegova predviđanja najbliže realnim vrednostima. Polynomial Regression i Decision Tree imaju veće greške (MAE 17–19%, RMSE 3–6%, MAPE 10–11%), dok ARIMA ima relativno visoke procente kod MAE i RMSE (69–78%), ali nizak MAPE (57.3%).



Slika 2. Dijagram rezultata evaluacije modela za mesec januar 2025.
Figure 2. Chart of model evaluation results for the month of January 2025.

Kod NTA, ARIMA ima MAE 35.7%, RMSE 48.2% i MAPE 28.8%, što je bolje od KNN kod naglih promena vrednosti (MAE 0%, RMSE 0%, MAPE 0% zbog specifične vrednosti), dok Decision Tree i Random Forest pokazuju umerene greške (MAE 12–16%, RMSE 11–14%, MAPE 13–16%). Za VTR, ARIMA je najprecizniji (MAE 99.4%, RMSE 99.8%, MAPE 99.4%), dok Linear Regression i Random Forest pokazuju velike odstupanja (MAE 91–92%, RMSE 94–94%, MAPE 69–86%).

5.2. Uticaj stabilnosti istorijskih podataka na preciznost prognoze

Modeli poput Linear Regression i Random Forest daju preciznija predviđanja i planiranja kod stabilnih istorijskih podataka, dok nagla oscilovanja ili manji setovi podataka zahtevaju pažljiv izbor modela, jer greške mogu značajno varirati (% greške jasno pokazuju koliko je model precizan).

Zaključak je da modeli linearnog tipa i ARIMA generalno bolje predviđaju kada istorijski podaci imaju stabilne trendove i sezonske obrasce, dok složeniji modeli ili stabla odluke mogu biti osetljivija na šum, što rezultira većim % razlikama i većim vrednostima MAE, RMSE i MAPE. U praksi, izbor modela zavisi od karaktera podataka: za stabilne istorijske serije može se preporučiti Linear Regression ili ARIMA, dok za nelinearne i promenljive podatke ensemble modeli mogu biti više korisniji, ali uz pažljivo podešavanje kako bi se izbeglo prekomerno prilagođavanje šumu.

Analizom istorijskih podataka za 2022–2024. godinu, primećuje se jasna razlika u ponašanju pojedinih serija podataka. Stabilne serije: VTA, NTA i OBRACUN pokazuju relativno stabilne mesečne trendove i sezonske obrasce. Ove karakteristike omogućavaju linearnim modelima i ARIMA da daju precizna predviđanja. Kod ovih serija, % razlike između predviđenih i stvarnih vrednosti su male, a ocena matrica (MAE, RMSE, MAPE) su niske, što potvrđuje visoku preciznost modela. VTR i NTR imaju velike skokove i nagle skokove u određenim mesecima (npr. VTR u aprilu 2024. je 1446, dok je prethodnog meseca samo 95).

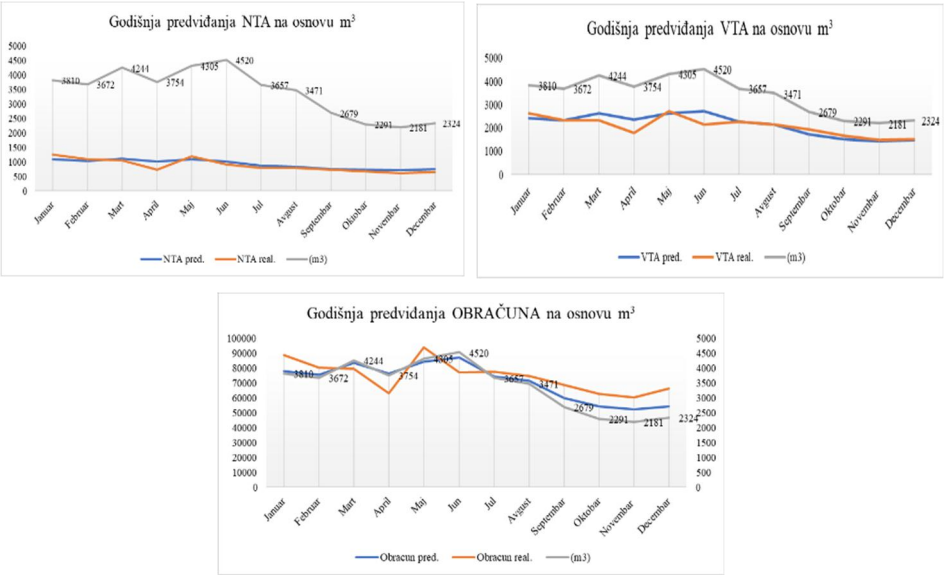
Za ovakve podatke, linearni modeli često zanemaruju ekstremne vrednosti, što rezultira većim % razlikama. Sa druge strane, modeli stabala i ensemble modeli (Decision Tree, Random Forest, KNN) mogu bolje pratiti kratkoročne promene, ali su osetljivi na šum, što povremeno povećava MAE, RMSE i MAPE. Korišćenje prethodnih vrednosti (lag) kod VTR i NTR pomaže modelima da prepoznaju kratkoročne trendove, što naročito poboljšava performanse ARIMA i stabala odluke.

5.3. Projekcija parametara na osnovu m^3 i realnih vrednosti

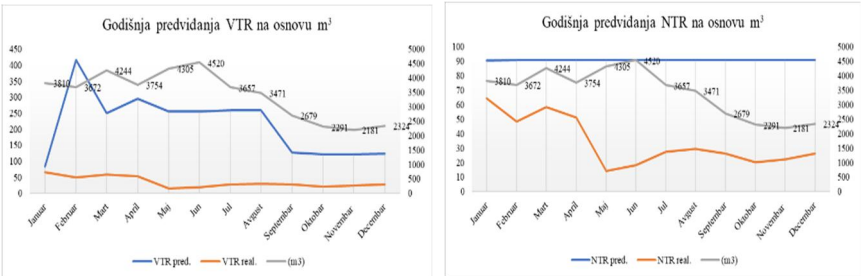
Poređenjem predviđenih vrednosti za VTA, NTA i OBRACUN sa realnim vrednostima u odnosu na mesečnu potrošnju (m^3) vidi se da modeli generalno prate sezonske trendove. U mesecima sa stabilnom potrošnjom, poput februara, jula i decembra, predviđanja su vrlo precizna, dok u mesecima sa naglim promenama, poput aprila i maja, modeli često precenjuju ili zanemaruju stvarne vrednosti.

Ovo pokazuje da količina vode (m^3) dobro predviđa utrošak i potrošnju, ali da bi preciznost mogla biti poboljšana uključivanjem dodatnih faktora ili prethodnih vrednosti. Linear Regression i ARIMA najbolje predviđaju stabilne trendove, dok složeniji modeli mogu biti osetljiviji na šum i kratkoročne promene.

Zaključak je da za stabilne istorijske podatke linearnim modelima možemo dobiti pouzdane vrednosti za planiranje, dok promenljivi meseci zahtevaju dodatnu pažnju pri modeliranju.



Slika 3. Dijagram rezultata predviđanja VTA,NTA i Obračuna u odnosu na realnu za 1 godinu
Figure 3. Diagram of the predicted results for VTA, NTA, and OBRACUN compared to the actual values over one year.



