

بررسی اثر ملاس چغندر و نیز نوع جریان در رسوب‌گذاری الکتریکی اکسید مس، جهت کنترل خوردگی میکروبی فاضلاب‌روهای بتنی مسلح

زهرا خادم مدرسی*^۱، رضا بازرگان لاری^۲، فرشته بختیاری^۳ و محمد علی زارع^۴

چکیده

خوردگی میکروبی در زمره متعارف‌ترین فرآیندهای تخریبی سیستم‌های بتنی انتقال فاضلاب شناخته شده است. هدف اصلی این مقاله کنترل این نوع خوردگی در فاضلاب‌روهای بتنی مسلح، توسط رسوب‌گذاری الکتریکی اکسید مس بر روی بتن می‌باشد. فرایند رسوب‌گذاری به دو روش جریان مستقیم و پالسی، مورد آزمایش قرار گرفت. لذا، پایلوتی با هشت نمونه بتنی ساخته شد و نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و آنالیز جذب اتمی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که درصد مس رسوب کرده در خلل و فرج بتن، به نوع جریان و محلول الکترولیت بستگی دارد. نتایج جذب اتمی، درصد اکسید مس رسوبی بیش‌تری را در روش جریان مستقیم نسبت به جریان پالسی ارائه داد، هر چند تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در رسوب‌دهی پالسی ذرات از نظر دانه‌بندی نسبت به حالت مستقیم، ریزتر بوده و تعداد حفره‌های بتن کم‌تر می‌باشد. همچنین، تأثیر افزودن ملاس چغندر به محلول الکترولیت مورد مطالعه قرار گرفت و داده‌های آزمایشی نشان داد که استفاده از ملاس چغندر می‌تواند سبب حذف و کاهش یون مس دو ظرفیتی از محلول الکترولیت گردد.

واژه‌های کلیدی: خوردگی میکروبی، رسوب‌گذاری الکتریکی، جریان مستقیم و پالسی، بتن مسلح، فاضلاب.

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان - ایران.
 - ۲- انجمن پژوهشگران جوان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان - ایران.
 - ۳- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت - ایران.
 - ۴- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان - ایران.
 - ۵- مربی گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت - ایران.
- *- نویسنده مسئول مقاله: z.modaresi@yahoo.com

پیشگفتار

امروزه مسئله خوردگی میکروبی لوله‌های بتنی و سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب، یکی از بزرگ‌ترین مشکلات کشورهای توسعه یافته است و سالانه میلیون‌ها دلار صرف تعمیر و نگهداری این سیستم‌ها می‌شود [۱]. بتن به‌عنوان ماده‌ای محکم و ارزان، در ساخت لوله و سازه‌های تأسیسات فاضلابی کاربرد وسیعی دارد و خواصی از قبیل تقویت استحکام سازه‌های بتنی، افزایش مقاومت کششی، جلوگیری از توسعه ترک‌ها، موجب استفاده بیشتر بتن مسلح در شبکه‌های فاضلابی شده است [۲ و ۳].

در دهه اول قرن بیستم، هیدروژن سولفید دلیل اصلی تشکیل اسید سولفوریک و در نتیجه، یکی از دلایل اصلی خوردگی میکروبی فاضلاب‌روهای بتنی معرفی شد [۴]. امروزه تولید هیدروژن سولفید در لوله‌های فاضلاب یک مشکل کاملاً شناخته شده است و این گاز اساس ایجاد پدیده‌ی خوردگی میکروبی در این سیستم‌ها معرفی شده است [۵]. مطالعات نشان می‌دهد که عمده‌ترین و مهم‌ترین نوع حمله بیولوژیکی به بتن حمله‌ی باکتری‌های عمل‌کننده بر گوگرد است. این باکتری‌ها شامل دو دسته می‌باشند: دسته نخست باکتری‌های احیاء‌کننده سولفات هستند که محصول عمل احیاء توسط این باکتری‌ها هیدروژن سولفید است و دسته دوم باکتری‌های اکسیدکننده سولفید هستند که محصول متابولیسمی این باکتری‌ها اسید سولفوریک می‌باشد [۶]. این اسید pH محیط را تا حدود ۲-۱ پایین می‌آورد و سبب خوردگی سطوح بالایی و در تماس با خط جریان لوله می‌شود، در این شرایط فولاد و بتن هر دو با شدت بسیار بیش‌تری خورده خواهند شد [۷].

