

بررسی علل تخریب و انسداد ناشی از خوردگی لوله های مسی حاوی گاز کلر در حضور رطوبت (مطالعه موردی)

سجاد بردبار^{۱*}، مصطفی علیزاده^۲ و مسعود ایرانمنش^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۲، ش.ص ۴۰-۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۴)

چکیده

این تحقیق به بررسی علل و مکانیزم انسداد لوله های مسی مورد استفاده در سیستم های کلر زنی آب شرب پرداخته است. انسداد لوله های منتقل کننده گاز کلر باعث می شود، فرآیند گندزدایی آب به طور کامل انجام نگردد و ممکن است سلامت انسان در معرض خطر قرار گیرد. مطالعه جامع لوله های مسی تخریب شده در چندین ایستگاه تصفیه آب مشخص ساخت دلیل اصلی انسداد مکرر این لوله ها، پدیده خوردگی است. تحقیق پیش رو دلایل و همچنین مکانیزم انسداد مکرر این لوله ها را مورد مطالعه قرار داده است. به منظور تعیین علل و مکانیزم انسداد از روش پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. بررسی مکانیزم انسداد لوله مشخص ساخت، حضور ناخواسته رطوبت درون لوله در هنگام خارج از سرویس بودن سیستم، طی دو مرحله (تشکیل و رشد محصولات خوردگی) باعث انسداد لوله ها می گردد. حضور همزمان رطوبت و گاز کلر درون لوله باعث تشکیل الکتروولیت خورنده (اسید هیدروکلریک) شده و شرایط را جهت خوردگی داخلی لوله ها فراهم می سازد. نتایج XRD حضور محصول خوردگی متخلخل و حجیم پاراتاسامیت ($Cu_2(OH)_3Cl$) را مشخص نمود. تصاویر SEM روشن ساخت با فراهم شدن محیط خورنده درون لوله و در نتیجه آن تشکیل محصولات خوردگی متخلخل و دارای ترک، باعث رشد سریع لایه محصولات خوردگی غیر محافظ می گردد. رشد رسوب محصولات خوردگی و تجمع تکه های جدا شده محصولات خوردگی در قسمت هایی از لوله باعث انسداد آن و در نتیجه عدم تزریق مقدار کافی گاز کلر به آب شرب می گردد.

واژه های کلیدی: کلرزن گازی، خوردگی، مس، کلر، اسید هیدروکلریک.

^۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

^۲- استادیار گروه فلزات، پژوهشکده مواد، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه صنعتی تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

^۳- استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه صنعتی تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: bordbar.sajjad@gmail.com

پیشگفتار

در بسیاری از ایستگاه‌های تصفیه آب از سیستم‌های کلرزن گازی برای گندزدایی آب استفاده می‌شود. در این سیستم‌ها با استفاده از تزریق گاز کلر به آب، فرآیند گندزدایی و حذف میکروارگانیسم‌ها صورت می‌پذیرد [۲ و ۱]. در فرآیند تصفیه آب، هر فاکتور مختل کننده سیستم‌های گندزدایی می‌تواند برای سلامت انسان خطرناک باشد [۳]. عدم عملکرد صحیح لوله‌های مسی در انتقال گاز کلر به دستگاه کلریناتور منجر به انجام ناقص فرآیند کلرزنی در واحدهای تصفیه آب می‌گردد. تشکیل غیر منتظره محیط خورنده درون لوله و در نتیجه وقوع پدیده خوردگی منجر به انسداد لوله‌های مسی در ایستگاه‌های تصفیه آب می‌گردد. پیش از این، محققان خوردگی ناشی از فعالیت میکروبی درون لوله‌های مسی در تاسیسات آب شرب [۴ و ۵] و همچنین خوردگی حفره‌ای مس در سیستم‌های توزیع آب [۶] را مورد بررسی قرار داده‌اند.

انسداد لوله‌ها، یکی از عوامل اصلی بازدارنده عملکرد صحیح واحدهای صنعتی است. وقوع مشکل انسداد لوله در اغلب واحدهای صنعتی مانند واحدهای پتروشیمی [۷ و ۸]، سیستم‌های مبدل حرارتی [۹]، لوله‌ها و پمپ‌های چاه‌های آب [۱۰-۱۲] و نیروگاه‌های تولید برق [۱۳-۱۵] گزارش شده است. به طور عمومی، پدیده انسداد می‌تواند در حین انتقال سیالات (مایع و یا گاز) و به سبب عوامل و مکانیزم‌های مختلفی رخ دهد. مرور منابع نشان می‌دهد، پدیده خوردگی دلیل اصلی انسداد لوله‌ها می‌باشد. علاوه بر خوردگی، انسداد ناشی از رسوب گرفتگی [۸]، فعالیت‌های میکروبی [۱۰] و سایش [۹ و ۱۶] نیز گزارش شده است.

اگرچه پدیده انسداد در مراجع مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما علل و مکانیزم انسداد لوله‌های مسی انتقال دهنده گاز کلر تاکنون در هیچ گزارشی منتشر نشده است. براساس شرایط اجرایی، انسداد می‌تواند به سبب دلایل مختلفی رخ دهد. نکته قابل تامل در وقوع از کار افتادگی تجهیزات ناشی از انسداد، دستیابی به علل و مکانیزم انسداد است. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل علل انسداد لوله‌های انتقال دهنده گاز کلر در سیستم‌های کلرزنی آب شرب است. این پژوهش به صورت موردی به

