



بررسی کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون با جریان متناوب و مستقیم در حذف سرب از فاضلاب صنعت باتری سازی با استفاده از الکترودهای میله ای آهنی و فولاد ضد زنگ

نویسندگان: حسین جعفری منصوریان^۱، امیرحسین محوی^۲، ادریس بذرافشان^۳، احمد جنیدی جعفری^۴

۱. نویسنده مسئول: مربی مرکز تحقیقات ارتقای سلامت، دانشگاه علوم پزشکی زاهدان

تلفن: ۰۹۱۸۸۱۳۳۸۵۴ Email: h.mansoorian@yahoo.com

۲. استادیار موسسه تحقیقات محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۳. دانشیار مرکز تحقیقات ارتقای سلامت دانشگاه علوم پزشکی زاهدان

۴. دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران

چکیده

مقدمه: سرب از سمی ترین فلزات سنگین غیر ضروری موجود در محیط زیست بوده که از نظر سمیت، در زمره آلاینده های درجه اول قرار می گیرند. در این مطالعه کارایی الکتروکواگولاسیون با جریان متناوب و مستقیم با استفاده از الکترودهای میله ای آهن و فولاد ضدزنگ در حذف سرب از فاضلاب صنعت باتری سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

روش بررسی: نمونه های فاضلاب از صنعت باتری سازی گرفته شد. در سلول الکتروشیمیایی از الکترودهای میله ای آهن و فولاد ضدزنگ استفاده و اتصال آنها به یکدیگر به صورت سری و به منبع تغذیه به صورت تک قطبی صورت گرفت.

یافته ها: کاربرد جریان متناوب، با الکتروده آهن در دانسیته جریان 6mA/cm^2 موجب حذف سرب تا ۹۶/۷٪ شد و با الکتروده فولاد ضد زنگ در دانسیته جریان 8mA/cm^2 برابر با ۹۳/۸٪ بدست آمد. با کاربرد جریان مستقیم حذف بهینه سرب با الکتروده آهن به ترتیب برابر با ۹۷/۲٪ در دانسیته جریان 6mA/cm^2 و با الکتروده فولاد ضدزنگ برابر با ۹۳/۲٪ در دانسیته جریان 8mA/cm^2 حاصل شد.

نتیجه گیری: نتایج حاصل از این تحقیق با موارد مشابه انجام شده توسط محققین دیگر همخوانی دارد. با توجه به داده های حاصل شده این فرایند می تواند به عنوان روشی مناسب برای توسعه فرایند الکتروکواگولاسیون در مقیاس صنعتی در حذف سرب از محیط های آبی مطرح گردد.

واژه های کلیدی: حذف سرب، الکتروکواگولاسیون، جریان مستقیم، جریان متناوب، الکتروده آهن و فولاد، ضد زنگ

طلوع بهداشت

مجله علمی پژوهشی

دانشکده بهداشت یزد

سال سیزدهم

شماره: اول

فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۳

شماره مسلسل: ۴۳

تاریخ وصول: ۱۳۹۲/۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۱۲



مقدمه

برخی از پساب های صنعتی حاوی فلزات سنگین از قبیل کادمیوم، کروم، مس، نیکل، جیوه، سرب و غیره هستند که تخلیه مستقیم آنها در محیط زیست مضر می باشد. امروزه آلودگی فلزات سنگین به یکی از جدی ترین مشکلات زیست محیطی تبدیل شده است (۱، ۲). به دلیل مقاومت فلزات سنگین در محیط زیست، تصفیه آنها نگرانی خاصی می باشد. فلزات سنگین برخلاف آلاینده های آلی، قابل تجزیه بیولوژیکی نبوده، قابلیت حلالیت بالایی در محیط های آبی دارند، گرایش به تجمع شدن در ارگانیسم های زنده دارند. از سوی دیگر، بسیاری از یون های فلزات سنگین سمی و سرطانزا می باشند. سرب از سمی ترین فلزات سنگین غیر ضروری موجود در محیط زیست می باشد که از نظر شدت آلودگی در گروه آلاینده های درجه اول سمی قرار دارند (۳، ۴). میزان یون های سرب از منابع مختلفی همانند فاضلاب ناشی از صنایع آبکاری، باتری های سربی، کودهای فسفاته، معادن، رنگدانه ها، پالایشگاه ها و صنایع کاغذ ناشی می شود. مسمومیت سرب شامل آسیب به کلیه، فیروز ریه و سرطان بوده، ضمن اینکه ساختار استخوان و خون را نیز تغییر می دهند. مقدار استاندارد سرب برای آب آشامیدنی برابر 0.1 mg/l گزارش شده است (۵، ۶). به منظور حذف اثرات نامطلوب فلزات مذکور بر انسان و اکولوژی و همچنین رعایت قوانین و استانداردهای دفع فاضلاب های حاوی این آلاینده ها لازم است فاضلاب حاوی این فلزات قبل از تخلیه تصفیه شود. روش های متداول برای حذف سرب از آب شامل تبادل یون، اسمز معکوس، شناورسازی، هم ترسیبی، کواگولاسیون،

استخراج با حلال، تصفیه شیمیایی، جذب سطحی و الکتروکواگولاسیون می باشد. هر روش تصفیه ای مزایا و معایبی دارد برای مثال روش های فیزیکی مانند تبادل یون، اسمز معکوس و الکترودیالیز برای حذف سرب پرهزینه و یا ناکارآمد هستند. تصفیه های شیمیایی نیز به علت معایبی همانند هزینه های بالای نگهداری، مشکلات جابجایی لجن و دفع آن و خنثی سازی پساب قابل استفاده نیستند. هم چنین حذف سرب از آب توسط جذب سطحی با استفاده از مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. معایب اصلی این جذب های مورد مطالعه کارایی کم و هزینه بالای آنها می باشد (۷-۱۱). در میان روش های مختلف ذکر شده در بالا، یک تکنولوژی مؤثر که نیازهای فرایند تمیزسازی، دست کاری آسان، هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری و قوانین زیست محیطی را برآورده می کند الکتروکواگولاسیون می باشد. این تکنولوژی برای اولین بار در قرن نوزدهم برای تصفیه فاضلاب چپیس به کار رفته و اخیراً به عنوان یک جایگزین برای بیشتر فرایندهای متداول تصفیه به کار می رود (۱۲، ۱۳). تکنولوژی های الکتروکواگولاسیون اساساً فرایندهای الکترولیتیکی هستند که شامل ناپایداری سازی جامدات معلق، آلاینده های امولسیون یا حل شده در یک محیط آبی از طریق کاربرد جریان الکتریکی است (۱۴، ۱۵).

الکتروکواگولاسیون، فرایندی است که شامل لخته های هیدروکسید فلزی تولید شده در فاضلاب از طریق تجزیه الکتریکی آندهای قابل حل، که معمولاً از آهن و آلومینیوم ساخته شده اند، می باشد. اکسیداسیون الکتروشیمیایی آهن یا آلومینیوم در



اولیه، جنس الکترودها، زمان تصفیه، فاصله بین الکترودها و میزان اختلاط بر کارایی حذف مورد مطالعه قرار گرفته تا شرایط بهینه بهره برداری تعیین شود.