تمام این مسائل سبب شده تا برای حل مشکلات ناشی از خوردگی میکروبی روش‌های گوناگونی نظیر بهینه‌سازی روش طراحی و هیدرولیک فاضلاب برای کاهش زمان ماند و تجمع سولفات، فناوری‌های کنترل منابع سولفات مثل جداسازی یا پیش تصفیه منابع سولفات‌دار، کاهش تولید و انتشار گاز سولفید هیدروژن در داخل فاضلاب‌روها مورد بررسی و آزمون قرار گیرد [۶]. از آنجایی که بیش‌تر لوله‌های آسیب دیده در حال حاضر در مدار می‌باشند و خارج کردن خطوط جمع‌آوری فاضلاب از مدار بمنظور

تعمیرات اساسی و قطع جریان تقریباً ناممکن است، بیش‌تر مطالعات به روز دنیا در جهت کنترل و به تعویق انداختن خوردگی میکروبی استوار می‌باشد [۸]. لذا روش ارائه شده در این مقاله، یکی از روش‌های پوشش‌دهی می‌باشد که انتظار می‌رود با کنترل بهینه‌ی شرایط در آینده به صورت درجا عملی گردد.

اثر پوشش‌دهی لوله‌های بتنی توسط اکسید فلزات سنگینی مانند مس و نقره بررسی شده است. در پژوهش‌های مربوطه اثبات شد که فلزات سنگین اثرات سمی بر روی باکتری‌ها دارند و به گونه قابل ملاحظه‌ای رشد آن‌ها را کاهش می‌دهند [۹ و ۱۰].

رسوب‌گذاری الکتریکی روشی است که در آن از عبور یک ولتاژ ضعیف از میان الکترودها استفاده می‌شود تا ذرات را در یک سطح متخلخل بنشینند [۶]. برای مثال، روش رسوب‌گذاری الکتریکی جهت تحریک نانو ذرات بمنظور کاهش تخلخل بتن سخت شده، آزمایش شد که در آن نانو ذرات سیلیکا و آلومینا به صورت رسوبی شیمیایی در نواحی خلل و فرج بتن انتقال داده شد [۱۱]. گروهی دیگر از پژوهشگران توانستند به‌گونه‌ای موفقیت‌آمیز اندازه ترک‌های موجود در بتن را با این روش کاهش دهند [۱۲].

در این مقاله براساس روش Jongh در زمینه ته‌نشینی نانو ذرات اکسید مس و هم‌چنین روش Allouche و همکارانش که به بررسی رسوب‌گذاری الکتریکی اکسید مس در بتن مسلح پرداختند [۱۴ و ۱۳]، اثر پارامترهایی نظیر نوع جریان و شرایط محلول الکترولیت، در زمینه رسوب‌گذاری بررسی شد. از این رو، دو نوع جریان پالسی و مستقیم مورد آزمایش قرار گرفت. هم‌چنین، جهت بررسی اثر قدرت پرتاب یون در محلول الکترولیت، از ملاس چغندر استفاده شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌های بتنی

طرح اختلاط برای تمام نمونه‌های بتنی بر اساس روش Vaidya و همکارانش شامل سیمان پرتلند تیپ ۲، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و بیش‌ترین قطر سنگدانه ۹/۵ میلی‌متر تهیه شد [۱۳]. هم‌چنین، بمنظور افزایش روانی

هیدراکسید به محلول اضافه شد تا pH محلول بین ۸ و ۹ حفظ شده و به انحلال سولفات مس نیز کمک شود. این محلول به مدت یک شبانه روز با استفاده از همزن مغناطیسی، جهت پایداری بیشتر و بهینه‌سازی شرایط رسوب‌گذاری هم زده شد.

محلول شماره دو دقیقاً طبق شرایط ذکر شده در تهیه محلول یک آماده گردید، با این تفاوت که پیش از تنظیم pH، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول ۱ مولار ملاس چغندر نیز به آن اضافه گردید (شکل ۱). گفتنی است که افزودن ملاس چغندر صرفاً جهت تعیین و مقایسه قدرت پرتاب یون در محلول الکترولیت صورت گرفت که در ادامه تأثیرات آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مواد شیمیایی مورد استفاده در تهیه محلول‌ها از شرکت مرک آلمان و ملاس چغندر مورد نیاز از کارخانه قند مرودشت تهیه گردید.