بررسی انسداد لوله‌های سیستم کلرزنی شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کرمان پرداخته است. مطالعه پیش رو می‌کوشد که علاوه بر تعیین علل انسداد لوله‌ها، مکانیزم خوردگی داخلی لوله‌های مسی در محیط حاوی گاز کلر و رطوبت را روشن سازد تا بتوان بر مبنای آن‌ها راهی برای کنترل این مشکل یافت.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های استفاده شده در این مطالعه از لوله‌های مسی در حال استفاده و لوله‌های از کار افتاده در اثر انسداد متعلق به سیستم کلرزن‌های شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کرمان انتخاب گردیدند. لوله‌های مسی مورد استفاده در این سیستم‌ها دارای قطر استاندارد ۸ میلی‌متر می‌باشند و مطابق با استاندارد ASTM B88 ساخته شده‌اند [۱۷]. به منظور مطالعات میکروسکوپی، لوله‌های انتخاب شده به قطعات کوچک‌تر برش خورده و سپس مانت شدند. برای حفظ رسوب محصولات خوردگی جمع شده درون لوله، مقاطع لوله‌های مسدود شده به وسیله میکروکاتر الکتریکی به آرامی برش خورده و سپس به وسیله صفحات سمباده تا زبری ۲۴۰۰ پرداخت گردید. برای آنالیز فازی رسوب تشکیل شده درون لوله از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. محدوده رویش بین ۱۰ تا ۱۰۰ درجه، گام ۰/۰۲ درجه و زمان نگهداری یک ثانیه انتخاب گردید. به منظور بررسی مقطع عرضی و همچنین مورفولوژی سطحی محصولات خوردگی تشکیل شده درون لوله از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA/TESCAN مجهز به طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. از نرم افزار Clemex ویرایش V3.5.025 برای تحلیل تصاویر متالوگرافی و اندازه گیری ضخامت رسوب محصولات خوردگی استفاده گردید.

نتایج و بحث

شکل ۱ نمای کلی تجهیزات تزریق گاز کلر به آب شرب در یک ایستگاه تصفیه آب را نشان می‌دهد. همان گونه که بخش‌های مختلف سیستم در شکل نشان داده شده‌اند، گاز کلر درون سیلندر از طریق لوله‌های مسی و پس از عبور از فیلتر گاز وارد کلریناتور می‌شود. پس از

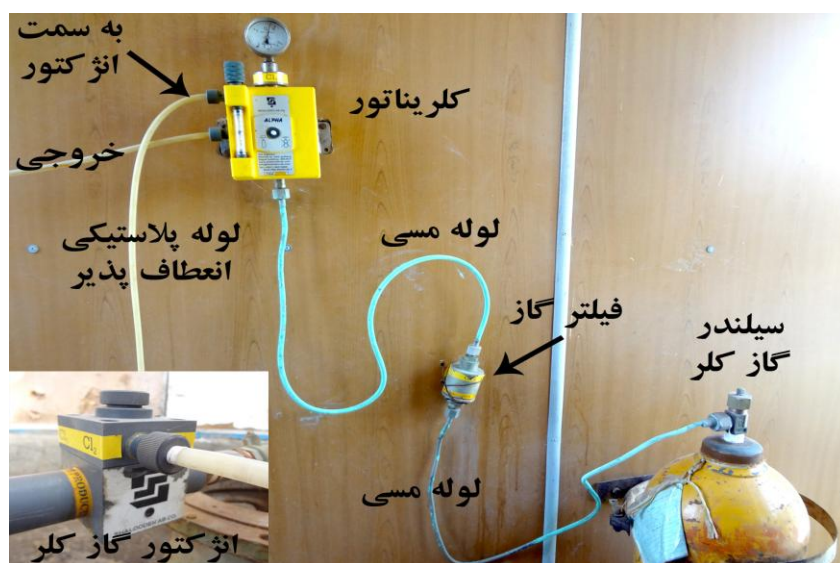
با توجه به این که وظیفه لوله‌های مسی انتقال گاز کلر از سیلندر گاز به کلریناتور (شکل ۱) است، انتظار می‌رود که این لوله‌ها تنها حاوی گاز کلر باشند.

اما بر خلاف این موضوع، حضور ترکیب $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ و یا به عبارت دیگر حضور ترکیبات گروه هیدروکسیل ($-\text{OH}$) در محصولات خوردگی نشان دهنده حضور آب (رطوبت) درون لوله است. علاوه بر این، حضور آب درون کلریناتور نیز در حین بازرسی قطعات داخلی آن به اثبات رسیده است. شکل (۴-الف) صفحه دیافراگم (تجهیز داخلی دستگاه کلریناتور) و شکل (۴-ب) پوسته داخلی کلریناتور را نشان می‌دهد. در این تصاویر مسیر عبور سیال و همچنین حضور محصولات خوردگی سبز رنگ روی صفحه دیافراگم و پوسته به خوبی مشاهده می‌شود. با توجه به این که صفحه دیافراگم و پوسته کلریناتور پلیمری می‌باشند و دچار خوردگی نمی‌گردند، لذا حضور محصولات خوردگی در این بخش‌ها نشان دهنده حضور ناخواسته سیال (آب) درون بخش‌های داخلی سیستم (لوله ها و کلریناتور) می‌باشد. به بیان دیگر، در اثر حضور ناخواسته و حرکت آب درون سیستم، محصولات خوردگی تشکیل شده درون لوله‌های مسی به بیرون رانده شده‌اند.

