

UDK: 551.482.214
Originalni naučni rad

PROCENA KOROZIVNIH KARAKTERISTIKA VODE PREMA INDEKSIMA AGRESIVNOSTI - PRIMER BUNARSKOG POLJA U VOJVODINI-

Andrija NEDELJKOVIĆ, Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Nemanja BRANISAVLJEVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija

REZIME

Za procenu agresivnosti i korozivnosti vode razvijeni su indeksi pokazatelja korozivnosti vode, od kojih su neki predstavljeni u ovom radu. Indeksi mogu da posluže kao indikatori korozivnosti vode.

U ovom radu analizirani su uzorci sirove vode iz četiri bunara u Vojvodini za koje se pretpostavlja da čine jedno bunarsko polje. Pretpostavka je da će voda biti obrađena fitracijom i dezinfekcijom pre puštanja u mrežu. Analiza je rađena pomoću Langelierov indeksa zasićenja, Ryznarovog indeksa, Pukoriusovog indeksa za korozione slojeve, indeksa agresivnosti, Larson-Skold-ov indeksa i modifikovanog Larson-Skold-ov indeksa.

Najčešće se razvoj korozije može sagledati kroz: propadanje cevi (meri se gubitak mase cevi i potrošnja kiseonika), formiranje naslaga (mere se hidraulički gubici ili stvaranje naslaga) i promenu kvaliteta vode u sistemu (meri se koncentracija gvožđa, određuje boja i mutnoća). Ključni parametri kvaliteta vode koji utiču na korozione procese su: pH vrednost, alkalitet i puferski kapacitet.

Među najpoznatijim indeksima, koji agresivnost i korozione karakteristike vode izražavaju putem $CaCO_3$, su: Langelierov indeks saturacije (*LSI*), Ryznarov indeks (*RSI*), Puckoriusov indeks skaliranja (*PSI*), indeks agresivnost (*AI*). Pored pomenutih indeksa, koji mogućnost korozije sagledavaju preko $CaCO_3$, razvijeni su i drugi indeksi koji uzimaju u obzir i druge parametre kvaliteta vode i njihov uticaj na koroziju cevi distributivne mreže. Među najpoznatijim su Larson-Skoldov indeks (*LR*) i modifikovani Larson-Skoldov indeks (*LRM*).

Uzorak iz bunara K3 ima približno iste vrednosti *LSI*, *RSI* i *PSI* indeksa kao i uzorci iz bunara E1 i L2, dosta

lošije vrednosti *LR* i *LRM* indeksa, ukazuju na to da voda iz bunara K3 ima veći potencijal da izaziva koroziju i probleme sa bojom vodom. Preporuka je da se voda iz bunara K3 ne koristi za vodosnabdevanje

Pod pretpostavkom da bunari imaju jednaku izdašnost, urađena je analiza indeksa korozivnosti za vodu koja bi bila mešavina iz sva četiri bunara (mešavina M1) i voda koja je mešavina bunara P2, E1 i L2 (mešavina M2).

Na osnovu analize mešavina vode M1, koja uključuje vodu iz sva 4 bunara, i mešavine M2, koja koristi vodu iz bunara P2, E1 i L2, pokazan je negativan uticaj vode iz bunara K3. Prema svim parametrima, mešavina M1 je pokazala veću tendenciju za razvoj korozije od mešavine M2

Ključne reči: korozija, indeksi korozivnosti, kvalitet vode, Langelierov indeks saturacije, Ryznarov indeks, Puckoriusov indeks skaliranja, indeks agresivnost, Larson-Skoldov indeks, modifikovani Larson-Skoldov indeks

1. UVOD

Korozija gvožđa kompleksan je proces koji zavisi od više parametara kvaliteta vode [1]. Za procenu agresivnosti i korozivnosti vode razvijeni su indeksi pokazatelja korozivnosti vode, od kojih su neki predstavljeni u ovom radu. Iako je razvijen veliki broj indeksa ni jedan nije pokazao mogućnost da tačno kvantifikuje i predvidi korozivnost ili agresivnost vode [2].

U ovom radu analizirani su uzorci sirove vode iz četiri bunara u Vojvodini za koje se pretpostavlja da čine jedno bunarsko polje. Pretpostavka je da će voda biti obrađena fitracijom i dezinfekcijom pre puštanja u mrežu. Analiza je rađena pomoću Langelierov indeksa zasićenja, Ryznarovog indeksa, Pukoriusovog indeksa

za korozione slojeve, indeksa agresivnosti, Larson-Skold-ov indeksa i modifikovanog Larson-Skold-ov indeksa. Cilj analize je bio određivanje da li je voda bunara pogodna za vodosnabdevanja, sa stanovništa korozije.

Korozija cevi u sistemima za vodosnabdevanje jedan je od značajnijih problema vodoprivrednih preduzeća. Korozija u vodovodnoj mreži uzrok je različitih pojava koje su međusobno povezane [1].

