



Мирјана Нинковић-Николић<sup>1</sup>  
Александар Танасковић<sup>2</sup>

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 ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 талоба утичу бројни фактори, укључујући рН вредност, температуру, алкалитет, тврдоћа, укупне растворене материје (TDS), као и концентрације јона хлорида ( $\text{Cl}^-$ ), сулфата ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), карбоната ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) и бикарбоната ( $\text{HCO}_3^-$ ). За предикцију појаве корозије и таложења користе се различити рачунски показатељи, као што су Ланжелиев 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 ( $\text{Cl}^-$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), and bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) 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

<sup>1</sup> ЈКП „Београдски водовод и канализација“, Београд, [mirjana.ninkovic@bvkc.rs](mailto:mirjana.ninkovic@bvkc.rs), ORCID 0009-0000-1806-8722

<sup>2</sup> ЈКП „Београдски водовод и канализација“, Београд, [aleksandar.tanaskovic@bvkc.rs](mailto:aleksandar.tanaskovic@bvkc.rs), ORCID 0009-0006-1236-337X



## 1. Увод

Квалитет воде за пиће на улазу у дистрибутивни систем може се разликовати од квалитета воде на slavинама 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  $\text{CaCO}_3$ . Такође се користи и Larson-Scoldov индекс (LR), који укључује додатне параметре везане за присуство јона хлорида и сулфата [2], [3].

У овом раду анализирани 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 km<sup>2</sup> 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

Таложeње у цевима настаје када се двовалентни јони метала, попут калцијума (Ca<sup>2+</sup>) и магнезијума (Mg<sup>2+</sup>), комбинују са другим јонима раствореним у води и таложe на унутрашњим зидовима цеви. Главни облици наслага укључују CaSO<sub>4</sub>, MgCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub> и MgCl<sub>2</sub>. Брзина таложeња расте са порастом температуре и концентрације соли у води. Вода са већим садржајем јона Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> (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

Table 1. 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  $\text{CaCO}_3$  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 zasiћена са $\text{CaCO}_3$ и може бити корозивна. Вода је у равнотежи Вода је zasiћена са $\text{CaCO}_3$ и може се очекивати формирање филма
Ryznarov индекс сатурације (RSI)	RSI<5 5<RSI<7 RSI>7	Изражено формирање филма $\text{CaCO}_3$ . Формирање наслага $\text{CaCO}_3$ Вода није zasiћена са $\text{CaCO}_3$ и може бити корозивна.
Puckoriuson индекс сатурације (PSI)	PSI<4,5 4,5<PSI<6,5 PSI>6.5	Изражено формирање филма $\text{CaCO}_3$ . Формирање наслага $\text{CaCO}_3$ Вода није zasiћена са $\text{CaCO}_3$ 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 $\text{Cl}^-$ и $\text{SO}_4^{2-}$ не утичу на корозију. Може се очекивати појачана корозија. Очекује се значајна корозија.

### 2.4. Идентификација поремећаја квалитета воде

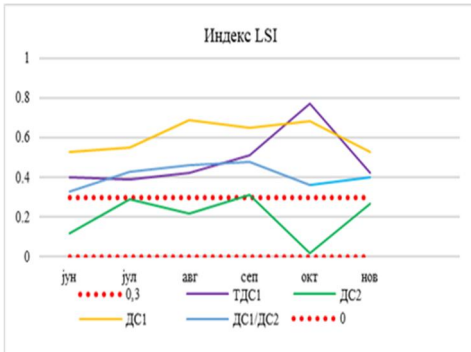
Снабдевачи водом за пиће могу открити губитак стабилности квалитета воде на основу примедби корисника, које се најчешће односе на замућење воде, непријатан мирис, укус и сличне промене. Чињеница да вода на уласку у дистрибутивни систем испуњава критеријуме квалитета прописане Правилником о хигијенској 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, рН вредност и бројност микроорганизама, дефинише стратегију за откривање и отклањање проблема.



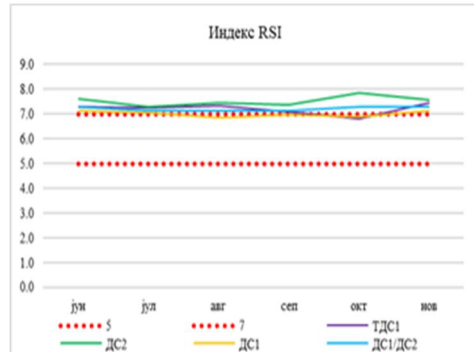
### 3. Резултати и дискусија

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.

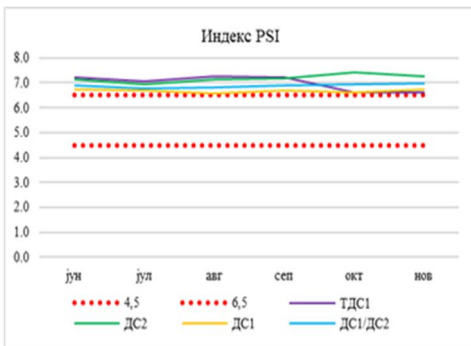
Резултати испитивања приказани су на сликама 2-6.



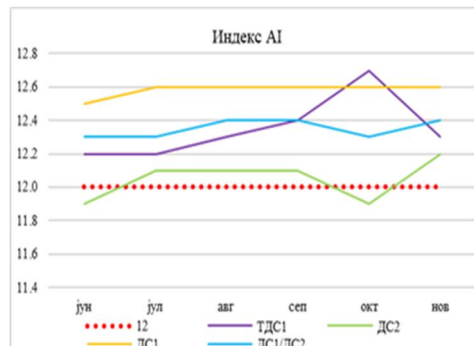
Слика 2. Langelierov индекс сатурације  
Figure 2. Langelierov saturation index



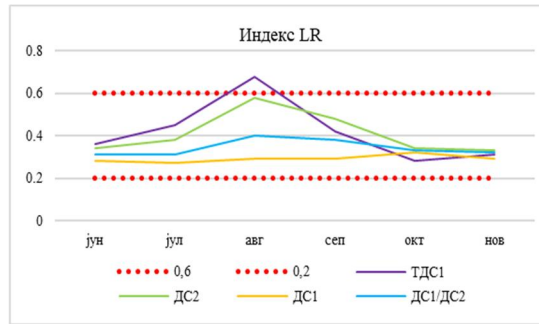
Слика 3. Ryznarov индекс сатурације  
Figure 3. Ryznar saturation index



Слика 4. Puckoriusov индекс  
Figure 4. Puckorius index



Слика 5. Индекс агресивности воде  
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 СаСО<sub>3</sub>, 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 смањило 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 агресивности, 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, Branislavljević 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 prediction 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.