روش پوشش‌دهی

از آنجایی که نتایج آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله Allouche و همکارانش نشان داد که عملکرد روش رسوب‌گذاری الکتریکی در لوله‌های بتنی جوان و کمتر خورده شده بهتر بوده است [۶]، ابتدا با استفاده از یک اسید تقریباً ضعیف به خوردگی اولیه نمونه‌های بتنی پرداخته شد. جهت این کار اسید سولفوریک ۱ مولار با PH برابر ۷ تهیه شده و به مدت ۱۲ ساعت در لوله‌های بتنی ریخته شد و سپس نمونه‌ها به خوبی با آب مقطر مورد شستشو قرار گرفت. تمامی ۸ نمونه مورد آزمایش در شرایط تقریباً یکسان جهت پوشش‌دهی آماده گردید.

عمل رسوب‌گذاری الکتریکی بر اساس روش Allouche با دانسیته جریان ۰/۵ میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع و مدت زمان ۵ ساعت انجام شد. برای این کار از یک منبع تغذیه ESCORT 3030 TD (DUAL-TRACKING DC Power Supply) با دقت ۰/۰۱ آمپر استفاده گردید و جهت اعمال جریان پالسی از یک تایمر دو زمانه ساخت شرکت صنایع الکترونیک فارس استفاده گردید (شکل ۲). زمان روشن و خاموش کردن دستگاه به ترتیب ۲ و ۰/۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر می‌باشد که هدف اصلی از قرار دادن این تایمر در مدار بررسی اثر قطع و وصل جریان بر فرایند

بتن و سهولت ریختن و تراکم آن از فوق روان‌کننده^۱ (Fabcrete -100) استفاده شد [۱۳]. برای آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد که در مرکز دارای یک حفره به قطر ۶۰ میلی‌متر و عمق ۹۰ میلی‌متر بودند. برای ساخت نمونه‌ها از قالب‌هایی از جنس لوله PVC با قطر ۱۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر استفاده گردید. سپس مش فولادی داخل بتن در ابعاد ۱۲ سانتی‌متر در ۲۸ سانتی‌متر به شکل مستطیل تهیه شد و با استفاده از آن استوانه‌ای به قطر ۸/۹۱ سانتی‌متر ساخته شد. برای حفظ شدن حالت استوانه‌ای مش حین بتن‌ریزی سه مفتول آروماتور بندی به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به مش بافته شده متصل گردید و به عنوان اسکلت‌بندی مش استوانه‌ای استفاده شد. مش استوانه‌ای به همراه لوله PVC داخلی در وسط قالب قرار داده شد و بتن تازه در قالب‌ها ریخته شد.

پس از ۲ ساعت از زمان ریختن بتن، لوله‌ی PVC داخلی به دقت خارج گردید. نمونه‌ها به مدت ۲۱ روز در مخزن آب و آهک بمنظور عمل‌آوری قرار داده شدند. پس از زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از آب خارج شده و در محیط آزمایشگاه، خشک گردید تا محیط متخلخل بتنی رطوبت کافی را برای سهولت انتقال یون‌ها داشته باشد. تعداد ۸ نمونه بتنی جهت انجام آزمایشات به روش بالا آماده گردید.

محلول سازی

در این پژوهش دو نوع محلول جهت پوشش‌دهی به وسیله هر دو روش مستقیم و پالسی تهیه گردید، که پایه اولیه تهیه هر دو محلول بر اساس روش Jongh جهت ته‌نشینی اکسید مس استوار بود. در سال ۱۹۹۹ Jongh و همکارانش موفق به رسوب‌گذاری الکتریکی اکسید مس تحت یک جریان گذرای زیر لایه‌ای با استفاده از محلول قلیایی لاکتیک مس II شدند [۱۴].

در محلول شماره یک ۴۵ گرم سولفات مس ۵ آبه در ۷۵ میلی لیتر اسید لاکتیک با خلوص ۸۸ درصد وزنی حل شد. هم‌چنین، ۲۲۵ میلی‌لیتر محلول ۵ مولار سدیم

