



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## تحلیل تمایل خوردگی در سیستم تامین آب با استفاده از شاخص‌های کیفی و شاخص کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم

رامین‌نبی‌زاده نوده‌ی<sup>۱</sup>، علیرضا مصداقی‌نیا<sup>۲</sup>، سیمین ناصری<sup>۳</sup>، مهدی هادی<sup>۳\*</sup>، حامد سلیمانی<sup>۱</sup>، پگاه بهمنی<sup>۳</sup>

- ۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۲- (نویسنده مسئول): مرکز تحقیقات کیفیت آب، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۳- مهندسی بهداشت محیط، شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کردستان، سنندج، ایران

### چکیده

زمینه و هدف: رسوبگذاری و خوردگی عوامل مخرب کیفیت آب آشامیدنی و تجهیزات لوله‌کشی محسوب می‌شوند. در این مطالعه تمایل به خوردگی یا رسوبگذاری آب زیرزمینی، آب مخازن ذخیره و شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از شاخص‌های کیفی و شاخص کمی پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم و تحلیل آماری شاخص‌ها به منظور بررسی وضعیت آب، انجام شد.

روش بررسی: نتایج آنالیز آب‌های زیرزمینی، آب مخازن ذخیره و شبکه توزیع آب روستایی شهرستان‌های استان کردستان مورد تحلیل قرار گرفت. مقدار شاخص‌های خوردگی لائزلیر (LI)، رایزنار (RI)، پوکوریوس (PSI) و لارسون-اسکولد (LS) و پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم (CCPP) تعیین گردید. آستانه خوردگی یا رسوبگذاری بر مبنای شاخص CCPP تعیین و مقایسه میانگین شاخص‌ها با مقادیر آستانه با استفاده از  $t$ -test independent انجام شد. آنالیز واریانس یکطرفه به منظور بررسی اختلاف بین مقدار شاخص‌ها در منابع استفاده شد.

یافته‌ها: محدوده تعادل آب بر مبنای لائزلیر، رایزنار و پوکوریوس به ترتیب ۰/۱-۰/۰۵، ۷-۹ و ۸/۵-۷/۱ تعیین شد. مقدار CCPP در آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه به ترتیب برابر با  $۹/۲۷ \pm ۱/۲۹$ ،  $۹/۱۳ \pm ۱/۲۵$  و  $۱۱/۲۵ \pm ۱/۲۳$  تعیین گردید و مقادیر شاخص‌های لائزلیر، رایزنار و پوکوریوس در هر سه منبع، نزدیک به وضعیت رسوبگذار بود. با این حال به لحاظ آماری وضعیت تعادل معنی‌دار شد. براساس مقادیر شاخص لارسون-اسکولد در مورد منابع آب مورد مطالعه، آنیون‌های سولفات و کلرور نقشی در رسوبگذاری ندارند.

نتیجه‌گیری: بررسی همزمان شاخص‌های کیفی در کنار شاخص CCPP اطلاعات دقیق‌تری از وضعیت خوردگی و رسوبگذاری آب فراهم می‌نماید. توصیه می‌شود مقدار شاخص‌های کیفی همواره در کنار شاخص CCPP بررسی شوند.

### اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۲۹  
تاریخ ویرایش: ۹۵/۱۱/۱۸  
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۴  
تاریخ انتشار: ۹۵/۱۲/۱۶

واژگان کلیدی: پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم، سیستم تامین آب شرب، شاخص‌های خوردگی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
hadi\_rfm@yahoo.com

## مقدمه

رسوبگذاری و خوردگی به عنوان یکی از عوامل مخرب مهم کیفیت آب آشامیدنی مشکلاتی را نظیر کاهش بهداشت عمومی، کاهش کیفیت آب و کاهش عمر مفید تجهیزات لوله‌کشی ایجاد می‌کند. از اینرو کنترل آن تاثیر بسزایی در بهداشت و کیفیت آب دارد. طبق استاندارد ایزو ۸۰۴۴ خوردگی، برهم‌کنش فیزیکو شیمیایی مسیر انتقال با محیط اطراف است که سبب تغییر در خواص مسیر انتقال می‌شود (۱). به بیانی دیگر خوردگی واکنش فیزیکی- شیمیایی ناشی از تاثیر چندین عامل شیمیایی، الکتریکی، فیزیکی و بیولوژیکی توصیف شده است (۲). فرایند فوق در دراز مدت می‌تواند سلامت انسان‌ها را به خطر انداخته و مسایل اقتصادی، اجتماعی، فنی مهندسی و زیباشناختی را به دنبال داشته باشد (۳). مطابق معیارهای جهانی پایش تمایل آب به خوردگی با استفاده از شاخص‌های خوردگی و رسوبگذاری باید حداقل هر سه ماه یکبار برای منابع آب‌های سطحی و هر شش ماه یکبار برای منابع آب‌های زیرزمینی انجام شوند (۴). از اینرو همه ساله هزینه قابل توجهی جهت کنترل خوردگی در صنعت آب اختصاص داده می‌شود. مطالعات در کشورهای صنعتی نشان می‌دهد خسارات ناشی از خوردگی حدود ۶ درصد درآمد ناخالص ملی در این کشورها بوده است (۵). در سیستم‌های آبرسانی علاوه بر خسارت‌های مالی که در اثر از بین رفتن تاسیسات حاصل می‌شود، ورود محصولات حاصله از خوردگی در آب، اغلب باعث بی‌میلی مصرف‌کنندگان نسبت به آب توزیعی شده و ممکن است به علت ورود فلزات سنگین نظیر سرب، مس، کروم و کادمیم سلامتی مصرف‌کنندگان را به مخاطره بیندازد (۶-۸). مطالعات نشان می‌دهند که محصولات ناشی از خوردگی سطوح لوله می‌تواند در شبکه‌های توزیع تجمع یافته یا ته‌نشین شوند و میکروارگانیسم‌ها را از اثر گندزدها محافظت کنند (۹، ۱۰). Loewenthal و همکاران در سال ۲۰۰۴ در کشور آفریقای جنوبی اعلام کردند که خوردگی و رسوبگذاری از مشکلات متداول در خطوط انتقال و توزیع آب‌های زیرزمینی است و مکانیزم اثر و شدت آن به دو عامل یکی کیفیت آب و دیگری جنس لوله بستگی دارد. صرف نظر از علل این مشکلات، از راه حل‌های ممکن (برای تقلیل آنها) تنظیم pH، تنظیم غلظت

کربنات کلسیم و تثبیت آب هستند (۱۱). بر طبق مطالعه انجام شده توسط Atasoy و همکاران خوردگی باعث افزایش غلظت فلزات در آب آشامیدنی می‌شود (۱۲). بر طبق سومین گزارش کنگره آکادمی علوم، خوردگی می‌تواند سبب کاهش طول عمر لوله‌ها و تخریب کلیه قسمت‌های سیستم توزیع آب یعنی خطوط انتقال، دستگاه‌های پمپاژ، خطوط اصلی شبکه توزیع و لوله‌کشی منازل گردد. مسائل مربوط به خوردگی در حال حاضر درصد قابل توجهی از درآمد سرانه کشورهای مختلف را به خود اختصاص داده است (۱۳).

در ایران آمار دقیقی از خسارت خوردگی و رسوبگذاری در دسترس نیست ولی بررسی تلفات آب تصفیه شده نشان می‌دهد که سالانه به علت پوسیدگی‌های حاصله از خوردگی لوله‌های انتقال و توزیع آب، بیش از ۳۰ درصد آب‌های توزیعی به هدر می‌روند (۶، ۱۴). در استانداردهای مصوب ایران نیز موضوع عدم خوردگی بودن آب منظور نگردیده است (۱۵). با این حال مطالعات متعددی در زمینه بررسی وضعیت خوردگی و تشکیل رسوب در سیستم‌های مختلف تامین و توزیع آب در شهرهای مختلف انجام شده است (۱۶، ۱۷).