روش بررسی

سلول الکتروکواگولاسیون از جنس پلاکسی گلاس با ابعاد ۱۲cm × ۱۰ cm × ۱۲ cm ساخته شد. حجم مؤثر راکتور ۱L برآورد شد. شمایی از این سلول در شکل ۱ نشان داده شده است. در هر آزمایش کل حجم فاضلاب الیتر بود. میله های آهنی و فولاد ضدزنگ با ابعاد ۵۰mm طول و ۵mm قطر به تعداد ۳۰ عدد مورد استفاده قرار گرفتند. الکترودها با فاصله ۲cm از کف راکتور قرار گرفته بودند. اتصال الکترودها به یکدیگر به صورت سری و به منبع تغذیه به صورت تک قطبی (اتصال فقط دو الکتروکواگولاسیون به قطب های مثبت و منفی و اتصال الکترودهای میانی به هم) بود. جریان متناوب و مستقیم توسط یک منبع تغذیه مدل (GW GPC-3060D) با محدوده دانسیته جریان ۸،۶،۴،۲mA/cm² و ۱۰ تأمین شد. فاضلاب مورد استفاده در این مطالعه از پساب صنعت باتری سازی واقع در شهرک صنعتی شهر کرمان برداشته شد که برخی از پارامترهای آن نظیر pH، هدایت الکتریکی، سرب در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به ذکر می باشد که قبل از اینکه پساب برای آزمایش مورد مطالعه قرار گیرد، جامدات معلق آن با استفاده از یک فیلتر حذف شد.

نمونه های برداشته شده، در کمتر از ۶ ساعت به آزمایشگاه منتقل شد.

آند کاتیون های فلزی تولید می کند، در حالی که اکسیداسیون کاتد معمولاً هیدروژن تولید می کند (۱۶). لازم به ذکر است، استفاده از Fe³⁺ به عنوان عامل لخته ساز در تصفیه آب مزایای قابل ملاحظه ای دارد، چرا که این فلز در مقایسه با یون های AL³⁺ که برخی اثرات سمی (بیماری آلزایمر) از خود نشان داده اند بی ضررمی باشد (۱۷-۱۹). فرایند الکتروشیمیایی شامل بسیاری از پدیده های شیمیایی و فیزیکی از قبیل تخلیه، اکسیداسیون آندی، احیای کاتدی، کواگولاسیون، مهاجرت الکتروفورزی و جذب سطحی می باشد. همچنین طی فرایند الکتروکواگولاسیون در مقایسه با ترسیب شیمیایی، مایع با آنیون ها غنی نشده و محتوای نمک های آن افزایش نمی یابد. این پدیده به تولید لجن های فلزی که با استفاده از الکتروکواگولاسیون در مقایسه با ترسیب شیمیایی متراکم هستند نسبت داده می شود. الکتروکواگولاسیون، علاوه بر اینکه به تجهیزات ساده نیاز دارد، مزایایی از جمله کارایی حذف بالا، زمان ماند کم، تأسیسات تصفیه فشرده شده، هزینه نسبتاً پایین و بهره برداری ساده دارا می باشد. این ویژگی ها به کاهش هزینه های بهره برداری برای کاربردهای صنعتی نسبت داده می شود (۲۱)، (۲۰). الکتروکواگولاسیون به طور موفقیت آمیزی برای تصفیه فاضلاب های صنایعی نظیر فاضلاب آبکاری، نساجی، کارخانه روغن زیتون، رختشویی خانه، دباغی، صنعت کاغذ و پالپ، مخمرسازی و کشتارگاه به کار رفته است (۲۲-۲۵). در این مطالعه کارایی الکتروکواگولاسیون با جریان متناوب و مستقیم با استفاده از آلیاژ آهن و فولاد ضدزنگ در حذف سرب مورد بررسی قرار گرفته است. اثر دانسیته جریان، میزان انرژی مصرفی، pH



جدول ۱: مشخصات اولیه فاضلاب صنعت باتری سازی واقع در شهرک

صنعتی کرمان

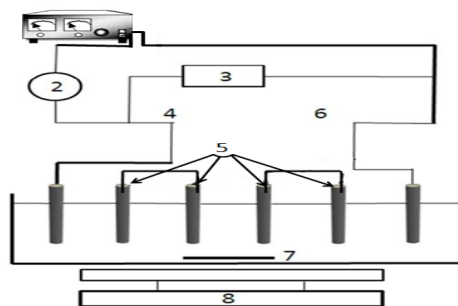
مقدار	مشخصات فاضلاب
۹mg/l	سرب (۲)
۴/۵ms/cm	هدایت الکتریکی
۲/۸	pH
۲/۳mg/l	آهن
۵mg/l	سولفات

۳۰،۲۰ و ۴۰ به میزان ۲۵ml از میانه راکتور نمونه برداشته می شد. سپس نمونه های برداشته شده از صافی با اندازه $0.45 \mu\text{m}$ عبور داده می شوند تا لخته های تشکیل شده حذف گردد. نمونه های صاف شده در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری و در پایان با استفاده از دستگاه جذب اتمی مطابق با روش های مندرج در کتاب روش های استاندارد برای آزمایش آب و فاضلاب به شماره ۳۱۱۱B از نظر غلظت باقیمانده یون سرب تعیین مقدار می شدند. در انتهای هر آزمایش مقدار لجن تولیدی و pH محلول باقیمانده نیز اندازه گیری شد. انرژی الکتریکی مصرفی یک پارامتر بسیار مهم اقتصادی در فرایند الکتروکواگولاسیون می باشد. این پارامتر با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$E = \frac{U \cdot I \cdot t}{V}$$

E = انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب $U \cdot I \cdot t$ (kwh/m³) = ولتاژ به کار رفته بر حسب $I \cdot t$ (V) = دانسیته جریان بر حسب I (A) = زمان الکتروکواگولاسیون بر حسب $V \cdot t$ (h) = حجم نمونه بر حسب (L).
میزان مصرف الکتروود قربانی نیز از طریق تعیین وزن ابتدایی و انتهای الکتروودها انجام پذیرفت.

نمونه ها از نظر میزان سرب توسط دستگاه جذب اتمی مدل (UNICAM929)، هدایت الکتریکی توسط یک هدایت سنج مدل (Model4071) و pH توسط یک pH متر مدل (InoLabWTW)، آهن و سولفات توسط اسپکتروفتومتر مدل (AL800) تعیین مقدار شد. در مرحله اول pH بهینه حذف سرب تعیین شد و به منظور تنظیم pH در محدوده بهینه، از هیدروکسید سدیم و اسیدسولفوریک ۰/۱N استفاده شد. فاضلاب داخل راکتور توسط یک همزن مغناطیسی مخلوط می گردید. الکتروودها پس از هربار آزمایش توسط یک بورس سنباده و با کلرید هیدروژن رقیق شسته شده و پس از آبکشی با آب مقطر به طور دقیق توزین می شدند. برای اطلاع از پیشرفت تصفیه، در فواصل زمانی ۱۰ min،



۱. منبع تامین جریان برق
۲. آمپر متر دیجیتال
۳. ولت متر دیجیتال
۴. میله آند
۵. آندهای قربانی
۶. میله کاتد
۷. آهن ربای مغناطیسی
۸. همزن برقی

