

ارزیابی پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی آب شرب (مطالعه موردی: شبکه آب شرب شهر شیراز)
نیما توان پور، نوید توان پور و سیده آسیه موسوی راد



دوره ۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحات: ۸۴-۱۰۱

www.jewe.ir

نحوه ارجاع به این مقاله: توان پور ن.، توان پور ن و موسوی راد س. آ. (۱۳۹۵). ارزیابی پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی آب شرب (مطالعه موردی: شبکه آب شرب شهر شیراز)، محیط‌زیست و مهندسی آب، جلد ۲، شماره ۱، صفحات: ۸۴-۱۰۱

How to cite this paper; Tavanpour N., Tavanpoyr N. and Mousavi Raad S. A. (2016). Investigation of scale-forming and corrosiveness potential of drinking water (Case study of Shiraz drinking water distribution system). J. Environ. Water Eng. 2(1), 84-101.

ارزیابی پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی آب شرب (مطالعه موردی شبکه آب شرب شهر شیراز)

نیما توان پور^{۱*}، نوید توان پور^۲ و سیده آسیه موسوی راد^۳

- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
 ۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی آب، گروه مهندسی آب، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
 ۳- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، بخش مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران

*نویسنده مسئول: nima.tavanpour@gmail.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۱۲/۱۶]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۰۳/۰۶]

چکیده

این تحقیق به منظور بررسی وضعیت خوردگی و رسوب‌گذاری آب آشامیدنی در منابع تأمین و شبکه‌ی توزیع آب شرب شهر شیراز صورت گرفت. منطقه‌ی مورد مطالعه به ۱۷ منطقه تقسیم‌بندی شد. نمونه‌برداری از آب‌ها در طول فصل‌های زمستان ۱۳۸۹ و بهار و تابستان ۱۳۹۰، به تعداد ۱۴۴ نمونه (بطری‌های ۳۰۰ سی‌سی) انجام و پارامترهای شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر شاخص‌های لانژلیه، رایزنر، لارسون و تهاجمی برای کلیه‌ی نمونه‌ها تعیین گردید. در این مطالعه، ۴۱ قطعه لوله‌ی آب از منازل در نقاط مختلف شهر جمع‌آوری و نرخ رسوب‌گذاری در هر نمونه محاسبه شد. همچنین جنس رسوب‌های ۳۳ عدد از لوله‌های آب خانگی و ۸ عدد از لوله‌های آب شبکه با روش انکسار اشعه ایکس آنالیز شد. نتایج نشان داد که متوسط مقدار شاخص‌های لانژلیه، رایزنر، لارسون و تهاجمی به ترتیب برابر با ۰/۰۷ (رسوب‌گذاری ضعیف)، ۷/۱ (عدم رسوب‌گذاری)، ۱/۲ (خورنده) و ۱۴ (غیر خورنده) بود. میانگین نرخ رسوب‌گذاری در لوله‌های آب شرب منازل شهر شیراز، ۰/۲۶ میلی‌متر در سال محاسبه شد. ترکیبات عمده در نمونه‌ها شامل کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، کربنات منیزیم، سولفات منیزیم، هماتیت، ماگمیت، مگنتیت، ژئوتیت، اکسید روی، ژیپس، ویویانیت، دولومیت، هیدروکسیپاتیت و تریولیت بودند. همچنین، عناصر عمده در این نمونه‌ها، منیزیم، سیلیسیم، فسفر، سولفور، روی، مس و سرب است. بر اساس نتایج این تحقیق، مناطق واقع در شرق، جنوب شرقی و جنوب شیراز به دلیل میزان بالای سختی و سولفات دارای مشکلات بیش‌تری از لحاظ رسوب‌گذاری می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آب شرب، شاخص‌های خوردگی، نرخ رسوب‌گذاری، جنس رسوب

۱- مقدمه

آب شرب بسته به منشأ و فصل‌های مختلف سال و زمینی که در آن جریان داشته است، دارای ترکیبات و مقادیر بسیار متنوعی از مواد محلول است. در کنار یون‌های ایجادکننده سختی (کلسیم و منیزیم)، آب دارای کاتیون‌های دیگری نظیر آهن، سدیم، پتاسیم و مقادیر مختلفی از آنیون‌ها نظیر کلرید، سولفات، نیترات و بی‌کربنات است (Dobersek et al. 2005). در جاهایی که از آب‌های بدون تصفیه استفاده می‌شوند، ته‌نشین شدن رسوب یکی از مشکلات مهم می‌باشد (Reiber et al. 1997). عدم کنترل رسوب‌گذاری ظرفیت خطوط لوله را به‌صورت جدی کاهش داده و مقاومت در برابر جریان آب را افزایش داده که خود باعث کاهش راندمان شبکه توزیع و افزایش هزینه‌های لوله‌کشی می‌شود (Von Huben, 1995). در شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی لوله‌های فولادی و آهنی که طی چندین دهه مورداستفاده قرار گرفته‌اند، رسوب‌گذاری و خوردگی درون لوله‌ها امری معمول است. رسوب‌های خوردگی نه‌تنها جریان آب را کاهش می‌دهند، بلکه از کیفیت آب نیز می‌کاهند. آب‌های خورنده دارای یک یا چند ویژگی زیر می‌باشند: سختی کم، اسیدیته کم، کلرید و یا سولفات زیاد، اکسیژن محلول زیاد، هدایت الکتریکی زیاد و کلر باقی‌مانده زیاد. خوردگی ممکن است به‌صورت از بین رفتن یک فلز معمولاً توسط واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی با محیط اطراف خود به وجود آید (Lane, 1993). خوردگی معمولاً به‌صورت یکنواخت و یا غیریکنواخت است. خوردگی یکنواخت منجر به یک مقدار یکسان از اتلاف مواد در کل سطح داخلی لوله می‌شود. در صورتی که خوردگی غیریکنواخت به نواحی کوچک‌تر و موضعی لوله حمله کرده و باعث ایجاد حفره‌ها، جریان محدود (در اثر گرفتگی لوله) و گسیختگی ساختاری می‌شود، در نتیجه سیستم لوله‌کشی از بین رفته و باید به‌سرعت تعویض شود (Singley et al. 1984). عوامل دیگری نظیر الگوهای جریان آب، نوسانات فصلی دما و اقدامات تصفیه آب مثل کاربرد بازدارنده‌های خوردگی نیز می‌توانند بر توسعه و تشکیل رسوب مؤثر باشند؛ بنابراین رسوب‌های خوردگی در لوله‌های فولادی و یا آهنی شبکه توزیع آب شرب، برای هر مکانی می‌توانند دارای ویژگی‌های منحصر به فرد باشند (Benjamin et al. 1996).

Pourzamani (2005) در شهرک صنعتی اشترجان اصفهان پس از محاسبه شاخص‌های خوردگی لانه‌ای، رایزنر، تهاجمی و پوکوریوس و مقایسه آن‌ها نشان داد که آب زیرزمینی منطق اشترجان در ابتدا حالت خورنده داشته ولی در طول مسیر حرکت آب زیرزمینی خاصیت خوردگی آن کم شده و تقریباً به شرایط رسوب‌گذاری رسیده است (در اثر انحلال کلسیم کربنات در آب). همچنین مقایسه میانگین پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در آب این منطقه با مقادیر استاندارد نشان می‌دهد در طول مسیر حرکت آب مقادیر پارامترها افزایش یافته و بالاتر از حد استاندارد می‌شوند که نشان دهند تأثیر بر کیفیت آب زیرزمینی این منطقه است. Avazpour et al. (2008) به‌منظور تعیین پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری آب شرب شهر ایلام از شاخص‌های مهمی نظیر شاخص اشباع لانه‌ای و شاخص پایداری رایزنر و شاخص تهاجمی استفاده کردند. نتایج نشان داد که آب تأمین‌شده از مخزن سد که وارد مخازن ذخیره و شبکه توزیع جهت مصارف شرب و صنعتی می‌گردد، خورنده است. Sarin (2002) رسوب‌های خوردگی از لوله‌های آهنی و فولادی کهنه را از نظر ساختار و ترکیب مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. رسوب‌ها قبل و بعد از خشک شدن مورد مطالعه قرار گرفتند و ژئوتیت و مگنتیت به‌عنوان اجزای اصلی نمونه‌های خشک‌شده شناسایی شدند. غلظت‌های بالای فازهای دو ظرفیتی با قابلیت بالای انحلال‌پذیری در نمونه رسوب‌های مرطوب معرفی شدند. رسوب‌های خوردگی دارای یک لایه گسترده صدفی شکل بودند که رسوب‌های متخلخل فازهای اکسید آهن را پوشش می‌دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که تفاوت عمده‌ای میان رسوب‌های خوردگی یافت شده در دو شبکه آبرسانی مختلف وجود دارد. Peng et al. (2010) ترکیب ساختاری و عنصری مواد جامد و رسوب‌های متحرک (از لحاظ هیدرولیکی) جداشده از لوله‌های شبکه‌های توزیع آب شرب را با استفاده از روش انکسار اشعه ایکس مورد شناسایی و بررسی قرار دادند. ژئوتیت، مگنتیت، و سیدریت به‌عنوان فازهای بلورین اصلی در اکثر نمونه‌ها شناسایی شدند. مقادیر عناصر مختلف در رسوب‌ها نیز اندازه‌گیری شد که نتایج نشان دادند که در میان عناصر اصلی، آهن غالب بوده و پس از آن به‌ترتیب عناصر سولفور، کربن آلی، کلسیم، کربن غیر آلی، فسفر، منگنز، منیزیم، آلومینیوم و روی موجود بودند. مقایسه حضور نسبی این عناصر نشان می‌دهد که تلاطم‌های هیدرولیکی ممکن است تأثیر نسبی کمی بر آزاد شدن منگنز،