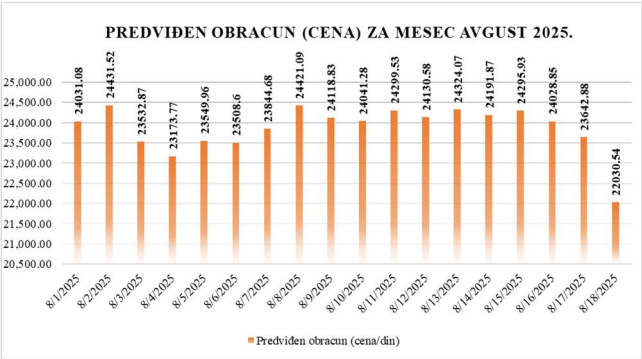
Slika 4. Dijagram prikaza rezultata predviđanja VTR,NTR za 1 godinu
Figure 4. Chart displaying the prediction results of VTR and NTR for one year.

Analiza VTR i NTR pokazuje velika odstupanja između predviđenih i stvarnih vrednosti. Realne vrednosti su male (14–64 m³), dok predviđanja često precenjuju ili ostaju konstantna (npr. NTR ≈ 90 m³), ovo ukazuje da modeli ne prate dinamiku i sezonske promene. Problem je delimično u ulaznim podacima (nula kao početna vrednost) i pristrasnosti zbog treninga na većim vrednostima. Za preciznije vrednosti, preporučuje se korišćenje stvarnih prethodnih vrednosti, dodatnih feature-a (sezonski indikatori, trend), skaliranje

podataka ili razvoj specifičnih modela za male vrednosti. Planiranje obračuna potrošnje električne energije pokazuje relativno dobro slaganje sa stvarnim vrednostima. Ukupna predviđena planirana godišnja vrednost iznosi 849.993,59 din, a stvarna 891.321,16 din (primer 2023.godina), što predstavlja odstupanje od oko 4,6%. Model uspešno prati sezonski trend potrošnje, pa su mesečne oscilacije u predviđanjima uglavnom u skladu sa realnim promenama. Ipak, u pojedinim mesecima primećuju se veća odstupanja, poput aprila i maja, gde su razlike izraženije, što može ukazivati na uticaj specifičnih faktora (npr. vremenski uslovi, promena u režimu potrošnje) koji nisu obuhvaćeni postojećim modelom. Uprkos tim odstupanjima, ovakva tačnost je dovoljna za potrebe planiranja budžeta i proceni troškova, posebno u situacijama gde je važnija procena trenda nego potpuno precizna mesečna vrednost. Predviđanja za VTA (viša tarifa aktivne struje) i NTA (niža tarifa aktivne struje) pokazuju relativno dobro slaganje sa stvarnim vrednostima, uz mala ukupna godišnja odstupanja – za VTA razlika iznosi oko 699 kWh (≈2,8%), a za NTA oko 508 kWh (≈4,9%). Model uspešno prati sezonski obrazac potrošnje, pri čemu su predviđene i realne vrednosti bliske u većini meseci.

5.4. Automatizovana predviđanja obračuna (cene) koristeći (m^3) iz SCADA podataka

Ovaj algoritam takođe omogućava praćenje i predviđanje obračuna (cene) potisnute količine vode po danima i mesecu koristeći podatke iz SCADA sistema, slika 5. Iz fajlova se izdvajaju vrednosti protoka vode (Modbus1.Izlazni_protok) i izračunava se zapremina u m^3 po danima. Za svaki dan se koristi sačuvani najbolji željeni model (LinearRegression), kako bi se predvideo obračun za taj dan. Na osnovu ukupne zapremine za ceo mesec računa se i sumarni predviđeni obračun. Algoritam omogućava stalno osvežavanje vrednosti za današnji fajl (18.08.2025.), što omogućava praćenje u realnom vremenu.



Slika 5. Dijagram prikaza dnevnih predviđanja obračuna (cene) za mesec avgust 2025.
Figure 5. Diagram showing daily predicted billing (prices) for August 2025.

6. Zaključak

Kombinovanjem istorijskih podataka i modela mašinskog učenja moguće je predvideti i planirati potrošnju ključnih parametara u procesu prerade vode. Regresioni i vremenski modeli omogućavaju bolje planiranje, optimizaciju troškova i identifikaciju odstupanja u

potrošnji. Za stabilne i sezonske serije (VTA, NTA, OBRACUN) najefikasniji su Linear Regression i ARIMA, jer daju niske greške i precizne rezultate. Za promenljive i naglo promenljive serije (VTR, NTR) bolje funkcionišu ensemble modeli i stabla odluke, jer linearni modeli često ne prate nagle skokove. Pri izboru modela važno je analizirati karakter podataka: stabilne serije zahtevaju jednostavnije modele, a promenljive serije modele koji prate kratkoročne fluktuacije uz kontrolu šuma.

7. Literatura

[1] Alba E. L, Ribeiro M. H. D. M, Adamczuk G, Trojan F, & Rodrigues E. O. *Water and electricity consumption forecasting at an educational institution using machine learning models with metaheuristic optimization*. https://arxiv.org/abs/2410.19709, 2024.

[2] García-Soto, C. G. Water consumption time series forecasting in urban centers. *Journal of Water Resources Management*, 38(5), 1123–1138. https://link.springer.com/article/10.1007/-s13201-023-02072-4, 2024.

[3] Kontopoulos I, Makris A, Tserpes K, & Varvarigou T. *An evaluation of time series forecasting models on water consumption data: A case study of Greece*. https://arxiv.org/-abs/2303.17617, 2023.

[4] Ugbehe, P. O. (2025). Electricity demand forecasting methodologies and applications. *Sustainable Energy Research*, 11(2), 145–167. https://sustainenergyres.-springeropen.com/articles/10.1186/-s40807-025-00149-z, 2025.

Marina Pešić[1], Tanja Petrović[2]

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK25355P

MONITORING KVALITETA VODE ZA PIĆE U JAVNOM KOMUNALNOM PREDUZEĆU „VODOVOD“ BOR

Rezime: Monitoring kvaliteta vode za piće od izvorišta do krajnjih korisnika u distributivnom sistemu je od izuzetne važnosti za bezbedno vodosnabdevanje. Javno vodosnabdevanje u gradu Boru oslanja se na kraške podzemne vode, koje su podložne zamućenju tokom perioda naglog topljenja snega i intenzivnih padavina. Obzirom da JKP „Vodovod“ Bor nema postrojenje za otklanjanje mutnoće iz vode, sprovodi se kontinualni monitoring fizičko - hemijskih parametara sirove vode na svim izvorištima, kao i tretirane vode u distributivnoj mreži. Podaci dobijeni monitoringom su osnova za pravilno i sigurno upravljanje vodovodnim sistemom.
Ključne reči: monitoring, kvalitet, kraške podzemne vode, mutnoća, javno vodosnabdevanje

MONITORING DRINKING WATER IN THE PUBLIC UTILITY COMPANY „VODOVOD“ BOR

Abstract: Monitoring the quality of drinking water from the source to the end consumers in the distribution system is extremely important for a safe water supply. Public water supply in the city of Bor relies on karst groundwater are subject to turbidity during periods of sudden snow melt and intense rainfall. Considering that JKP "Vodovod" Bor does not have a facility for removing turbidity from water, continuous monitoring of the physical and chemical parameters of raw water is carried out at all sources as well as treated water in the distribution system. Data obtained through monitoring are the basis for rightly and safe management of the water system.
Key words: Monitoring, quality, karst groundwater, turbidity, public water supply

1. Uvod

Zdravstveno ispravna voda za piće spada u najznačajnije uslove dobrog zdravlja i jedan je od osnovnh pokazatelja zdravstvenog stanja stanovnika jedne zemlje. Takođe, pravo na vodu za piće jedno je od osnovnih ljudskih prava. Najsigurniji način obezbeđenja higijenski ispravne vode za piće je putem javnog vodosnabdevanja. Obezbeđivanje zdravstveno ispravne vode za piće je u Republici Srbiji regulisano različitim zakonima i podzakonskim aktima, koji između ostalog propisuju i monitoring zdravstvene ispravnosti vode za piće [1].