پدیده‌های خوردگی یا رسوبگذاری با استفاده از شاخص‌های کیفی شامل شاخص اشباع لائزلیر (LI) (۱۸)، شاخص پایداری رایزنار (RY) (۱۹)، شاخص رسوبگذاری پوکوریوس (PSI) (۲۰) و شاخص لارسون-اسکولد (LS) (۲۱) و همچنین شاخص کمی مهم دیگری با عنوان پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم (CCPP) قابل بررسی است. اولین روش به منظور پیش‌بینی مشخصات خورنده و یا رسوبگذار بودن آب توسط لائزلیر (۲۲) ارائه شد. در ایندکس پایداری رایزنار (۱۹) سعی شد از اطلاعات تجربی نیز به منظور بررسی شدت خوردگی در لوله‌های انتقال آب شهری کمک گرفته شود. در شاخص PSI رابطه بین وضعیت فوق اشباع آب و رسوبگذاری با لحاظ شدن دو پارامتر ظرفیت بافری آب و حداکثر مقدار ته‌نشست ناشی از آب در شرایط تعادل بررسی شد. شاخص لارسون-اسکولد (۲۱) نیز به منظور بررسی خورنده بودن آب در مجاورت با لوله‌های فولادی و لوله‌های فولادی با ساختار کربنی سبک و لوله‌های چدنی ارائه شد. شاخص دیگری که بر خلاف شاخص‌های قبل یک شاخص کمی محسوب می‌شود شاخص CCPP

برای همین منظور در مطالعه Mesdaghinia و همکاران (۱۷) تدوین شد انجام گردید. بعد از تعیین مقدار شاخص‌ها، مقایسه میانگین مقادیر تعیین شده با مقدار آستانه با استفاده از independent t-test و با استفاده از نرم افزار R انجام شد. حدود اطمینان آماری در انجام تمام آزمون‌های انجام شده ۹۵ درصد منظور شد.

در این مطالعه براساس پیشنهاد ارائه شده در مطالعه Mesdaghinia و همکاران (۱۷) حد آستانه هر یک از شاخص‌های لائزلیر، رایزنار و پوکوریوس از طریق بررسی ارتباط بین این شاخص‌های کیفی با مقدار شاخص کمی CCPP تعیین و در جدول ۱ آورده شد. در مورد شاخص لارسون اسکولد به دلیل اینکه این شاخص بر پایه تعادل کربنات کلسیم نیست امکان تعیین حدود آستانه از طریق برقراری ارتباط با شاخص CCPP وجود نداشت و از اینرو حد آستانه خوردگی این شاخص مقادیر بالاتر از ۱/۲ مطابق توصیه Larson و همکاران (۲۱) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- حد آستانه شاخص‌های کیفی خوردگی

| شاخص     | حد آستانه |           |
|----------|-----------|-----------|
|          | رسوبگذار  | تعادل     |
| لائزلیر  | > ۰/۰۵    | -۰/۱-۰/۰۵ |
| رایزنار  | < ۷       | ۷-۹       |
| پوکوریوس | < ۷/۱     | ۷/۱-۸/۵   |

در جدول ۲ نحوه محاسبه هر شاخص و مقدار آستانه بروز خوردگی بر مبنای پیشنهاد مطالعات مختلف آورده شده است.

### یافته‌ها

در جدول ۳ آمار توصیفی مشخصات کیفی آب‌های زیرزمینی، مخازن ذخیره آب و شبکه‌های توزیع آب روستایی در تمامی شهرستان‌های مورد مطالعه آورده شده است. از مهمترین پارامترهایی که در پدیده‌های رسوبگذاری و خوردگی نقش دارند می‌توان به پارامترهای pH، قلیائیت، مقدار کلسیم، TDS و غلظت آنیون‌های سولفات و کلرور اشاره کرد. با

است. محاسبه این شاخص نیازمند استفاده از روش‌های حل عددی کامپیوتری بوده و به روش دستی قابل محاسبه نیست. این مسئله باعث شده است تا در اغلب مطالعات انجام شده در زمینه پایش خوردگی آب از این شاخص استفاده نشود و یا به ندرت مورد استفاده قرار گیرد. Rossum و همکاران (۲۳) در سال ۱۹۸۳ الگوریتمی را جهت محاسبه شاخص CCPP ارائه کردند. آنها به پیچیده بودن محاسبه این شاخص اشاره و استفاده از برنامه‌های کامپیوتری را تنها راه حل برای محاسبه این شاخص معرفی کرده‌اند. به هر حال در اغلب مطالعات صورت گرفته عمدتاً از شاخص‌های کیفی لائزلیر، رایزنار و پوکوریوس و همچنین شاخص لارسون اسکولد استفاده شده است. در ایران در مطالعات مرتبط با پایش خوردگی در سیستم‌های تامین آب شرب از شاخص پتانسیل ترسیب کربنات کلسیم که یک شاخص کمی است بندرت (۱۷) استفاده شده است. در این مطالعه با استفاده از اطلاعات کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه توزیع آب در استان کردستان، مقادیر شاخص‌های خوردگی کیفی شامل LI, RY, PSI و LS و همچنین CCPP که نشان‌دهنده تمایل رسوبگذاری کربنات کلسیم هستند و برحسب میلی گرم بر لیتر بیان می‌شود تعیین گردید و با استفاده از روش‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه از اطلاعات ثبت شده اندازه‌گیری‌های کیفی آب‌های زیرزمینی توسط شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کردستان (سال ۱۳۸۸) که شامل چشمه‌ها، قنوات و چاه‌ها در شهرستان‌های بانه، دهگلان، سقز، سنندج، سروآباد، قروه، کامیاران، مریوان، بیجار و دیواندره است، استفاده شد. اطلاعات مربوط به کیفیت شیمیایی شامل مقدار پارامترهای دما، قلیائیت کل، pH، سختی کلسیم، سختی کل، کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی پس از جمع‌آوری و بررسی اولیه وارد نرم افزار اکسل شدند. بعد از حذف مقادیر برونهشته از بین داده‌ها، رکوردهای مناسب داده به منظور بررسی بیشتر مورد استفاده قرار گرفت. محاسبه شاخص‌های خوردگی با استفاده از نرم افزار Water Corrosion Index Calculator که

بررسی مقدار pH در جدول ۳ مشاهده می‌شود که مقدار این پارامتر از ۷/۵۶ در آب‌های زیرزمینی به ۷/۶۳ در مخازن ذخیره و در نهایت به ۷/۷۲ در شبکه توزیع افزایش یافته است. با افزایش pH تمایل آب به رسوبگذاری افزایش می‌یابد. در مقابل مقدار پارامتر TDS از ۳۸۶/۳۴ در آب‌های زیرزمینی به ۳۳۷/۳۶ در مخازن ذخیره و در نهایت به ۳۰۴/۸۹ در شبکه توزیع کاهش یافته است. همچنین این روند کاهش در مورد پارامتر کلسیم نیز دیده می‌شود.

به جز شاخص CCPP که یک شاخص کمی بوده و بر حسب میلی‌گرم بر لیتر بیان شده است بقیه شاخص‌ها کیفی بوده و بدون بعد هستند. مقدار شاخص CCPP برای آب زیرزمینی، مخازن ذخیره‌سازی و شبکه توزیع به ترتیب برابر با  $۸/۱۶ \pm ۲/۱۵$ ،  $۱۱/۰۹ \pm ۴/۸۶$  و  $۱۱/۱۵ \pm ۳/۱۶$  تعیین شد. در جدول ۴ نتایج مقایسه مقدار شاخص‌های برآورد شده در منابع مورد بررسی با استفاده از آنالیز واریانس آورده شده است. براساس نتایج آنالیز واریانس و انجام مقایسه Tukey Multiple Comparison اختلاف معنی‌داری بین مقدار شاخص‌های لائزیر و لارسون اسکولد برآورد شده برای آب زیرزمینی و آب شبکه توزیع در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود دارد. در شکل ۱ آزمون فرض مقایسه مقدار میانگین شاخص‌های خوردگی با حدود آستانه به تفکیک منبع مورد بررسی آورده شده است. همچنین آزمون فرض مشابهی به تفکیک شهرستان برای شاخص کمی CCPP در شکل ۲ برای آب زیرزمینی، مخازن آب و شبکه توزیع آورده شده است. در شکل ۱ و ۲، SE نشان‌دهنده مقدار خطای استاندارد ضرب شده در مقدار Z (برابر ۱/۹۶) و به عبارتی حدود اطمینان ۹۵ درصد میانگین است. دو خطی که اطراف میانگین (دایره مشکی) قرار گرفته است حدود اطمینان ۹۵ درصد میانگین را نشان می‌دهد. در این نمودارها با استفاده از دو خط عمودی آستانه‌های خوردگی و رسوبگذاری براساس تفسیر هر شاخص در جداول ۱ و ۲ مشخص شده است.