U tabeli 1 dat je očekivani efekat raznih faktora na koroziju gvožđa.

2. METODOLOGIJA

2.1 Parametri kvaliteta vode koji utiču na korozivnost

Korozija gvožđa je kompleksan proces. Zbog velikog broja promenljivih veličina u vodovodnom sistemu, određeni faktor u jednom sistemu može biti veoma

značajan, dok se u drugom sistemu može zanemariti. Korozioni procesi u vodi mogu se iskazati na više načina. Najčešće se razvoj korozije može sagledati kroz: propadanje cevi (meri se gubitak mase cevi i potrošnja kiseonika), formiranje naslaga (mere se hidraulički gubici ili stvaranje naslaga) i promenu kvaliteta vode u sistemu (meri se koncentracija gvožđa, određuje boja i mutnoća) [1].

Ključni parametri kvaliteta vode koji utiču na korozione procese su: pH vrednost, alkalitet i puferski kapacitet.

Istraživanja su pokazala da ako je pH vrednost u rasponu od 7,0 do 9,0 dolazi do većeg gubitka mase cevi i nastanka čvrstih korozivnih naslaga u cevima. Sa većom vrednošću pH nastaje manje korozivnih proizvoda. U jednoj studiji pokazano je da dolazi do porasta gubitka mase cevi i do povećanja koncentracije gvožđa u vodi, ako je pH vrednost između 8,5 i 9,2 [1]

Veća alkalnost vode obično uzrokuje manji gubitak mase cevi i manje izraženu koroziju. Visoke vrednosti

Tabela 1. Sumarni prikaz očekivanih efekat raznih faktora na koroziju gvožđa [1]

<i>Faktor</i>	Potencijalni efekat na		
	Stepen korozije	Formiranje naslaga	Produkti korozije
<i>Povećanje vrednosti pH</i>	-	-	+
<i>Povećanje alkaliteta</i>	+	-	+
<i>Povećanje puferskog kapaciteta</i>	+	?	?
<i>Povećanje rastvorenog kiseonika</i>	-	±	±
<i>Kuch-ova reakcija</i>	-	?	-
<i>Naslage kalcita</i>	+	-	±
<i>Naslage siderita</i>	+	?	+
<i>Naslage zelene rđe</i>	+	?	+
<i>Langelier-ov indeks saturacije</i>	<i>Ne bi trebalo koristiti</i>	<i>Ne bi trebalo koristiti</i>	<i>Ne bi trebalo koristiti</i>
<i>Povećanje Larson-Skold-ov indeks</i>	±	±	±
<i>Povećanje dezinfekcionih reziduala</i>	-	?	-
<i>Inhibitori fosfata</i>	±	±	±
<i>Silikati</i>	+	+	±
<i>Povećanje starosti cevi</i>	+	-	+
<i>Povećanje brzine vode</i>	-	±	±
<i>Povećanje vremena mirovanja vode</i>	?	?	-
<i>Povećanje aktivnosti mikroba</i>	-	-	-
<i>Povećanje temperature</i>	-	?	-
<i>Rastvoreni bakar</i>	-	?	?
<i>Prirodne organske materije</i>	+	+	-
<i>''Slobodan ugljen-diksid''</i>	-	?	-
+ koristan efekat; - - štetan efekat; ± pomešani rezultati; - ? nepoznato			

puferskog kapaciteta se često vezuje za povišeni nivo alkaliteta, mada ova dva parametra nisu u potpunosti jednaka. Međutim, njihov efekat na koroziju gvožđa je vrlo sličan. Nekoliko studija je pokazalo da je gubitak mase liveno-gvozdenih cevi najveći kada je puferski kapacitet minimalan ($pH = 8,4$). Pretpostavka je da visoke vrednosti puferskog kapaciteta smanjuju promenu vrednosti pH usled korozivnih reakcija na anodnim i katodnim površinama. Međutim, istraživanja u okviru jedne studije su pokazala suprotan efekat: gubitak mase uzorka od gvožđa u mirnoj vodi se povećao sa porastom puferskog kapaciteta [1].

2.2 Indeksi agresivnosti i korozivnosti

Indeksi služe kao indikatori korozivnih karakteristika vode. Iskustvo je pokazalo da se primenom zaštitnog sloja od kalcijum karbonata ($CaCO_3$) postižu uslovi za minimalnu koroziju. [2]. Među najpoznatijim indeksima, koji agresivnost i korozivne karakteristike vode izražavaju putem $CaCO_3$, su: Langelierov indeks saturacije (LSI), Ryznarov indeks (RSI), Puckoriusov indeks skaliranja (PSI), indeks agresivnosti (AI).

Pored pomenutih indeksa, koji mogućnost korozije sagledavaju preko $CaCO_3$, razvijeni su i drugi indeksi koji uzimaju u obzir i druge parametre kvaliteta vode i njihov uticaj na koroziju cevi distributivne mreže. Među najpoznatijim su Larson-Skoldov indeks (LR) i modifikovani Larson-Skoldov indeks (LRM).