تنظیم فشار گاز و میزان مقدار مصرفی درون کلریناتور، گاز از طریق لوله‌های پلاستیکی وارد انژکتور می‌شود. گاز کلر وارد شده به انژکتور ابتدا با مقدار کمی آب مخلوط شده و سپس محلول غلیظ به درون خط لوله آب تزریق می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد، انسداد لوله‌های مسی بیش‌تر در فاصله فیلتر گاز تا کلریناتور رخ می‌دهد. دلیل اصلی از کار افتادگی لوله‌ها انسداد مکرر ناشی از تجمع رسوب درون لوله گزارش شده است. شکل ۲ نمونه‌ای از مقطع لوله مسی مسدود شده با رسوبات سبز رنگ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل به خوبی مشخص است، تجمع رسوب درون لوله باعث انسداد کامل لوله می‌شود که در نتیجه آن عبور گاز کلر از طریق این لوله‌ها فراهم نشده و فرآیند تصفیه آب به درستی انجام نمی‌پذیرد.

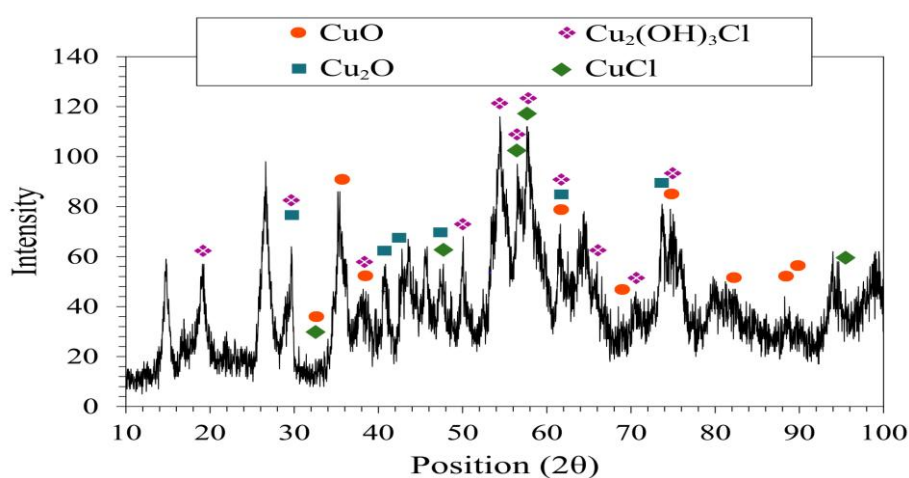
شکل ۳ فازهای شناسایی شده در الگوی پراش پرتو ایکس رسوب‌های موجود درون لوله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، رسوبات به طور عمده شامل CuO (اکسید کوپریک)، Cu_2O (کوپریت)، CuCl (نانتوکیت) و $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ (پاراتاسمیت) می‌باشد. در حقیقت این رسوبات سبز رنگ، محصولات خوردگی ناشی از خوردگی سطح داخلی لوله مسی می‌باشند.



شکل ۱- نمای کلی تجهیزات تزریق گاز کلر به آب شرب در یک ایستگاه تصفیه آب روستایی



شکل ۲- نمونه‌ای از مقطع لوله مسی مسدود شده با رسوب



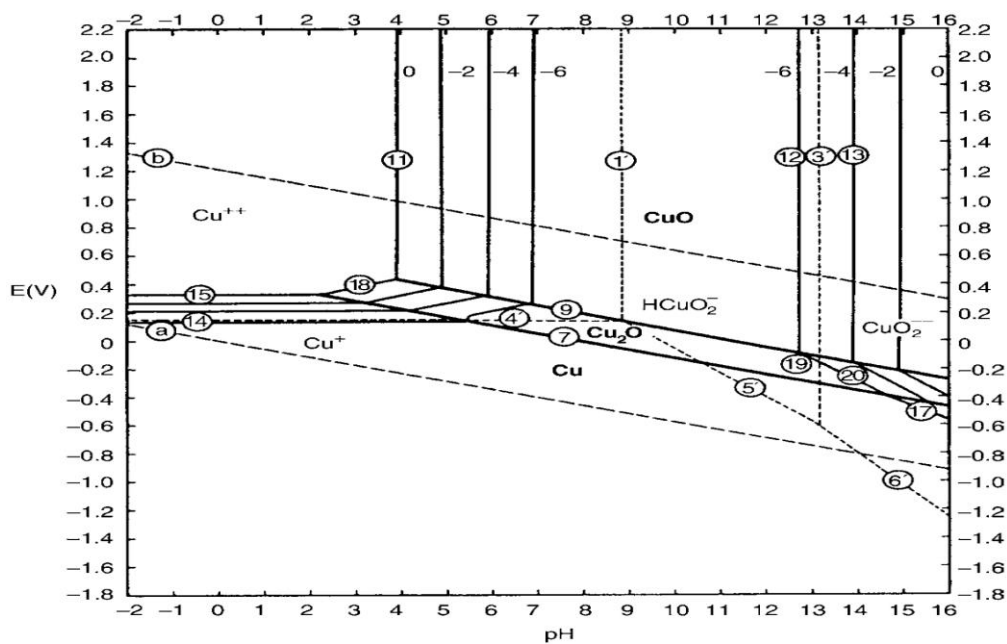
شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس رسوب های موجود درون لوله

شدن احتمالی مس می‌شوند که این شرایط با استفاده از شکل ۵ قابل تعیین می‌باشند. اکسید تشکیل شده بر روی مس در غیاب یون‌های کلراید به حد قابل قبولی محافظ است. از آنجا که در بسیاری از محیط‌ها، معمولاً غلظت یون Cu^{2+} کم‌تر از 10^{-6} می‌باشد، فیلم پسیو فقط در محدوده pH، ۶-۱۲ قابل تشکیل می‌باشد [۱۸].