آلومینیوم و روی داشته باشد، اما تأثیر بیشتری بر آزاد شدن کربن آلی، کربن غیر آلی و منیزیم دارد. (Alsaqqar et al. 2013) کیفیت آب تصفیه شده را از تصفیه خانه های آب در شهر بغداد مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای کیفی آب شامل دما، قلیائیت، کلسیم، اسیدیته و کل جامدات محلول بود و دو شاخص لانژلیه و رایزنر محاسبه شدند. نتایج نشان داد که این آبها در طول سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ خورنده بوده و نیاز به تصفیه بیشتر داشتند. در تحقیقات صورت گرفته در ایران، به محاسبه این شاخصها بسنده شده است. در صورتی که برای بررسی دقیق تر رسوب گذاری و خوردگی در لوله های آب باید به بررسی پارامترهای شیمیایی مؤثر در این مسئله و نیز نرخ رسوب گذاری پرداخت. در این تحقیق، علاوه بر محاسبه این شاخصها، پارامترهای شیمیایی مهم در این زمینه اندازه گیری شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. همچنین نرخ رسوب گذاری و جنس رسوبها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

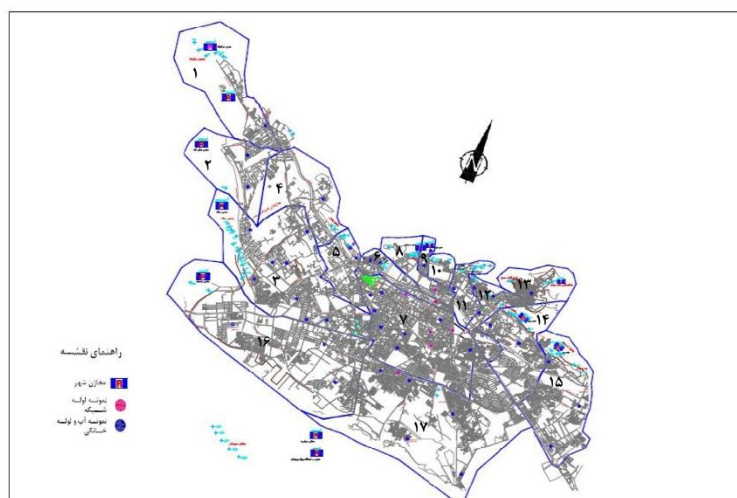
۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه ی مورد مطالعه

شهر شیراز (مرکز استان فارس) با مساحت 10531 Km^2 در بخش مرکزی استان قرار گرفته است، میانگین ارتفاع این شهر 1540 m از سطح دریا است. شیراز هیچ گونه رودخانه دائمی نداشته و تنها تعدادی کانالهای سیلابی خشک که در ماههای آبی تمام آبهای سطحی را به سمت دریاچه مهارلو جریان می دهند، وجود دارند. نزدیک به ۷۰ تا ۸۰ درصد نیاز آبی شیراز از چاههای عمیق واقع در شهر و ارتفاعات اطراف آن و بقیه از سد درود زن تأمین می شود (Tootoonchi et al. 2003).

۲-۲- نمونه برداری از آبها

برای بررسی وضعیت خوردگی و رسوب گذاری در شبکه توزیع آب شهر شیراز، تعداد ۲۵ نمونه از منابع آب و ۴۲ نمونه از منازل در نقاط مختلف شهر شیراز برداشت شد. نمونه برداری از آبها در سه نوبت طی فصلهای زمستان، بهار و تابستان سالهای ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ صورت گرفت. با توجه به مناطق تحت پوشش هر منبع آب، شهر شیراز به ۱۷ منطقه آبی تقسیم بندی شد که نمونه برداریها به گونه ای انتخاب گردید که هر ۱۷ منطقه را پوشش دهد. شکل (۱) محل این منطقهها را نشان می دهد.



شکل (۱) - نقش منطقه بندی منابع آب شیراز و نقاط نمونه گیری

۲-۳- شاخص های تعیین پتانسیل خوردگی و رسوب گذاری آب

سالهای زیادی مهندسان، شیمیدانهای آب، بهره برداران تصفیه خانهها و آژانسهای راهنما در جستجوی تعریف جامع خوردگی

آب بوده‌اند، زیرا کنترل رسوب کربنات کلسیم بر سطح داخلی لوله‌ها که در تماس با آب هستند، روش غالب کنترل خوردگی است. بنابراین کوشش در جهت تعریف خوردگی آب، بر اساس توانایی آب در ایجاد رسوب محافظ کربنات کلسیم بر دیواره لوله (جهت محافظت از لوله در برابر خوردگی) متمرکز شد و شاخص‌های مختلف ارائه گردید. شاخص‌های موردپذیرش عموم عبارت‌اند از: شاخص لانژلیه (LSI)، شاخص پایداری رایزنر (RSI)، شاخص لارسون - اسکولد (LR)، شاخص خوردگی یا تهاجمی (AI). وجود شاخص‌های فراوان نشان می‌دهد که راه‌حل منفرد و مشخصی جهت تعیین پتانسیل خوردگی آب وجود ندارد و جستجو جهت تعیین بهترین روش توصیف کنترل رسوب کربنات کلسیم ادامه دارد. این شاخص‌ها به‌طور مستقیم مقدار خوردگی آب را مشخص نمی‌کنند. تمایل آب به خوردگی پدیده پیچیده‌ای است که میزان وسعت آن فقط تابع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب نیست بلکه به دستگاه‌های انتقال‌دهنده آب نیز بستگی دارد (Rossum, 1980).

۲-۳-۱- شاخص لانژلیه

این شاخص به‌صورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود:

$$LI = pH - pH_s \quad (1)$$

که در معادله (۱)، pH_s : pH آب اشباع‌شده از کربنات کلسیم که به‌صورت معادله (۲) بیان می‌گردد:

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (2)$$

که در آن A کل مواد جامد محلول (میلی‌گرم در لیتر)، B دما (درجه سلسیوس)، C سختی کلسیم میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم، D قلیایت کل (میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم). پارامترهای فوق به‌صورت معادله‌های (۳) تا (۶) محاسبه می‌شوند:

$$A = (\log [TDS] - 1) / 10 \quad (3)$$

$$B = -13.12 \times (\log(C+273)) + 34.55 \quad (4)$$

$$C = \log [Ca^{2+} \text{ as } CaCO_3] - 0.4 \quad (5)$$

$$D = \log [Alk \text{ as } CaCO_3] \quad (6)$$

جدول (۱) - تفسیر شاخص لانژلیه (Nikpour et al. 2009)

مقدار شاخص	تفسیر	مقدار شاخص	تفسیر
-۵	خوردگی شدید	۰	متعادل
-۴	خوردگی متوسط	۰/۵	رسوب‌گذاری ضعیف
-۳	خوردگی متوسط	۱	رسوب‌گذاری ملایم
-۲	خوردگی متوسط	۲	رسوب‌گذاری ملایم
-۱	خوردگی کم	۳	رسوب‌گذاری متوسط
-۰/۵	خوردگی کم	۴	رسوب‌گذاری شدید

شاخص لانژلیه دارای محدودیت‌های زیر است:

- شاخص لانژلیه، تنها تمایل آب به رسوب‌گذاری یا عدم آن را نشان می‌دهد و نمی‌توان از آن به‌عنوان یک معیار کمی استفاده نمود.
- این شاخص، فقط برای کنترل رسوب کربنات کلسیم در دستگاه‌هایی با کل جامدات محلول کم و در محدوده دماهای نه‌چندان بالا صادق است.
- کربنات کلسیمی که به دلیل افزایش اسیدیته موضعی در مناطق کاتدی تشکیل می‌شود، قدرت محافظت بیشتری نسبت به رسوبی دارد که به‌طور طبیعی در اثر اشباع شدن از کربنات کلسیم به وجود می‌آید و این موضوع با محاسبه شاخص لانژلیه قابل‌درک نیست.