U tabeli 2 prikazani su indeksi korišćeni u ovom radu i parametri kvaliteta vode potrebni za proračun indeksa.

Tabela 2. Indeksi korozivnosti i potrebni parametri kvaliteta vode

Parametri kvaliteta vode	Indeksi korozivnosti					
	LSI	RSI	PSI	AI	LR	LRM
pH	X	X	X	X		
T	X	X	X			X
TDS	X	X	X			
Alk	X	X	X	X		X
HCO_3^-					X	
Ca^{2+}	X	X	X			
SO_4^{2-}					X	X
Cl^-					X	X
H - tvrdoća				X		
Na^+						X
HRT						X

2.2.1 Langelierov indeks saturacije

Langelierov indeks saturacije (LSI) je indikator koji ukazuje da li postoje uslovi za taloženje $CaCO_3$. Uobičajeno se koristi kao indeks stabilnosti vode zato što je dokazano da film $CaCO_3$ donekle sprečava razvoj korozije [3]. Otkako je prvi put predložen LSI je dugo važio kao univerzalni alat za rešavanje svih problema sa korozijom. Iako se ova metoda pokazala uspešnom u određenim slučajevima, nikako je ne treba uvažiti kao univerzalnu metodu za kontrolu korozije. Nekoliko studija je pokazalo da ne postoji veza između LSI i stepena korozije. Uprkos više predloženih modifikacija LSI i kontinuirane upotrebe od strane mnogih komunalnih preduzeća Udruženje američkih vodovoda (American Water Works Association – AWWA) je 1996, u svom priručniku o koroziji, predložilo da se napusti praksa upotrebe LSI [1]. I pored AWWA preporuke LSI se i dalje koristi u praksi [3], [2], [4], [5] i zbog toga je obrađen i u ovom radu.

LSI se dobija na osnovu sledećeg izraza:

$$LSI = pH_A - pH_S$$

gde je:

pH_A – izmerena pH vrednost vode

$pH_S = (9.3 + A + B) - (C + D) - pH$ vrednost vode pri zasićenju na određenoj temperaturi

$$A = \frac{(\log_{10} TDS - 1)}{10}$$

$$B = -13.12 \times \log_{10}(^{\circ}C + 273) + 34.55$$

$$C = \log_{10}(Ca^{2+}) - 0.4$$

$$D = \log_{10}(Alk)$$

Pozitivne vrednosti LSI ukazuju na to da je voda zasićena $CaCO_3$ i može se očekivati formiranje filma $CaCO_3$. Negativne vrednosti ukazuju da voda nije zasićena $CaCO_3$ i ima izgleda da bude korozivna. Ako je $LSI = 0$ smatra se da je voda u ravnoteži. Nezasićena voda ima tendenciju da skida postojeći zaštitni $CaCO_3$ sloj i da izlaže metalnu površinu cevi daljoj koroziji. Opšta praksa je da se pH_A poveća za 0,2 –1,0 iznad vrednosti pH_S kako bi se sprečila korozija u vodovodnim sistemima [3]. Treba napomenuti da je LSI osetljiv na promenu temperature. LSI ima više, pozitivne, vrednosti sa porastom temperature [2]

2.2.2 Ryznarov indeks

Ryznarov indeks (*RSI*) je sličan *LSI*. I u ovom slučaju se kao pokazatelj korozivnosti koristi tendencija vode da taloži $CaCO_3$. Vrednost parametra pH_S u jednačini za *RSI* se računa na isti način kao za *LSI* [4]. Indeks *RSI* se dobija iz sledećeg izraza

$$RSI = 2pH_S - pH_A$$

gde je:

$pH_S = (9.3 + A + B) - (C + D) - pH$ vrednost vode pri zasićenju na određenoj temperature
 pH_A – izmerena pH vrednost vode

Vrednosti *RSI* između 5,0 i 7,0. Ako je vrednost *RSI* između 5,0 i 5,5 očekuje se formiranje velikih naslaga $CaCO_3$. Za vrednosti *RSI* preko 7,0 očekuje se značajna korozija. Sa porastom vrednosti *RSI* raste i korozivnost vode. [4].

2.2.3 Puckoriusov indeks skaliranja

Puckoriusov indeks skaliranja (*PSI*) vrlo je sličan *LSI* i *RSI*. Kao i kod prethno pomeunith indeksa, potencijalno taloženje $CaCO_3$ se koristi kao pokazatelj korozivnosti vode. Razlika je u tome što *PSI* uvodi vrednost pH pri ravnoteži pH_{eq} . *PSI* se računa preko sledećeg izraza:

$$PSI = 2pH_S - pH_{eq}$$

gde je:

$pH_S = (9.3 + A + B) - (C + D) - pH$ vrednost vode pri zasićenju

$pH_{eq} = 1.465 \times \log_{10}(Alk) + 4.54 - pH$ vrednost vode pri ravnoteži

Ako je vrednost manja od 4,5 voda ima tendenciju da stvara naslage. Vrednosti *PSI* od 4,5 do 6,5 su u optimalnom rasponu i neće dolaziti do korozije. Ako su vrednosti *PSI* preko 6,5 postoji potencijal za koroziju [5].