شکل ۱: شمایی از راکتور طراحی شده



یافته ها

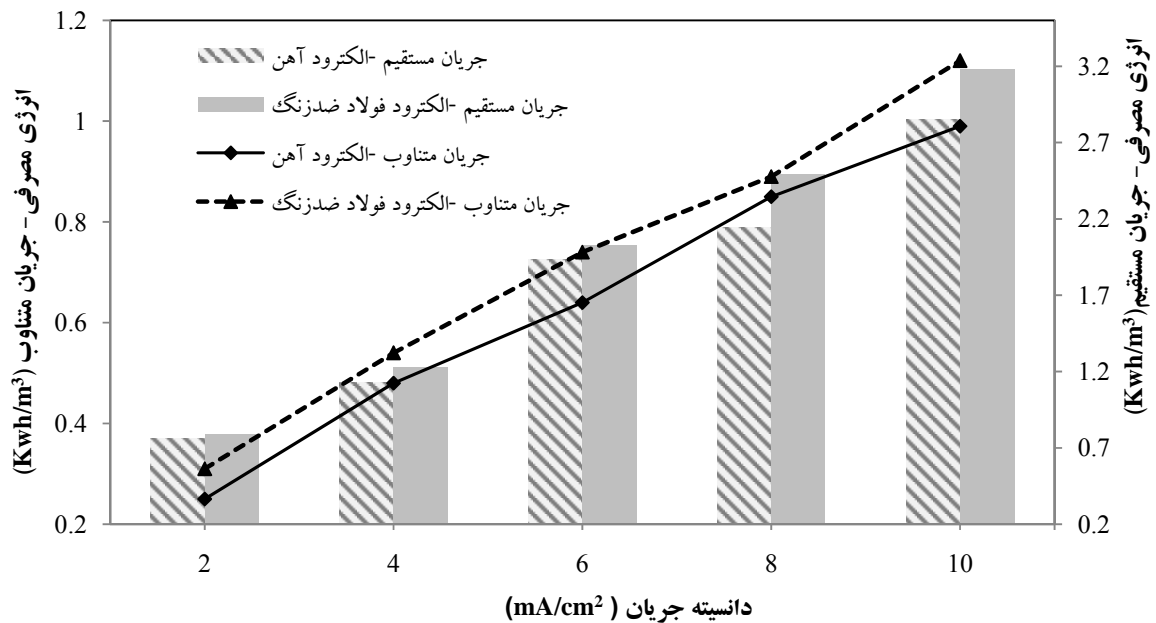
حذف بهینه سرب با الکتروود آهن برابر با ۹۷/۲٪ در دانسیته جریان بهینه 6 mA/cm^2 و با الکتروود فولاد ضدزنگ برابر با ۹۳/۲٪ در دانسیته جریان بهینه 8 mA/cm^2 و زمان ۴۰min حاصل شد. در نمودار ۱ میزان انرژی مصرفی با هر دو جریان متناوب و مستقیم و با الکتروودهای آهن و فولاد ضدزنگ نشان داده شده است. با جریان متناوب بیشترین انرژی مصرفی با کاربرد الکتروود آهن در دانسیته بهینه حذف سرب 0.69 kWh/m^3 و با الکتروود فولاد ضد زنگ 0.89 kWh/m^3 بود. در جریان مستقیم بالاترین میزان انرژی مصرفی با الکتروود آهن در دانسیته بهینه حذف سرب برابر با 2.49 kWh/m^3 و با فولاد ضدزنگ برابر با 1.93 kWh/m^3 می باشد.

نتایج حاصل از این مطالعه در نمودارهای ۵-۱ و جدول ۲ نشان داده شده است. مناسب ترین pH برای حذف سرب برابر ۵ با راندمان حدود ۹۸/۴ درصد بدست آمد. در جدول ۲ راندمان حذف سرب با الکتروود آهن و فولاد ضدزنگ با کاربرد جریان متناوب و مستقیم نشان داده شده است. همان طور که این جدول برای جریان متناوب نشان داده است دانسیته جریان بهینه در حذف سرب با الکتروود آهن 6 mA/cm^2 در مدت زمان واکنش ۳۰ دقیقه حاصل شد برابر با ۹۶/۷٪ بود و با الکتروود فولاد ضد زنگ در دانسیته جریان بهینه 8 mA/cm^2 و زمان واکنش ۴۰min برابر با ۹۳/۸٪ بدست آمد. همچنین در جدول ۲ با کاربرد جریان مستقیم راندمان

جدول ۲: راندمان حذف سرب با کاربرد الکتروود آهن و فولاد زنگ نزن در جریان متناوب و مستقیم بر حسب دانسیته جریان و زمان های

مختلف

نوع الکتروود	زمان تماس (دقیقه)	دانسیته جریان (mA/cm^2)					نوع الکتروود	زمان تماس (دقیقه)	دانسیته جریان (mA/cm^2)				
		۱۰	۸	۶	۴	۲			۱۰	۸	۶	۴	۲
آهن	۱۰	۸۵/۴	۸۱/۸	۷۷/۵	۷۲/۶	۶۵/۹	آهن	۱۰	۸۶/۴	۸۳/۸	۷۹/۴	۷۴/۵	۶۷/۶
	۲۰	۹۶/۶	۹۳/۷	۸۹/۳	۸۴/۲	۷۶/۷		۲۰	۹۶/۷	۹۵/۶	۹۰/۲	۸۵/۳	۷۸/۵
	۳۰	۹۷/۲	۹۶/۳	۹۵/۲	۸۷/۸	۸۷/۱		۳۰	۹۸	۹۷/۴	۹۶/۷	۸۹/۷	۸۷/۴
	۴۰	۹۸	۹۷/۵	۹۷/۲	۹۱/۴	۸۸/۹		۴۰	۹۸/۴	۹۸/۲	۹۷/۴	۹۲/۲	۸۹/۷
فولاد زنگ نزن	۱۰	۷۳/۴	۷۰/۳	۶۶/۴	۶۰/۷	۵۴/۸	فولاد زنگ نزن	۱۰	۷۵/۴	۷۱/۶	۶۸/۷	۶۲/۶	۵۶/۴
	۲۰	۸۸/۶	۸۲/۶	۷۷/۸	۷۵/۲	۶۳/۵		۲۰	۸۹/۳	۸۳/۷	۷۹/۲	۷۵/۴	۶۴/۷
	۳۰	۹۱/۳	۹۱/۱	۸۷/۴	۸۳/۴	۷۵/۸		۳۰	۹۲/۶	۹۱/۴	۸۸/۳	۸۴/۷	۷۷/۳
	۴۰	۹۴/۸	۹۳/۲	۹۰/۸	۸۷/۹	۸۴/۲		۴۰	۹۵/۳	۹۳/۸	۹۱/۴	۸۹/۲	۸۴/۶



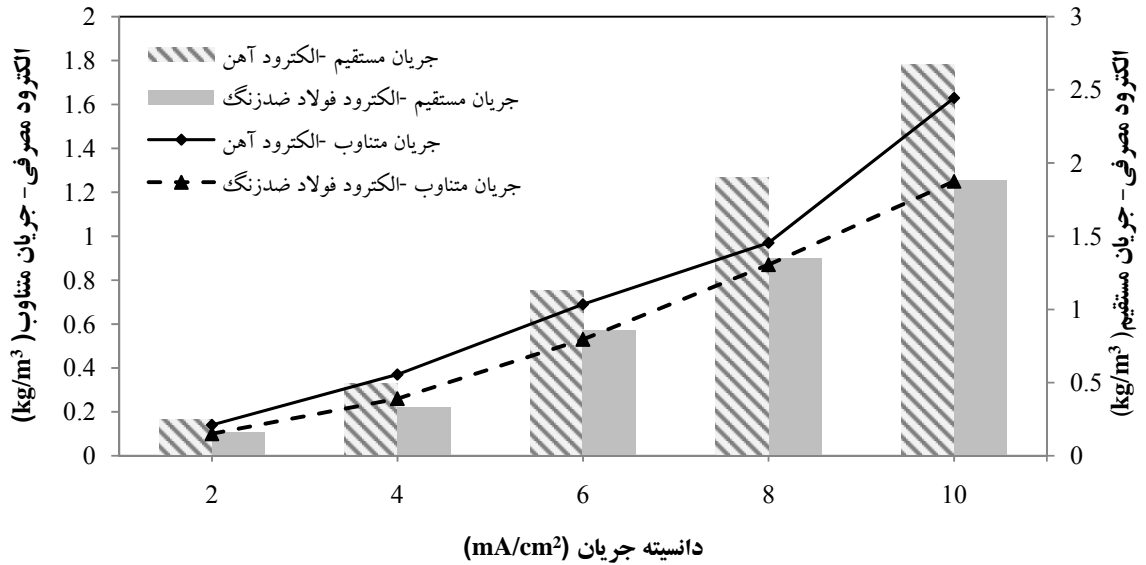
نمودار ۱: میزان انرژی مصرفی در حذف سرب با کاربرد جریان متناوب و مستقیم

ترتیب مقادیر 0.081 kg/m^3 بود. اثر فاصله بین الکترودها در راندمان حذف سرب مطالعه و اثر آن در نمودار ۴ نشان داده شده است. در جریان متناوب و مستقیم بالاترین راندمان حذف در فاصله 1 cm الکترودها حاصل شد.