• شاخص لانژلیه، بیش تر در دستگاه‌های با سرعت کم جریان آب کاربرد دارد (Seyyed-Razi, 1996).

۲-۳-۲- شاخص پایداری یا شاخص رایزنر

رایزنر با توجه به گزارش نتایج رسوب‌گذاری و خوردگی در شبکه‌های آب شهری شاخص پایداری را به صورت معادله (۷) تعریف کرد:

$$RI = 2 \text{ pH}_s - \text{pH} \quad (7)$$

جدول (۲) - تفسیر شاخص رایزنر (Prisyazhniuk, 2007)

تفسیر	مقدار شاخص
به شدت رسوب‌گذار	$RI < 5/5$
نسبتاً رسوب‌گذار و کمی خورنده	$6/2 < RI < 5/5$
متعادل	$6/8 < RI < 6/2$
خورنده	$RI > 8/5$

اگر مقدار شاخص پایداری برابر با شش و یا کم تر باشد، همیشه رسوب بیش تری تولید می‌شود و تمایل خوردگی کم تر است و اگر شاخص پایداری بزرگ تر از هفت باشد، رسوب‌گذاری اتفاق نمی‌افتد و هنگامی که مقدار شاخص پایداری در محدود ۸-۷/۵ باشد احتمال خوردگی وجود دارد (Greenburg, 2005). شاخص لانژلیه بیش تر برای آب‌های ساکن (مثل آب در مخازن و یا فیلترها) صادق است ولی شاخص رایزنر تجربی بوده و فقط برای آب‌های جاری (آب داخل لوله‌ها) با سرعت بیش از حدود ۰/۶ متر بر ثانیه صادق است. نتایج به دست آمده از شاخص رایزنر نشان می‌دهد که این شاخص برای حالت اشباع آب رضایت بخش نیست (Rossum, 1983).

۲-۳-۳- شاخص لارسون - اسکولد

این شاخص به منظور بررسی خوردگی آب در مجاورت با لوله‌های فولادی، لوله‌های فولادی با ساختار کربنی سبک و لوله‌های چدنی توسط لارسون و اسکولد ارائه شد. رابطه و تفسیر این شاخص به صورت معادله (۸) است:

$$LS = \frac{C_{Cl^-} + C_{SO_4^{2-}}}{C_{HCO_3^-} + C_{CO_3^{2-}}} \quad (8)$$

که، در این رابطه، C نشان دهند غلظت هر یک از مؤلفه‌های رابطه، برحسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم است (Prisyazhniuk, 2007).

جدول (۳) - تفسیر شاخص لارسون (Prisyazhniuk, 2007)

تفسیر	مقدار شاخص
تشکیل غشای محافظ بدون دخالت یون‌های کلرید و سولفات	$LS < 0/8$
تشکیل غشای محافظ با دخالت یون‌های کلرید و سولفات (در مقادیر بالا خوردگی فولاد رخ می‌دهد)	$0/8 < LS < 1/2$
بروز خوردگی موضعی	$LS > 1/2$

۲-۳-۴- شاخص خوردگی یا شاخص تهاجمی

شاخص تهاجمی جهت کمک به انتخاب لوله مناسب برای هدایت آب در خطوط انتقال شبکه‌های توزیع ایجاد شده است و بر اسیدیته آب و قابلیت انحلال کربنات کلسیم استوار است (Singley, 1984). این شاخص مخصوص لوله‌های سیمان آریستی بوده و بر اساس استاندارد C-400 و AWWA به صورت معادله (۹) تعریف و تفسیر می‌شود (Rossum, 1983):

$$AI = pH + \log [(A)(H)] \quad (9)$$

که در آن،

A = قلیائیت کل، بر حسب میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم

H = سختی کلسیم، بر حسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم

جدول (۴)-تفسیر شاخص تهاجمی (Rossum, 1983)

مقدار شاخص	تفسیر
$AI < 10$	آب دارای خوردگی زیاد است
$AI = 10-12$	آب دارای خوردگی متوسط است
$AI > 12$	آب فاقد خوردگی است

۲-۴- آنالیز نمونه‌های آب

پارامترهای اسیدیته با pH متر، دما با دماسنج در محل اندازه‌گیری شده و سپس نمونه‌ها برای اندازه‌گیری پارامترهای کل جامدات محلول، هدایت الکتریکی، قلیائیت کل، سختی کل و غلظت آنیون‌ها شامل کربنات، بی‌کربنات، کلرید و سولفات و غلظت کاتیون‌ها شامل کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم بر اساس روش‌های استاندارد^۱ به آزمایشگاه آب‌و‌خاک فارس در شیراز انتقال داده شدند. میانگین حسابی مقادیر این پارامترها مربوط به نقاط نمونه‌گیری در هر منطقه، به‌عنوان نماینده آن منطقه در نظر گرفته شد. با کمک پارامترهای اندازه‌گیری شده، شاخص‌های لائزلیه، رایزنر، لارسون و تهاجمی جهت ارزیابی خوردگی و یا رسوب‌گذاری آب محاسبه شدند.

۲-۵- تعیین نرخ رسوب‌گذاری

در این مطالعه، ۴۱ قطعه لوله آب از جنس آهن گالوانیزه از منازل (منازلی که نمونه‌های آب نیز از آن‌ها گرفته شده) و ۸ عدد لوله فولادی و چدنی از شبکه توزیع آب شهری جهت ارزیابی ضخامت رسوب (قطر لوله بدون رسوب منهای قطر لوله دارای رسوب) و جنس رسوب‌ها از مناطق مختلف شهر شیراز جمع‌آوری شد. برای اندازه‌گیری ضخامت رسوب ابتدا و انتهای نمونه لوله جدا و حذف شد و سپس سه مقطع از ابتدا، وسط و انتهای نمونه به طول ۵ سانتی‌متر انتخاب شد. مقدار ضخامت رسوب در هر مقطع ۵ سانتی‌متری به وسیله میکرومتر درون‌سنج مدل Dial Bore Gauge اندازه‌گیری شد. بدین صورت که برای هر مقطع ۵ سانتی‌متری، ۱۰ اندازه‌گیری قبل از تراشیدن رسوب و ۱۰ اندازه‌گیری بعد از تراشیدن رسوب صورت گرفت و میانگین این ضخامت‌های اندازه‌گیری شده به‌عنوان ضخامت لوله مربوطه در نظر گرفته شد. جهت محاسبه نرخ رسوب‌گذاری (α) از رابطه (۱۰) استفاده شد:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot t \quad (10)$$

که در آن، ε قطر ثانویه لوله (دارای رسوب پس از مدت زمان t)، ε_0 = قطر اولیه لوله (قطر داخلی لوله بدون رسوب)، α نرخ رسوب‌گذاری و t زمان می‌باشند. از تفاضل مقادیر قطرهای لوله قبل از تراشیدن رسوب و بعد تراشیدن آن، ضخامت رسوب هر لوله به دست آمد. طول عمر هر نمونه لوله خانگی از طریق پرسش از صاحبان منازل حاصل شد. نرخ رسوب‌گذاری مربوط به هر

نمونه برابر با خارج قسمت تقسیم ضخامت رسوب هر نمونه لوله بر طول عمر آن نمونه است (اطلاعات طول عمر نمونه لوله‌ها از صاحب‌خانه‌ها دریافت شد).