## بحث

مقدار متوسط شاخص لائزیر در آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه توزیع به ترتیب برابر با  $۰/۱۸ \pm ۰/۰۲۴$ ،  $۰/۱۹ \pm ۰/۰۲$  و  $۰/۶۰ \pm ۰/۰۳۳$  تعیین گردید. چنانچه مقدار این شاخص کمتر از

صفر باشد بیانگر تمایل آب به خوردگی است و در صورتی که بزرگتر از صفر باشد به مفهوم رسوبگذار بودن آب است (۱۸). به هر شکل هر دو پدیده رسوبگذاری و خوردگی پدیده‌های نامطلوبی به حساب می‌آیند. طبق پیشنهاد Benefield (۲۴) چنانچه مقدار شاخص لائزیر در آب‌های سرد از ۰/۵- بیشتر باشد و یا در آب جوش از ۰/۰ بیشتر باشد، آب در وضعیت غیرخورنده قرار خواهد داشت و مطلوب‌ترین حالت زمانی است که مقدار شاخص برابر صفر باشد. به هر حال حدود آستانه بسته به مشخصات کیفی آب متفاوت خواهد بود و بهترین روش برای تعیین حدود آستانه شاخص‌های کیفی، بررسی ارتباط آنها با شاخص کمی CCPP است (۱۷). براساس نتایج این مطالعه چنانچه مقدار شاخص لائزیر بین ۰/۱- تا ۰/۰۵ باشد، آب در وضعیت تعادل قرار دارد. براساس مقدار شاخص لائزیر و همچنین پلات ترسیم شده از مقادیر مشاهداتی این شاخص در شکل ۱- (الف)، مقدار این شاخص در آب زیرزمینی، مخازن ذخیره و شبکه توزیع از مقدار آستانه ۰/۰۵ بزرگتر بوده و از اینرو تمایل نسبتاً کمی به شرایط رسوبگذار وجود دارد.

مقدار متوسط شاخص رایزنار در آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه نیز به ترتیب برابر با  $۷/۲۲ \pm ۰/۰۳۴$ ،  $۷/۲۵ \pm ۰/۰۳۳$  و  $۷/۱۳ \pm ۰/۰۲$  تعیین گردید. براساس شاخص رایزنار و حدود آستانه تعیین شده برای این شاخص (جدول ۱) چنانچه مقدار این شاخص بین ۷ تا ۹ قرار گیرد، آب در وضعیت تعادل و چنانچه بیشتر از ۹ باشد خورنده خواهد بود. بر اساس شکل ۱- (ب) مقادیر مشاهداتی این شاخص نیز به حد آستانه رسوبگذاری یعنی عدد هفت نزدیک هستند، با این حال به لحاظ آماری با اطمینان ۹۵ درصد مقدار این شاخص برای آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه در محدوده ۷ تا ۹ است. در بین شاخص‌های مختلف، شاخص‌های رایزنار و لائزیر به دلیل مزایای خاصی که نسبت به دیگر شاخص‌ها دارند، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۵، ۲۶). یکی از مزایای عمده این دو شاخص سادگی، قدمت و کاربرد وسیع آنها است (۲۷). از مزایای دیگر، کاربرد عام در تمامی بخش‌های مرتبط با آب است. با این حال روند تحقیقات نشان می‌دهد محققان مختلف شاخص‌های گوناگونی را در زمینه خوردگی و رسوبگذاری معرفی نموده‌اند (۱۲، ۲۳، ۲۸، ۲۹).

جدول ۲- تعریف و حد آستانه خوردگی هر یک از چهار شاخص مورد مطالعه

| منبع     | روابط محاسباتی  | حد آستانه خوردگی | نوع  | فرمول  | شاخص |
|----------|---|------------------|------|--|------|
| (۱۸)     | $pH = -\log[H^+]$   | < ۰              | کیفی | $LI = pH - pH_s$   | LI   |
| (۱۹)     | $pH_s = pK_{a2} + pCa^{2+} - pK_{so} - \log(2[Alk_{initial}]) - \log \gamma_m$<br>$[Alk_{initial}] = [CO_3^{2-}] + \frac{1}{2}[HCO_3^-] + \frac{1}{2}[OH^-] - \frac{1}{2}[H^+]$       | > ۷/۵            | کیفی | $RI = 2pH_s - pH$  | RY   |
| (۲۱)     | $C_T = \frac{[HCO_3^-]([H^+]^2 + K_{a1}[H^+] + K_{a1}K_{a2})}{K_{a1}[H^+]}$   | > ۱/۲            | کیفی | $LS = (C_{Cl^-} + C_{SO_4^{2-}})(C_{HCO_3^-} + C_{CO_3^{2-}})$ | LS   |
| (۲۰)     | $pH_{eq} = -\log\{H^+\}$<br>$\alpha_1 = \frac{K_{a1}\{H^+\}}{\{H^+\}^2 + K_{a1}\{H^+\} + K_{a1}K_{a2}}$<br>$\alpha_2 = \frac{K_{a1}K_{a2}}{\{H^+\}^2 + K_{a1}\{H^+\} + K_{a1}K_{a2}}$ | > ۷/۶            | کیفی | $PSI = 2pH_s - pH_{eq}$  | PSI  |
| (۳۰, ۳۳) | $X \approx \frac{C_T(\{H^+\} + 2\alpha_2) + \frac{K_w}{\{H^+\}} - \{H^+\} - Alk_{initial}}{(\alpha_1 + 2\alpha_2 - 2)}$<br>$K_{so} = ([Ca^{2+}] - X)(C_T - X)\alpha_2$                | < ۴              | کمی  | $CCPP = X \times 100086.9$                                     | CCPP |

مقدار پارامتر X به روش سعی و خطا براساس روش ارائه شده توسط تروسل قابل تعیین است.

$[Alk_{initial}]$ : قلیائیت اولیه (mol/L)،  $Alk_{initial}$ : قلیائیت اولیه (eq/L)،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$ : فاکتورهای یونیزاسیون کربنات کلسیم،  $H^+$ : اکتیویته پروتون در نقطه تعادل (mol/L)،  $K_{a1}$ : ثابت تعادل اصلاح شده اسید کربنیک و بی کربنات،  $K_{a2}$ : ثابت تعادل اصلاح شده بی کربنات و کربنات،  $K_w$ : ثابت تعادل اصلاح شده آب،  $K_s$ : ثابت حاصلضرب حلالیت کربنات کلسیم، X: مقدار کربنات کلسیم حل شده یا رسوب یافته در نقطه تعادل (mol/L)،  $C_T$ : غلظت کل گونه‌های کربناته (mol/L)، مقدار pH واقعی (اندازه‌گیری شده)،  $pH_s$ : مقدار pH در نقطه اشباع کربنات کلسیم،  $pH_{eq}$ : مقدار pH در نقطه تعادل کربنات کلسیم،  $\gamma_m$ : ضریب اکتیویته یون‌های مونولنت در آب.