Voda za piće ima veliki higijensko-epidemiološki značaj, jer se putem vode mogu izazvati i preneti mnoga bakteriološka, virusna i parazitarna oboljenja, kao i oboljenja pove-

[1] *JKP „Vodovod“, Bor, marinabor030@gmail.com*
[2] *JKP „Vodovod“, Bor, tanjapetrovic991@gmail.com*

zana sa hemijskom neispravnošću. Obzirom da su vodovodni sistemi zatvoreni sistemi, ne mogu se i ne smeju dešavati promene u kvalitetu vode. To se postiže sistemskom kontrolom zdravstvene ispravnosti vode za piće koja obuhvata praćenje fizičko-hemijskih i mikrobioloških parametara.

Takođe, sistem monitoringa je neophodan radi obezbeđenja efikasnog upravljanja vodnim resursima, odnosno izvorištima vodosnabdevanja, kao i samim distributivnim sistemom. Pravilno uspostavljen, organizovan i kontinualan monitoring omogućava adekvatno i pravovremeno reagovanje u slučaju pojave zdravstvene neispravnosti vode za piće.

2. Vodosnabdevanje na teritoriji grada Bora

Vodosnabdevanje na teritoriji grada Bora bazira se na korišćenju kaptiranih podzemnih voda karstnih područja, koje u svetu, pa i kod nas, predstavljaju jedne od najčistijih i najkvalitetnijih voda. Obzirom da se karstni izvori nalaze u planinskim, nepristupačnim predelima, gde za sada nema antropogenog uticaja, kvalitet sirove vode odstupa od propisanog samo po pitanju mutnoće, u periodima dugotrajnih intenzivnih padavina ili naglog otapanja snežnog pokrivača i mikrobioloških parametara, jedini tretman koji se primenjuje je proces dezinfekcije, odnosno, hlorisanje vode. JKP „Vodovod“ Bor nema postrojenje za otklanjanje mutnoće iz vode.

Snabdevanje vodom se vrši iz četiri različita pravca (tabela 1), odnosno iz tri izvorišta, kojima upravlja JKP „Vodovod“ Bor i izvorišta „Mrljiš“ koje je u nadležnosti JP „Bogovine“, od kog Borski vodovod kupuje sirovu vodu. Distribucija vode sa izvorišta „Mrljiš“ se vrši tokom sušnih perioda, ali i tokom perioda kada se izvorišta u JKP „Vodovod“ Bor zamute. Borski vodovod tada nema dovoljne količine vode da bi se obezbedilo sigurno i kvalitetno vodosnabdevanje na teritoriji grada Bora. Prednost izvorišta „Mrljiš“ je ta, što je ovo izvorište u pogledu količina i kvaliteta vode stabilnije u odnosu na Borska izvorišta, a što se tiče mutnoće, zamućenja su zabeležena samo u periodima izuzetno jakih kiša, a i tada ne prelaze vrednosti od 2,0 NTU [2].

Tabela 1. Izvorišta, lokacije, izdašnost i nadmorska visina izvorišta koja se koriste za potrebe vodosnabdevanja Bora i okolnih naselja
Table 1. Names, locations, capacities and altitudes of sources that provide water supply to Bor and surrounding settlements

Izvorište	Lokacija	Izdašnost (l/sec)	Visinski položaj (mnm)
Zlot (4 kaptaže i 3 bunara)	Sliv Beljevinske reke, 11 km jugozapadno od Bora	110 - 2.400	315 - 360
Krivelj	6 km, severno od Bora	0-100	386
Surdup	8 km, istočno od Bora	60 -120	310
Mrljiš	Priobalje Crnog Timoka, 25 km jugozapadno od Bora	150 - 240	230

2.1. Monitoring kvaliteta vode za piće

U JKP „Vodovod“ Bor, kontrola kvaliteta vode za piće sprovodi se u okviru zakonom propisanog monitoringa od izvorišta do krajnjih konzumenata putem ovlašćene institucije i u hemijskoj laboratoriji vodovoda gde se vrši kontrola sledećih fizičko-hemijskih parametara vode iz distributivne mreže: miris, boja, temperatura, pH, rezidualni hlor, mutnoća, potrošnja $KMnO_4$, elektroprovodljivost, alkalitet i hloridi. Monitoring kvaliteta vode za piće koji sprovodi JKP „Vodovod“ Bor od izvorišta do krajnjih korisnika u distributivnom sistemu uspostavljen je 2006. godine.

Na svakom izvorištu se nalazi turbidimetar kojim se na dva sata u redovnim uslovima meri mutnoća sirove vode, a u periodima nepovoljnih klimatskih prilika češće. Jedini tretman sirove vode koji se primenjuje je proces dezinfekcije, odnosno, hlorisanje vode, kojim se postiže mikrobiološka ispravnost vode. Na objektima vodosnabdevanja gde se vrši hlorisanje vode, na sat vremena se komparatorom proverava rezidualni hlor u vodi. Takođe, u upravnoj zgradi JKP „Vodovod“ Bor, kao krajnjoj tački distributivnog sistema, u Odeljenju za manipulaciju vode, koje radi 24 sata dnevno, rezidualni hlor se proverava na sat vremena. Uzorkovanje vode iz distributivne mreže vrši se jednom dnevno, radnim danima, na šest tačaka, koje se po određenoj dinamici ponavljaju i nalaze u gradu i selima na teritoriji grada Bora. Mesta uzorkovanja su lokacije gde najveći broj ljudi u toku dana konzumira vodu (škole, obdaništa, Dom zdravlja, hoteli) (tabela 2). Analize prikupljenih uzoraka se vrše u hemijskoj laboratoriji Vodovoda.

Tabela 2. Mesta uzorkovanja vode iz distributivne mreže grada Bora
Table 2. Water sampling points from the distribution network of the city of Bor

Ponedeljak	Utorak	Sreda	Četvrtak	Petak
Direkcija TIR-a	Servisno okno	Direkcija TIR-a	Selo V.Krivelj OŠ „Đura Jakšić“	Direkcija TIR-a
Naselje Brezonik prodavnica	Staro Selište prodavnica	Naselje Brezonik prodavnica	Staro Selište prodavnica	Servisno okno
OŠ „Vuk Karadžić“	OŠ „Dušan Radović“	Bolničko naselje prodavnica	OŠ “Dušan Radović”	Bolničko naselje prodavnica
OŠ „3. oktobar“	Naselje „Sunca“ prodavnica	OŠ „3. oktobar“	Naselje „Sunca“ prodavnica	OŠ „Vuk Karadžić“
Banjsko polje Klub ZiJIn	Dom zdravlja	Naeselje NGC Hotel „Albo“	Dom zdravlja	OŠ „3. oktobar“
Naselje NGC Hotel “Albo”	JKP „Vodovod“ Laboratorija	SOŠ „Vidovdan”	JKP „Vodovod“ Laboratorija	Ekonomska škola

2.2. Upravljanje vodosnabdevanjem na osnovu podataka monitoringa

Kontrolisanjem mutnoće na izvorištima sprečava se ulazak mutne vode u distributivni sistem. Ukoliko izmerena mutnoća prelazi zakonom propisane vrednosti takvo izvorište se

isključuje iz sistema vodosnabdevanja. Zakonom propisana vrednost mutnoće za sirovu vodu je 5 NTU, međutim obzirom da nema postrojenja za otklanjanje mutnoće JKP „Vodovod“ Bor i na sirovu vodu primenjuje zakonom propisanu vrednost za pijaću vodu koja je 1 NTU. Manipulacija vodom je moguća na ovakav način, obzirom da se vodosnsabdevanje vrši iz četiri izvorišta, koja se nalaze na različitim lokacijama i ne mute se u isto vreme, tako da se uvek raspolaže dovoljnom količinom ispravne vode.