U tabeli 3 prikazani su optimalni rasponi indeksa *LSI*, *RSI* i *PSI*

2.2.4 Indeks agresivnosti

Indeks agresivnosti (*AI*) predstavlja tendenciju vode da razara strukturu azbestno-cementnih cevi. *AI* se računa preko sledećeg izraza:

$$AI = pH + \log_{10}(Alk \times H)$$

gde je:

pH – izmerena pH vrednost vode

Tabela 3. Raspon optimalnih vrednosti indeksa *LSI*, *RSI* i *PSI*

Indeksi			Aktivnost vode
<i>LSI</i>	<i>RSI</i>	<i>PSI</i>	
3.0	3.0	3.0	izraženo
2.0	4.0	4.0	↑
1.0	4.5	4.5	Formiranje naslaga $CaCO_3$
0.5	5.0	5.0	↓
0.2	5.5	5.5	Slabo
0.0	6.0	6.0	↓
-0.2	6.5	6.5	Slabo
-0.5	7.0	7.0	↑
-1.0	8.0	8.0	Rastvaranje naslaga $CaCO_3$
-2.0	9.0	9.0	↓
-3.0	10.0	10.0	izraženo

Alk – alkalitet vode [$CaCO_3$ mg/l]

H – tvrdoća vode u [$CaCO_3$ mg/l]

Ako je vrednost *AI* jednaka ili manja od 10 smatra se da je voda veoma agresivna, između 10 i 12, umereno agresivna, a ako je vrednost *AI* jednaka ili veća od 12, smatra se da voda nije agresivna [3]

2.2.5 Larson Skoldov indeks

T.E. Larson i R.V. Skold su razvili jednostavan izraz za kvantifikovanje agresivnosti vode prema niskougleničnom čeliku i livenom gvožđu. Izraz se zasniva na tome da hloridi (Cl^-) i sulfati (SO_4^{2-}) igraju važnu ulogu pri razvoju korozije, dok alkalitet snižava njihovu agresivnost [2]. Larson-Skold-ov indeks (*LR*) se dobija iz sledećeg izraza:

$$LR = \frac{Cl^- + SO_4^{2-}}{HCO_3^- + CO_3^{2-}}$$

gde su:

Cl^- – hloridi [meq/l]

SO_4^{2-} – sulfati [meq/l]

HCO_3^- – bikarbonati [meq/l]

CO_3^{2-} – karbonati [meq/l]

Vrednosti *LR* tumače se prema sledećim smernicama [2]:

- $LR < 0,2$ - Cl^- i SO_4^{2-} verovatno neće uticati na formiranje prirodnog filma
- $0,2 < LR < 0,6$ - Cl^- i SO_4^{2-} mogu uticati na formiranje prirodnog filma; može se očekivati pojačana korozija
- $LR > 0,6$ – treba očekivati tendenciju visoke stope korozije lokalnog tipa

2.2.6 Modifikovani Larson Skoldov indeks

Imran i grupa saradnika su dali ocenu nekoliko indeksa korozivnosti na osnovu podataka prikupljenih sa pilot distributivnog sistema. Došli su da zaključka da LR ima bolju korelaciju sa gvoždem i bojom vode koja potiče od gvožđa nego većina indeksa koji se baziraju na $CaCO_3$. Predložili su modifikovani Larson-Skoldov indeks (LRM), koji uzima u obzir efekte koje natrijum (Na^+), temperatura (T) i hidrauličko vreme zadržavanja (HRT). Cilj je bio bolja korelacija sa podacima o ispuštanju gvožđa [3], [2]:

$$LRM = \frac{(Cl^- + SO_4^{2-} + Na^+)^{1/2} T}{Alk} \frac{HRT}{25}$$

gde su:

Cl^- – hloridi [mg/l]

SO_4^{2-} – sulfati [mg/l]

Na^+ – natrijum [mg/l]

Alk – alkalitet vode [$CaCO_3$ mg/l]

T – temperatura vode [$^{\circ}C$]

HRT – hidrauličko vreme zadržavanja vode [dan]

Ako LRM ima vrednosti ispod 0,5, smatra se da voda nije korozivna. Shodno tome, za vrednosti preko 0,5 smatra se da je voda korozivna [2]. Na pilot distributivnom sistemu primetili da čak i kod voda koje nisu korozivne dolazi do promene boje usled povećane temperature i HRT , što je u skladu sa izrazom za LRM [3].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Kvalitet sirove vode iz 4 bunara u Vojvodini, za koje se pretpostavlja da čine jedno bunarsko polje, analiziran je korišćenjem indeksa korozivnosti koji su predstavljeni u Poglavlju 2.2. Pretpostavlja se da se vrši samo filtracija i dezinfekcija vode pre puštanja vode u sistem. Parametri kvaliteta vode su prikazani u tabeli 4.