جدول ۳- آمار توصیفی مشخصات کیفی آب به تفکیک منبع

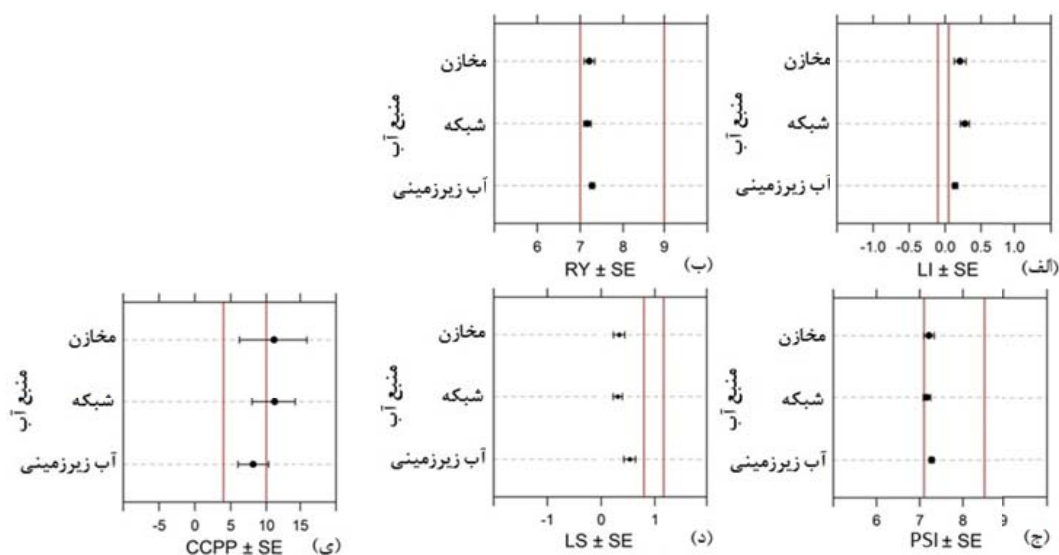
| منبع        | پارامتر         | واحد  | میانگین | انحراف معیار | خطای استاندارد | پیشینه  | کمیته | حد بالا | حد پایین |
|-------------|-----------------|-------|---------|--------------|----------------|---------|-------|---------|----------|
| آب زیرزمینی | T               | C°    | ۲۲/۸۳   | ۳/۷۹         | ۰/۳۳           | ۲۹/۷۰   | ۱۱/۸۰ | ۲۳/۱۶   | ۲۲/۵۰    |
|             | pH              | -     | ۷/۵۶    | ۰/۳۵         | ۰/۰۳           | ۸/۹۰    | ۶/۵۰  | ۷/۵۹    | ۷/۵۲     |
|             | EC              | μs/cm | ۶۰۳/۷   | ۶۰۴/۵        | ۵۲/۶           | ۸۱۰۳    | ۱۱۹   | ۶۵۶۳    | ۵۵۱      |
|             | TDS             | mg/L  | ۳۸۶/۳۴  | ۳۸۳/۱۰       | ۳۳/۳۳          | ۵۴۲۹/۰  | ۷۵/۰۰ | ۴۱۹/۶۷  | ۳۵۳/۰۱   |
|             | TH              | mg/L  | ۲۷۷/۳۵  | ۱۵۰/۴۸       | ۱۳/۰۹          | ۱۵۹۵/۳۰ | ۹۰/۸۰ | ۲۹۰/۴۴  | ۲۴۶/۲۶   |
|             | Cl              | mg/L  | ۳۴/۰۸   | ۱۲۲/۳۶       | ۱۰/۶۵          | ۱۷۷۹/۱۰ | ۰/۵۰  | ۴۴/۷۲   | ۲۳/۴۳    |
|             | SO <sub>۴</sub> | mg/L  | ۶۶/۲۶   | ۱۴۲/۰۶       | ۱۲/۳۶          | ۱۷۵۰/۰  | ۰/۵۰  | ۷۸/۶۲   | ۵۳/۹۰    |
|             | Alk             | mg/L  | ۲۰۸/۹۸  | ۷۴/۹۹        | ۶/۵۲           | ۵۴۵/۴۰  | ۱۹/۸۰ | ۲۱۵/۵۰  | ۲۰۲/۴۶   |
|             | Ca              | mg/L  | ۷۸/۸۰   | ۴۳/۱۸        | ۳/۷۶           | ۵۳۲/۳۰  | ۱۶/۲۰ | ۸۲/۵۶   | ۷۵/۰۴    |
|             | CO <sub>۲</sub> | mg/L  | ۱۳/۱۴   | ۱۲/۱۲        | ۱/۰۵           | ۹۰/۰۰   | ۰/۰۰  | ۱۴/۱۹   | ۱۲/۰۸    |