^۱ - Super Plasticizer

نوع جریان را در این مقایسه واضح تر می کند، ولی نتایج تأثیر این دو عامل بر یکدیگر چندان قابل قبول نیست و نتایج دقیق تر آزمایش ها و تأثیرات هر یک در جدول ۲ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج جدول ۲ تغییر نوع جریان از مستقیم به پالسی سبب کاهش درصد رسوب مس شده است. که این کاملاً بدیهی می باشد، چرا که با قطع و وصل جریان در حالت پالسی تعداد یون هایی که به سطح کاتد خواهند رسید کاهش خواهد یافت. در واقع هدف اصلی از انجام آزمایش ها با استفاده از جریان پالسی مقایسه شکل و اندازه ذرات رسوب کرده و بررسی سطح مورد پوشش، با نوع جریان مستقیم بود که این موضوع با استفاده از آنالیزهای SEM/EDS مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳- (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه بتنی پوشش داده شده با جریان مستقیم طی مدت زمان ۵ ساعت را نشان می دهد که به گونه تصادفی از دو نقطه آن نتایج آنالیز EDS گزارش شده است (شکل ۳ (ب)). هم چنین، شکل ۴ (الف) و (ب) به ترتیب نتایج SEM/EDS را در نمونه پوشش داده شده با جریان پالسی طی ۵ ساعت نشان می دهد. همان گونه که انتظار می رفت و شکل های ۳ و ۴ نیز نشان می دهد، در رسوب دهی پالسی ذرات تشکیل شده از نظر دانه بندی نسبت به حالت مستقیم، ریزتر بوده، تعداد حفره های بتن کم تر است. معمولاً بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته [۱۵] جریان پالسی قادر به رسوب غلظت بالایی از ذرات ریز تا ابعاد نانو می باشد. به گونه ای که محدوده وسیعی از ترکیب رسوب با خواص مشخص تولید می گردد و پوششی با رسوبات ریزتر احتمال خوردگی کمتری خواهد داشت [۱۴]. هم چنین، از آنجایی که نسبت Cu به O بر اساس نتایج EDS تقریباً ۲ به ۱ می باشد، می توان ادعا نمود که Cu_2O تشکیل شده است [۱۴].

نتایج جدول ۲ هم چنین، تأثیر افزودن ملاس چغندر را نشان می دهند. پیش از بررسی تأثیر افزودن این ماده ابتدا به بررسی، نقش اسید لاکتیک در محلول الکترولیت و فرایند رسوب گذاری می پردازیم. با توجه به pH بالای محلول و شرایط قلیایی حاکم، لیگندهای دو دندانه اسید لاکتیک (Lac^-) در محلول تشکیل می شوند که بر اساس روابط ۱ و ۲ هر دو لیگاند تشکیل شده (Lac^-) یکی از

پوشش دهی در همان شدت جریان مورد استفاده در روش مستقیم بود و فرکانس خاصی مدنظر قرار نگرفت. تفاوت زمان روشن و خاموش بودن دستگاه نیز جهت کاهش نوسانات در نظر گرفته شد. جهت پوشش دهی با توجه به سطح کاتد که در اینجا سطح مش فولادی بافته شده و سه میلگرد فولادی در تماس با محلول الکترولیت در نظر گرفته شد، یک تکه فویل مسی که سطح آن تقریباً ۲ برابر سطح کاتد بود، به عنوان آند در نظر گرفته شده و مدار مورد نظر بسته شد.

طرح آزمایش مورد استفاده با توجه به تابع هدف که درصد رسوب نمونه های مورد آزمایش بود با استفاده از نرم افزار آماری Minitab ریخته شد. جهت بررسی میزان رسوب تشکیل شده آنالیز جذب اتمی از نمونه های بتنی گرفته شد؛ جهت این کار با استفاده از سوهان، مکعبی با ابعاد ۱ سانتی متر مربع و عمق ۱ میلی متر از هر یک از نمونه های پوشش داده شده تراشیده شد. سپس پودر تراشیده شده در ۱۰۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۹۸ درصد حل شده و پس از صاف کردن با کاغذ صافی ۴۲، محلول به حجم ۲۵۰ میلی لیتر رسانیده شد و در انتها آنالیز جذب اتمی با استفاده از دستگاه PerkinElmer A Analyst 800 ساخت آمریکا از نمونه ها گرفته شد. هم چنین، جهت بررسی ترکیب، شکل و اندازه ذرات رسوبی، آنالیزهای EDS/SEM با استفاده از دستگاه VELA3 XM ساخت شرکت TESCAN از نمونه های پوشش داده شده تهیه شد.

نتایج و بحث

با در نظر گرفتن دو فاکتور نوع محلول و جریان اعمال شده، جهت بررسی تأثیر هر یک بر درصد مس رسوبی، تعدادی آزمایش به صورت (طراحی فاکتور) 2^k با استفاده از نرم افزار آماری Minitab طراحی شد. سپس با استفاده از نتایج طراحی، ۸ آزمایش انجام گرفت. نتایج طراحی و آزمایش ها در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. جدول ۱ نشان می دهد که مقادیر P-Value و T-Value در محدوده قابل قبول روش طراحی (کمتر از ۰/۰۰۵) بوده و تأثیر دو عامل نوع جریان و محلول تقریباً به یک اندازه است. از سوی دیگر، فاکتور F، غالب بودن

نتیجه‌گیری

۱- با توجه به نتایج آنالیز جذب اتمی، درصد رسوبی که طی فرایند پوشش‌دهی با استفاده از جریان مستقیم ایجاد می‌شود، بیش‌تر از حالت جریان پالسی می‌باشد. هم‌چنین، استفاده از ملاس چغندر به دلیل حذف و کاهش یون مس دو ظرفیتی از محلول الکترولیت توصیه نمی‌شود. لذا، از نظر درصد رسوب تشکیل شده حالت ایده‌آل، استفاده از محلول الکترولیت بدون افزودن ملاس و اعمال جریان مستقیم می‌باشد.