۲-۶- آنالیز جنس رسوبها

رسوب هر نمونه لوله به صورت مکانیکی به وسیله سنباده جدا شده و با هاون به صورت پودر درآمد و سپس با روش انکسار اشعه ایکس (*X-ray diffraction*)، ترکیب شیمیایی رسوبها تعیین شد. الگوی انکسار اشعه ایکس با استفاده از نرم‌افزار *Xpert* مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. دستگاه انکسار اشعه ایکس که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت مدل *D8 ADVANCED* ساخت کارخانه *BRUKER* آلمان است. منبع انکسار اشعه ایکس در این مدل مس بوده و شدت موج مورد استفاده *40 map/40 kv* و طول موج $1/54$ آنگستروم بود. اساس این روش بر این حقیقت استوار است که الگوی پراش اشعه ایکس هر جسم بلوری، خاص همان جسم است، بنابراین اگر یک هم‌خوانی دقیق بین الگوی یک جسم مجهول و یک نمونه مشخص وجود داشته باشد، شناسایی شیمیایی می‌تواند انجام پذیرد.

۳- یافته‌ها و بحث

مقادیر پارامترهای آنالیز شیمیایی آب‌ها برای هر منطقه و همچنین استاندارد ملی آب شرب در جدول (۵) ارائه شده است.

۳-۱- کل جامدات محلول

میانگین مقادیر کل جامدات محلول آب در گستره ۳۷۵ تا ۸۴۳ میلی‌گرم در لیتر قرار دارند. کم‌ترین مقدار کل جامدات محلول مربوط به منطقه چاه‌های دوکوهک و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن سرسره است. مقادیر کل جامدات محلول در ۶۵ درصد منطقه‌ها شامل منطقه‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۱۷ بالاتر از حداکثر مقدار مطلوب (ولی کم‌تر از حداکثر مقدار مجاز) است که این منطقه‌ها غالباً در نواحی شرق، جنوب شرق و جنوب شهر شیراز قرار دارند.

جدول (۵)- مقادیر پارامترهای آنالیز شیمیایی آب‌های هر منطقه

شماره منطقه	اسیدیته	کل جامدات محلول	کلسیم	منیزیم	سولفات	کلرید	سختی (as CaCO ₃)	قلیائیت (as CaCO ₃)
۱	۷/۴	۳۷۵	۷۷	۲۲	۴۹	۱۹	۲۸۲	۲۲۰
۲	۷/۷	۴۶۰	۹۷	۲۶	۱۲۸	۲۴	۳۵۵	۱۹۴
۳	۷/۴	۴۷۲	۹۵	۳۰	۱۲۰	۲۵	۳۵۶	۲۰۴
۴	۷/۴	۵۲۰	۱۰۳	۳۴	۱۴۶	۲۸	۳۸۹	۲۲۱
۵	۷/۳	۶۰۰	۱۱۴	۳۹	۱۸۶	۳۲	۴۴۰	۲۲۲
۶	۷/۵	۵۲۷	۱۰۸	۳۱	۱۵۶	۲۸	۴۰۰	۲۱۲
۷	۷/۱	۷۰۶	۱۳۱	۴۳	۲۲۳	۵۵	۵۰۰	۲۲۳
۸	۷/۲	۴۹۱	۹۴	۳۳	۱۱۵	۲۵	۳۷۰	۲۲۵
۹	۷/۵	۶۲۶	۱۰۷	۴۹	۲۰۳	۳۹	۴۷۱	۲۲۲
۱۰	۶/۹	۷۱۹	۱۲۰	۵۸	۲۱۶	۶۵	۵۳۷	۲۶۰
۱۱	۷/۱	۶۸۱	۱۳۵	۴۰	۲۲۱	۴۶	۵۰۱	۲۲۸
۱۲	۷/۲	۷۱۳	۱۳۴	۴۸	۲۴۲	۶۵	۴۴۲	۲۲۳
۱۳	۷/۶	۴۳۷	۸۲	۲۹	۹۶	۲۳	۳۲۷	۲۰۶

شماره منطقه	اسیدیته	کل جامدات محلول	کلسیم	منیزیم	سولفات	کلرید	سختی (as CaCO ₃)	قلیائیت (as CaCO ₃)
	(mg/L)							
۱۴	۷/۰۵	۸۴۳	۱۵۰	۵۱	۲۹۰	۸۲	۵۸۶	۲۲۸
۱۵	۷/۲	۸۳۴	۱۴۵	۵۳	۲۸۱	۸۸	۵۸۰	۲۲۷
۱۶	۷/۷	۴۴۰	۸۱	۳۲	۱۰۷	۲۳	۳۳۳	۱۹۸
۱۷	۷/۳	۷۵۶	۱۳۶	۴۸	۲۶۴	۶۵	۵۳۸	۱۹۶
میانگین	۷/۳	۶۰۰	۱۱۲	۳۹	۱۷۹	۴۳	۴۳۶	۲۱۸
حداکثر	۷/۷	۸۴۳	۱۵۰	۵۸	۲۹۰	۸۸	۵۸۶	۲۶۰
حداقل	۶/۹	۳۷۵	۷۷	۲۲	۴۹	۱۹	۲۸۳	۱۹۴
حداکثر مقدار مطلوب	۷-۸/۵	۵۰۰	۷۵	-	۲۵۰	۲۰۰	-	-
حداکثر مقدار مجاز	۶/۵-۹/۲	۲۰۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۵۰۰	-

۳-۲- اسیدیته

میانگین مقادیر اسیدیته‌ی آب در مناطق در گستره ۶/۹ تا ۷/۱ قرار دارند. کم‌ترین میزان اسیدیته مربوط به منطقه چاه‌های بابا کوهی (منطقه ۱۰) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن معالی آباد (منطقه ۲) است. مقادیر اسیدیته در تمام مناطق در گستره مطلوب و مجاز قرار داشتند. به‌جز در منطقه شماره ۱۰، در بقیه منطقه‌ها مقدار اسیدیته بیش‌تر از ۷ بود. در مقادیر اسیدیته با گستره ۵ تا ۹ اگر غشای محافظ موجود نباشد، حفره‌دار شدن امری محتمل است. در گستره ۷ تا ۹، نرخ خوردگی و میزان غده‌ای شدن لوله‌های آهنی معمولاً با افزایش اسیدیته افزایش می‌یابد، اما آزاد شدن آهن از محصولات فرعی خوردگی با افزایش اسیدیته کاهش می‌یابد.

۳-۳- قلیائیت

میانگین مقادیر قلیائیت در مناطق منابع آب در گستره ۱۹۴ تا ۲۲۸ میلی‌گرم در لیتر قرار داشت. کم‌ترین میزان قلیائیت مربوط به منطقه مخزن معالی آباد (منطقه ۲) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه‌های مخزن انبار مرکزی (منطقه ۱۱) و مخزن سرسره (منطقه ۱۴) است. از آنجایی که مقادیر اسیدیته در نمونه‌های کم‌تر از هشت بود، بنابراین قلیائیت به‌صورت بی‌کربنات می‌باشند. مقدار قلیائیت کم‌تر از ۳۰ میلی‌گرم در لیتر به‌صورت کلسیم کربنات باعث خوردگی آب می‌شود. اگر میزان قلیائیت در بیش‌تر از ۶۵ میلی‌گرم در لیتر به‌صورت کلسیم کربنات حفظ شود، میزان خوردگی و آزاد شدن آهن کاهش می‌یابد. همچنین قلیائیت بالا موجب خاصیت بافری در آب می‌شود و به‌عبارت‌دیگر اسیدیته به میزان کم‌تری دچار تغییر می‌شود (Alrawajfeh et al. 2007). بنابراین، مقادیر قلیائیت در آب شرب نقاط مختلف شیراز بالا بوده و این امر باعث کاهش خوردگی در لوله‌های آب می‌شود. البته اگر مقدار قلیائیت در نمونه‌های آب بیش‌تر از ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌صورت کلسیم کربنات باشد، ممکن است بر طعم آب تأثیر نامطلوبی داشته باشد.