Ovo je od izuzetne važnosti jer svako prisustvo zamućenosti vode veće od 1 NTU može dovesti do smanjenja efikasnosti procesa dezinfekcije. Dokazano je da vrednosti 3,0 NTU „ne smeju nikada da se prekorače“, jer se efikasnost dezinfekcionog sredstva značajno smanjuje, a osobine vode se naglo pogoršavaju i mikrobiološki i hemijski [3]. Takođe, zagađivači, kao što su virusi i bakterije, mogu se prilepiti za čestice koje čine mutnoću, koje ih na taj način štite i smanjuju efekte dezinfekcije, odnosno povećavaju njihovu otpornost na sredstvo za dezinfekciju. I neorganski i organski izvori mutnoće mogu zaštiti mikroorganizme od dezinfekcije, pri čemu organski izvori mutnoće smanjuju efikasnost hlora kao sredstva za dezinfekciju. Mutnoća izazvana neorganskim česticama utiče na pH vode, alkalitet, povećanje koncentracije metala i aktivnost pojedinih dezinfekcionih sredstava. Mutnoća izazvana organskim česticama takođe utiče na hemiju, pH vode i njen alkalitet. Najveći uticaj na kvalitet vode imaju prirodne organske materije (POM), čija se količina povećava sa povećanjem mutnoće. Prirodne organske materije su u stanju da vežu znatne količine metala i oksida i da zajedno formiraju komplekse. Ono što je najvažnije, je da POM sa hlorom stvaraju kancerogene dezinfekcione nusprodukte (DBPs) [4].

Istraživanjima je dokazano da je porast broja patogenih mikroorganizama u vodi srazmeran povećanju mutnoće vode. Osim povećanja broja mikroorganizama, povećana mutnoća iznad 1,0 NTU može dovesti do značajnog povećanja taloga u distributivnom sistemu, a za mutnoće veće od 5,0 NTU, voda često ima boju, ukus i miris [5]. Sagledavajući sve napred navedeno, neophodno je redukovati mutnoću u dozvoljene granice i tako minimizirati mogući štetan uticaj na zdravlje ljudi.

Proces dezinfekcije se sastoji iz dve faze: primarne dezinfekcije koja podrazumeva uništavanje mikroorganizama u sirovoj vodi i sekundarne dezinfekcije koja omogućava održavanje rezidualnog dezinfekcionog sredstva u vodi distributivnog sistema, kako ne bi došlo do ponovnog razvoja mikroorganizama i kontaminacije vode (duže stajanje vode u cevovodu zbog malog protoka odnosno potrošnje i drugo).

JKP „Vodovod“ Bor dezinfekciju vode vrši gasnim hlorom i rastvorom natrijum hipohlorita. Rezidualni hlor u distributivnoj mreži se održava u granicama 0,2-0,3 mg/l, a svako odstupanje od ovih vrednosti reguliše se korigovanjem u doziranju hlora na objektima gde se vrši hlorisanje. Svakodnevnom analizom uzoraka iz distributivne mreže, koja se obavlja u hemijskoj laboratoriji, proverava se da li se tehnološki proces prerade vode za piće dobro obavlja, a sva odstupanja, ako do njih dođe, odmah se signaliziraju i regulišu.

3. Zaključak

Monitoring kvaliteta vode za piće se sprovodi kako bi dobijeni podaci pomogli u upravljanju vodosnabdevanjem. Kontrolisanjem parametara, koji mogu uticati na neisprav-

nost vode za piće od izvorišta do krajnjih korisnika, postignut je visok stepen sigurnosti upravljanja vodosnabdevanjem, sa aspekta kvaliteta vode za piće.

Mutnoća sirove vode na izvorištima i rezidualni hlor u distributivnoj mreži su parametri koji se kontrolišu u kontinuitetu i na osnovu izmerenih vrednosti reaguje se blagovremeno, ako je potrebno.

U proteklom periodu u JKP „Vodovod“ Bor nije bilo prekida u vodosnabdevanju zbog zamućenja ili mikrobiološke neispravnosti vode u distributivnom sistemu, što je ranije bio slučaj.

4. Literatura

[1] Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, *Sl. list SRJ*, br. 42/98 i 44/99 i *Sl gl. RS*, br. 28/2019.

[2] Pešić M, Ristić Vakanjac V, Vakanjac B, Antonijević M, Marković N, Good monitoring as a preco ndition for high drinking water quality: Case study of Zlot water supply sources (Bor, Serbia). *XXIII International Conference Ecological Truth*, Technical Faculty Bor, 583-589, 2015.

[3] Bonacci O, *Hidrološka analiza pojave mutnoće na izvorima u kršu: interpretacija podataka merenih na merenih na izvoru Omble*. Hrvatske vode, 24, 47-57, 2016.

[4] Durmishi B. A, Reka A. A, Jashari A, Ismaili M, Shabani A, Durmishi A, Disinfection of Drinking Water and Technology: A Review. *International journal of advanced research in Chemical science*, 2, 45-56, 2015.

[5] Schock M. R., Lytle, D. A, *Internal corrosion and deposition control. In: Water quality and treatment : a handbook of community water supples*, 6th edition. McGraw-Hill, 2011.

Ивана Дунић[1]

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25361D

ПРАЋЕЊЕ МИКРОБИОЛОШКОГ САСТАВА У ПИЈАЋОЈ ВОДИ У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

Резиме: Развој технологије и тежња ка напретку у процесима дезинфекције воде изнедрили су технике прилагодљиве микробиолошком загађењу и захтеву Правилника и додатним физичко-хемијским утицајима. Правилном употребом, адаптацијом и комбинацијом постојећих техника дезинфекције воде добијају се високоефикасни механизми који и у динамичним системима испуњавају и најстроже критеријуме, којима се потрошачима испоручује безбедна вода за употребу. Међутим, у изузетним случајевима, промене квалитета воде или појаве кварова на уређајима који чине системе дезинфекције, може доћи до дестабилизације система и микробилошког загађења воде. У наведеној ситуацији најважније је имати брзу, релевантну информацију која ће омогућити правовремену реакцију како би се поново успоставио стабилан рад система дезинфекције воде. Изазов у неведеној ситуацији представља дужина трајања испитивања у лабораторији уз процедуру узимања узорка. У идеалним условима, резултати су добијени након 3 дана што представља проблем, јер у том интервалу може доћи до раста микробиолошке активности, потенцијално развоја биофилма и дубље контаминације дистрибутивног система. Додатни изазов у водоводима чини ограничен ресурс људства који би могли да прате комплетан систем, што је примењиво и на Заводе за јавно здравље, који врше анализе у циљу контроле. Одговор на изазов контаминације и смањеног људства може бити праћење микробиолошког загађења у реалном времену. Са мањим модификацијама постојећих система дезинфекције може се у року од 20 минута добити информација о ефикасности дезинфекције воде и обезбедити правовремена реакција, а тиме обезбедити безбедна вода.
Кључне речи: дезинфекција воде, праћење у реалном времену, количина микроорганизама