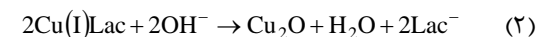
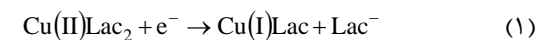
۲- تصاویر SEM تهیه شده از نمونه‌ها نشان می‌دهد که در رسوب‌دهی با جریان پالسی، پوشش از نظر دانه‌بندی نسبت به حالت جریان مستقیم ریزتر بوده، سطح یکنواخت‌تر شده و احتمال پر شدن حفره‌های ریزتر بتن در این حالت بیش‌تر خواهد بود.

۳- در لوله‌های انتقال فاضلاب ساخته شده از بتن مسلح، اسید سولفوریک تولید شده می‌تواند لوله فاضلاب را در نقاط گوناگون مورد حمله قرار دهد و آن را تخریب کند که این نتیجه عملکرد باکتری‌ها در خط لوله است. از آنجایی که اثر باکتری‌کشی فلزات سنگین به اثبات رسیده است [۹]، انتظار می‌رود که روش رسوب‌گذاری الکترولیتی اکسید مس، با کنترل تشکیل کلونی باکتری‌ها تا حد زیادی خوردگی میکروبی را کنترل نماید.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت شرکت آب و فاضلاب فارس و همکاری دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت به خاطر در اختیار گذاشتن آزمایشگاه و لوازم مورد نیاز تشکر نمایند.

یون‌های مس دو ظرفیتی (II) Cu موجود در محلول را به دام می‌اندازند تا پس از تشکیل یون لاکتات مس، Cu_2O روی دیواره و خلل و فرج بتن رسوب نماید [۱۴].



روابط نشان می‌دهند که در فرایند تشکیل رسوب، یون‌های مس موجود در محلول الکترولیت دخیل می‌باشند و حتی می‌توان از آندی غیر از مس نیز استفاده نمود، ولی مشاهدات صورت گرفته در حین آزمایش، حذف یون‌های مس دو ظرفیتی به شکل کریستال‌های آبی رنگ را، حین افزودن ملاس چغندر به محلول الکترولیت نشان می‌دهد.

بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته [۱۶] انتظار می‌رفت که با افزودن ملاس، قدرت پرتاب محلول الکترولیت بالاتر رفته و مقدار ذرات بیش‌تری رسوب کنند، اما نتایج جدول ۲ خلاف این مطلب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، ملاس چغندر سبب حذف یون مس دو ظرفیتی از محلول الکترولیت گردید. ملاس با فرمول $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{NNaO}_3\text{S}$ دارای یک سر مثبت Na می‌باشد که به راحتی می‌تواند جایگزین (II) Cu موجود در محلول شده و سبب حذف یون مس از الکترولیت شود. هم‌چنین، قلیابیت محلول، قدرت در اختیار گذاشتن Na از ملاس را تشدید می‌کند. از سوی دیگر، بر اساس مطالعات Jongh [۱۳] حین فرایند پوشش‌دهی ذرات Cu_2O پیش از نشست روی کاتد در لایه نفوذ تشکیل می‌شوند. در واقع، در زمان برقراری جریان، ذرات رسوبی Cu_2O به جای یون‌های Cu به سمت کاتد هدایت می‌شوند، لذا می‌توان این فرضیه را پذیرفت که افزودن ملاس چغندر کمکی به افزایش میزان رسوب نخواهد کرد، چرا که در آخرین مرحله نشست رسوب، فرایند صرفاً شیمیایی شده و ذرات به جای یون‌ها بر روی دیواره می‌نشینند. نتایج جدول ۲ این فرضیه را اثبات می‌کنند.

References

- 1- A.K. Parande, P.L. Ramsamy, S. Ethirajan, C. R. K. Rao and N. Palanisamy, "Deterioration of reinforced concrete in sewer environments", Municipal Engineer, Vol. 159, pp. 11-20, 2006.