ادامه جدول ۳- آمار توصیفی مشخصات کیفی آب به تفکیک منبع

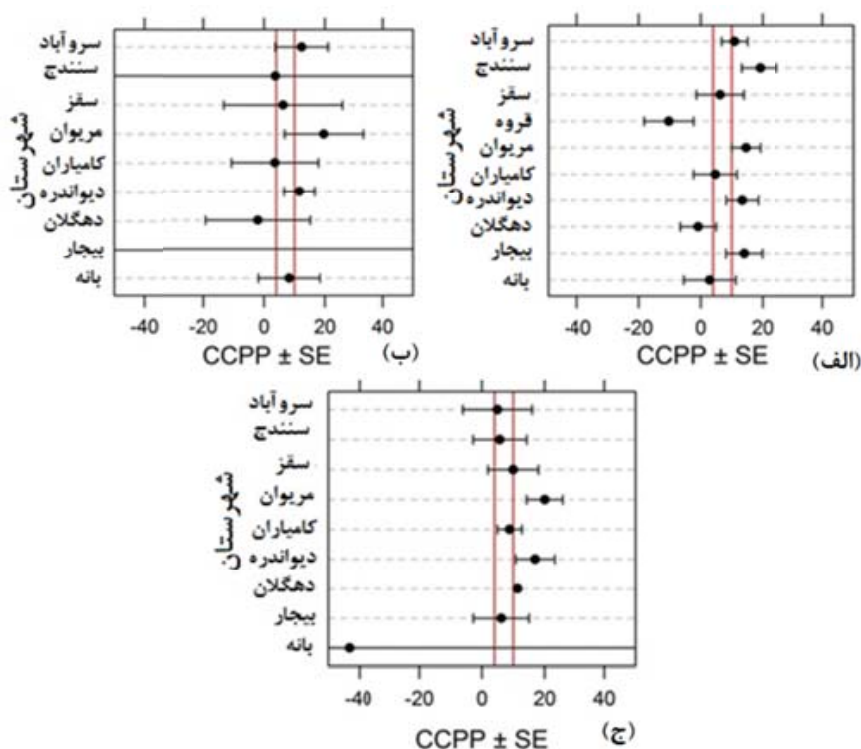
| منبع            | پارامتر         | واحد  | میانگین | انحراف معیار | خطای استاندارد | پیشینه  | کمینه  | حد بالا | حد پایین |
|-----------------|-----------------|-------|---------|--------------|----------------|---------|--------|---------|----------|
| مخازن ذخیره آب  | T               | C°    | ۲۲/۹۵   | ۲/۸۸         | ۰/۶۰           | ۲۹/۵۰   | ۱۵/۷۰  | ۲۳/۵۵   | ۲۲/۳۵    |
|                 | pH              | -     | ۷/۶۳    | ۰/۳۴         | ۰/۰۷           | ۸/۳۷    | ۶/۵۰   | ۷/۷۰    | ۷/۵۶     |
|                 | EC              | μs/cm | ۵۲۱/۹   | ۳۱۹/۲        | ۶۶/۵           | ۱۹۴۹/۱  | ۱۱۶/۸  | ۵۸۸/۳   | ۴۵۵/۴    |
|                 | TDS             | mg/L  | ۳۳۷/۳۶  | ۲۱۲/۶۸       | ۴۴/۲۹          | ۱۳۰۵/۹۰ | ۷۳/۶۰  | ۳۸۱/۶۵  | ۲۹۳/۰۷   |
|                 | TH              | mg/L  | ۲۷۳/۸۱  | ۱۴۵/۸۲       | ۳۰/۳۷          | ۹۲۹/۴۰  | ۹۵/۴۰  | ۳۰۴/۱۸  | ۲۴۳/۴۴   |
|                 | Cl              | mg/L  | ۲۰/۷۹   | ۳۸/۸۳        | ۸/۰۹           | ۲۱۸/۵۰  | ۰/۵۰   | ۲۸/۸۷   | ۱۲/۷۰    |
|                 | SO <sub>۴</sub> | mg/L  | ۴۷/۲۴   | ۹۴/۳۶        | ۱۹/۶۵          | ۶۵۰/۰۰  | ۰/۵۰   | ۶۶/۸۹   | ۲۷/۵۹    |
|                 | Alk             | mg/L  | ۲۰۶/۳۶  | ۸۴/۹۹        | ۱۷/۷۰          | ۶۵۴/۲۰  | ۵۰/۰۰  | ۲۲۴/۰۶  | ۱۸۸/۶    |
|                 | Ca              | mg/L  | ۷۷/۴۲   | ۳۸/۵۵        | ۸/۰۳           | ۳۰۹/۴۰  | ۲۱/۴۰  | ۸۵/۴۵   | ۶۹/۳۹    |
| CO <sub>۲</sub> | mg/L            | ۱۱/۰۲ | ۹/۶۰    | ۲/۰۰         | ۵۲/۰۰          | ۲/۰۰    | ۱۳/۰۲  | ۹/۰۲    |          |
| شبکه توزیع      | T               | C°    | ۲۲/۳۹   | ۳/۵۶         | ۰/۵۸           | ۲۹/۷۰   | ۱۲/۶۰  | ۲۲/۹۶   | ۲۱/۸۱    |
|                 | pH              | -     | ۷/۷۲    | ۰/۳۷         | ۰/۰۶           | ۸/۳۵    | ۶/۶۰   | ۷/۷۸    | ۷/۶۶     |
|                 | EC              | μs/cm | ۴۷۴/۲   | ۲۴۳/۴        | ۳۹/۴           | ۱۹۰۵    | ۱۶۷/۹  | ۵۱۳/۶   | ۴۳۴/۸    |
|                 | TDS             | mg/L  | ۳۰۴/۸۹  | ۱۶۲/۱۹       | ۲۶/۲۶          | ۱۲۷۶/۶۰ | ۱۰۵/۸۰ | ۳۳۱/۱۵  | ۲۷۸/۶۳   |
|                 | TH              | mg/L  | ۲۵۱/۹۳  | ۹۰/۱۴        | ۱۴/۵۹          | ۷۰۴/۶۰  | ۷۷/۳۰  | ۲۶۶/۵۳  | ۲۳۷/۳۴   |
|                 | Cl              | mg/L  | ۱۵/۸۹   | ۲۵/۴۶        | ۴/۱۲           | ۱۶۴/۴۰  | ۰/۵۰   | ۲۰/۰۱   | ۱۱/۷۷    |
|                 | SO <sub>۴</sub> | mg/L  | ۳۵/۴۶   | ۵۶/۳۴        | ۹/۱۲           | ۶۰۰/۰۰  | ۱/۰۰   | ۴۴/۵۸   | ۲۶/۳۴    |
|                 | Alk             | mg/L  | ۲۰۳/۶۴  | ۶۴/۶۰        | ۱۰/۴۶          | ۴۰۹/۳۰  | ۵۷/۲۰  | ۲۱۴/۰۹  | ۱۹۳/۱۸   |
|                 | Ca              | mg/L  | ۷۲/۱۰   | ۲۵/۱۹        | ۴/۰۸           | ۱۷۸/۷۰  | ۲۱/۰۰  | ۷۶/۱۷   | ۶۸/۰۲    |

جدول ۴- آنالیز واریانس مقدار شاخص‌ها در بین منابع آب مورد بررسی

| مقایسه Tukey Multiple Comparison |         |                  | آنالیز واریانس |       |                   |                  |     | منبع واریانس      | شاخص |
|----------------------------------|---------|------------------|----------------|-------|-------------------|------------------|-----|-------------------|------|
| P-value                          | اختلاف  | محل اختلاف       | P-value        | F     | میانگین مربعات خط | مجموع مربعات خطا | Df  |                   |      |
| ۰/۰۰۱۰                           | ۰/۱۳۵۷  | شبکه-آب زیرزمینی | ۰/۰۰۱          | ۶/۸۷  | ۱/۱۲              | ۲/۲۴             | ۲   | منبع آب باقیمانده | LI   |
| ۰/۲۸۵۱                           | ۰/۰۶۹۶  | مخزن-آب زیرزمینی |                |       | ۰/۱۶              | ۱۲۱/۸۵           | ۷۴۷ |                   |      |
| ۰/۴۳۵۳                           | -۰/۰۶۶۱ | مخزن-شبکه        |                |       |                   |                  |     |                   |      |
| ۰/۱۱۴۴                           | -۰/۱۰۸۹ | شبکه-آب زیرزمینی | ۰/۱۱۵          | ۲/۱۶۷ | ۰/۷۵              | ۱/۴۹             | ۲   | منبع آب باقیمانده | RY   |
| ۰/۶۰۳۸                           | -۰/۰۶۳۹ | مخزن-آب زیرزمینی |                |       | ۰/۳۴              | ۲۵۶/۹            | ۷۴۷ |                   |      |
| ۰/۸۳۲۸                           | ۰/۰۴۵۰  | مخزن-شبکه        |                |       |                   |                  |     |                   |      |
| ۰/۹۸۰۳                           | ۰/۰۰۵۸  | شبکه-آب زیرزمینی | ۰/۹۳۳          | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۱              | ۰/۰۲             | ۲   | منبع آب باقیمانده | PSI  |
| ۰/۹۵۷۵                           | -۰/۰۱۰۴ | مخزن-آب زیرزمینی |                |       | ۰/۱۱              | ۷۹/۸۲            | ۷۴۷ |                   |      |
| ۰/۹۲۶۲                           | -۰/۰۱۶۲ | مخزن-شبکه        |                |       |                   |                  |     |                   |      |
| ۰/۰۴۴۸                           | -۰/۲۲۳۵ | شبکه-آب زیرزمینی | ۰/۰۳۸          | ۳/۲۷۲ | ۳/۷۵              | ۷/۴۹             | ۲   | منبع آب باقیمانده | LS   |
| ۰/۲۳۶۵                           | -۰/۱۹۷۶ | مخزن-آب زیرزمینی |                |       | ۱/۱۵              | ۸۵۵/۳۲           | ۷۴۷ |                   |      |
| ۰/۹۸۱۹                           | ۰/۰۲۵۹  | مخزن-شبکه        |                |       |                   |                  |     |                   |      |
| ۰/۳۶۱۵                           | ۲/۹۸۹۱  | شبکه-آب زیرزمینی | ۰/۲۷۵          | ۱/۲۹۲ | ۷۱۷/۶۳            | ۰/۱۴۳۵           | ۲   | منبع آب باقیمانده | CCPP |
| ۰/۵۱۹۸                           | ۲/۹۲۶۵  | مخزن-آب زیرزمینی |                |       | ۵۵۵/۳۴            | ۴۱۴۸۳۶           | ۷۴۷ |                   |      |
| ۰/۹۹۹۸                           | -۰/۰۶۲۶ | مخزن-شبکه        |                |       |                   |                  |     |                   |      |



شکل ۱- آزمون فرض مقایسه مقدار میانگین شاخص‌های خوردگی با حدود آستانه



شکل ۲- مقدار شاخص CCPP منابع آب زیرزمینی (الف) مخازن ذخیره آب (ب) و شبکه توزیع آب (ج) به تفکیک شهرستان