طبق دیاگرام پوربه (شکل ۵) مس در برابر احیای یون هیدروژن یا احیای مستقیم آب از خوردگی مصون و در کلیه pHها پایدار می‌باشد (خط a زیر خط ۷، ۱۴ و ۱۷ واقع است). در غیاب عوامل کمپلکس ساز قوی، عوامل اکسید کننده موجود در محیط که موجب افزایش پتانسیل مس به بالای منطقه مصونیت (منطقه Cu) می‌گردند، بسته به pH باعث خوردگی اکتیو و یا پسیو



شکل ۴- صفحه دیافراگم (الف) و پوسته داخلی کلریناتور (ب) و همچنین مسیر عبور سیال و حضور رسوبات خارج شده از لوله



شکل ۵- دیاگرام پوربه سیستم مس-آب [۱۸]

سپس به درون لوله‌های مسی جریان می‌یابد. اگرچه با افزایش فشار گاز (نصب سیلندر گاز جدید)، آب به بیرون از سیستم رانده می‌شود؛ اما مقدار اندکی آب روی سطح دیواره‌های داخلی لوله‌های مسی باقی می‌ماند.

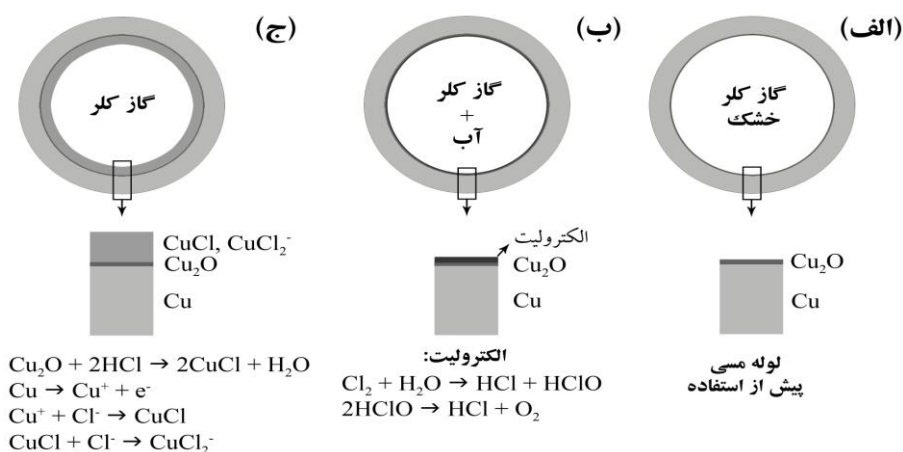
مطالعات انجام شده در ایستگاه‌های تصفیه آب نشان می‌دهند، هنگامی که فشار گاز کلر درون لوله‌ها افت می‌کند (به سبب تعویض سیلندر گاز، نشت گاز و یا عملکرد ناصحیح تجهیزات) آب از سمت انژکتور وارد سیستم می‌شود. آب وارد شده ابتدا به درون کلریناتور وارد شده و

مکانیزم انسداد

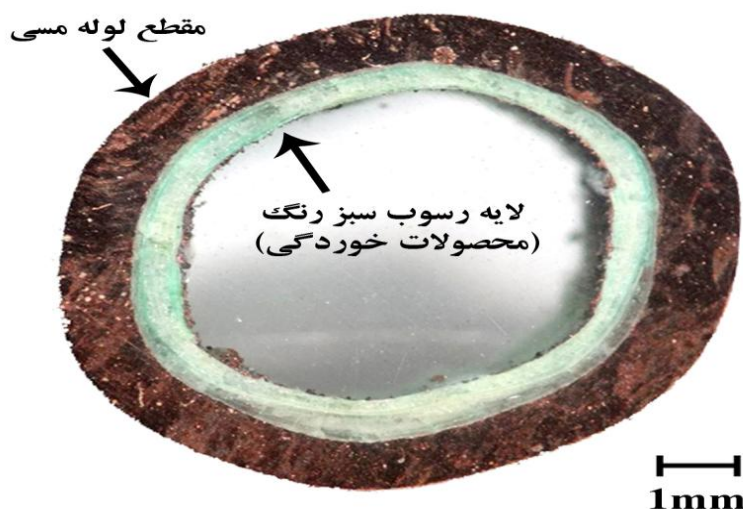
شکل ۶، مراحل تشکیل رسوب درون لوله و واکنش‌های انجام شده در هر مرحله را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. شکل (۶-الف) لوله مسی پوشیده شده با اکسید محافظ Cu_2O (دیواره داخلی لوله) قبل از ورود آب به درون لوله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، هنگامی که فشار گاز کلر درون سیستم کاهش می‌یابد، مقدار قابل توجهی آب به درون لوله‌ها جاری می‌شود. در چنین شرایطی، دیواره داخلی لوله مسی با لایه نازکی از آب مرطوب می‌شود.

پس از تعویض سیلندر گاز، میزان مناسب فشار گاز کلر درون لوله برقرار می‌گردد. حضور هم‌زمان گاز کلر و آب درون لوله منجر به تشکیل اسید هیدروکلریک (HCl)

[۱] و در نتیجه کاهش مقدار pH به کم‌تر از ۶ می‌شود [۱۹]. اگرچه جریان گاز کلر درون لوله باعث می‌شود اسید تشکیل شده به عقب رانده شود؛ اما یک لایه نازک اسید دیواره داخلی لوله را مرطوب می‌سازد (شکل ۶-ب)). در این شرایط، لایه Cu_2O ناپایدار است [۱۹] و انحلال آندی مس آغاز می‌گردد. شکل (۶-ج) این مرحله از تخریب را همراه با واکنش‌های شیمیایی مربوط به آن نشان می‌دهد. حضور هم‌زمان یون‌های مس و کلراید منجر به تشکیل CuCl و CuCl_2^- می‌شود که روی دیواره داخلی لوله رسوب می‌کنند. تشکیل این رسوب اولین مرحله از انسداد لوله است. شکل ۷ نشان دهنده مقطع عرضی لوله در مرحله اول تخریب است.