- 2- ز. خادم مدرسی، ر. بازرگان لاری، "بررسی خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمان- فولاد مورد استفاده در لوله‌های فاضلاب شهری پس از خوردگی"، همایش ملی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، ۴۷-۴۵، ۱۳۹۰.

- ۳- ع. کیوانی، اصول و تکنولوژی بتون مسلح به الیاف فولادی، انتشارات رودکی، ارومیه، ۱۳۶۹.
- 4- J. Vollertsen, A.H. Nielsen, H.S. Jensen, T. Wium-Andersen, and T. Hvitved-Jacobsen, "Corrosion of concrete sewers-The kinetics of hydrogen sulfide oxidation", Science of the Total Environment, Vol. 394, pp. 162-170, 2008.
- 5- G. Jiang, O. Gutierrez, K.R. Sharma, J. Keller, and Z. Yuan, "Optimization of intermittent, simultaneous sulfide and methane production in sewers", Water Research, Vol. 45, pp. 6163-6172, 2011.
- 6- S. Vaidya and E.N. Allouche, "Electrokinetically deposited coating for increasing the service life of partially deteriorated concrete sewers", Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 2164-2170, 2010.
- ۷- ز. خادم مدرسی، ر. بازرگان لاری و ف. بختیاری، "بررسی خوردگی میکروبی شبکه فاضلاب بتنی شهرستان مرودشت با توجه به غلظت سولفید هیدروژن"، مجله مواد نوین، شماره ۸، ۱۰۴-۹۷، ۱۳۹۱.
- ۸- ی. پریش، ا. مرادی، ن. حسین اهلی، ف. نجائی آبادی، "ارزیابی راهکارهای مقاوم‌سازی لوله‌های بتنی فاضلاب‌روها"، فستیوال سراسری بتن، دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- 9- LV. Evans and N. Clarkson, "Antifouling strategies in the marine environment", Appl Bact Symp Sup, Vol. 74, pp. 119-124, 1993.
- 10- W.D. Muynck, N.D. Belie and W. Verstraete, "Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete", Cement & Concrete Composites, Vol. 31, pp. 163-170, 2009.
- 11- H.E. Cardenas and J. Struble Leslie, "Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability", Mater. Civ. Eng. Vol. 18, pp. 554-560, 2006.
- 12- R. Jae-Suk and O. Nobuaki, "Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique", Cem Concr Res, Vol. 32, pp. 159-164, 2002.
- 13- S. Vaidya, C. Montes and E.N. Allouche, "Use of nanomaterials for concrete pipe protection", ASCE Conference Proceeding, Vol. 252, pp. 100-109, 2007.
- 14- P.E. Jongh, D. Vanmaekelbergh and J. Kelly, "Cu₂O: Electrodeposition and characterization", Chem Mater, Vol. 11, pp. 3512-3517, 1999.
- 15- H. Adelkhani and M.R. Arshadi, "Properties of Fe-Ni-Cr alloy coating by using direct and pulse current Electrodeposition", Alloys and Compounds, Vol. 476, pp. 234-237, 2009.
- ۱۶- ا. بشارت، مهندسی آبکاری فلزات، نشر طراح، تهران، ۱۳۸۲.