REAL TIME MONITORING OF MICROBIOLOGICAL CONTENT IN DRINKING WATER

Abstract: The development of technology and the pursuit of progress in water disinfection processes have given rise to techniques adaptable to microbiological pollution, the requirements of the legislative and additional physical and chemical influences. With proper use, adaptation and combination of existing water disinfection techniques, highly efficient mechanisms are obtained that, even in dynamic systems, meet the strictest criteria for delivering safe water for consumers. However, in exceptional cases of changes in water quality or malfunctions in devices that make up disinfection systems, system destabilization and microbiological water pollution may occur. In the aforementioned situation, it is most important to have quick, relevant information that will enable a timely reaction in order to restore the stable operation of the water disinfection system. The challenge in the mentioned situation is the

[1] *Aqua interma inženjering d.o.o, Београд, ivana@aquainterma.rs, ORCID: 0009-0006-4525-5500*

length of the examination in the laboratory with the sample taking procedure. Under ideal conditions, results are obtained after 3 days, which is a problem, because in that interval there can be an increase in microbial activity, potentially biofilm development and deeper contamination of the distribution system. An additional challenge in waterworks is the limited human resource that could monitor the entire system, which is also applicable to Public Health Institutes that perform analyzes for the purpose of control. The answer to the challenge of contamination and reduced manpower may be the monitoring of microbiological pollution in real time. With minor modifications to the existing disinfection systems, information on the effectiveness of water disinfection can be obtained within 20 minutes and provide a timely response, thus ensuring safe water.
Key Words: water disinfection, real-time monitoring, quantity of microorganisms

1. Увод

Квалитет воде је од суштинског значаја за здравље људи, зато је успостављање континуалних и стабилних процеса дезинфекције од великог значаја. Изазови у вођењу процеса дезинфекције тичу се примарно адекватног постављања и вођења процеса, али и превентивног одржавања и правовременог одговора на хаваријску интервенцију. Проблем настаје мањком људства и ограниченошћу ресурса.

Присуство микроорганизама, може указивати на контаминацију и потенцијалне здравствене ризике, а може изазвати зачепљење филтера накупљањем биофилма, контаминацију и зачепљење цевовода и слично. Дакле, микробиолошку контаминацију је потребно са опрезношћу пратити. Традиционалне методе анализе микробиолошког садржаја воде, попут микробиолошких култура, захтевају лабораторијске услове и дуг период обраде резултата (24-48 сати), што може одложити препознавање потенцијалне контаминације и отежати правовремену реакцију.

Међутим, развијена је иновативна технологија која омогућава брзо, прецизно и ефикасно мерење садржаја бактерија у води коришћењем флуоресцентне ензимске методе. Ова технологија омогућава анализу у реалном времену и може се користити у различитим секторима, укључујући индустрију, водоводне системе и заштиту животне средине. Циљ овог рада је да прикаже начин функционисања поменуте технологије, њене предности и могућности примене у пракси.

2. Принцип рада

Мерење се може вршити ручним, преносивим уређајем (слика 1А) и фиксним уређајем који се поставља у линији (on-line) који врши аутоматско узорковање и мерење (слика 1Б). Због једноставности сликовитог приказа принципа рада, процес анализирања биће приказан на преносном уређају, али је принцип рада оба уређаја идентичан.

Технологија се заснива на патентираном мерењу бактеријске активности помоћу флуоресцентне ензимске методе. Уређај користи флуорецентну реакцију коју изазива посебан реагенс како би прецизно квантификовао присуство бактерија и гљива у води. Процес анализе од узимања узорака до саопштења резултата обухвата 5 корака: узорковање воде, додавање реагенса, време реакције, мерење и анализа резултата.

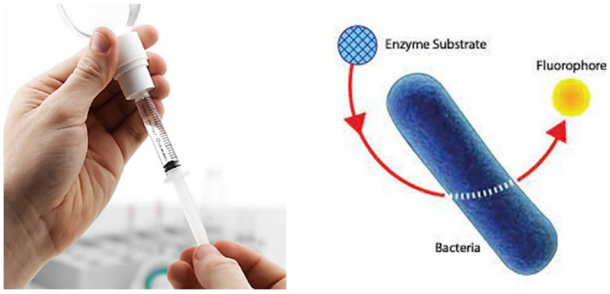
Слика 1a. Ручни, преносни уређај
Picture 1a. Handheld device

Слика 1b. Фиксни уређај за мерење у линији
Picture 1b. Online unit

Узорак воде се узима из система и припрема за анализу. Узимање узорка се може вршити ручно (слика 2) или аутоматски зависно од изабраног типа уређаја. Узорак воде се пропушта на филтеру порозности пора од 0,22 μm. Припремом узорка добија се концентрат бактерија на филтеру.

Слика 2. Ручно узимање узорка
Picture 2. Manual sampling

Други корак је додавање реагенса. Овом приликом се додаје специјални ензиматски реагенс (слика 3) у узорак, омогућавајући реакцију са бактеријским ензимима (естеразама) који се природно налазе у ћелијама.



Слика 3. Апликација реагенса
Picture 3. Reagent application

Трећи корак је флуоресцентна реакција. Настала реакција реагенса и ензима хидролазе производи флуоресценцију тј. израчивање. Интензитет зрачења директно зависи односно пропорционалан је броју бактерија у узорку. Четврти корак методе је мерење флуоресценције. Мерење се врши оптичким сензором флуорометра којим се мери интензитет светлости произведене реакцијом (слика 4).

Слика 4. Мерење
Picture 4. Measurement

Пети корак је анализа измерених резултата и приказ. Уређај приказује нумеричку вредност која омогућава брзу процену бактеријског садржаја у води (слика 5).

Слика 5. Приказ резултата
Picture 5. Results

Резултати бактеријске активности се исказују након 10 до 15 минута (или по протоколу који се прилагођава по захтеву корисника), док је за гљивичну активност потребно 30 минута. Тренутни лимит детекције је 5 CFU/ml.

Постојеће методе попут микробиолошких култура и цитометрије обухватају мерење садржаја слободних јединки, док ензимска флуоресценција обухвата и мерење микробиолошке активности на честицама и у колонијама једнако ефикасно чинећи методу обухватнијим приступом одређивању садржаја бактерија у води.

Због своје робусне конструкције и високо осетљивог сензора добијени резултати су поуздани. Поред брзог одзива, резултати се могу репродуковати што је доказано испитивањима које је спровео US-EPA репродуктивношћу добијених резултата са вредношћу релативне стандардне девијације нижом од 6%.