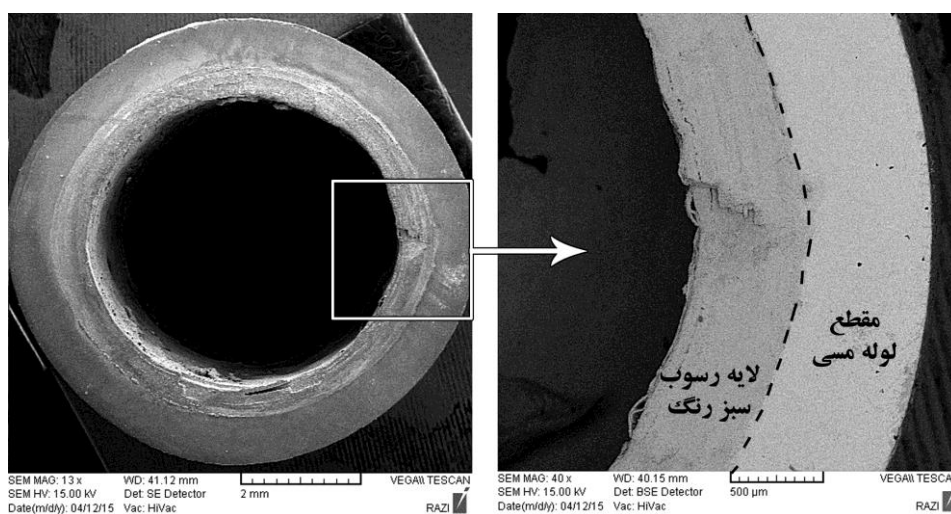
شکل ۶- مراحل تشکیل رسوب درون لوله به صورت شماتیک (مرحله اول)



شکل ۷- مقطع عرضی لوله در مرحله اول تخریب؛ تشکیل رسوب محصولات خوردگی درون لوله

خورد و مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۹ تصاویر SEM از سطح محصولات خوردگی تشکیل شده درون لوله در پایان مرحله اول تخریب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، محصولات خوردگی عمدتاً ساختار سبیدی شکل دارند (شکل ۹-ب) و دارای ترک (شکل ۹-الف) و تخلخل (شکل ۹-ج) هستند. جدول ۱ نتایج آزمون EDS از نواحی مختلف محصولات خوردگی (چهار نقطه در شکل ۹ مشخص شده‌اند) برای سه عنصر اکسیژن، مس و کلر را نشان می‌دهد.

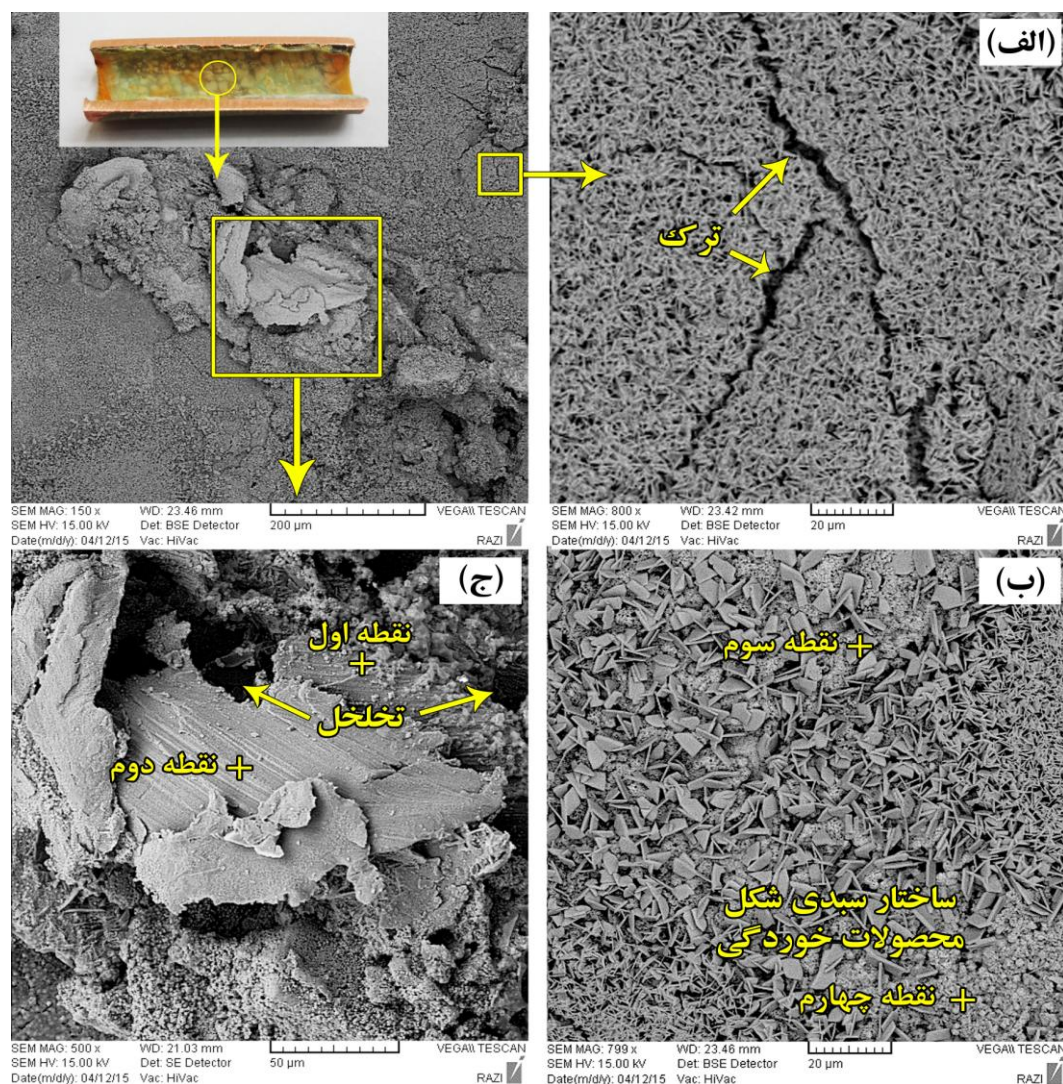
در این تصویر تشکیل رسوب محصولات خوردگی (شامل $CuCl$) درون لوله به خوبی مشخص است. شکل ۸ تصویر SEM از مقطع عرضی لوله در پایان مرحله اول تخریب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، در این لایه محصولات خوردگی به صورت تقریباً یکنواخت روی سطح دیواره داخلی لوله تشکیل شده است. علاوه بر این، محصولات خوردگی به صورت متراکم تشکیل شده و دارای چسبندگی خوبی به سطح داخلی لوله می‌باشند. به منظور بررسی موفقولوژی سطح محصولات خوردگی در پایان مرحله اول تخریب، لوله در راستای طول، برش