Koncentracije gvožđa i mangana u uzorku sirove vode iz bunara K3 prevazilaze dozvoljene koncentracije prema

Tabela 4. Parametri kvaliteta sirove vode

Bunar		P2	K3	E1	L2
datum uzorkovanja		24.05. 2016	24.05. 2016	24.05. 2016	24.05. 2016
T vode	$^{\circ}C$	16	14	18	20
pH vrednost		7,76	7,17	7,74	7,77
El.provodlji vost na 25 $^{\circ}C$	mS/cm	2493	1265	1626	1613
rastvoreni kiseonik	mgO ₂ /l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
boja	$^{\circ}Pt-Co$	61	9	125	130
mutnoća	NTU	6,4	41	0,8	2,3
amonijum jon	mgN/l	4,32	3,02	8,4	4,92
nitriti	mgN/l	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
nitriti	mgN/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
p-alk	mgCaC O ₃ /l	0	0	0	0
m-alk	mgCaC O ₃ /l	1080	404	980	1050
bikarbonati	mg/l	1317,6	489	1195,6	1281
karbonati	mg/l	0	0	0	0
ukupna tvrdoća	mgCaC O ₃ /l	300,9	499,3	85,7	88
rastvoreni CO ₂	mg/l	37,5	54,2	35,7	35,7
suvi ostatak na 105 $^{\circ}C$	mg/l	1550	786	1010	1012
hloridi	mg/l	243,7	127,9	28,7	13,3
sulfati	mg/l	7,7	241,3	15,8	1,5
ortofosfati	mgP/l	0,124	0,307	0,702	0,719
ukupni fosfati	mgP/l	0,345	1,365	0,896	0,844
utrosak KMnO ₄	mg/l	136,7	20	73,7	74
kalcijum	mg/l	50,11	148,3	11,29	10,04
magnezijum	mg/l	42,69	31,33	13,96	15,29
natrijum	mg/l	455,28	57,23	335,21	345,45
kalijum	mg/l	3,7	2,44	2,98	2,04
gvožđe	mg/l	0,05	0,22	0,12	0,1
mangan	mg/l	0,012	0,246	<0,005	0,008

[6] (dozvoljena koncentracija gvožđa – 0,2 mg/l; dozvoljena koncentracija mangana – 0,05 mg/l), dok su ostali uzorci u propisanim granicama. Prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće [7] svi uzorci ispunjavaju propisanu granicu za gvožđe (300 mg/l), dok uzorak iz bunara broj K3 premašuje dozvoljenu koncentraciju za mangan (50 mg/l).

U tabeli 5 date su vrednosti indeksa korozivnosti za svaki bunar. Ako dobijena vrednost indeksa pokazuje da voda nema korozivna svojstva (posmatrano za taj indeks), ćelija u tabeli 5 je obojena zelenom bojom. U suprotnom, ćelija je obojena crvenom bojom.

Tabela 5. Vrednosti indeksa korozivnosti

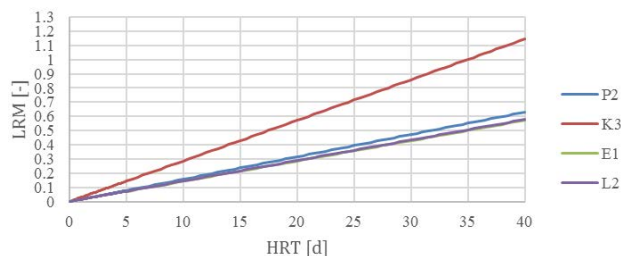
Bunar	Indeksi korozivnosti				
	<i>LSI</i>	<i>RSI</i>	<i>PSI</i>	<i>AI</i>	<i>LR</i>
P2	0,31	7,14	5,91	13,27	0,33
K3	-0,24	7,66	6,47	12,47	1,08
E1	-0,34	8,42	7,24	12,66	0,06
L2	-0,29	8,35	7,16	12,74	0,02

Dobijene vrednosti za *LSI* ukazuju da je voda iz bunara P2 zasićena sa $CaCO_3$ što ukazuje na potencijal za formiranje zaštitnog filma od $CaCO_3$ u cevovodu. Vrednosti za bunare K3, E1 i L2 ukazuju da voda nije zasićena i da poseduje potencijal za razgradnju zaštitnog filma od $CaCO_3$.

Po *RSI* voda iz sva četiri bunara je nezasićena i ima potencijal za razgradnju zaštitnog filma od $CaCO_3$ u cevi. Prema *PSI* metodi voda iz bunara P2 i K3 je zasićena, dok je voda iz bunara E1 i L2 nezasićena. Prema *AI* metodi, koja ukazuje na potencijal vode da razara azbestno cementne cevi, voda iz sva četiri bunara pokazuje potencijal za neagresivnost prema azbestno cementnim cevima.