Добијени резултати се налазе у меморији уређаја који се поставља у линији мерења са временском одредницом и са ограничењем на 60 последњих мерења којима се може приступити апликацијом. Мерени резултат је могуће послати аутоматски и дигитално пренети на SCADA, Профинет, Модбас и другим опцијама преноса података. Уређај се може повезати, примити и послати сигнал екстерним уређајима наведеним протоколима, а конкретно информације о мереној вредности, аларму високе вредности, статусу уређаја, грешкама које су се појавиле приликом рада могу се пронаћи и у посебно дизајнираној апликацији. Додатно се уређајем може управљати даљински покретањем мерења и покретањем чишћења. Што се тиче преносног уређаја, нажалост не постоји наведена опција као могућност.

3. Област примене

Примена уређаја је веома широка: било у третману пијаће воде било у водоводним системима или у индустријским условима где су постављени најоштрији захтеви квалитета воде, као што су фармацеутска и прехрамбена индустрија. Једна од предности употребе уређаја је да не захтева посебне лабораторијске услове за свој рад, нити комплексну обуку оператера. Јединица која ради у протоку све ради потпуно аутоматски: од узорковања до изношења резултата. Услед своје робусности може се користити у погону или на терену са једнаком ефикасношћу. Уређај у линији (on-line) са роботом узоркивачем се може користити за праћење микробиолошког садржаја у пијаћој води у реалном времену, са чак 12 анализа дневно, било преносним уређајем или фиксном јединицом на жељеној позицији цевовода. Праћење резултата може служити за оптимизацију рада система дезинфекције праћењем ефекта дезинфекције. Може се користити и за процену употребе различитих техника дезинфекције или промену доза биоцида за најбољи ефекат третмана. На тај начин се може рационализисати потрошња биоцида, смањити трошак редовног рада система и оптимизовати процес за најбољи ефекат дезинфекције.

4. Закључак

Праћење микробног садржаја у води у реалном времену представља значајан напредак у области микробиолошке анализе воде. Његова брзина одзива, прецизност

и једноставност употребе чине га идеалним решењем за водоводне системе и производне индустријске системе који користе пијаћу тј. дезинфиковану воду.

Могућност континуалног праћења бактеријског садржаја у води омогућава брзу реакцију на евентуалну контаминацију чиме се смањује ризик по здравље и нуди могућност оптимизације потрошње биоцида смањујући трошкове рада науштрб одржања ефикасности рада система дезинфекције. Све наведено нуди могућност унапређења постојећих система, једноставност у праћењу и управљању процесима за најбољи ефекат. Вредан алат који ће пружити важне информације правовремено сваком предузећу може бити од кључног значаја за вођење процеса третмана воде, нудећи вишу безбедност потрошачима и оптимизацију рада постројења за уштеде и одрживији систем.

Литература

[1] Schou Christian, Biological stability and Risk Assessment of Drinking Water in Denmark. *Nordic Drinking Water Conference*, 2010, Copenhagen, Denmark, 2010.

[2] J. Fajt et al, *Selection, Screening and Field Trial of Calcium Hypochlorite to reduce bacteria population in freshwater storage tanks in Williston*, North Dakota, USA. AMPP Paper No.17645, 2022.

[3] J. Fajt, Sometimes more is just more: THPS biocide laboratory kill study on wildtype Sulfate Reducing Bacteria, *AMPP paper* No. 18858, Denver, Colorado, 2023.

SUORGANIZATORI

ITNMS

INSTITUT ZA TEHNOLOGIJU NUKLEARNIH I DRUGIH MINERALNIH SIROVINA

B E O G R A D

ITNMS se bavi fundamentalnim, primenjenim i razvojnim istraživanjima do kompletnih tehničko-tehnoloških rešenja i razvojem i proizvodnjom novih materijala u domenu:

- **tehnologija za pripremu i koncentraciju metaličnih, nemetaličnih i energetskih sirovina,**
- **metalurških tehnologija,**
- **neorganske hemijske tehnologije,**
- **hemijske, elektrohemijske i mehanohemijske sinteze,**
- **hemijskog inženjerstva,**
- **zaštite i očuvanja životne sredine,**
- **hemijska, fizička, fizičko-hemijska, mineraloška ispitivanja,**
- **eksperimentalne proizvodnje, i uvođenja novih tehničko-tehnoloških rešenja u industriju.**

Bulevar Franša d'Eperea 86, 11000 Beograd, 390, . (011) 369-17-22,

. (011) 369-15-83

http://www.itnms.ac.rs - E-mail: itnms@itnms.ac.rs

Универзитет у Нишу

ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14, 18000 Ниш, Србија **www.gaf.ni.ac.rs**

ГАФ је део Универзитета у Нишу и представља угледну образовну и научну институцију која образује студенте у области грађевинског инжењерства, архитектуре, урбанистичког планирања и инжењерског менџмента.

ОСНОВНЕ и МАСТЕР АКАДЕМСКЕ СТУДИЈЕ [4+1 година - 240+60 ЕСПБ]

ГРАЂЕВИНАРСТВО

дипл. инж. грађ.
маст. инж. грађ.

ИЗБОРНИ МОДУЛИ НАКОН 2. СЕМЕСТРА ОАС:
КОНСТРУКЦИЈЕ, ХИДРОТЕХНИКА, САОБРАЋАЈНИЦЕ, ЗГРАДАРСТВО

ПРИЈЕМНИ ИСПИТ за ОАС: **МАТЕМАТИКА** или **ТЕХНИЧКА МЕХАНИКА** или **ТЕСТ СКЛОНОСТИ**

УПРАВЉАЊЕ ПРОЈЕКТИМА У ГРАДИТЕЉСТВУ

дипл. инж. менаџм.
маст. инж. менаџм.

ПРИЈЕМНИ ИСПИТ за ОАС:
МАТЕМАТИКА или **ТЕСТ СКЛОНОСТИ**

ИНТЕГРИСАНЕ АКАДЕМСКЕ СТУДИЈЕ [5 година - 300 ЕСПБ]

АРХИТЕКТУРА

маст. инж. арх.

ПРИЈЕМНИ ИСПИТ за ИАС:
ТЕСТ ОПШТЕ КУЛТУРЕ СА ЕЛЕМЕНТИМА ПРОВЕРЕ ПРОСТОРНЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ

ДОКТОРСКЕ АКАДЕМСКЕ СТУДИЈЕ [3 године - 180 ЕСПБ]

ГРАЂЕВИНАРСТВО

доктор наука - грађевинарство

АРХИТЕКТУРА

доктор наука - архитектура

ИНСТИТУТ ЗА ВОДОПРИВРЕДУ
„ЈАРОСЛАВ ЧЕРНИ"

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

Институт у свом раду користи најсавременије истраживачке и инжењерске методе, напредне технологије и софистициране инструменте.

Са циљем да дугорочно допринесемо општем развоју друштва и унапређењу животне средине у свим областима повезаним са водама, у успешној спрези науке, истраживања и пројектовања и традицији дугој више од 75 година, изналазимо најбоља решења у задовољавању потреба и циљева својих клијената и изради и имплементирању сложених и изазовних пројеката.