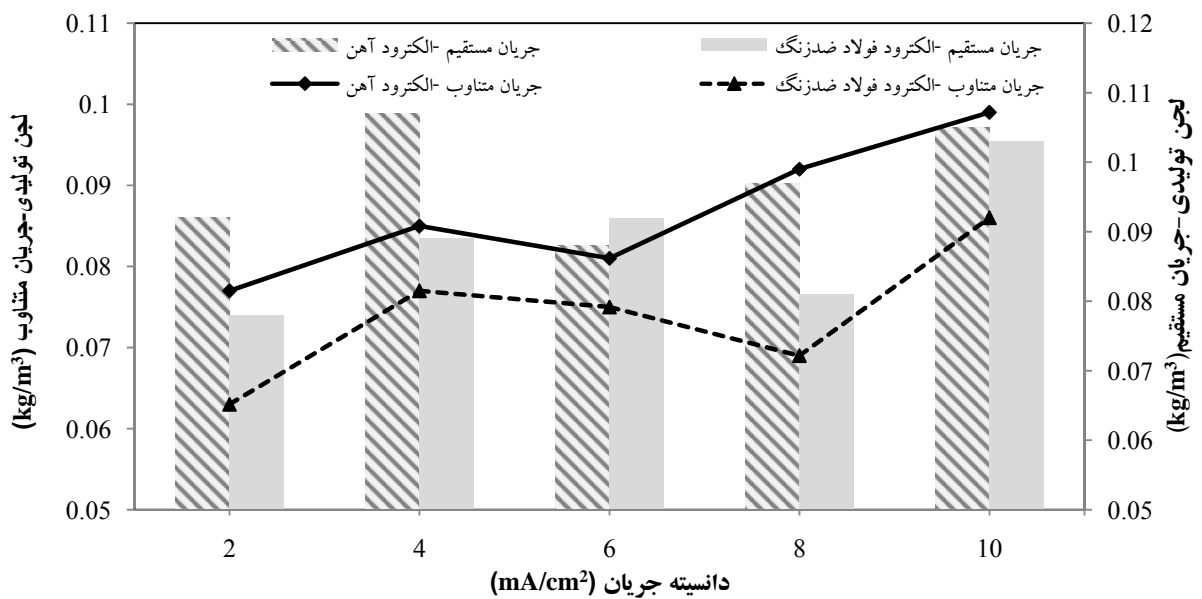
میزان تغییرات pH بعد از اتمام هر مرحله از آزمایش را نشان می دهد. بیشترین تغییر در pH در جریان متناوب با کاربرد الکترودها آهن در دانشیته جریان بهینه حذف سرب به ترتیب $1/44$ و با الکترودها فولاد ضدزنگ $1/62$ بوده است. در جریان مستقیم بیشترین تغییرات pH با کاربرد الکترودها آهن در حذف سرب در دانشیته جریان بهینه به ترتیب $1/89$ و با کاربرد الکترودها فولاد ضدزنگ $1/38$ بود (نمودار ۵).

همچنین میزان الکتروکواگولاسیون مصرفی در جریان متناوب با کاربرد الکترودها آهن در دانشیته بهینه حذف سرب برابر با 0.69 kg/m^3 و با الکترودها فولاد ضدزنگ 0.87 kg/m^3 بوده و در جریان مستقیم با الکترودها آهن در دانشیته جریان بهینه در حذف سرب 1.13 و با الکترودها فولاد ضدزنگ 1.35 kg/m^3 بود (نمودار ۲).

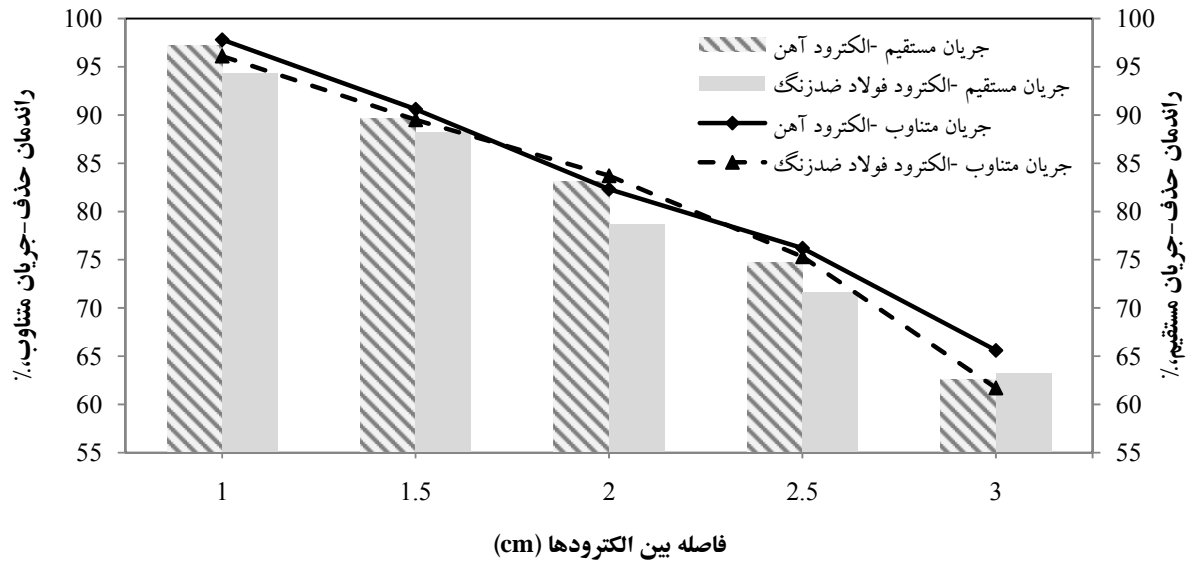
میزان لجن تولیدی از این فرآیند در نمودار ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در جریان متناوب با کاربرد الکترودها آهن برای حذف سرب در دانشیته جریان بهینه لجن تولیدی برابر با 0.081 kg/m^3 و با الکترودها فولاد 0.069 kg/m^3 بود. در جریان مستقیم با الکترودها آهن لجن تولیدی در دانشیته جریان بهینه حذف سرب 0.088 kg/m^3 بود و با الکترودها فولاد به