Zanimljivi rezultati su dobijeni za *LR* metodu. Prema tri predstavljene metode *LSI*, *RSI* i *PSI*, koje potencijal za korozivnost izražavaju prema $CaCO_3$ uzorci iz bunara E1 i L2 imaju potencijal za korozivnost. Prema *LR* metodi, koja potencijal za korozivnost gleda preko odnosa hlorida i sulfata i alkaliteta vode, uzorci iz bunara E1 i L2 imaju najniže vrednosti, što ukazuje da hloridi i sulfati verovatno neće narušavati formiranje prirodnog filma. Visoka vrednost *LR* za uzorak iz bunara K3 ukazuje na tendenciju ka visokom stepenu korozivnosti.

Indeks *LRM* je prikazan na slici 1 u zavisnosti od hidrauličkog vremena zadržavanja.

Slika 1. Zavisnost *LRM* od hidrauličkog vremena zadržavanja

Prema [8] vreme zadržavanja vode u sistemima koji opslužuju 24 000 stanovnika kreće se između 12 i 24 dana na osnovu hidrauličkog modela, dok je za naselje veličine 87 900 stanovnika, utvrđena starost vode preko 16 dana na osnovu konverzije hloroamina. Trend je da je u većim sistemima kraće vreme zadržavanja. S tim u vezi, može se pretpostaviti da je vreme zadržavanja vode u sistemu koji opslužuju razmatrana četiri bunara 24 dana. U tabeli 6 date su vrednosti *LRM* za pojedina vremena zadržavanja.

Tabela 6. Vrednosti *LRM* u zavisnosti od *HRT*

Bunar	<i>LRM</i>				
	<i>HRT=1</i>	<i>HRT=6</i>	<i>HRT=12</i>	<i>HRT=18</i>	<i>HRT=24</i>
P2	0,02	0,09	0,19	0,28	0,38
K3	0,03	0,17	0,34	0,52	0,69
E1	0,01	0,09	0,17	0,26	0,34
L2	0,01	0,09	0,17	0,26	0,35

Po *LRM* metodi sve vode koje imaju vrednost *LRM* ispod 0,5 nisu korozivne. Uzorak iz bunara K3 prevazilazi tu vrednost za vreme zadržavanja vode od 18 dana, dok ostali uzorci imaju vrednost nižu od 0,5 i za vreme zadržavanja od 24 dana.

Iako uzorak iz bunara K3 ima približno iste vrednosti *LSI*, *RSI* i *PSI* indeksa (tabela 5) kao i uzorci iz bunara E1 i L2, dosta lošije vrednosti *LR* i *LRM* indeksa, ukazuju na to da voda iz bunara K3 ima veći potencijal da izaziva koroziju i probleme sa bojom vodom. Preporuka je da se voda iz bunara K3 ne koristi za vodosnabdevanje.

Ako se pretpostavi da bunari imaju jednaku izdašnost, može se uraditi analiza indeksa korozivnosti za vodu koja bi bila mešavina iz sva četiri bunara (mešavina M1) i voda koja je mešavina bunara P2, E1 i L2 (mešavina M2). S obzirom da su vrednosti *pH* sva četiri uzorka približno jednak, *pH* mešanih uzoraka je računata na osnovu prosečnih vrednosti aktivnih jona vodonika iz četiri i tri uzorka. Izračunate vrednosti potrebnih parametara kvaliteta vode date su u tabeli 7, a u tabeli 8 date su vrednosti *LSI*, *RSI*, *PSI*, *AI* i *LR* indeksa za razmatrane mešavine vode.

Kvalitet sirove vode u pogledu koncentracije gvožđa i mangana zadovoljava propisane standarde [6], [7].

Tabela 7. Vrednosti indeksa korozivnosti mešane vode M1 i M2

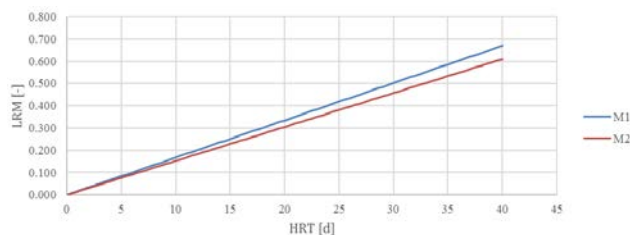
Mešavina		M1	M2
temperatura vode	°C	17	18
pH vrednost		7.52	7.76
El. provodljivost na 25°C	mS/cm	1749.25	1910.67
rastvoreni kiseonik	mgO ₂ /l	<0.5	<0.5
boja	°Pt-Co	81.25	105.33
mutnoća	NTU	12.63	3.17
amonijum jon	mgN/l	5.17	5.88
nitriti	mgN/l	<0.005	<0.005
nitriti	mgN/l	<0.05	<0.05
p-alkalitet	mgCaCO ₃ /l	0.00	0.00
m-alkalitet	mgCaCO ₃ /l	878.50	1036.67
bikarbonati	mg/l	1070.8	1264.7
karbonati	mg/l	0.0	0.0
ukupna tvrdoća	mgCaCO ₃ /l	243.5	158.2
rastvoreni CO ₂	mg/l	40.8	36.3
suvi ostatak na 105°C	mg/l	1089.5	1190.7
hloridi	mg/l	103.4	95.2
sulfati	mg/l	66.6	8.3
ortofosfati	mgP/l	0.46	0.52
ukupni fosfati	mgP/l	0.86	0.70
utrosak KMnO ₄	mg/l	76.10	94.80
kalcijum	mg/l	54.94	23.81
magnezijum	mg/l	25.82	23.98
natrijum	mg/l	298.29	378.65
kalijum	mg/l	2.79	2.91
gvožđe	mg/l	0.12	0.09
mangan	mg/l	0.07	0.008