شکل ۸- تصویر SEM از مقطع عرضی لوله در پایان مرحله اول تخریب

جدول ۱- نتایج آزمون EDS از چهار نقطه مشخص شده در تصاویر SEM شکل (۹)

موقعیت	نقطه اول	نقطه دوم	نقطه سوم	نقطه چهارم
اکسیژن	% wt ۱۶/۱۸	۱۲/۰۹	۴/۰۷	-
	% at ۳۹/۷۵	۳۱/۰۵	۱۴/۱۶	-
کلر اید	% wt ۱۷/۱۴	۲۳/۶۶	۲/۶۰	۴۱/۸۷
	% at ۱۹/۰۰	۲۷/۴۱	۴/۰۸	۵۶/۳۶
مس	% wt ۶۶/۶۸	۶۴/۲۵	۹۳/۳۳	۵۸/۱۳
	% at ۴۱/۲۵	۴۱/۵۴	۸۱/۷۶	۴۳/۶۴

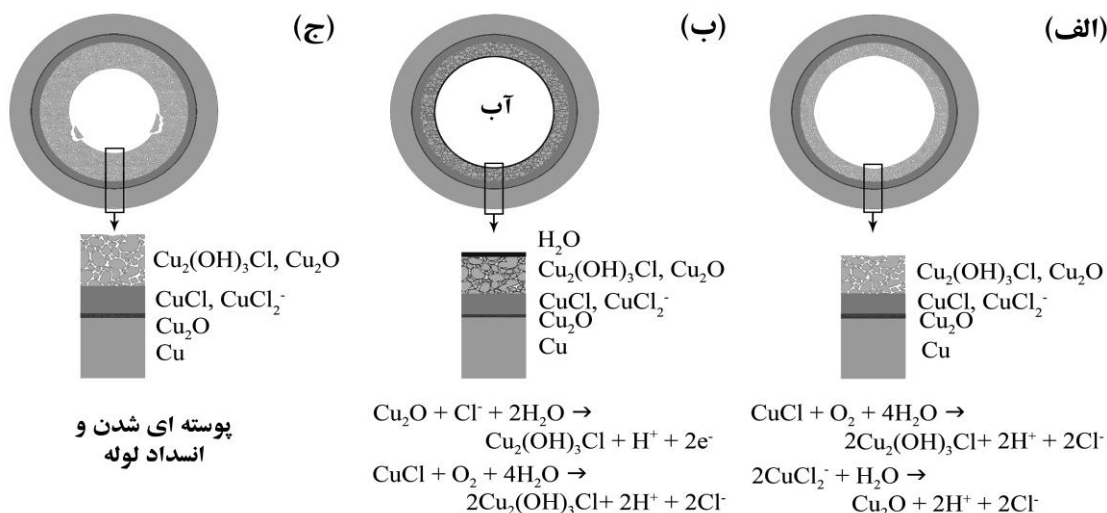


شکل ۹- تصاویر SEM از موفولوژی سطح محصولات خوردگی در پایان مرحله اول تخریب

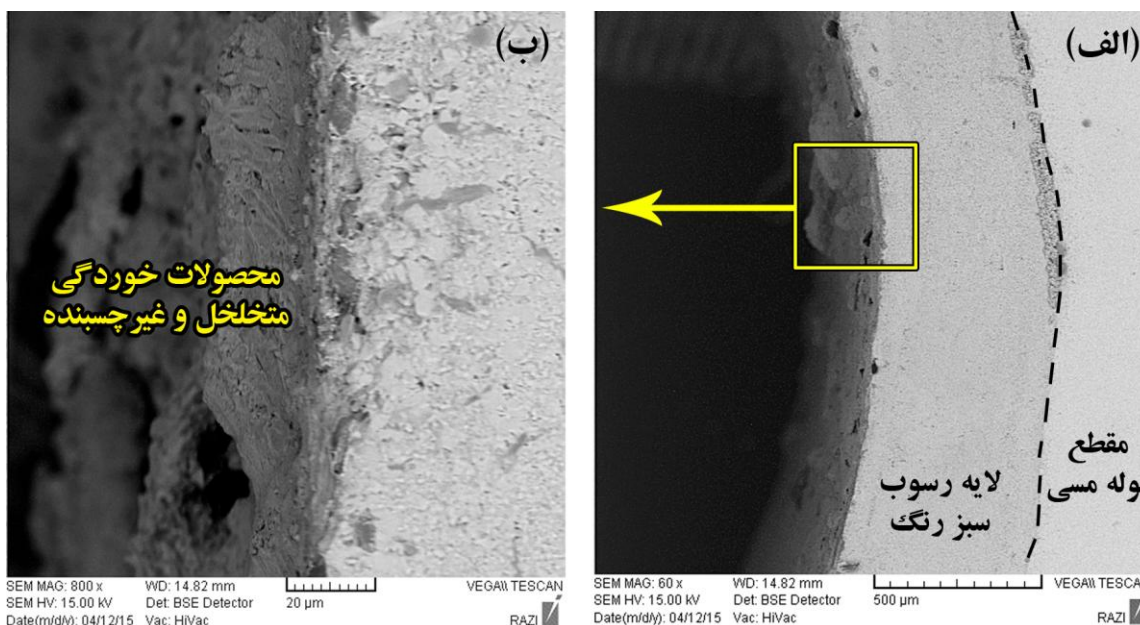
آب/رطوبت با CuCl و CuCl_2^- باعث تشکیل Cu_2O و $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ می شود (شکل ۱۰-الف). در مقایسه چگالی ترکیبات موجود در لایه محصولات خوردگی، $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ دارای حجم بیشتری نسبت به CuCl است (نانتوکیت $23/88 \text{ cm}^3/\text{mol}$ و پاراتاسامیت $61/02 \text{ cm}^3/\text{mol}$). همچنین رسوب $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ساختاری غیر محافظ با چسبندگی ضعیف به زیرلایه دارد [۱۶]. شکل ۱۱ مقطع عرضی لوله در لحظات آغازین مرحله دوم تخریب را نشان می دهد. با قرار گرفتن رسوب تشکیل شده در پایان مرحله اول تخریب در مجاورت رطوبت محصولات خوردگی متخلخل، حجیم و با چسبندگی ضعیف روی سطح رسوب اولیه تشکیل می شوند.

دومین مرحله تخریب با تشکیل لایه متخلخل و غیر محافظ $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ آغاز می شود. در حین تعویض مجدد سیلندر گاز (سیلندر گاز دوم) و در نتیجه کاهش مجدد فشار گاز، دوباره آب به درون لوله جاری شده و رطوبت مورد نیاز برای تشکیل ترکیب $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ فراهم می گردد. مراحل دومین مرحله تخریب همراه با واکنش های شیمیایی به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

قابل ذکر است که ورود رطوبت موجود در محیط (مناطق مرطوب جنوب کشور) به درون لوله و جذب آن توسط لایه متخلخل سطحی در زمانی که سیستم خارج از سرویس است و سیلندر گاز به لوله های مسی متصل نیست نیز می تواند، باعث پیشرفت واکنش های خوردگی مرحله دوم تخریب گردد. در این مرحله واکنش