۳-۴- سختی

میانگین مقادیر کلسیم آب در مناطق در گستره ۷۷ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر قرار دارند. کم‌ترین مقدار کلسیم مربوط به منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن گل‌ها و چاه‌های بلوار نصر (منطقه ۱۵) است. مقادیر کلسیم در منطقه‌ها در گستره حداکثر مقدار مطلوب و حداکثر مقدار مجاز قرار دارند. منشأ اصلی کلسیم در آب‌ها، سنگ‌آهک است. میانگین مقادیر منیزیم آب در مناطق در گستره ۲۲ تا ۵۳ میلی‌گرم در لیتر قرار دارند. کم‌ترین مقدار منیزیم مربوط به

منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه چاه‌های بابا کوهی (منطقه ۱۰) است. مقادیر منیزیم در مناطق در گستره مجاز قرار دارند. غلظت بالای منیزیم به دلیل رسوب گرفتگی لوله‌ها، نامناسب است. منشأ اصلی منیزیم در آب‌ها، دولومیت است (Lower, 2009). میانگین مقادیر سختی آب در منطقه‌ها در گستره ۲۸۲ تا ۵۸۶ میلی‌گرم در لیتر قرار دارند؛ بنابراین آب‌های تمامی مناطق در گروه آب‌های بسیار سخت قرار می‌گیرند. کم‌ترین میزان سختی مربوط به منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن سرسره (منطقه ۱۴) است. مقادیر سختی در ۳۵ درصد منطقه‌ها، شامل مناطق ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۵ و ۱۷، بالاتر از حداکثر مقدار مجاز است. عامل اصلی ایجاد سختی در آب شیراز، منابع آب موجود در مناطق کارستی است. بیش‌ترین نوع سختی در آب شیراز، از نوع موقتی و یا کربناتی است. به نظر می‌رسد ترکیب متناسب منابع آب زیرزمینی با منابع آب سطحی (سد درود زن) که دارای میزان سختی پایین‌تری هستند، در تعدیل سختی آب‌ها مؤثر است. سختی بالا به تشکیل لایه محافظ کربنات کلسیم کمک کرده و باعث جلوگیری از خوردگی لوله‌ها می‌شود. سختی بیش‌ازحد باعث افزایش میزان رسوب در لوله‌ها و در نتیجه گرفتگی و کاهش ظرفیت حمل جریان می‌شود. بیش‌ترین نوع سختی در آب شیراز، از نوع موقت و یا کربناتی است.

۳-۵- سولفات

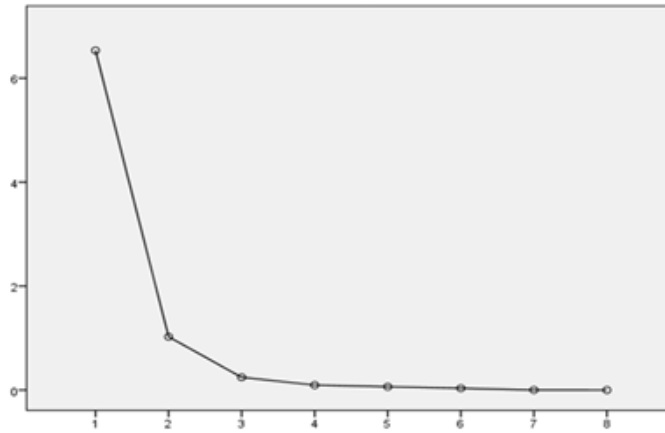
میانگین مقادیر سولفات آب در مناطق در گستره ۴۹ تا ۲۹۰ میلی‌گرم در لیتر قرار دارند. کم‌ترین میزان سولفات مربوط به منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن سرسره (منطقه ۱۴) است. مقدار سولفات در منطقه‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۷ بالاتر از حداکثر مقدار مطلوب بود که این مناطق در نواحی شرق، جنوب شرق و جنوب شهر شیراز واقع شده‌اند.

۳-۶- کلراید

میانگین مقادیر کلراید آب در گستره ۱۹ تا ۸۸ میلی‌گرم در لیتر قرار دارند. کم‌ترین میزان کلراید مربوط به منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن گل‌ها (منطقه ۱۵) است. مقادیر کلراید در تمام مناطق در گستره مجاز و مطلوب قرار داشت. کلراید فعال‌ترین و خورنده‌ترین یون است (Singley et al. 1984).

۳-۷- تحلیل عاملی

در روش تحلیل عاملی درجه اشتراک نشان‌دهنده درجه شرکت داشتن متغیرهای موجود در دسته‌بندی انجام شده است. اگر در دسته‌بندی انجام شده درجه اشتراک برای هر متغیر یا پارامتر به عدد ۱ نزدیک بوده و یا از حدود ۰/۷ تا ۰/۸ بیش‌تر باشد، دسته‌بندی انجام شده به خوبی تغییرات تمام پارامترها را در نظر گرفته است و نیاز به در نظر گرفتن فاکتورهای بیش‌تر در تقسیم‌بندی نیست. ضریب واریانس هر فاکتور نشان‌دهنده این است که فاکتور معرفی شده چه اندازه در تقسیم‌بندی‌ها مؤثر بوده است و یا نشان‌دهنده آن است که فاکتور مربوطه چه نسبتی از تغییرات داده‌ها را در خود دارد. برای نشان دادن بهتر درجه اهمیت هر فاکتور در تقسیم‌بندی انجام شده می‌توان از اسکری پلات استفاده نمود. (شکل ۲). در این شکل در محور افقی شماره فاکتور و در محور عمودی ارزش و اهمیت هر فاکتور نشان داده شده است. تحلیل عاملی توسط نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. روش استخراج، تحلیل مولفه اصلی است (جدول ۶).



شکل (۲) - اسکری پلات فاکتورهای اصلی

جدول (۶) - اشتراکات مؤلفه‌های شیمیایی آب

مؤلفه	اولیه	استخراج
قلیایت	۱	۰/۹۵۶
سختی	۱	۰/۹۶۲
کلرید	۱	۰/۹۲۷
سولفات	۱	۰/۹۸۹
منیزیم	۱	۰/۸۷۹
کلسیم	۱	۰/۹۴۱
کل جامدان محلول	۱	۰/۹۹۹
اسیدیته	۱	۰/۸۹۵

جدول (۷) - ماتریس چرخیده مؤلفه

مؤلفه		
۲	۱	
۰/۹۶۸	۰/۱۶۹	قلیایت
۰/۳۴۱	۰/۹۲۰	سختی
۰/۳۱۰	۰/۹۱۲	کلرید
۰/۲۰۲	۰/۹۷۴	سولفات
۰/۴۵۴	۰/۸۲۰	منیزیم
۰/۲۴۸	۰/۹۳۸	کلسیم
۰/۳۱۶	۰/۹۴۸	کل جامدان محلول
-۰/۸۰۶	-۰/۴۹۶	اسیدیته

نتایج تحلیل عاملی (جدول ۷) نشان می‌دهد که پارامترهای کلرید، سولفات، کلسیم، منیزیم و کل جامدات محلول از تأثیر بیش‌تری نسبت به اسیدیته و قلیایت برخوردارند. با توجه به مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده برای مناطق، شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری محاسبه شدند که نتایج آن در جدول (۸) ارائه شده است.

۳-۸- تفسیر شاخص‌ها در مناطق شیراز

۳-۸-۱- شاخص‌های لانژلیه و رایزتر

میانگین مقادیر شاخص لانژلیه در مناطق در گستره ۰/۲۷- تا ۰/۴۲ قرار دارند که کم‌ترین مقدار آن (خورنده‌ترین) مربوط به منطقه چاه‌های بابا کوهی (منطقه ۱۰) و بیش‌ترین مقدار آن (رسوب‌گذارترین) مربوط به منطقه مخزن معالی آباد (منطقه ۲) است. میانگین مقادیر شاخص رایزتر در مناطق در گستره ۶/۹ تا ۷/۴۵ قرار دارند که کم‌ترین مقدار آن (رسوب‌گذارترین) مربوط به منطقه مخزن معالی آباد و بیش‌ترین مقدار آن (خورنده‌ترین) مربوط به منطقه چاه‌های بابا کوهی (منطقه ۱۰) است. شاخص لانژلیه در تمام منطقه‌ها در نزدیکی حالت تعادل قرار دارد. شاخص رایزتر در تمام منطقه‌ها حالت عدم رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه شاخص لانژلیه فقط تمایل آب به رسوب‌گذاری و یا خوردگی را نشان می‌دهد و نمی‌توان از آن به‌عنوان یک شاخص برای اندازه‌گیری کمی خوردگی یا رسوب‌گذاری استفاده نمود، از طرفی این شاخص برای آب‌های ساکن و دارای کل جامدات محلول پایین به کار می‌رود، پس برای آب‌های موردبررسی در این تحقیق چندان معتبر نیست. لذا توصیه‌شده است جهت پیش‌بینی دقیق‌تر، همواره از شاخص لانژلیه و رایزتر به‌طور هم‌زمان برای تصمیم‌گیری استفاده شود. به دلیل اینکه در همه منابع آب مقدار شاخص رایزتر از شش بزرگ‌تر است، لذا آب‌ها به خوردگی تمایل داشته و لایه محافظ کربنات کلسیم یا تشکیل نمی‌گردد یا قادر به حفاظت از جدار داخلی لوله‌ها نیست. از طرف دیگر شاخص لانژلیه، فقط برای کنترل رسوب کربنات کلسیم در آب‌های با کل جامدات محلول کم مناسب است.