Tabela 8. Vrednosti indeksa korozivnosti mešane vode M1 i M2

Mešavina	Indeksi korozivnosti				
	LSI	RSI	PSI	AI	LR
M1	-0,54	8,60	7,27	12,85	0,25
M2	-0,31	8,37	7,17	12,97	0,14

Kao i u tabelama 5 i 6, crvenom bojom su označene vrednosti koje po određenom indeksu, pokazuju potencijal za razvoj korozije. Mešavina M1 ima lošije rezultate u odnosu na mešavinu M2. Iako obe mešavine imaju pokazuju tendenciju za razvoj korozije po indeksima *LSI*, *RSI* i *PSI*, vrednosti *LR* indeksa pokazuju da mešavina M2 nema tendenciju za korozivna dejstva.

Indeks *LMR* je prikazan na slici 2 u zavisnosti od hidrauličkog vremena zadržavanja.

Slika 2. Zavisnost *LRM* od hidrauličkog vremena zadržavanja

Vrednosti *LRM* indeksa za mešavinu M1 i M2 ne prelaze graničnu vrednost 0,5 tokom 24 dana. *LRM* mešavine M1 dostiže graničnu vrednost, ako vreme zadržavanja vode u sistemu iznosi 30 dana, kao što je prikazano u tabeli 9.

Tabela 9. Vrednosti *LRM* u zavisnosti od *LRM* mešane vode M1 i M2

Mešavina	Indeksi korozivnosti				
	HRT=1	HRT=6	HRT=12	HRT=24	HRT=30
M1	0.02	0.10	0.20	0.40	0,50
M2	0.02	0.09	0.18	0.37	0,46

Na osnovu analize mešavina vode M1, koja uključuje vodu iz sva 4 bunara, i mešavine M2, koja koristi vodu iz bunara P2, E1 i L2, pokazan je negativan uticaj vode iz bunara K3. Prema svim parametrima, mešavina M1 je pokazala veću tendenciju za razvoj korozije od mešavine M2.

4. ZAKLJUČAK

Korozija je kompleksan proces na koji utiče mnogo promenljivih. Nije moguće razviti jedan model koji će sa sigurnošću utvrditi da li voda ima korozivne karakteristike. Korozija se iskazuje na nekoliko načina: kroz propadanje cevi, formiranje naslaga, i ispuštanjem korozivnih produkata [1]. Među parametrima kvaliteta vode, koji utiču na koroziju, izdvajaju se *pH* vrednost, alkalitet i puferski kapacitet, mada su neke studije pokazale i suprotne efekte za određene vrednosti parametara [1].

U nedostatku opšteg modela razvijen je veliki broj indeksa koji na različite načine predviđaju da li voda ima potencijal ka koroziji. Među najpoznatijim indeksima, koji agresivnost i korozivne karakteristike vode izražavaju preko kalcijum-karbonata, su: Langelierov indeks saturacije (*LSI*), Ryznarov indeks

(RSI), Puckoriusov indeks skaliranja (PSI), indeks agresivnost (AI). Larson-Skoldov indeks (LR) i modifikovani Larson-Skoldov indeks (LRM) uzimaju drugi pristup u pokušaju kvantifikovanja korozionog potencijala vode uvodeći u razmatranje koncentraciju hlorida, sulfata, natrijuma, temperature i hidrauličkog vremena zadržavanja. Ni jedan od indeksa ne može se posmatrati kao univerzalan za sve sisteme, jer isti parametar kvaliteta vode može imati različite efekte u određenim sistemima.