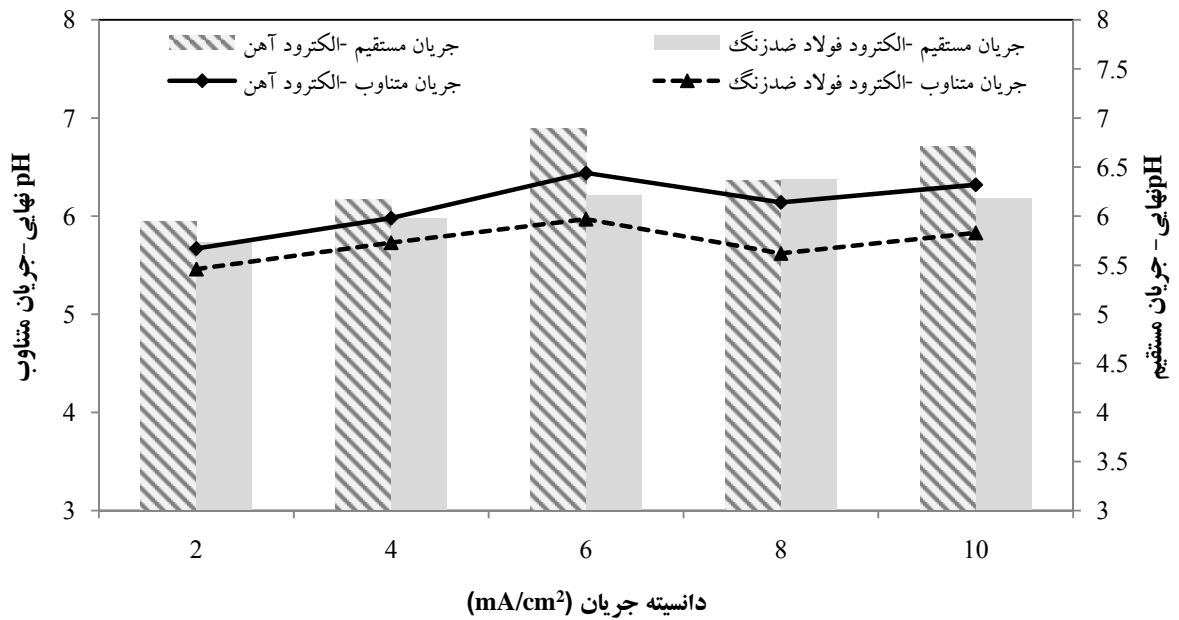
نمودار ۲: میزان الکترولیت مصرفی در حذف سرب با کاربرد جریان متناوب و مستقیم



نمودار ۳: میزان لجن تولیدی با الکترولیت آهن و فولاد ضدزنگ در جریان متناوب و مستقیم



نمودار ۴: راندمان حذف سرب با جریان متناوب و مستقیم در فاصله های مختلف بین الکترودها



نمودار ۵: میزان تغییرات pH اولیه در حذف سرب با کاربرد جریان متناوب و مستقیم

**بحث و نتیجه گیری**

در مطالعه حاضر اثرات پارامترهایی از جمله دانسیته جریان، pH، زمان واکنش، میزان انرژی و الکتrod مصرف شده، نوع الکتrod، آرایش الکتrodها و فاصله بین الکتrodها بر کارایی فرایند الکتrodکواگولاسیون در حذف فلزات سنگین سرب و مقدار لجن تولیدی از این فرایند مورد بررسی قرار گرفت.

در تمام فرایندهای الکتروشیمیایی، دانسیته جریان مهمترین پارامتر جهت کنترل میزان واکنش در داخل راکتور الکتروشیمیایی است. به خوبی مشخص شده است که دانسیته جریان میزان تولید کواگولانت، میزان تولید حباب، اندازه و توزیع آن و میزان رشد فلوک ها در راکتور الکتrodکواگولاسیون با الکتrodهای مختلف را تعیین می کند (۲۷، ۲۶). اثر دانسیته جریان بر کارایی حذف سرب از فاضلاب صنعت باتری سازی با دو نوع جریان متناوب و مستقیم و دو نوع الکتrod آهنی و فولاد ضدزنگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جریان متناوب و الکتrod آهنی به مراتب مؤثرتر از جریان مستقیم و الکتrod فولاد ضدزنگ می باشد که ممکن است به علت تجزیه یکنواخت آند و کاتد در حالت جریان متناوب در مدت الکتrodکواگولاسیون باشد. کارایی حذف حاصل شده نشان می دهد با افزایش دانسیته جریان، حذف سرب نیز افزایش می یابد. این امر به افزایش مقدار جاذب (یون های هیدروکسید آهن) تولیدی در محل نسبت داده شده که منجر به حذف سریع سرب می شود. مقدار جاذب نیز از طریق قانون فارادی تعیین می شود (۲۹، ۲۸، ۲۶):

$$C = \frac{I.t.M}{Z.F.V}$$

$C =$ غلظت آهن در سلول الکترولیتیک بر حسب (kg/m^3) ، $I =$ دانسیته جریان بر حسب (A) $t =$ زمان الکتrodکواگولاسیون بر حسب (s) $M =$ وزن مولکولی آند بر حسب (kg/mol) ، برای آهن $Z = 2$ ، $F = 96485$ (برای آهن = ۲)، میزان ثابت فارادی (C/mol) $V = 96485$ و $V =$ حجم نمونه بر حسب (m^3) .

همانگونه که انتظار می رفت مقدار جذب سطحی سرب با افزایش غلظت جاذب افزایش می یابد که خود به طور مستقیم به دانسیته جریان و زمان واکنش بستگی دارد. این امر، بیانگر وابستگی زیاد جذب سطحی به قابلیت دسترسی محل های پیوند برای سرب می باشد (۳۱، ۳۰). کاهش سرب با الکتrod آهن بیشتر از الکتrod فولاد بوده است که این امر عمدتاً به علت تشکیل سریعتر سولفات و هیدروکسیدهای فریک از آهن معمولی به دلیل مقاومت کمتر آن در برابر خوردگی نسبت به فولاد ضدزنگ می باشد (۳۲). با افزایش دانسیته جریان، مقدار سرب بیشتر کاهش می یابد. این امر عمدتاً به دلیل این است که افزایش دانسیته جریان منجر به تولید حباب های بزرگتر اکسیژن توسط آند شده که خود باعث جریان روبه بالای بیشتر و حذف سریعتر سرب از طریق شناورسازی می شود. با این حال تأثیر اصلی افزایش جریان، تشدید میزان تجزیه آند بوده که منجر به افزایش غلظت یون های فلزی در محلول و متعاقباً بهبود حذف املاح سرب می شود (۱۸). نتایج تحقیقات حاضر نشان می دهد، افزایش دانسیته جریان، زمان لازم برای حذف سرب را کاهش می دهد. این نتایج مطابق با نتایج حاصل از مطالعه Erdem Yilmaz و همکاران در جداسازی برون از آبهای گرم زیرزمینی از طریق الکتrodکواگولاسیون، Ghosh و همکاران در



مطابقت دارد (۴۰-۳۸). مقدار pH محلول طی الکترولیز افزایش می یابد. با این حال در الکترولیت به شدت اسیدی، قلیائیت تولیدی در مدت الکترولیز برای افزایش pH محلول کافی نیست (۴۱). pH نمونه ها نیز در انتهای فرایند اندازه گیری و میزان تغییرات آن در نمودار ۶ نشان داده شده است. بیشترین تغییر در pH در جریان متناوب با کاربرد الکتروود آهن در دانسیته جریان بهینه حذف سرب ۱/۴۴ و با الکتروود فولاد ضدزنگ ۱/۶۲ می باشد. در جریان مستقیم بیشترین تغییرات pH با کاربرد الکتروود آهن در حذف سرب در دانسیته جریان بهینه از ۵ به ۶/۸۹ و با الکتروود فولاد ضدزنگ از ۵ به ۶/۳۸ بود.