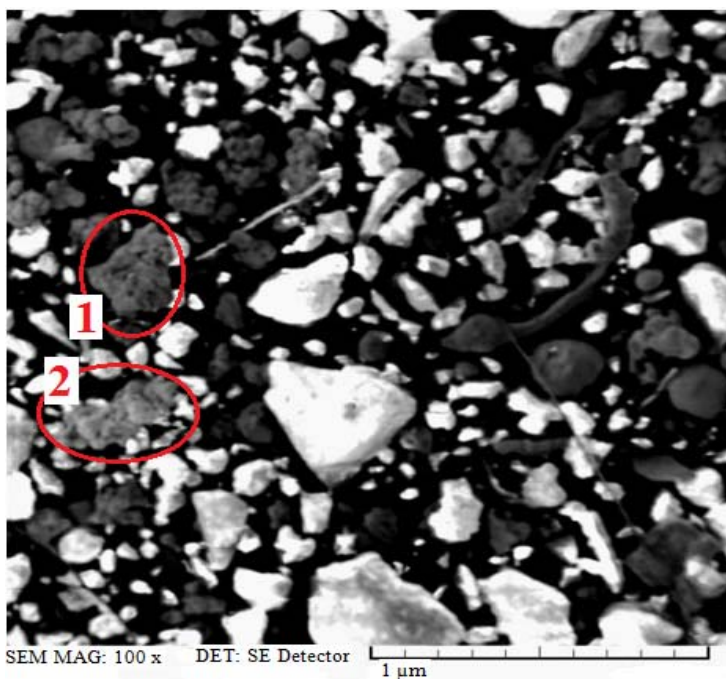
پیوست‌ها

جدول ۱- آنالیز واریانس تأثیر نوع جریان و محلول مورد آزمایش

T-Value	P-Value	F	MS	SS	درجه آزادی	سطح آزمایش
۹/۷۷	۰/۰۰۱	۹۵/۴۵	۰/۰۴۱۷۶۰۵	۰/۰۴۱۷۶۰۵	۱	فاکتور نوع جریان
۹/۴۳	۰/۰۰۱	۸۸/۹۶	۰/۰۳۸۹۲۰۵	۰/۰۳۸۹۲۰۵	۱	فاکتور نوع محلول
-۱/۶۶	۰/۱۷۳	۲/۷۴	۰/۰۰۱۲۰۰۵	۰/۰۰۱۲۰۰۵	۱	برهم کنش جریان و محلول
			۰/۰۰۰۴۳۷۵	۰/۰۰۱۷۵۰۰	۴	خطا

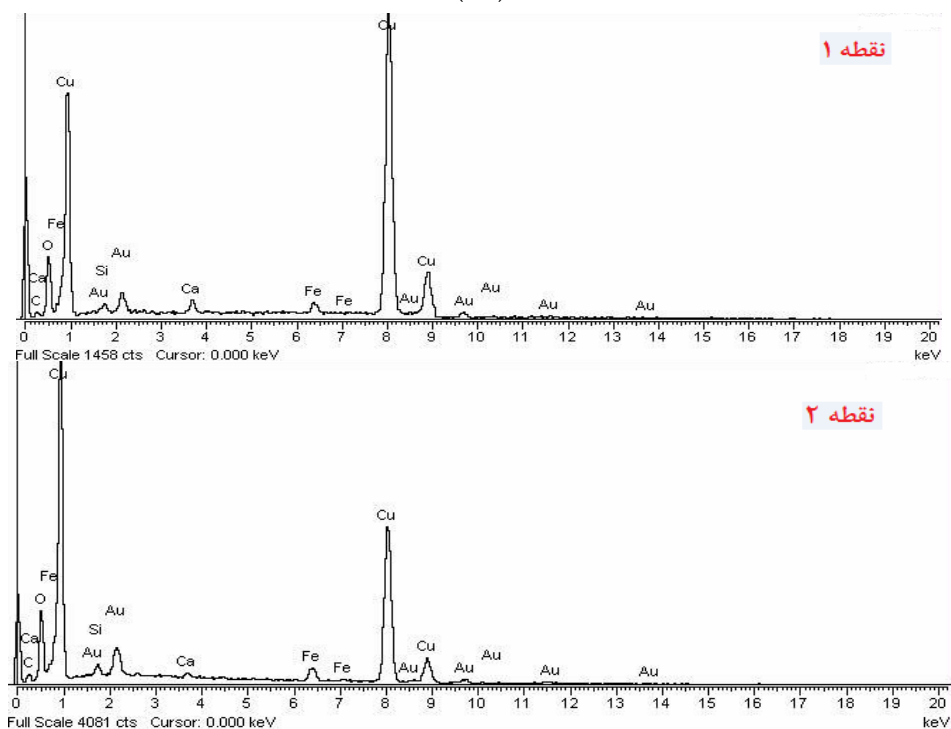
جدول ۲- نتایج جذب اتمی برای نمونه‌های پوشش داده شده با دو عامل نوع جریان و نوع محلول

شماره	نوع جریان	نوع محلول	گرم بتن تراشیده شده	گرم بتن حل شده	غلظت مس ppm (mg/l)	مقدار مس mg	درصد مس %Cu
۱	مستقیم	بدون ملاس	۰/۰۶۱	۰/۰۴۶	۲/۱۹۵	۰/۵۴۹	۱/۱۹
۲	پالسی	بدون ملاس	۰/۰۵۰	۰/۰۴۴	۱/۸۹۶	۰/۴۷۴	۱/۰۸
۳	مستقیم	حاوی ملاس	۰/۰۵۷	۰/۰۴۹	۲/۰۱۱	۰/۵۲۷	۱/۰۷
۴	پالسی	حاوی ملاس	۰/۰۶۶	۰/۰۴۸	۱/۷۴۲	۰/۴۳۵	۰/۹۰۶