Analiza uzorka sirove vode sa četiri bunara, putem različitih indeksa korozivnosti, potvrdila je da se problemu korozije ne sme prići jednostrano. Uzorak sa bunara K3 imao je približno iste vrednosti indeksa LSI, RSI i PSI kao i uzorci sa bunara E1 i L2 koji su ukazivali na tendenciju razvoja korozije. Međutim, analiza LR i LRM indeksa pokazala je da voda iz bunara K3 dominira u mogućem potencijalu za razvoj korozije. Preporuka je da se voda iz bunara K3 ne koristi za vodosnabdevanje. Analiza mešavina vode M1, koja uključuje vodu iz sva 4 bunara, i mešavine M2, koja koristi vodu iz bunara P2, E1 i L2, je takođe pokazala negativan uticaj vode iz bunara K3

ZAHVALNOST

Autori se ovim putem posebno zahvaljuju g-dinu Miomiru Vasiljeviću koji je nesebično ustupio podatke kvaliteta vode koji su korišćeni u izradi ovog rada.

LITERATURA

- [1] L. S. McNeill and M. Edwards, "Iron pipe corrosion in distribution systems," *J. AWWA*, pp. 88–100, 2001.
- [2] A. Postawa and C. Hayes, Eds., *Best Practice Guide on the Control of Iron and Manganese in Water Supply*. IWA Publishing, 2013.
- [3] S. A. Imran, J. D. Dietz, G. Mutoti, J. S. Taylor, and a. a. Randall, "Modified Larsons Ratio Incorporating Temperature, Water Age, and Electroneutrality Effects on Red Water Release," *J. Environ. Eng.*, vol. 131, no. 11, pp. 1514–1520, 2005.
- [4] A. S. Benson, "Evaluation of Iron Corrosion Release Models for Water Distribution Systems," Virginia Polytechnic Institute, 2009.
- [5] H. C. Vasconcelos, B. M. Fernández-Pérez, S. González, R. M. Souto, and J. J. Santana, "Characterization of the corrosive action of mineral waters from thermal sources: A case study at Azores archipelago, Portugal," *Water (Switzerland)*, vol. 7, no. 7, pp. 3515–3530, 2015.
- [6] Savet Evropske Unije, "Council Directive 98/83/EC," *Off. J. Eur. Communities*, vol. L330, pp. 32–54, 1998.
- [7] Službeni glasnik RS 42/98 and 44/99, "Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće," *Off. Gaz. RS*, no. 42/98 and 44/99, 1999.
- [8] AWWA, "Effects of Water Age on Distribution System Water Quality," 2002.

ASSESSMENT OF CORROSIVE CHARACTERISTICS OF WATER ACCORDING TO INDICES OF WATER AGGRESSION - EXAMPLE OF WELL FIELD IN VOJVODINA

by

Andrija NEDELJKOVIĆ, Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Nemanja BRANISAVLJEVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Summary

For the assessment of aggressiveness and corrosiveness of water many indices have been developed and some of them are presented in this paper. Although number of indices has been developed indexes none of them has been able to accurately quantify and predict corrosiveness of water or aggression. Indexes can be used as indicators of possible corrosiveness of water.

Samples of raw water from four wells in Vojvodina, which are supposed to make a one-well field, have been analyzed in this paper. The assumption is that the water will be treated with filtration and disinfection before being introduced in to the system. The analysis was conducted using Langelier Index of Saturation, Ryznar Index, Puckorius Scaling Index, the Aggressiveness Index, Larson-Skold's Index and Modified Larson-Skold's Index.

Most often, the development of corrosion can be seen through: deterioration of the pipes (measured by the loss in mass of pipes and oxygen consumption), the formation of deposits (measured by hydraulic loss or the buildup of deposits) and change in water quality in the system (measured by the concentration of iron, change of color and turbidity). The key water quality parameters that affect the corrosion processes are: pH, alkalinity and buffering capacity.

Among the best known indices, which the aggression and corrosion properties of water express by $CaCO_3$, are: Langelier Index of Saturation (LSI), Ryznar Index (RSI), Puckorius Scaling Index (PSI), and the Aggressiveness Index (AI). In addition to these indices, which observe the possibility of corrosion by $CaCO_3$,

other indices have been developed that take into account other parameters of water quality and their effect on corrosion of the pipe distribution network. Most common among the Larson-Skold's index (LR) and modified Larson-Skold's index (LRM).

A sample from the well K3 has about the same values of LSI, RSI and PSI index as the samples from wells E1 and L2, but much worse values of LR and LRM index, which indicates that water from wells K3 has a greater potential to cause corrosion problems and the problems of water. It is recommended that water from wells K3 is not used for water supply.

Assuming that the wells have the same capacity, an analysis of the indices of water that would have been a mixture of all four wells (mixture M1) and the water is a mixture of wells P2, E1 and L2 (mixture M2), has been conducted.

Based on the analysis of a mixture of water M1, which includes water from all 4 wells, and mixtures M2, which uses water from wells P2, E1 and L2, negative impact water from wells K3 has been shown. According to all parameters, a mixture M1 showed a greater tendency to develop corrosion than mixture M2.

Keywords: corrosion, corrosiveness indices, water quality, Langelier Index of Saturation, Ryznar Index, Puckorius Scaling Index, the Aggressiveness Index, Larson-Skold's Index and Modified Larson-Skold's Index.

Redigovano 07.11.2016.