در فرایندهای الکتروکواگولاسیون، زمان الکترولیز بر میزان کارایی تصفیه تأثیر می گذارد. آزمایشات الکتروکواگولاسیون طی ۴۰ دقیقه در دانسیته جریان و pH های مختلف به انجام رسید. جدول ۱ ارتباط میان زمان واکنش و کارایی حذف سرب را در دانسیته های جریان مختلف نشان می دهد. با افزایش زمان واکنش، کارایی حذف افزایش یافته است. این امر، ناشی از این واقعیت است، که کارایی فرایند به طور مستقیم به غلظت هیدروکسید و یون های فلزی تولیدی توسط الکتروودها بستگی داشته و با افزایش زمان، غلظت یون ها و لخته های هیدروکسید افزایش می یابد (۴۲، ۲۰). زمان واکنش، میزان تولید یون های Fe^{3+} ناشی از الکتروودهای آهن و فولاد ضدزنگ را تعیین می کند. در مدت الکترولیز، الکتروود مثبت دستخوش واکنش های آندی قرار می گیرد. یون های رها شده بار ذرات آلاینده را خنثی کرده و بدین وسیله انعقاد شروع می شود. وقتی زمان الکترولیز

حذف آهن ۲ از آب شیر با استفاده از تکنیک الکتروکواگولاسیون و Merzouk و همکاران در حذف کدورت و جداسازی فلزات سنگین با استفاده از تکنیک الکتروکواگولاسیون و فلوتاسیون مشابه می باشد (۳۴، ۳۳، ۲۷).

در فرایندهای جداسازی شیمیایی یا الکتروشیمیایی، pH یک پارامتر مهم می باشد و بر تشکیل گونه های هیدروکسید فلزی و مکانیسم حذف یون ها و آلاینده ها تأثیر معنی داری دارد (۳۵، ۲۱). تأثیر pH در جریان متناوب و مستقیم با کاربرد الکتروود آهن و فولاد ضدزنگ در حذف سرب از فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت و مطابق با نتایج بدست آمده کارایی حذف سرب در pH ۵ به حداکثر رسید. معمولاً pH در مدت عملکرد فرایند الکتروکواگولاسیون (EC) تغییر می کند و این تغییر به نوع الکتروود به کار رفته و pH اولیه بستگی دارد. افزایش pH در این فرایند به تشکیل گاز H_2 در الکتروود کاتد و تجمع یون های هیدروکسید در محلول نسبت داده می شود. بنابراین فرایند الکتروکواگولاسیون می تواند به عنوان تنظیم کننده pH عمل نماید. به عبارتی دیگر فرایند EC از خود ظرفیت بافری نشان می دهد زیرا بین تولید و مصرف OH^- تعادل برقرار می کند. این امر از تغییر زیاد pH جلوگیری می کند (۳۶، ۳۷). یافته ها با نتایج مطالعه انجام شده توسط Escobar و همکاران در بهینه سازی فرایند الکتروکواگولاسیون برای حذف مس، سرب و کادمیوم از آب های طبیعی و فاضلاب سنتتیکو Canizares و همکاران در مطالعه تأثیر pH به عنوان یک پارامتر مهم در انتخاب کواگولاسیون و الکتروکواگولاسیون برای تصفیه فاضلاب



افزایش می یابد غلظت یون ها و لخته های هیدروکسیدشان نیز افزایش می یابد. همچنین در جریان های بالا حباب های بیشتری تولید شده که باعث بهبود میزان اختلاط هیدروکسیدهای فلزی و آلاینده هاو در نهایت بهبود قابلیت شناورسازی و افزایش کارایی حذف می شود (۴۳، ۱۶). در این مطالعه زمان بهینه برای حذف سرب در جریان متناوب با الکتروود آهن و فولاد به ترتیب ۳۰ min بود و در جریان مستقیم با هر دو الکتروود آهن و فولاد ضدزنگ ۴۰ min بود. یافته ها با نتایج حاصل از مطالعه Drouiche و همکاران در بررسی تصفیه فاضلاب فتولتائیک با استفاده از الکتروکواگولاسیون و حذف فلوراید با الکترودهای آلومینیومی و Mouedhen و همکاران در بررسی رفتار الکترودهای آلومینیومی در فرایند الکتروکواگولاسیون مطابقت دارد (۴۱، ۱۶).

میزان انرژی مصرفی، یک پارامتر بسیار مهم اقتصادی در فرایند الکتروکواگولاسیون می باشد. عمده هزینه بهره برداری فرایند الکتروکواگولاسیون نیز در ارتباط با مصرف انرژی الکتریکی می باشد. با افزایش دانسیته جریان از ۲ به ۶، مصرف انرژی در جریان متناوب مستقیم با الکتروود آهنی و فولاد ضدزنگ به طور جزئی افزایش پیدا کرد. افزایش دانسیته جریان از ۶ به ۱۰ با جریان متناوب مصرف انرژی به طور جزئی و با جریان مستقیم به طور معنی داری افزایش پیدا کرد. نتایج نشان می دهد، که افزایش دانسیته جریان باعث افزایش مصرف انرژی به دلیل پلاریزاسون و افزایش تشکیل تعداد ترکیبات آهن و فولاد شده که به همان اندازه کارایی حذف سرب را بهبود می بخشد. بنابراین برای رسیدن به دانسیته جریان بهینه بایستی هم درصد حذف و هم مصرف انرژی الکتریکی مورد

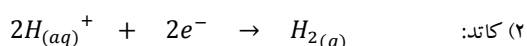
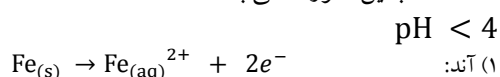
ارزیابی قرار گیرد. در این مطالعه برای کارایی حذف معقول و مصرف نسبتاً پایین انرژی، در هر دو جریان متناوب و مستقیم با الکتروود آهن دانسیته جریان 6 mA/cm^2 و با الکتروود فولاد ضدزنگ دانسیته جریان 8 mA/cm^2 به عنوان یک مقدار بهینه بدست آمد (۴۴، ۲۳). مصرف انرژی با کاربرد الکترودهای آهنی کمتر از الکترودهای فولاد ضدزنگ است که احتمالاً ناشی از ولتاژ زیاد مورد نیاز برای رسیدن به دانسیته جریان بهینه در مدل آرایش سری می باشد. دانسیته جریان بالا همچنین باعث کاهش بیشتر وزن الکتروود و افزایش مقدار الکتروود رها شده به محلول می شود (۳۳، ۲۶). مقدار الکتروود مصرف شده در دانسیته های جریان مختلف در نمودار ۲ نشان داده شده است. مقدار الکتروود مصرف شده آهن در دانسیته جریان بهینه حذف سرب با کاربرد جریان متناوب به ترتیب برابر با 0.69 kg/m^3 و مقدار الکتروود مصرف شده فولاد ضدزنگ 0.87 kg/m^3 بود. با به کارگیری جریان مستقیم مصرف الکتروود آهن در دانسیته جریان بهینه حذف سرب برابر با 1.13 kg/m^3 و مصرف الکتروود فولاد ضدزنگ نیز برابر با 1.35 kg/m^3 بود که با نتایج حاصل شده از مطالعه Zaied و همکاران در تصفیه الکتروکواگولاسیون مایع سیاه ناشی از صنعت کاغذسازی، AyhanSengil و همکاران در تصفیه فاضلاب دباجی از طریق الکتروکواگولاسیون و LungChou و همکاران در حذف الکتروشیمیایی یون های ایندیوم از محلول های آبی با استفاده از الکتروود آهن مطابقت دارد (۴۵، ۴۴، ۲۳). قسمت الکتروود سلول الکتروشیمیایی قلب راکتور است بنابراین انتخاب جنس مناسب آن بسیار مهم است. معمولی ترین جنس الکتروود برای

افزایش می یابد غلظت یون ها و لخته های هیدروکسیدشان نیز افزایش می یابد. همچنین در جریان های بالا حباب های بیشتری تولید شده که باعث بهبود میزان اختلاط هیدروکسیدهای فلزی و آلاینده هاو در نهایت بهبود قابلیت شناورسازی و افزایش کارایی حذف می شود (۴۳، ۱۶). در این مطالعه زمان بهینه برای حذف سرب در جریان متناوب با الکتروود آهن و فولاد به ترتیب ۳۰ min بود و در جریان مستقیم با هر دو الکتروود آهن و فولاد ضدزنگ ۴۰ min بود. یافته ها با نتایج حاصل از مطالعه Drouiche و همکاران در بررسی تصفیه فاضلاب فتولتائیک با استفاده از الکتروکواگولاسیون و حذف فلوراید با الکترودهای آلومینیومی و Mouedhen و همکاران در بررسی رفتار الکترودهای آلومینیومی در فرایند الکتروکواگولاسیون مطابقت دارد (۴۱، ۱۶).