باشد نشانه تمایل آب به رسوبگذاری باشد. قرار گرفتن مقدار شاخص پوکوریوس بین مقادیر مذکور نشان‌دهنده وضعیت تعادل آب است. با مشاهده شکل ۱- (ج) مشخص است که شاخص پوکوریوس نیز مانند شاخص رایزنار نتایج نسبتاً مشابهی را ایجاد کرده است و تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر از نظر تعیین وضعیت آب ندارند. براساس این شاخص نیز، تمایل آب هر سه منبع مورد بررسی نزدیک به وضعیت رسوبگذار است با این حال به لحاظ آماری همچنان در وضعیت تعادل قرار دارند. شاخص خوردگی دیگری که در این مطالعه به آن پرداخته شد شاخص خوردگی لارسون اسکولد (LS) (۲۱) است. این شاخص از نسبت مجموع اکی والانی آنیون‌های سولفات و کلرور بر مجموع اکی والانی آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات محاسبه می‌شود. به عبارتی در این شاخص نقش آنیون‌های سولفات، کلرور و گونه‌های کربناته و بی‌کربناته بر تمایل آب به خوردگی در نظر گرفته شده است. حد آستانه بروز خوردگی براساس این شاخص

شاخص خوردگی دیگری که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت شاخص اشباع پوکوریوس (PSI) است. همانطور که قبلاً اشاره شد در این شاخص این امکان فراهم شده است که رابطه بین وضعیت فوق اشباع آب و رسوبگذاری با لحاظ شدن دو پارامتر یعنی ظرفیت بافیری آب و حداکثر مقدار ته نشست ناشی از آب طبیعی، در شرایط تعادل بررسی شود. در این شاخص به جای استفاده از مقدار pH اندازه‌گیری شده، از pH تعادل که نشان‌دهنده اکتیویته تعادلی یون هیدروژن است استفاده می‌شود. در جدول ۲ به نحوه محاسبه pH تعادل (pH<sub>eq</sub>) و محاسبه شاخص اشاره شد. این شاخص یک شاخص تجربی بوده و مقادیر آن مانند شاخص رایزنار تفسیر می‌شوند. مقدار متوسط شاخص پوکوریوس در آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه به ترتیب برابر با  $7/41 \pm 0/17$ ،  $7/45 \pm 0/17$ ،  $7/42 \pm 0/16$  تعیین گردید. مطابق جدول ۱ چنانچه مقدار شاخص پوکوریوس بیشتر از ۸/۵ باشد می‌تواند نشانه تمایل آب به خوردگی و در صورتی که کمتر از ۷/۱



(۲۳). این شاخص تخمینی از غلظت کربنات کلسیمی است که بایستی رسوب کند یا حل شود تا آب در وضعیت تعادل قرار گیرد. مقدار منفی این شاخص به مفهوم پتانسیل آب برای حل کردن رسوب کربنات کلسیم و مقدار مثبت آن به مفهوم پتانسیل آب برای تشکیل رسوب است. براساس مطالعه انجام شده توسط Merrill و همکاران جلوگیری از بروز شرایط خوردنده در سیستم توزیع آب تحت شرایط زیر مقدور خواهد شد (۳۱):

- آب نسبت به کربنات کلسیم می‌بایست در حالت فوق اشباع بوده و مقدار شاخص CCPP بین ۴ تا ۱۰ mg/L باشد و مقدار قلبیابیت بیشتر از ۴۰ mg/L باشد.
- مقدار pH بایستی بین ۶/۸ تا ۷/۳ باشد.

طبق پیشنهاد فوق مقدار هدف توصیه شده برای تنظیم این شاخص به منظور حفظ وضعیت تعادل آب، محدوده بین ۴ تا ۱۰ میلی‌گرم کربنات کلسیم بر لیتر است. از این شاخص معمولاً به طور گسترده‌ای برای کنترل تشکیل رسوب مخصوصاً در آب‌هایی با مقدار سختی و قلبیابیت بالا استفاده شده است (۳۲، ۳۳). Al-Rawajfe و همکاران تحقیقی را در سال ۲۰۰۷ در کشور اردن بر روی خوردندگی شبکه آب شرب شهری Tafila با استفاده از شاخص‌های رایزنار و لانژلیر و CCPP انجام دادند. نتایج حاصل از این تحقیق خوردنده بودن آب این شهر را تایید نمود. مقدار شاخص لانژلیر بین ۰/۳۹- و ۱/۵-، شاخص رایزنار بین ۸/۷- تا ۹/۸- و شاخص CCPP نیز بین ۱/۷۷ تا ۱۶/۷۶- تعیین شدند. در این تحقیق مشخص گردید که شاخص CCPP برخلاف سایر شاخص‌های متداول خوردندگی به نحو مطلوب‌تری می‌تواند شرایط خوردندگی را نشان دهد (۴). در مطالعه انجام شده توسط Mesdaghinia و همکاران نیز (۱۷) مقدار CCPP در کنار سایر شاخص‌های کیفی شامل لانژلیر، رایزنار، پوکوریوس در بررسی تمایل خوردندگی آب در شبکه توزیع آب شهر همدان مورد بررسی قرار گرفت و مقدار این شاخص‌ها به ترتیب برابر با ۱۰/۹۵±۶/۹- میلی‌گرم کربنات کلسیم بر لیتر و ۰/۶۰±۰/۳۰-، ۸/۶۳±۰/۵۷- و ۸/۱۸±۰/۳۴- تعیین شد. در این مطالعه نیز بر استفاده از شاخص CCPP به عنوان ابزاری کمی در کنار سایر شاخص‌های کیفی تاکید شده است. در مطالعه حاضر مقدار

مقدار بالای ۱/۲ است. چنانچه مقدار شاخص بین ۰/۸ تا ۱/۲ باشد یون‌های کلرور و سولفات مانع از ایجاد فیلم محافظ در مقابل خوردندگی شده و در مقادیر نزدیک به ۱/۲ باعث تشدید پدیده خوردندگی می‌شوند. در مقادیر کمتر از ۰/۸ سولفات و کلرور نقش مزاحمتی قابل توجهی در تشکیل لایه‌های رسوبی محافظ ندارند و در این شرایط آب در وضعیت تعادل قرار دارد (۲۱). مقدار متوسط شاخص LS در آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه به ترتیب برابر با ۰/۵۲±۰/۰۴، ۰/۴±۰/۰۲، ۰/۰۱±۰/۰۱ تعیین گردید. همچنین براساس شکل ۱- (د) با اطمینان ۹۵ درصد مقدار این شاخص برای آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه کمتر از مقدار ۰/۸ است. لذا براساس تفسیر جدول ۱ می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که آنیون‌های سولفات و کلرور در تشکیل فیلم محافظ رسوبی نقشی ایفا نمی‌کنند از اینرو چنانچه آب رسوبگذار باشد آنیون‌های سولفات و کلرور در این پدیده نقشی ندارند. لذا این دو آنیون، آنیون‌های موثری بر پدیده رسوبگذاری در آب‌های مورد بررسی محسوب نمی‌شوند. در مورد نتایجی که از شاخص لارسون-اسکولد بدست آمد می‌توان اینگونه توضیح داد که این شاخص در مورد آب‌هایی که مقدار آنیون‌های سولفات و کلرور در آنها بالا است و این آنیون‌ها می‌توانند سیستم تعادل کربنات را مختل کرده و از تشکیل رسوب محافظ جلوگیری کنند، اهمیت بیشتری دارد. در مورد منابع آب مورد مطالعه در این تحقیق آنیون‌های سولفات و کلرور براساس این شاخص تأثیری بر فرایند رسوبگذاری ندارند. براساس نتایج آنالیز واریانس و انجام مقایسه Tukey Multiple Comparison اختلاف معنی‌داری بین مقدار شاخص‌های لانژلیر و لارسون اسکولد برای آب زیرزمینی و آب شبکه توزیع در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود دارد. به عبارت دیگر زمانی که هدف مقایسه کیفیت آب زیرزمینی با مخازن و شبکه از نظر تمایل به خوردندگی باشد شاخص‌های لانژلیر و لارسون اسکولد می‌توانند استفاده شوند و نسبت به سایر شاخص‌ها حساسیت بیشتری در نشان دادن وجود تفاوت در کیفیت آب دارند. در بین شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه شاخص CCPP بر خلاف سه شاخص دیگر بر حسب میلی‌گرم کربنات کلسیم بر لیتر است. این شاخص یک شاخص واقعی‌تر از وضعیت آب است چرا که یک شاخص کمی است

به لحاظ اجرائی و عملیاتی تغییر pH و یا تنظیم آن به عنوان یک پارامتر اصلی عملیاتی تر است و از طرفی این پارامتر نیز بیشترین تاثیر را بر روی شاخص CCPP دارد. به نظر می‌رسد به منظور حفظ مقدار شاخص CCPP در محدوده تعادل (بین ۴ تا ۱۰) می‌توان با افزایش مقدار pH تا مقدار ۸/۳ و کاهش مقدار قلیائیت، تمایل آب به شرایط خنثی و تعادل را بیشتر و آب را از وضعیت رسوبگذار خارج نمود.