جدول (۸)- مقادیر شاخص‌های لانژلیه، رایزتر، لارسون و تهاجمی مناطق

شماره منطقه	شاخص لانژلیه	تفسیر	شاخص رایزتر	تفسیر	شاخص لارسون	تفسیر	شاخص تهاجمی	تفسیر
۱	۰/۰۲	رسوبگذاری ضعیف	۷/۴	عدم رسوبگذاری	۰/۲۷	رسوبگذار	۱۳/۹۴	غیر خورنده
۲	۰/۴۲	رسوبگذاری ضعیف	۶/۹	عدم رسوبگذاری	۰/۸۳	احتمال خوردگی	۱۴/۲۷	غیر خورنده
۳	۰/۰۵	رسوبگذاری ضعیف	۷/۳۳	عدم رسوبگذاری	۰/۷۶	رسوبگذار	۱۳/۹۷	غیر خورنده
۴	۰/۲۴	رسوبگذاری ضعیف	۶/۹۳	عدم رسوبگذاری	۱/۰۳	احتمال خوردگی	۱۴/۰۶	غیر خورنده
۵	۰/۱۸	رسوبگذاری ضعیف	۶/۹۵	عدم رسوبگذاری	۱/۰۳	احتمال خوردگی	۱۴/۰۱	غیر خورنده
۶	۰/۱۷	رسوبگذاری ضعیف	۷/۲	عدم رسوبگذاری	۰/۹۶	احتمال خوردگی	۱۴/۰۵	غیر خورنده
۷	-۰/۰۷	خوردگی کم	۷/۲	عدم رسوبگذاری	۱/۳۹	خورنده	۱۳/۸۲	غیر خورنده
۸	-۰/۰۸	خوردگی کم	۷/۴	عدم رسوبگذاری	۰/۷	رسوبگذار	۱۳/۸۴	غیر خورنده
۹	۰/۲۴	رسوبگذاری ضعیف	۶/۹۷	عدم رسوبگذاری	۱/۲۰	خورنده	۱۴/۱۸	غیر خورنده
۱۰	-۰/۲۷	خوردگی کم	۷/۴۵	عدم رسوبگذاری	۱/۱۵	خورنده	۱۳/۷۳	غیر خورنده

شماره منطقه	شاخص لائزلیه	تفسیر	شاخص رایزنر	تفسیر	شاخص لارسون	تفسیر	شاخص تهاجمی	تفسیر
				رسوبگذاری				خورنده
۱۱	-۰/۱	خورندگی کم	۷/۳	عدم رسوبگذاری	۱/۲۸	خورنده	۱۳/۸۷	غیر خورنده
۱۲	۰/۰۴	رسوبگذاری ضعیف	۷/۰۸	عدم رسوبگذاری	۱/۵۴	خورنده	۱۳/۹۷	غیر خورنده
۱۳	۰/۲۷	رسوبگذاری ضعیف	۷/۰۲	عدم رسوبگذاری	۰/۶۸	رسوبگذار	۱۴/۰۵	غیر خورنده
۱۴	-۰/۰۶	خورندگی کم	۷/۱۶	عدم رسوبگذاری	۱/۸۲	خورنده	۱۳/۸۸	غیر خورنده
۱۵	۰/۰۶	رسوبگذاری ضعیف	۷/۱۵	عدم رسوبگذاری	۱/۷۷	خورنده	۱۳/۹۵	غیر خورنده
۱۶	۰/۲۴	رسوبگذاری ضعیف	۷/۱۸	عدم رسوبگذاری	۰/۶۷	رسوبگذار	۱۴/۱۷	غیر خورنده
۱۷	۰/۲	رسوبگذاری ضعیف	۶/۹۲	عدم رسوبگذاری	۱/۶۶	خورنده	۱۴/۱	غیر خورنده
میانگین	۰/۰۸	--	۷/۱۵	--	۱/۱	--	۱۴	--
حداکثر	۰/۴۲	--	۷/۴۵	--	۱/۸۲	--	۱۴/۲۷	--
حداقل	-۰/۲۷	--	۶/۹	--	۰/۲۷	--	۱۳/۷۳	--

۳-۸-۲- شاخص لارسون

میانگین مقادیر شاخص لارسون در مناطق در گستره ۰/۲۷ تا ۱/۸۲ قرار دارند که کم‌ترین مقدار آن (رسوب‌گذارترین) مربوط به منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) و بیش‌ترین مقدار آن (خورنده‌ترین) مربوط به منطقه مخزن سرسره (منطقه ۱۴) است. این شاخص در ارتباط با خوردگی لوله‌های فولادی و چدنی است. بر اساس این شاخص در بیش‌تر منطقه‌ها تمایل به خوردگی مشاهده می‌شود.

۳-۸-۳- شاخص تهاجمی

میانگین مقادیر شاخص تهاجمی در مناطق در گستره ۱۳/۷۳ تا ۱۴/۲۷ قرار دارند که کم‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه چاه‌های بابا کوهی (منطقه ۱۰) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه مخزن معالی آباد (منطقه ۲) است. شاخص تهاجمی، تنها مخصوص لوله‌های سیمان آزیستی است که در قسمت‌هایی از لوله‌های شبکه توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس این شاخص در هیچ‌کدام از منطقه‌ها، آب‌ها نسبت به لوله‌های سیمان آزیستی خورنده نیستند.

۳-۸-۴- تفسیر نرخ رسوب‌گذاری در مناطق

مهم‌ترین عواملی که در نرخ رسوب‌گذاری مؤثرند، پارامترهای سختی، اسیدیته، قلیائیت، فشار و مقادیر کلرید و سولفات می‌باشند. افزایش میزان سختی، اسیدیته، قلیائیت و فشار، باعث افزایش نرخ رسوب‌گذاری می‌شود. آنیون‌های کلرید و سولفات خورنده بوده و افزایش مقادیر آن‌ها در آب باعث کاهش نرخ رسوب‌گذاری می‌شود (Lane, 1993). کم‌ترین نرخ رسوب‌گذاری مربوط به حوضه مخزن دراک (منطقه ۳) و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به حوضه مخزن گل‌ها و چاه‌های بلوار نصر (منطقه ۱۵) است. ملاحظه

می‌شود که منطقه چاه‌های دوکوهک (منطقه ۱) علیرغم دارا بودن کم‌ترین میزان سختی، دارای نرخ رسوب‌گذاری متوسطی است که دلایل آن احتمالاً وجود فشار آب بالا و همچنین نرخ بیش‌تر خوردگی و در نتیجه ایجاد محصولات خوردگی (ترکیبات آهن) در این منطقه است. احتمالاً عامل اصلی بیش‌ترین نرخ رسوب‌گذاری در منطقه مخزن دراک (منطقه ۳)، مقدار سختی بسیار بالا در این منطقه است (جدول ۹).