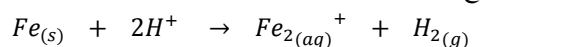
میزان انرژی مصرفی، یک پارامتر بسیار مهم اقتصادی در فرایند الکتروکواگولاسیون می باشد. عمده هزینه بهره برداری فرایند الکتروکواگولاسیون نیز در ارتباط با مصرف انرژی الکتریکی می باشد. با افزایش دانسیته جریان از ۲ به ۶، مصرف انرژی در جریان متناوب مستقیم با الکتروود آهنی و فولاد ضدزنگ به طور جزئی افزایش پیدا کرد. افزایش دانسیته جریان از ۶ به ۱۰ با جریان متناوب مصرف انرژی به طور جزئی و با جریان مستقیم به طور معنی داری افزایش پیدا کرد. نتایج نشان می دهد، که افزایش دانسیته جریان باعث افزایش مصرف انرژی به دلیل پلاریزاسون و افزایش تشکیل تعداد ترکیبات آهن و فولاد شده که به همان اندازه کارایی حذف سرب را بهبود می بخشد. بنابراین برای رسیدن به دانسیته جریان بهینه بایستی هم درصد حذف و هم مصرف انرژی الکتریکی مورد



دامنه وسیع pH ترکیب، به شدت نامحلول $Fe(OH)_2$ است. این نتایج با مطالعات قبلی در مورد تشکیل اکثریت ترکیبات آهن در pH ۵-۹ مطابقت دارد. غلظت آهن در آب یک نقش مهم در حذف آلاینده ها بازی می کند. غلظت و pH گونه های شیمیایی مختلف احتمالی، آهن را در محلول آبی تعیین می کنند (۴۷). اثر هیدروژن رها شده در کاتد، تسهیل پیشرفت تجمع فلوک ها در سطح محلول به شکل گل ضخیم مایل به سفید می باشد. یکی از مکانیسم هایی که در رابطه با تولید هیدروکسیدهای آهن پیشنهاد شده است بدین صورت می باشد (۴۶):

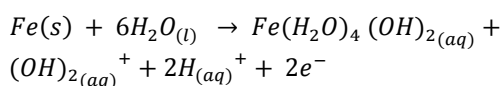


(۳) در مجموع:

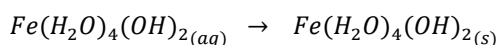


$$4 < pH < 9$$

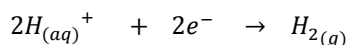
(۴) آند:



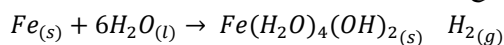
(۵) توده محلول:



(۶) کاتد:



(۷) در مجموع:

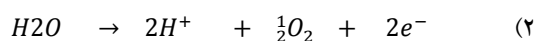
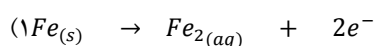


در هر فرایند الکتروشیمیایی، جنس های مختلف الکتروود و نوع جفت الکتروود به عنوان فاکتورهای تأثیرگذار بر عملکرد فرایند تلقی

الکتروکواگولاسیون آهن، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ است، که ارزان بوده و به آسانی قابل دسترس هستند. بنابراین در این مطالعه دو الکتروود آهن و فولاد ضدزنگ در شرایط آزمایشگاهی یکسان آزمایش شدند. واضح است، هر دو الکتروود به کار رفته، عملکرد تقریباً مشابهی در کاهش سرب دارند. با افزایش زمان میزان حذف با الکتروود آهن به طور جزئی نسبت به الکتروود فولاد ضدزنگ افزایش یافته است. نمونه آب تصفیه شده با الکتروود آهن و فولاد ضد زنگ ابتدا سبز رنگ و سپس زرد و کدر شد. رنگ های سبز و زرد می تواند ناشی از گونه های آهن دو و سه تولید شده در مدت الکتروولیز باشد که به طور معلق در محلول باقی مانده و همچنین می توانند یون های سرب را از طریق مرکب سازی یا جذب الکتروستاتیک به دنبال انعقاد حذف کند. مطالعات مشابهی توسط Chen و همکاران در مورد حذف روغن گریس از فاضلاب رستوران توسط الکتروکواگولاسیون و Zaied و همکاران در تصفیه الکتروکواگولاسیون آب سیاه ناشی از صنعت کاغذسازی انجام شده است. آنها این تغییر رنگ را بدین صورت شرح دادند که تغییر رنگ، ناشی از اکسید شدن تدریجی یون های آهن ۲ تولید شده از طریق تجزیه الکتریکی آند در حضور اکسیژن محلول می باشد. (۴۵، ۴۶). لازم به ذکر است، الکتروود آهن و فولاد ضد زنگ در شرایط قلیایی از نظر pH بهترین کارایی را داشتند. از سوی دیگر از نظر میزان مصرف انرژی الکتریکی و الکتروود قربانی که بر میزان هزینه فرایند تأثیر می گذارد الکتروود آهن کارآمدتر از الکتروود فولاد ضدزنگ بود (۱۲). ترکیبات هیدروکسید آهن بعد از اکسیداسیون اولیه در آند تشکیل شده و غالب ترین گونه آن در

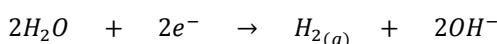


مطمئن ممکن است در عمل برای کاربرد خاص، کارآمدتر یا اقتصادی تر باشد. بر خلاف این، El-Naas و همکاران در تصفیه فاضلاب پالایشگاه عملکرد بهتری برای آلومینیوم در مقایسه با آهن به عنوان الکتروود در فرایند EC مشاهده کردند (۳۲). بنابراین آرایش و جنس بهتر آند به شدت بستگی به نوع آلاینده و شرایط بهره برداری دارد. در سلول الکتروکواگولاسیون با آراستن الکتروود بهتر واکنش به صورت زیر اتفاق می افتد (۴۹):
واکنش های آندی:

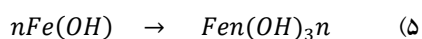
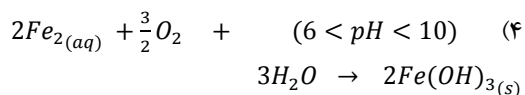


واکنش کاتدی:

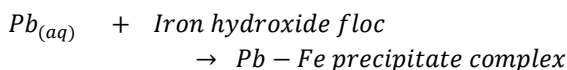
(۳)



واکنش های توده مایع:

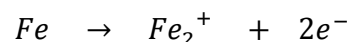


حذف سرب:



بنابراین مکانیسم اصلی در حذف سرب از فاضلاب توسط فرایند الکتروکواگولاسیون ممکن است شامل اکسیداسیون آهن به یون های فروس و الکترولیز همزمان آب در سطح آند باشد که منجر به تولید اکسیژن می شود، اکسیداسیون یون های فروس به فریک از