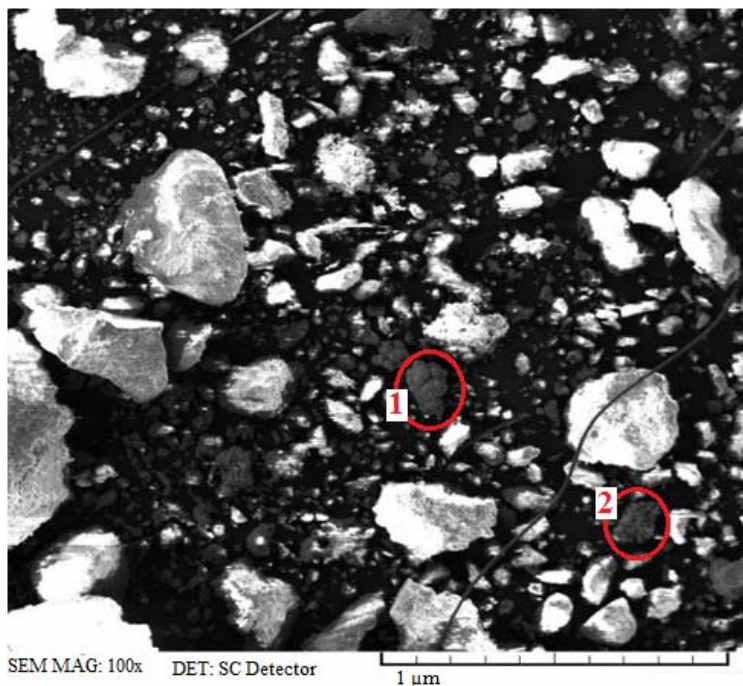
پالسی

(الف)

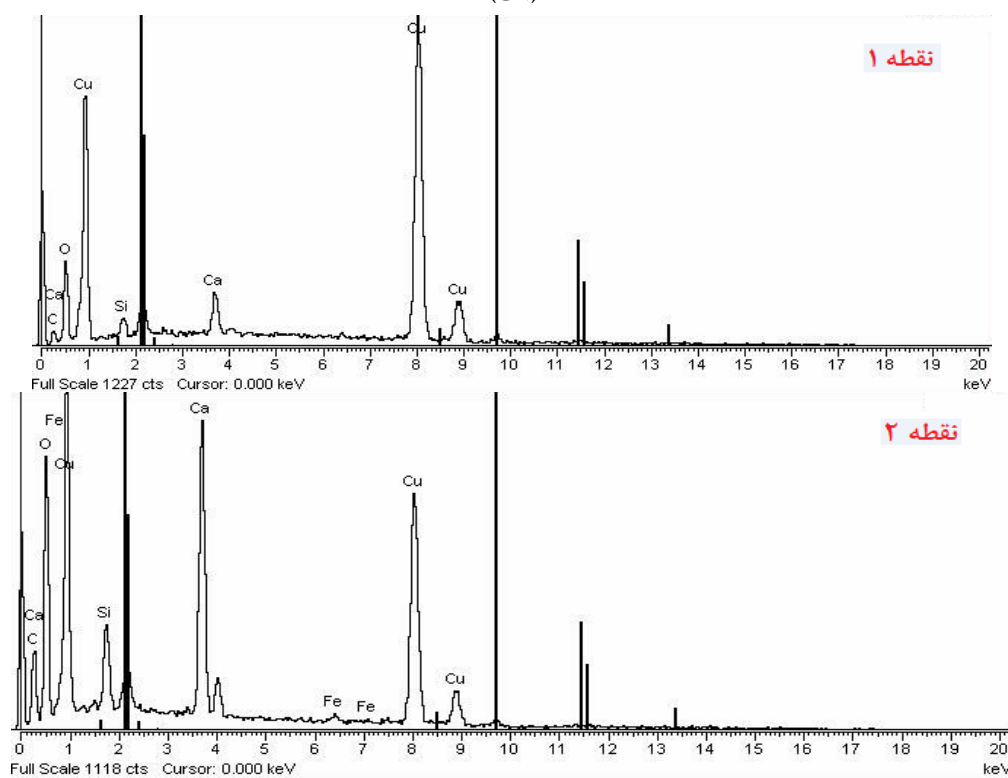


(ب)

شکل ۱- (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه بتنی پوشش داده شده با جریان مستقیم و محلول الکترولیت بدون ملاس؛ (ب) آنالیز EDS در دو نقطه شماره گذاری شده.



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه بتنی پوشش داده شده با جریان پالسی و محلول الکترولیت بدون ملاس؛ (ب) آنالیز EDS در دو نقطه شماره گذاری شده.