۳-۹- تفهیر آنالیز جنس رسوب‌ها

۳-۹-۱- ترکیبات آهن

حضور ژئوتیت و مگنتیت در اغلب رسوب‌ها نشان از وجود لایه صدفی شکل در آن‌ها است؛ زیرا ترکیب این لایه متراکم صدفی شکل، اغلب مگنتیت و ژئوتیت است. فازهای اکسید آهن، مثل لپیدوکروسیت و هیدروکسید آهن سه‌ظرفیتی بدون شکل نیز ممکن است علاوه بر رسوب‌های سیلیکات‌ها، فسفات‌ها و کربنات‌ها (مثل کربنات کلسیم) در ناحیه سطح فوقانی رسوب‌ها حضور داشته باشند. کربنات کلسیم و کربنات منیزیم در اغلب رسوب‌ها و لپیدوکروسیت در برخی از رسوب‌ها موجود بود. وقتی اکسیژن محلول در آب موجود باشد، یون‌های آهن دو ظرفیتی می‌توانند اکسایش یافته و هیدرولیز شوند و فازهای مختلف اکسید (هیدروکسید) آهن مثل لپیدوکروسیت، ژئوتیت، هیدروکسید آهن سه‌ظرفیتی، هیدریت آهن سه‌ظرفیتی، مگنتیت و ماگمیت را به وجود آورند. وجود فازهایی مثل ژئوتیت، مگنتیت و ماگمیت در اغلب رسوب‌ها نشان از حضور اکسیژن در آب‌ها است. نرخ‌های پایین اکسایش باعث پیشرفت تشکیل مگنتیت و ژئوتیت می‌شوند، درحالی‌که نرخ‌های بالا باعث تشکیل لپیدوکروسیت می‌شوند. از آنجایی‌که فازهای ژئوتیت و مگنتیت جزو فازهای اصلی در اکثر رسوب‌ها بودند، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ‌های پایین بوده‌اند. سیدریت در تعداد معدودی از نمونه‌ها حضور داشت که دلیل این امر مجاورت نمونه لوله‌ها با هوا است، زیرا سیدریت ($FeCO_3$) در مجاورت با هوا در دمای اتاق به هماتیت (Fe_2O_3) تبدیل می‌شود. هماتیت در اغلب نمونه‌ها وجود داشت.

۳-۹-۲- آهن

همان‌طور که از نتایج آنالیز رسوب قابل‌مشاهده است، آهن ندرتاً به‌صورت عنصر در نمونه‌ها وجود داشت و غالباً به‌صورت اکسید و هیدروکسید و کمپلکس از جمله ژئوتیت، مگنتیت، ماگمیت، هماتیت، ویوانیت و غیره موجود بود.

۳-۹-۳- کلسیم

حضور کلسیم در نمونه رسوب‌ها به دلیل حضور طبیعی آن در آب‌های مربوطه و همچنین حاصل از ته‌نشینی و تجزیه کلسیت، دولومیت، هیدروکسیپاتیت و ژیپس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) است که این مواد معدنی در اغلب نمونه‌ها حضور داشتند.

۳-۹-۴- منگنز

حضور منگنز در رسوب‌ها به دلیل حضور طبیعی آن در آب‌های مربوطه تشکیل و ته‌نشینی اکسید و یا هیدروکسید منگنز در آب است.

۳-۹-۵- منیزیم

به نظر می‌رسد حضور منیزیم در رسوب‌ها به دلیل تشکیل و ته‌نشینی مواد معدنی از جمله دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) است که این ترکیب در غالب نمونه‌ها وجود داشت.

جدول (۹) - مقادیر نرخ‌های رسوب‌گذاری مناطق

شماره منطقه	منبع تغذیه کننده	میانگین نرخ رسوب‌گذاری (میلی‌متر در سال)
۱	چاه‌های دوکوهک	۰/۱۸
۲	مخزن معالی آباد	۰/۱۷
۳	مخزن دراک	۰/۱۳
۴	چاه‌های چمران	۰/۱۹
۵	چاه‌های چمران و چوگیا	۰/۳
۶	مخزن ابیوردی	۰/۱۹
۷	تصفیه خانه نمازی	۰/۲۸
۸	مخزن دره چناری	۰/۱۵
۹	مخزن شیخ آقا	۰/۳۴
۱۰	چاه‌های بابا کوهی	-
۱۱	مخزن انبار مرکزی	۰/۲۹
۱۲	چاه‌های هفت تنان	۰/۳
۱۳	مخزن خرامه	۰/۲۵
۱۴	مخزن سرسره	۰/۳۸
۱۵	مخزن گل‌ها	۰/۴۱
۱۶	مخزن محمدیه	۰/۲۶
۱۷	مخزن سبز پوشان	۰/۳۴
میانگین	-	۰/۲۶
حداکثر	-	۰/۴۱
حداقل	-	۰/۱۳

۳-۹-۶- کلسیم کربنات

در تمامی نمونه‌ها کلسیم کربنات وجود داشت زیرا این آب‌ها به‌شدت سخت و سرشار از یون‌های کلسیم و بی‌کربنات بودند. در میان این فازها، کلسیت از نظر ترمودینامیکی، در دما و فشار هوای محیط، پایدارترین فاز بوده و معمولاً در ته‌نشین شدن از بی‌کربنات کلسیم خالص، فاز غالب است. آراگونیت و واتریت از نظر جنبشی با یکدیگر مشابه بوده و ممکن است به‌عنوان اولین فرم‌ها ظاهر شوند و باگذشت زمان به کلسیت تبدیل شوند. کلسیت معمولاً در دمای اتاق ته‌نشین می‌شود. در اغلب نمونه رسوب‌ها فاز کلسیت موجود بود و در بسیاری نمونه‌ها فاز واتریت نیز حضور داشت. از آنجایی‌که آراگونیت غالباً در دمای بیش‌تر از ۶۵ درجه سانتی‌گراد ته‌نشین می‌شود، این نوع فاز در هیچ‌یک از نمونه‌ها شناسایی نشد.

۳-۹-۷- نوع سختی

در اغلب نمونه‌های آب، غلظت یون بی‌کربنات بیش‌تر از یون‌های سولفات و کلرید بود و همچنین بر اساس آنالیز رسوب‌ها به روش انکسار اشعه ایکس می‌توان مشاهده نمود که ترکیبات کربناتی یون‌های کلسیم و منیزیم بیش‌تر از ترکیبات غیر کربناتی (ترکیبات کلریدی، سولفاتی و نیتراتی) آن‌ها است، بنابراین بیش‌ترین نوع سختی در آب شیراز، سختی موقت است.

۳-۹-۸- فسفر

حضور فسفر در رسوبها می‌تواند مرتبط با تشکیل هیدروکسیپاتیت (به فرمول $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)\text{OH}$ که در اغلب نمونه‌ها وجود داشت)، تجمع فسفات در بیوفیلم و مواد سلولی باشد. تجمع فسفر در رسوبها نیازمند این است که فسفر در آب تصفیه‌شده حضور داشته باشد.

۳-۹-۹-سولفور

حضور سولفور در رسوبها احتمالاً به دلیل وجود تروپلیت (سولفید آهن دو ظرفیتی به فرمول FeS) است که یک جزء معمول در زیر لایه رسوب خوردگی آهن است که نتایج آنالیز آنکسار اشعه ایکس حاکی از حضور این ترکیب در نمونه‌ها بود.

۳-۹-۱۰-سیلیکا

سیلیکا (SiO_2) یک ماده معدنی است که معمولاً در آب زیرزمینی یافت می‌شود. سیلیکا به آسانی در آب حل نمی‌شود. سیلیکا غالباً در غلظت‌های بالا (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) یافت می‌شود. غلظت‌های پایین‌تر از این مقدار معمولاً نرمال در نظر گرفته می‌شود. سیلیکا از هوازدگی مواد معدنی سیلیکاتی حاصل می‌شود. فراوانی آن در آب زیرزمینی به مقدار مواد معدنی سیلیکاتی موجود در سنگ‌بستر بستگی دارد. سیلیکا تقریباً در تمام نمونه‌های رسوب وجود داشت که این امر نشان از حضور قابل‌توجه این ماده در آب‌های نقاط مختلف شهر است.

۳-۹-۱۱-آلومینیم

حضور آلومینیم در رسوب، می‌تواند مربوط به حضور طبیعی آن در آب و ته‌نشینی آلومینا (اکسید آلومینیم)، هیدروکسید آلومینیم و تشکیل آلومینوسیلیکات‌ها باشد. آلومینیم همچنین می‌تواند از طریق جدایش از پوشش‌های سیمانی وارد آب شده باشد.

۳-۹-۱۲-روی

علت وجود روی در رسوبها ممکن است به دلیل حضور طبیعی در آب منبع و یا خوردگی لوله‌های آهن گالوانیزه باشد.

۳-۹-۱۳-سرب

سرب در اکثر نمونه‌های رسوب وجود داشت. حضور سرب در رسوبها به علت حضور طبیعی آن در آب منبع و یا خوردگی اتصالات برنجی موجود در دستگاه‌های لوله‌کشی آب است.