شکل ۱۰- مراحل رشد رسوب درون لوله (دومین مرحله تخریب) به صورت شماتیک



شکل ۱۱- تصویرمقطع عرضی لوله در لحظات آغازین مرحله دوم تخریب؛ تشکیل محصولات خوردگی متخلخل روی سطح رسوب تشکیل شده در مرحله اول تخریب

رسوب زیرین، CuCl و CuCl_2^- برای انجام واکنش‌های جدید در دسترس قرار می‌گیرند. زمان مرطوب بودن طولانی‌تر و همچنین در دسترس بودن عوامل واکنش باعث افزایش سرعت رشد لایه محصولات خوردگی متخلخل می‌گردد (شکل ۱۰-ج).

تبدیل CuCl به $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ باعث انبساط حجمی زیاد محصولات خوردگی می‌گردد. این فرآیند تنش‌های فیزیکی داخلی شدیدی در لایه محصولات خوردگی ایجاد می‌کند. در نتیجه این تنش‌ها، پدیده پوسته‌ای شدن

با تشکیل محصولات خوردگی حجیم و متخلخل روی سطح رسوب منسجم اولیه (شکل ۱۰-الف) و همچنین حضور ترک‌ها و تخلخل‌ها در لایه رسوب زیرین (شکل‌های ۹-الف) و (۹-ج)) امکان جذب آب بیش‌تر فراهم می‌گردد. با ورود مجدد آب درون لوله (شکل ۹-ج)، آب بیشتری در فضاهای خالی موجود در لایه متخلخل محصولات خوردگی حبس شده و در نتیجه آن زمان مرطوب بودن دیواره داخلی لوله افزایش می‌یابد. همچنین با نفوذ آب از طریق ترک‌ها و تخلخل‌های لایه

خوردگی رشد می کند. حضور تخلخل ها و ترک ها در لایه محصولات خوردگی و همچنین غیر محافظ بودن $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ باعث، افزایش زمان مرطوب بودن و دسترسی آسان الکترولیت خورنده به زیرلایه شده و در نهایت رشد سریع لایه محصولات خوردگی حاصل می شود.

به سبب اختلاف زیاد چگالی بین فازهای تشکیل شده در لایه محصولات خوردگی، رشد لایه باعث انبساط حجمی زیاد محصولات خوردگی می گردد. تنش های فیزیکی به وجود آمده در اثر این انبساط حجمی باعث می شود پدیده پوسته ای شدن رخ دهد. رشد سریع لایه محصولات خوردگی در اثر حضور رطوبت درون لوله و همچنین رخداد پدیده پوسته ای شدن محصولات خوردگی و تجمع تکه های جدا شده از لایه محصولات خوردگی در بخش هایی از لوله، در نهایت باعث انسداد لوله مسی می گردد.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت های مالی شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کرمان در راستای انجام این پروژه تحت قرارداد شماره ۹۱/۲۳۴/۵۶۱۹ ص مورخ ۱۳۹۱/۱۲/۱۹ کمال تشکر و قدردانی خود را اعلام می نمایند.