ДЕЛАТНОСТИ:

- Пројектовање, надзор, консалтинг и инжењеринг у грађевинарству, управљању водама и заштити животне средине
- Израда мултидисциплинарних студија из области вода
- Истраживање, развој и едукација у техничко-технолошким наукама
- Софтверски инжењеринг и развој, имплементација и одржавање информационих система
- Теренска и лабораторијска испитивања, мерења и осматрања воде, земљишта и грађевинских конструкција
- Израда планских и стратешких докумената

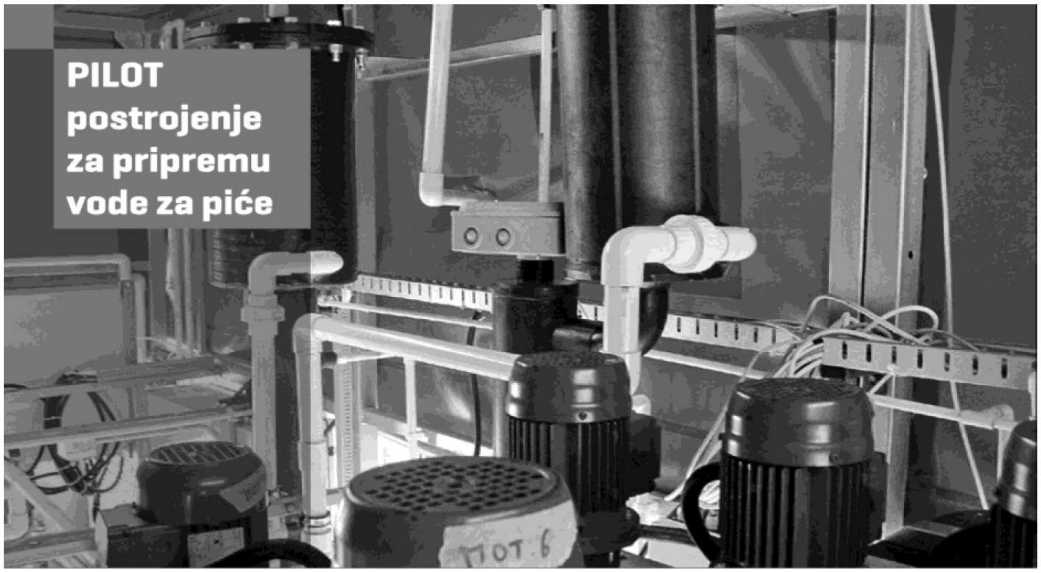
ОБЛАСТИ:

- Хидроелектране и бране са акумулацијама
- Управљање и одржавање постојећих брана
- Снабдевање водом
- Каналисање и пречишћавање отпадних вода
- Наводњавање и одводњавање
- Заштита од спољашњих и унутрашњих вода и уређење река и сливова
- Учешће у инфраструктурним пројектима (путеви, метро, гасовод)
- Посебне услуге у вези са рудницима и депонијама
- Глобално управљање водама и заштита животне средине

Институт за водопривреду „Јарослав Черни" А. Д. • Јарослава Черног 80, 11226 Пиносава, Београд
+381 11 61 76 600 office@jcerni.rs www.jcerni.rs

Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno-matematički fakultet
Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine

Trg Dositeja Obradovića 3, 21000 Novi Sad
Tel: +381 21 6350-672, Fax: +381 21 454-065
www.dh.pmf.uns.ac.rs
e-mail: infohemija@dh.uns.ac.rs

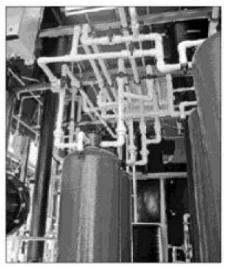


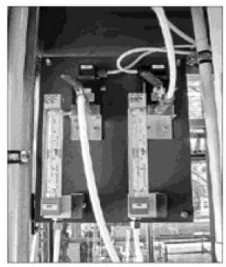
Raspolažemo mobilnim, modularnim PILOT postrojenjem kapaciteta 2 m^3/h koje se sastoji iz 9 funkcionalnih podsklopova (korekcija pH; oksidacija; koagulacija; flokulacija, taloženje; filtracija; adsorpcija; jonska izmena; membranska separacija). Postrojenje transportujemo na vašu lokaciju i testiranjem na sirovoj i/ili delimično obrađenoj vodi u trajanju 4-6 meseci definišemo tehnološko rešenje.

Na PILOT-u postoji mogućnost kombinovanja različitih faza i podfaza procesa pripreme vode, a u cilju:

- utvrđivanja procesnih parametara u uslovima sličnim realnim;
- definisanja efekata i optimizovanja pojedinih procesnih faza u sklopu tehnološke linije;
- upoređivanja efekata odabranih tehnoloških rešenja;

Sve prateće analize sprovodimo u sopstvenim laboratorijama.





Dr Jasmina Agbaba | 021/485-2798
jasmina.agbaba@dh.uns.ac.rs | www.dh.uns.ac.rs

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu
Studijski program HEMIJSKO INŽENJERSTVO
Studijsko područje NEORGANSKA HEMIJSKA TEHNOLOGIJA

OBAVEZNI PREDMETI

- Neorganska hemijska tehnologija
- Termodinamički osnovi neorganske hemijske tehnologije
- Tehnologija vode
- Sagorevanje i industrijske peći
- Heterogena ravnoteža
- Osnovi tehnologije keramike

NAUČNO-ISTRAŽIVAČKI RAD

- Savremeni postupci sinteze i procesiranja keramičkih i staklastih materijala za primenu u visokim tehnologijama, medicini, vojnoj industriji, pripremi i preradi vode: biokeramika, biostakla, optička stakla, staklo-keramika, sorpcioni materijali, vatrostalni materijali...
- Energetika hemijsko-tehnoloških postupaka
- Procesi sagorevanja i ekonomika goriva i industrijskih peći
- Termodinamika rastvora elektrolita (industrija soli, veštačkih djubriva...)

SARADNJA

- Naučni institut "Vinča"
- Institut tehničkin nauka SANU
- Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju
- Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina
- Institut za ispitivanje materijala
- Tehnološki fakultet Novi Sad
- Rudarsko-geološki fakultet Beograd
- Poljoprivredni fakultet Beograd
- Geozavod
- Institute of Inorganic Chemistry and Institute of Silicate Materials of the Riga Technical University
- National Institute for Lasers, Plasma and Radiation Physics Bucharest

IZBORNI PREDMETI

- Tehnologija stakla
- Tehnologija gradjevinskih materijala
- Tehnologija kiselina, baza i mineralnih djubriva
- Elektrolitičke tehnologije

MOGUĆNOST ZAPOŠLJAVANJA

Industrija gradjevinskih materijala
(fabrike za proizvodnju cementa, kreča, gradjevinske opeke)

-fabrika cementa Novi Popovac-Holcim,
-fabrika cementa Beočin-LaFarge,
-fabrika cementa Kosjerić-Titan,
-fabrika za proizvodnju gas betona-Xella,
-fabrika za proizvodnju gradjevinske opeke Kanjiža-Tondach,
-fabrika za proizvodnju kreča-Nexe

Industrija keramičkih i vatrostalnih materijala

- fabrike za proizvodnju sanitarne keramike, porcelana, elektroporcelana, vatrostalnih materijala

Industrija emajliranih proizvoda

-Metalac Gornji Milanovac,
-Sloboda Čačak

Industrija stakla

Industrija kiselina, baza i veštačkih djubriva

-Zorka Šabac,
-Azotara Subotica,
-IHP Prahovo,
-HIP Pančevo

Pogoni za pripremu i preradu vode
-priprema vode za piće,
-priprema vode za potrebe industrije (Termoelektrane, prehrambena, farmaceutska industrija..)