### نتیجه گیری

بررسی همزمان شاخص‌های کیفی در کنار شاخص کمی CCPP می‌تواند اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری از نظر وضعیت کیفی آب در خصوص تمایل به پدیده‌های خوردگی و رسوبگذاری فراهم نماید. از طریق بررسی ارتباط بین شاخص‌های کیفی با مقدار شاخص کمی CCPP محدوده تعادل آب براساس شاخص‌های لانتزلیر، رایزنار و پوکوریوس به ترتیب ۰/۵-۰/۱، ۹-۷ و ۷/۱-۸/۵ تعیین شد. براساس نتایج تحلیل آماری مقادیر شاخص‌های لانتزلیر، پوکوریوس و رایزنار برای هر سه منبع مورد بررسی، نزدیک به وضعیت رسوبگذار تعیین شد با این حال به لحاظ آماری همچنان وضعیت تعادل معنی‌دار شد. بر مبنای نتایج حاصل از آنالیز واریانس زمانی که هدف مقایسه کیفیت آب زیرزمینی با مخازن و شبکه از نظر تمایل به خوردگی باشد شاخص‌های لانتزلیر و لارسون اسکولد می‌توانند استفاده شوند و نسبت به سایر شاخص‌ها حساسیت بیشتری نسبت به تمایل آب به خوردگی و رسوبگذاری دارند. براساس مقادیر برآوردی برای شاخص لارسون اسکولد، آنیون‌های سولفات و کلرور تاثیر بر فرایند رسوبگذاری در منابع آب مورد بررسی ندارند. استفاده از شاخص CCPP به عنوان مبنایی در تعیین حدود آستانه شاخص‌های کیفی، تفسیر مقادیر این شاخص‌ها را به واقعیت نزدیک‌تر کرده و می‌تواند تفسیر دقیق‌تری را از وضعیت کیفی آب فراهم کند. بررسی این شاخص به تفکیک شهرستان‌های مختلف در استان کردستان نشان داد که آب زیرزمینی مناطق روستایی در شهرستان سنندج با اطمینان ۹۵ درصد رسوبگذار و در شهرستان قروه با احتمال ۹۵ درصد خورنده است. در مورد سایر شهرستان‌ها براساس این شاخص، آب زیرزمینی در

متوسط شاخص CCPP در آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه به ترتیب برابر با  $۹/۲۷ \pm ۱/۲۹$ ،  $۹/۱۳ \pm ۱/۲۵$ ،  $۱۱/۲۵ \pm ۱/۲۳$  تعیین گردید. در شکل ۱- (ی) با اطمینان ۹۵ درصد مقدار این شاخص برای آب‌های زیرزمینی، مخازن و شبکه در محدوده بین ۴ تا ۱۰ میلی‌گرم کربنات کلسیم بر لیتر خواهد بود. با این وجود از آنجا که مقدار میانگین این شاخص برای آب مخازن و شبکه بالاتر از آستانه ۱۰ است، بررسی بیشتر این شاخص در شکل ۲ به تفکیک شهرستان انجام شد. در شکل ۲-الف مقدار شاخص CCPP برای منابع آب زیرزمینی به تفکیک شهرستان نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در مورد منابع آب زیرزمینی شهرستان سنندج و شهرستان قروه نتیجه آزمون میانگین شاخص معنی‌دار است. در مورد شهرستان سنندج با اطمینان ۹۵ درصد مقدار میانگین شاخص از مقدار آستانه  $۱۰ \text{ mg/L}$  بیشتر است و از اینرو آب زیرزمینی این شهرستان رسوبگذار است. اما آب زیرزمینی شهرستان قروه با احتمال ۹۵ درصد خورنده است چون مقدار میانگین شاخص از مقدار آستانه ۴ کمتر است. در مورد سایر شهرستان‌ها براساس شکل ۲-الف آب زیرزمینی در وضعیت تعادل است. در شکل ۲-ب مقدار شاخص CCPP برای مخازن ذخیره آب به تفکیک شهرستان نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این شکل آزمون مقایسه مقدار میانگین CCPP با محدوده مورد آزمون در مورد هیچ یک از شهرستان‌ها معنی‌دار نیست می‌توان وضعیت آب را در مخازن ذخیره‌سازی در وضعیت متعادل در نظر گرفت. بررسی وضعیت آب در شبکه توزیع نیز به تفکیک شهرستان در شکل ۲-ج نشان داده شده است. در بین تمامی شهرستان‌ها، آب شبکه در شهرستان‌های دیواندره، مریوان و دهگلان در وضعیت رسوبگذار و برای سایر شهرستان‌ها وضعیت تعادل قابل تأیید است. با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به شبکه شهرستان قروه در دسترس نبود در این نمودار مقدار میانگین شاخص CCPP برای این شهرستان ترسیم نشده است. همچنین وضعیت آب در شبکه توزیع روستایی شهرستان‌های مریوان، دیواندره و دهگلان متمایل به رسوبگذار است. تمایل آب به رسوبگذاری به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن بستگی دارد. به همین خاطر می‌بایست تمهیداتی اتخاذ شود که آب از نظر کیفیت به سمت شرایط تعادلی سوق پیدا کند.

که در کنترل خوردگی و یا رسوبگذاری اثرگذار هستند انجام شود.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل نتایج طرح تحقیقاتی با شماره ۲۵۸۷۶-۴۶-۰۲-۹۳ مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی تهران در سال ۱۳۹۳ است که با حمایت پژوهشکده محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی تهران اجرا شده است.

وضعیت تعادل است. شاخص‌های خوردگی مناسب‌ترین ابزار برای ایجاد یک درک کلی از کیفیت آب از نظر رسوبگذاری و خوردگی به حساب می‌آیند. توصیه می‌شود تعیین و بررسی مقدار شاخص‌های کیفی همواره در کنار شاخص CCPP که یک شاخص کمی محسوب می‌شود انجام شود و ضرورت آن در روش‌های کنترل کیفی منابع تامین آب گنجانده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده تحلیل ارتباط بین مقدار شاخص‌ها و مشخصات کیفی آب با استفاده از روابط همبستگی به منظور شناسایی مهمترین پارامترهای کیفی آب

### منابع

1. Talbot DE, Talbot JD. Corrosion Science and Technology. Boca Raton: CRC Press; 2010.
2. Poorzamani HR, Ghazaie M, Samani AM. survey the quality of drinking water source in Esfahan osh-torejan industrial park based on corrosion properties. Environmental Health Congress; 2005; Tehran (in Persian).
3. Hosseinian SM. The quality of corrosion and scalling determination methods. First National Congress on Corrosion; 1988; University of Tehran, Tehran (in Persian).
4. Al-Rawajfeh AE, Al-Shamaileh EM. Assessment of tap water resources quality and its potential of scale formation and corrosivity in Tafila Province, South Jordan. Desalination. 2007;206(1):322-32.
5. Koch GH, Brongers MP, Thompson NG, Virmani YP, Payer JH. Corrosion cost and preventive strategies in the United States. Dublin, Ohio: CC Technologies Laboratories; 2002.
6. Ghaneian MT, Ehrampoush MH, Ghanizadeh G, Amrollahi M. Survey of corrosion and precipitation potential in dual water distribution system in Kharanagh District of Yazd Province. The Journal of Toloo-Ebehdasht. 2009;7(3,4):65-73 (in Persian).
7. Savari J, Jaafarzadeh N, Hassani AH, Shams Khoramabadi G. Heavy metals leakage and corrosion potential in ahvaz drinking water distribution network. Water & Wastewater Journal. 2007;18(4):16-