۳-۹-۱۴-کادمیم و آرسنیک

منشأ حضور کادمیم و آرسنیک، حضور طبیعی آن‌ها در منابع آب و یا خوردگی لوله‌های گالوانیزه است، زیرا این عناصر در ساختار لوله‌های گالوانیزه قرار دارند و خوردگی موجب آزاد شدن این آلاینده‌ها می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری نشان داد که متوسط مقدار شاخص‌های لانژلیه، رایزور، لارسون و تهاجمی در شهر شیراز به ترتیب ۰/۰۷ (رسوب‌گذاری ضعیف)، ۷/۱۲ (عدم رسوب‌گذاری)، ۱/۲ (خورنده)، ۱۳/۹۶ (غیر خورنده) بود. بر اساس شاخص لانژلیه ۷۱ درصد آب منطقه‌های مورد مطالعه رسوب‌گذار بوده و بر اساس شاخص رایزور تمام منطقه‌ها دارای ویژگی عدم رسوب‌گذاری می‌باشند. بر اساس شاخص لارسون برای لوله‌های چدنی و فولادی ۲۹ درصد منطقه‌ها رسوب‌گذار، ۲۳ درصد احتمالاً خورنده و ۴۸ درصد منطقه‌ها خورنده است. بر اساس شاخص تهاجمی هیچ‌کدام از منطقه‌ها برای لوله‌های سیمان آریستی خورنده نیستند. بیش‌ترین نرخ رسوب‌گذاری مربوط به منطقه شماره ۱۵ (مخزن گل‌ها واقع در بلوار رسول اعظم) و کم‌ترین مقدار آن مربوط به منطقه شماره ۳ (مخزن دراک واقع در کمربندی دراک) بود. به‌طور کلی، نرخ رسوب‌گذاری در

لوله‌های آب شرب منازل در شهر شیراز، ۰/۲۶ میلی‌متر در سال است. در مجموع منطقه‌های واقع در شرق، جنوب شرق و جنوب شیراز دارای مشکلات بیش‌تری از لحاظ رسوب‌گذاری بوده و منطقه‌های شمال و شمال غرب، بهترین شرایط را از نظر رسوب‌گذاری دارند. نتایج نشان داد که ترکیبات عمده در نمونه‌ها شامل کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، کربنات منیزیم، سولفات منیزیم، همتیت، ماگمیت، مگنتیت، ژئوتیت، اکسید روی، ژپس، ویوانیت، دولومیت، هیدروکسیپاتیت و تریولیت بودند. همچنین، عناصر عمده در این نمونه‌ها، منیزیم، سیلیسیم، فسفر، سولفور، روی، مس و سرب است.

References

- Al-Rawajfeh A. E. and Al-Shamialeh E. M. (2007). Assessment of tap water resources quality and its potential of scale formation and corrosiveness. Conference on desalination strategies in south Mediterranean countries, Tafila province, South Jordan.
- Alsaqqar A. S., Khudair B. H. and Ali S. K. (2014). Evaluating water stability indices from water treatment plants in Baghdad city. *J. Wat. Resour. Prot.*, 6, 1344-1351.
- Avaz-pur M. and Gholami M. (2008). The study of corrosion potential and scale-formation of drinking water resources of Ilam Town, Eleventh National Conference of Environmental Health, Zahedan, 10-15. [in Persian]
- Benjamin M. M., Sontheimer H and Leroy P. (1996). Corrosion of iron and steel. In: Internal corrosion of water distribution systems. 2nd edition. AWWA Research Foundation and DVGW Technologiezentrum Wasser, Denver, CO, 29-70.
- Dobersek D., Goricanec D. and Kroppe J. (2005). Economic analysis of energy savings by using rotary heat regenerator in ventilating systems. *IASME Trans.* (4), 1640-1647.
- Greenberg A. E., Clesceri L. S and Eaton A. D. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Ed., APHA, Washington, DC. 541 pp.
- Lane R.W. (1993). Control of scale and corrosion in building water systems. McGraw-Hill Book Co., New York, 279 pp.
- Lower S. (2009). Electrochemical corrosion. Chem1 virtual textbook. Simon Fraser University, Vancouver Canada. Available from: <http://www.chem1.com/acad/webtext/elchem/ec7.html>, Accessed May 2011.
- Nikpour B. (2006). A qualitative study of drinking water of Behshahr city based on Corrosion and Scale-formation Indices, M.sc Dissertation, Faculty of Technical-Engineering, Azad University of Bandar Abbas. [in Persian]
- Peng C., Korshin, G. V and Valentine R. L. (2010). Characterization of elemental and structural composition of corrosion scales and deposits formed in drinking water distribution systems. *Wat. Res.*, 44, 4570-4580.
- Pourzamani H R. (2005). Assessment of water quality in aspect of corrosiveness in Ashtarjan industrial town of Isfahan, Eighth National Conference of Environmental Health, Tehran University, Tehran. [in Persian]
- Prisyazhniuk A. V. (2007). Prognosticating scale-forming properties of water. *Appl. Thermal Eng.*, 27(8), 1637-1641.

- Reiber S., Poulosom S., Edwards M. and Patel S. (1997). A general framework for corrosion control based on utility experience. AWWA. Publication No. 90712A: 6-11.
- Rossum J. R. (1980). Fundamentals of metallic corrosion in fresh water., Los Angeles, CA, 1-12
- Rossum, J. R., and Merrill, D. T. (1983) An evaluation of the calcium carbonate saturation index. J. AWWA. 75(2): 95-100
- Singley, J. E., Beaudet B. A and Markey P. H. (1984). Corrosion manual for internal corrosion of water distribution systems, Environmental science and Engineering Inc., 1-67.
- Sarin P. (2002). Iron release from corrosion scales in old iron/steel/drinking water distribution pipes. Ph.D. thesis. The graduate college of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 158 pp.
- Seyyed-Razi M. (1997). Control of corrosion in industries, Iranian Corrosion Forum Publication, 400pp. [in Persian]
- Tootoonchi A., Naseri N. and Sarkhoshiyan R. (2003). Shiraz water supply and wastewater collection and disposal, Iranab Consulting Engineering Corporation, 1-37 [In Persian].
- Von Huben H. (1995). Water treatment principles & practices of water supply operations, 2nd Ed., AWWA, 36-72.

Investigation of Scale-Forming and Corrosiveness Potential of Drinking Water (Case Study of Shiraz Drinking Water Distribution System)

Nima Tavanpour¹, Navid Tavanpour² and Seyyedeh Asiyeh Mousavi-Raad³

¹ Ph.D. Student of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Undergraduate Student of Water Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

³ M.Sc. of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Zabol University, Zabol, Iran

*Corresponding Author: nima.tavanpour@gmail.com

Received: March 6, 2016

Accepted: May 26, 2016

Abstract:

This research was conducted to investigate the potential of scale forming and corrosiveness of drinking water in the reservoirs and drinking water distribution network in Shiraz, Iran. The area under study was divided into 17 zones. During winter, spring, and summer 2011, 144 water samples were collected from the water reservoirs and the various sites of water distribution system. The chemical parameters were measured. Then, values of the Langelier (LI), Rayznar (RI), Larson (LI) and aggressive (AI) indices were calculated for each sample. In this research, 41 samples of home pipes were collected from different zones of Shiraz and the rate of scale formation was calculated for each sample. The scale composition of 33 home pipe samples and 8 network pipe samples were analyzed by X-ray diffraction method. Results showed that the mean values of LI, RI, LS, and AI were 0.07 (considered as slightly scale forming), 7.1 (non-scale forming), 1.2 (corrosive), and 14 (non-corrosive) respectively. The average rate of scale formation and their values for the drinking water of Shiraz pipes is 0.26 mm/yr. The research found that the main compositions in the scale samples were calcium carbonate, calcium sulfate, magnesium carbonate, magnesium sulfate, hematite, maghemite, magnetite, goethite, zinc oxide, gypsum, vivianite, dolomite, hydroxyapatite, and troilite. The main elements in the scale samples were magnesium, silicon, phosphorus, sulfur, zinc, copper, and lead. According to the results of this research, zones located in the east, south, and southeast of Shiraz, because of high levels of hardness and sulfate exhibit more scale formation as a problem.

Keywords: Corrosion Indices, Drinking Water, Scale Composition, Scaling Rate