محصولات خوردگی پیش می آید [۲۰]. تکه های جدا شده از لایه محصولات خوردگی با حرکت سیال درون لوله (گاز و یا آب) جابجا می شوند و در بخش هایی از لوله تجمع پیدا می کنند. رشد سریع لایه محصولات خوردگی در اثر حضور آب درون لوله و همچنین رخداد پدیده پوسته ای شدن محصولات خوردگی و تجمع آن ها، در نهایت باعث انسداد لوله مسی می گردد.

نتیجه گیری

این تحقیق به تحلیل علل انسداد مکرر لوله های مسی مورد استفاده در سیستم های کلرزی آب شرب شرکت آب و فاضلاب روستایی استان کرمان پرداخته است. در این رابطه، دلایل و مکانیزم انسداد لوله ها ناشی از پدیده خوردگی داخلی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر به طور خلاصه حاصل گشت:

با افت فشار گاز کلر درون سیستم کلرزی، آب از قسمت انژکتور به صورت ناخواسته وارد سیستم می گردد و درون لوله ها جاری می شود. هنگامی که فشار گاز کلر درون سیستم افزایش می یابد، در اثر حضور همزمان رطوبت و گاز کلر درون لوله ها مقداری الکترولیت خورنده تشکیل می شود که دیواره داخلی لوله ها را مرطوب می سازد. با فراهم شدن شرایط خوردگی درون لوله، لایه نسبتاً یکنواختی از محصولات خوردگی شامل CuCl روی دیواره داخلی لوله رسوب می کند. با افت دوباره فشار گاز کلر درون لوله و ورود مجدد رطوبت، ترکیب $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ نیز تشکیل شده و لایه محصولات

References:

- 1- Water Chlorination/ Chloramination Practices and Principles, AWWA Manual M20, American Water Works Association, 2nd Ed., 2006.
- 2- White's handbook of chlorination and alternative disinfectants, Black & Veatch Corporation, John Wiley & Sons, 5th Ed., 2010.
- 3- Chlorine in Drinking-water, World Health Organization, WHO/SDE/WSH/03.04/45, 2003.

- 4- D. Wagner, W.R. Fischer, A.H.L. Chamberlain, J.N. Wardell, C.A.C. Sequeira, "Microbiologically Influenced Corrosion of copper in potable water installations – a European project review", Materials and Corrosion, Vol. 48, pp. 311–321, 1997.
- 5- D. Wagner, W. Fischer, H.H. Paradies, "Copper deterioration in a water distribution system of a county hospital in Germany caused by microbially influenced corrosion", Materials and Corrosion, Vol. 43, pp. 496–502, 1992.

- 6- W. Fischer, H.H. Paradies, D. Wagner, I. Hänbel, "Copper deterioration in a water distribution system of a county hospital in Germany caused by microbially induced corrosion", *Materials and Corrosion*, Vol. 43, pp. 56-62, 1992.
- 7- J.L. Otegui, P.G. Fazzini, "Root causes of fire in a solvent pipe at a petrochemical plant", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, pp. 1903-1911, 2009.
- 8- A.A. Kisilitsyn, "Numerical modeling of high-frequency electromagnetic heating of a dielectric plug clogging a pipe", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 37, No. 3, 1996.
- 9- U. Klein, A. Zunkel, A. Eberle, "Breakdown of heat exchangers due to erosion corrosion and fretting caused by inappropriate operating conditions", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 43, pp. 271-280, 2014.
- 10- J. Wang, M. Sickinger, V. Ciobota, M. Herrmann, H. Rasch, P. Rosch, J. Popp, K. Kusel, "Revealing the microbial community structure of clogging materials in dewatering wells differing in physico-chemical parameters in an open-cast mining area", *Water Research*, Vol. 63, pp. 222-233, 2014.
- 11- F. Larroque, M. Franceschi, "Impact of chemical clogging on de-watering well productivity: numerical assessment", *Environmental Earth Sciences*, Vol. 64, pp. 119-131, 2011.
- 12- D.E. Ralph, J.M. Stevenson, "The role of bacteria in well clogging", *Water Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 365-369, 1995.
- 13- J. Marek, M. Šimunkova, H. Parschov, "Clogging of the electrodeionization chamber, Desalination and Water Treatment", pp. 1-5, 2014.
- 14- H. Song, S. Park, M. Choi, J.Y. Park, M. Kim, J. Jung, Y. Kim, "Examination of chemical and physical effects on sump screen clogging of containment materials used in Korean plants", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 69, pp. 51-56, 2014.
- 15- R. Sandrine, L. Cantrel, A. Yves, M. Jean-Marie, L. Marek, G. Dagmar, V. Yvan, S. Bela, "Precipitate formation contributing to sump screens clogging of a nuclear power plant during an accident", *Chemical engineering research and design*, Vol. 86, pp. 633-639, 2008.
- 16- M. M. Wanger, G. A. Fox, G. V. Wilson, "Pipeflow experiments to quantify pore-water pressure buildup due to pipe clogging", *ASABE Annual International Meeting Paper*, 152156396, 2015.
- 17- ASTM B 88, Standard Specification for Seamless Copper Water Tube, ASTM International, 2003.
- 18- E.E. Stansbury, R.A. Buchanan, *Fundamentals of electrochemical corrosion*, ASM International, Materials Park Ohio, 2000.
- 19- R. Francis, *The corrosion of copper and its alloys: a practical guide for engineers*, NACE International, Texas, 2010.
- 20- X. Zhang, I.O. Wallinder, C. Leygraf, "Mechanistic studies of corrosion product flaking on copper and copper-based alloys in marine environments", *Corrosion Science*, Vol. 85, pp. 15-25, 2014.