- 24 (in Persian).
8. Babaie A, Mazloomi S, rabie A, Abouee E, Fazlzadeh Davil m, Nouroozie M. Corrosion and scaling potential of Shiraz drinking water. 12th National Conference on Environmental Health; 2009; Shahid Beheshti University of Medical Science, Tehran (in Persian).
  9. Nasehinia H, Naghizadeh A, Ravankhah M. Determining of corrosion or sedimentation of drinking water in Dameghan city with corrosion indexes. 4th Conference & Exhibition on Environmental Engineering; 2010; Tehran University, Tehran (in Persian).
  10. Qazavati M, Noshadi M. Evaluation of Chemical quality and corrosion potential of drinking water produced at the Bandar Abbas refiner. 12th National Conference on Environmental Health; 2009; Shahid Beheshti University of Medical Science, Tehran (in Persian).
  11. Loewenthal R, Morrison I, Wentzel M. Control of corrosion and aggression in drinking water systems. *Water Science & Technology*. 2004;49(2):9-18.
  12. Atasoy AD, Yesilnacar MI. Effect of high sulfate concentration on the corrosivity: a case study from groundwater in Harran Plain, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2010;166(1-4):595-607.
  13. TWAS. Safe drinking water: the need, the problem, solution and action plan. Trieste, Italy: Third World Academy of Sciences; 2002.
  14. Haybati B, Mazlomi S, Fazlzadeh D, Derakhshan S, Norozi M. Evaluation of corrosion and sedimentation potential of drinking water in Mianeh City. 12th National Conference on Environmental Health; 2009; Shahid Beheshti University of Medical Science, Tehran (in Persian).
  15. Savari J, JafarZadeh N, Hasani AH, Shams G, RabieiRad MH. Comparison of survey methods of corrosion in distribution system of drinking water in Ahwaz. 10th National Conference on Environmental Health; 2007; Hamedan University of Medical Science, Hamedan (in Persian).
  16. Mahvi AH, Eslami A. Corrosion and scaling analysis of water supply and distribution system in Zanjan. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2006;8(1(28)):90-95.
  17. Mesdaghinia A, Nabizadeh Nodehi R, Nasserri S, Imran SA, Samadi MT, Hadi M. Potential for iron release in drinking water distribution system: a case study of Hamedan city, Iran. *Desalination and Water Treatment*. 2015;57(31):14461-72.
  18. Langelier WF. The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal of American Water Works Association*. 1936;28(10):1500-21.
  19. Ryznar JW. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. *Journal of American Water Works Association*. 1944;36(4):472.
  20. Puckorius P, Brooke J. A new practical index for calcium carbonate scale prediction in cooling tower systems. *Corrosion*. 1991;47(4):280-84.
  21. Larson TE, Skold RV. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron. *Corrosion*. 1958;14(6):43-46.
  22. Langelier WF. The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal of American Water Works Association*. 1936;10(28):1500-21.
  23. Rossum JR, Merrill DT. An evaluation of the calcium carbonate saturation indexes. *Journal of American Water Works Association*. 1983:95-100.
  24. Benefield LD, Judkins Jr JF, Weand BL. *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1982.
  25. Agatemor C, Okolo PO. Studies of corrosion tendency of drinking water in the distribution system at the University of Benin. *The Environmentalist*. 2008;28(4):379-84.
  26. Pátzay G, Stáhl G, Karman F, Kálmán E. Modeling of scale formation and corrosion from geothermal water. *Electrochimica Acta*. 1998;43(1):137-47.
  27. Pakshir M, Moalem A, Nazarboland A, Abbasi S. Limitations of Precipitation and Corrosivity Indices in the Cooling Water Systems. *Water & Wastewater Journal*. 2003;51:60-65 (in Persian).
  28. Güler C, Thyne GD, McCray JE, Turner KA. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*. 2002;10(4):455-74.
  29. Al-Rawajfeh AE. Factors influencing CaCO<sub>3</sub> scale precipitation and CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system in flowing water

- in natural water piping system. *Desalination and Water Treatment*. 2009;12(1-3):337-43.
30. Kemmer FN. *The NALCO Water Handbook*. 2 ed. New York: McGraw-Hill; 1988.
31. Merrill DT, Sanks RL. Corrosion control by deposition of  $\text{CaCO}_3$  films: Part 1, A practical approach for plant operators. *Journal of American Water Works Association*. 1977;69(11);592-99.
32. Hamedan Water and Wastewater Company. 35% of the water distribution shystem is exhausted Hamedan. Hamedan: Hamedan Water and Wastewater Company; 2014. [cited 2016 Jul 9]. Available from: <http://www.hww.ir/news/default.aspx?ni=1066841199>.
33. Ferguson J, von Franque O, Schock MR. Corrosion of copper in potable water systems. *Internal corrosion of water distribution systems*, 2nd ed. Denver: American Water Work Association Research Foundation; 1996.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Analysis of Water Corrosion Tendency in Water Supply System Using Qualitative Indices and Calcium Carbonate Precipitation Potential Index

R Nabizadeh Nodehi<sup>1</sup>, AR Mesdaghinia<sup>2</sup>, S Nasser<sup>2</sup>, M Hadi\*<sup>2</sup>, H Soleimani<sup>1</sup>, P Bahmani<sup>3</sup>

1. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

2. Center for Water Quality Research (CWQR), Institute for Environmental Research (IER), Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3. Environmental Health Engineering, Kurdistan Rural Water and Wastewater Company, Sanandaj, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 19 November 2016

**Revised:** 6 February 2017

**Accepted:** 12 February 2017

**Published:** 6 March 2017

**Key words:** Calcium carbonate precipitation potential, Drinking water system, Water corrosion indices

### \*Corresponding Author:

hadi\_rfm@yahoo.com

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Water corrosion and scaling are known as destructive phenomenon of drinking water quality and water facilities. In this study, the groundwater tendency to corrosion or scaling in source water, water storage reservoirs and distribution system were studied. Simultaneous use of some qualitative and a quantitative index along with statistical analyses to assess the water scaling or corrosion tendency were investigated.

**Materials and Methods:** The data analysis of groundwater, water storage reservoirs and water distribution system in rural area of Kurdistan province were analyzed and the amount of Langelier (LI), Ryznar (RY), Pockorius (PSI) and Larson-Skold (LS) and CCPP indices were determined. Corrosion and scaling threshold for qualitative indices were determined based on CCPP index. The mean of indices was compared with the thresholds using independent t-test. ANOVA was used to assess the difference between the indices in different sources of water.

**Results:** The balance range for LI, RY and PSI found to be -0.1-0.05, 7-9 and 7.1-8.5. The mean CCPP for groundwater, reservoirs and networks were  $9.27 \pm 1.29$ ,  $9.13 \pm 1.25$ ,  $11.25 \pm 1.23$ , respectively. All three sources of water have some tendencies toward scaling; however, a significant balance status was confirmed statistically. According to Larson-Skold index, sulfate and chloride anions did not play a role in scaling process.

**Conclusion:** The use of qualitative indices with CCPP index can provide more accurate estimation of water tendency toward scaling or corrosion. The assessment of qualitative indices along with CCPP is recommended in drinking water corrosion monitoring studies.

Please cite this article as: Nabizadeh Nodehi R, Mesdaghinia AR, Nasser S, Hadi M, Soleimani H, Bahmani P. Analysis of water corrosion tendency in water supply system using qualitative indices and Calcium Carbonate Precipitation Potential index. Iranian Journal of Health and Environment. 2017;9(4):457-70.