Naučno-istraživačke organizacije

Laboratorije

Zastupništva i predstavništva stranih firmi za prodaju laboratorijske i industrijske opreme i hemikalija

ИНЖЕЊЕРСКА АКАДЕМИЈА СРБИЈЕ

Инжењерска академија Србије - ИАС основана је 26.06.2000. године ради остваривања циљева и задатака из техничко-технолошких делатности, развоја и унапређења инжењерске струке, примене савремених техничко-технолошких знања, унапређења стандарда и садржаја у науци, образовању, привреди, заштити животне средине и другим привредним сферама живота и рада.

Идеја оснивања Инжењерске академије била је присутна у круговима Савеза инжењера и техничара Југославије - СИТЈ још од 1993. године, када је у Статут СИТЈ унета одредба о оснивању Академије. На осмом Конгресу СИТЈ, септембра 1997. године, предлог за оснивање Инжењерске академије добио је пуну подршку.

Активни оснивачи Инжењерске академије Србије - ИАС су:

- Савез инжењера и техничара Србије - СИТС
- Друштво за путеве Србије.

М И С И Ј А

Мисија ИАС је да буде креативна и иновативна научно-стручна организација која ће подржати изврсност у области инжењерског и научног стваралаштва и допринети развоју техничких наука и преносу знања оријентисаних на економски и привредни развој Србије, као и укупни развој друштва у целини, уз промовисање одрживог развоја, заштите животне средине и људи и безбедну употребу технологија.

В И З И Ј А

Визија ИАС је да у наредних десет година постане високо респектабилна научно-стручна инжењерска организација у функцији унапређења привредног, друштвеног и економског амбијента Републике Србије.

С И С Т Е М В Р Е Д Н О С Т И

Систем вредности ИАС заснива се на промовисању професионализма, академског понашања и поштвања високих етичких норми.

ИАС, 11000 Београд, Кнеза Милоша 9/Iwww.ias.org.rs; E-mail: office@ias.org.rs

www.ipininstitut.com

ЈАВНО КОМУНАЛНО ПРЕДУЗЕЋЕ "В О Д О В О Д" БОР

Адреса: Радомира Јовановића Чочета бр 16, 19210 Бор
веб-сајт: www.vodovodbor.com ; е-маил: vodovod_bor@mts.bor
Контакт телефон 030 421 150; Бесплатна корисничка линија: 0800 200 220

Основна делатност ЈКП „Водовод“ Бор је сакупљање, пречишћавање и дистрбуција воде за пиће.

Поред основне делатности, предузеће врши сакупљање и одвођење комуналних отпадних вода, одржавање атмосферске канализације, одржавање јавне расвете као и одржавање јавних чесми и фонтана на територији града Бора.

Такође, ЈКП „Водовод“ Бор врши изградњу и одржавање водоводне и канализационе мреже и хидротехничких објеката.

SPONZORI

VALMAN

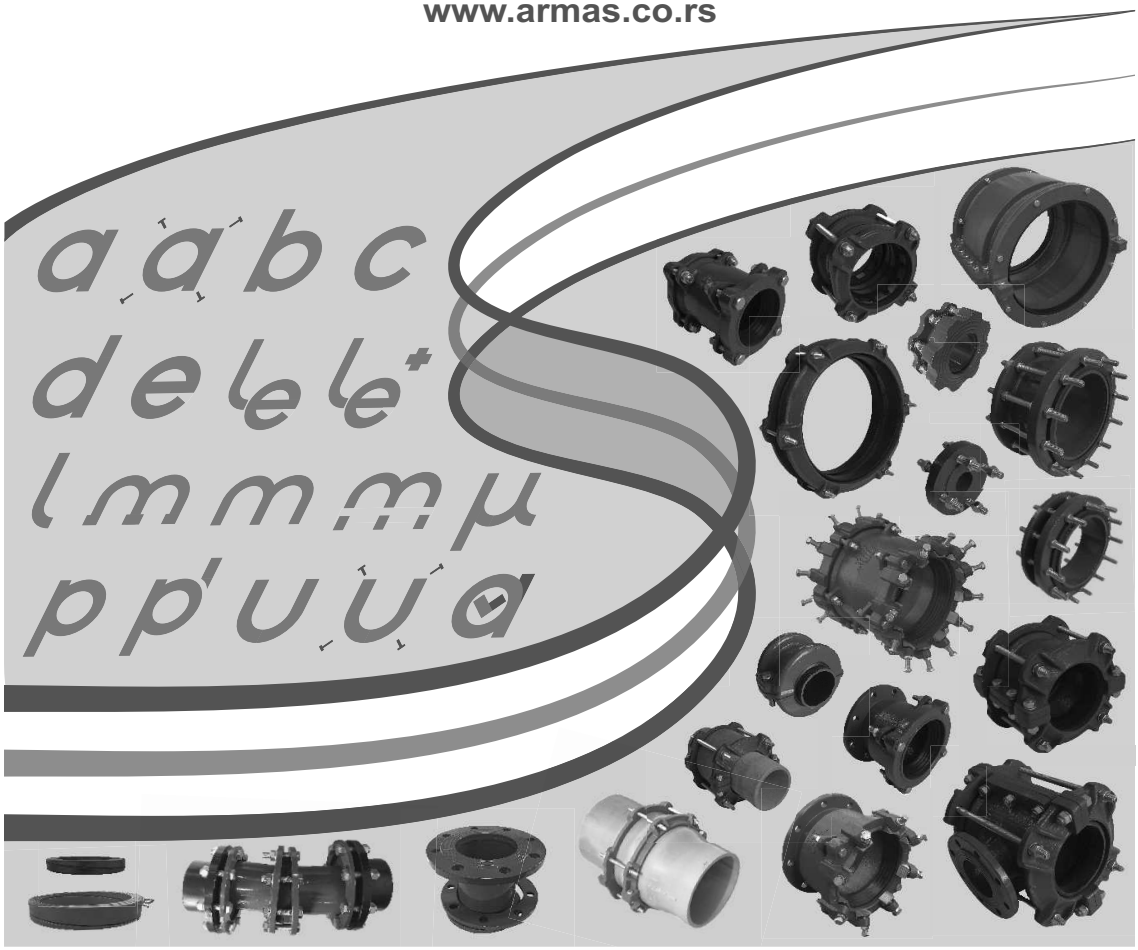
VALVE MANUFACTURING

A R M A T U R E S T O J A N O V I Ć

ARMAS

Kvalitetna rešenja, trajna sigurnost.

www.armas.co.rs



ИНЖЕЊЕРСКА КОМОРА СРБИЈЕ

NAPLATA

sistem za obračun i naplatu komunalnih usluga

KOMPLETNO REŠENJE EVIDENCIJE POTROŠNJE I OBRAČUNA

Povećavanje efikasnosti i kvaliteta evidencije potrošnje. Racionalizacija angažovanja na terenu.
Kvalitetni obrasci računa. Smanjivanje broja reklamacija.
Povećavanje efektivnosti i efikasnosti naplate. Podrška za naplatu zaostalih i teško naplativih potraživanja.
Brza implementacija. Kompatibilnost sa standardnim računovodstvenim softverom.

PRIMENJUJE 33 VODOVODA

42 KOMUNALNO PREDUZEĆE KORISTI BILLING SISTEM NAPLATA

OmniData
društvo za projektovanje i izradu informacionih sistema

Koste Abraševića 2, 15000 Šabac

tel +381 15 355 182 fax +381 15 351 103 mob +381 64 8052 555 email omnidatadoo@gmail.com

www.omnidata.rs **www.omnidataagency.com** **www.mojiracuni.com**

9 788682 563341 ISBN 978-86-82563-34-1