می شوند، از این رو انتخاب جفت الکتروود مناسب مهم است. در این مطالعه برای تعیین جفت الکتروود بهینه میله های آهن و فولاد ضدزنگ در دو ترکیب مختلف آهن - آهن و فولاد - فولاد در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان دادند که جفت الکتروود آهن-آهن کارایی بالاتری در حذف سرب دارد. در جریان متناوب برای سرب به میزان ۹۶/۷٪ در دانسیته جریان بهینه 6mA/cm^2 و زمان واکنش بهینه ۳۰min بود و در جریان مستقیم برای سرب برابر ۹۷/۲٪ در دانسیته جریان بهینه 6mA/cm^2 و زمان واکنش بهینه ۴۰min حاصل شد. این راندا بالا برای جفت الکتروود آهن-آهن به واکنش شیمیایی که در آند اتفاق می افتد نسبت داده می شود:



در مرحله آغازی یون های آهن کواگولانت های بسیار کارآمدی برای لخته شدن ذرات هستند. از واکنش بالا می توان جرم معادل الکتروشیمیایی را برای Fe محاسبه کرد. بنابراین جرم معادل الکتروشیمیایی برای آهن 1041mg/Ah است که این باعث می شود وقتی بار الکتریکی یکسانی عبور می کند کواگولانت های بیشتری از نظر تئوری از آندهای آهن تولید شود. این پدیده می تواند دلیلی برای کارایی حذف بیشتر الکتروودهای آهن باشد (۴۸). کارایی بالاتر آرایش آهن-آهن می تواند به گرادیان بیشتر پتانسیل الکتروود و در نتیجه پتانسیل اکسیداسیون بیشتر بین آند- کاتد در مقایسه با دیگر آرایش ها نسبت داده شود. این پدیده منجر به تولید کواگولانت بیشتر و بهبود درصد حذف آلاینده ها می شود (۳۲). نتایج حاکی از آن است که یک آرایش الکتروود



بر آند می شود. این پدیده باعث ایجاد مقاومت خارجی می شود که با افزایش فاصله بین الکترودها افزایش می یابد. بنابراین بعد از مدتی جریان بهره برداری کاهش می یابد و برای ثابت نگه داشتن جریان ولتاژ بایستی افزایش یابد. این پدیده منجر به افزایش مقاومت می شود. بنابراین افت اهمیت افزایش یافته که در شروع از اکسیداسیون آندی جلوگیری می کند. با کاهش اکسیداسیون آندی، تعداد کاتیون ها در آند نیز کاهش می یابد. این کاتیون ها مسئول تشکیل کواگولانت هستند. بنابراین با افزایش فاصله بین الکترودها از ۱۰mm میزان تجمع ذرات معلق و به همان میزان جذب سطحی آلاینده ها کاهش می یابد. این پدیده ممکن است باعث کارایی حذف پایین در فاصله زیاد بین الکترودها شود. حداقل فاصله بین الکترودها مقاومت کمتر بوده که باعث تسهیل فرایند الکترولیز و بهبود حذف سربی شود (۳۳).

فرایند الکتروکواگولاسیون یک روش تصفیه الکتروشیمیایی است که از طریق تحرک یون ها با کاربرد الکتروسیسته تحقق می یابد. مدت این فرایند یک محیط پایدار محلول برای تحرک یون ها بسیار کارآمد خواهد بود. اختلاط محیط باعث آشفتگی تحرک یون و مصرف بیهوده مقداری الکتروسیسته خواهد شد (۵۰). سرعت های اختلاط بالا نیز یون ها را در جهت الکترودها قرار داده که منجر به تشکیل محصولات بیشتر و جداسازی نامناسب رسوب نمک های آن می شود. بنابراین در این مطالعه برای رسیدن به رسوب نسبتاً چسبنده اما قابل حذف، ۲۰۰rpm به عنوان سرعت اختلاط بهینه انتخاب شد. درصد حذف سرب با افزایش سرعت اختلاط تا ۲۰۰rpm به طور معنی داری افزایش می یابد که به دلیل

طریق واکنش با مولکول های اکسیژن و تشکیل هیدروکسید، پلی هیدروکسید، پلی هیدروکسی اکسید آهن رسوب شونده، میباشد (۴۸، ۴۹).

تأثیر فاصله بین الکترودها با هدف حذف بهتر آلاینده ها مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش فاصله بین الکترودها، جریان الکتریکی کاهش پیدا می کند و برای رسیدن به دانسیته جریان مطمئن ولتاژ بایستی افزایش یابد. در این مطالعه فاصله بین الکترودها ۱۰mm انتخاب شد. این فاصله انتخاب شده کارایی حذف را افزایش می دهد (نمودار ۵). این راندمان بالا احتمالاً به دلیل اثرات الکتروستاتیک وابسته به فاصله بین الکترودها می باشد. بنابراین با افزایش این فاصله، اثر الکتروستاتیک کمتر شده، حرکت یون های تولیدی آهسته تر شده و فرصت بیشتری برای تجمع و تولید لخته دارند. به عبارت دیگر کاهش راندمان مشاهده شده با افزایش فاصله، ناشی از کاهش غلظت موضعی و جاذبه الکتروستاتیک بوده که خود ممکن است باعث جانشین سازی آهسته تر یون های تشکیل شده در مدت الکترولیز و تسهیل لخته سازیشان شود (۴۲). در مطالعات مشابه توسط Nanseu-Njiki و همکاران در حذف جیوه از آب توسط الکتروکواگولاسیون، EI-Naas و همکاران در ارزیابی الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب پالایشگاه نفت و Modirshahla و همکاران در حذف نیتروفلن از محلول های آبی توسط الکتروکواگولاسیون رفتار مشابهی مشاهده شده بود (۴۶، ۴۲، ۳۲). همچنین در فرایند EC اکسیداسیون آندی با کاربرد ولتاژ برای الکترودها آغاز شده و گذر زمان، منجر به تشکیل یک فیلم بسیار نازک هیدروکسیدهای فلزی



تولیدی با افزایش کارایی حذف سرب از فاضلاب افزایش می یابد. همانطور که دانسته جریان افزایش می یابد تجزیه آندی به طور مطلوب صورت گرفته و باقیمانده لجن فلزی افزایش یافته و یون های سرب از طریق هم ترسیبی یا جذب سطحی بر لجن فلزی به طور مؤثری حذف می شوند. مقادیر لجن در این فرایند در هر دو جریان متناوب و مستقیم با کاربرد الکترودهای آهن و فولاد ضدزنگ بدست آمد. در جریان متناوب با الکتروده آهن، بیشترین لجن در دانسته جریان بهینه در حذف سرب 0.081 kg/m^3 و با الکتروده فولاد 0.069 kg/m^3 تولید شد. بیشترین لجن در جریان مستقیم با کاربرد الکتروده آهن و فولاد ضدزنگ در دانسته جریان بهینه حذف سرب 0.088 kg/m^3 و 0.081 تولید شد. به نظر می رسد که پیوند هیدروکسیدهای آهن از نظر شیمیایی یا فیزیکی با آب بیشتر از پیوند هیدروکسیدهای فولاد می باشد (۲۵، ۲۸).

در مطالعه حاضر تلاش شد تا قابلیت کاربرد روش الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب باتری سازی مورد بررسی قرار گیرد. تأثیر متغیرهایی از قبیل دانسته جریان، نوع الکتروده، آرایش و فاصله بین الکترودها، زمان الکترولیز و pH فاضلاب بر حذف سرب مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که EC می تواند به نحو مؤثری یون های فلزی را توسط فلوک های هیدروکسید آهن و فولاد به عنوان جاذب، به میزان بسیار بالایی از فاضلاب کاهش دهد. سرب از طریق ترسیب شیمیایی هیدروکسیدها توسط یون های هیدروکسید تشکیل شده در کاتد از طریق الکترولیز آب و از طریق هم ترسیبی با هیدروکسیدهای آهن و فولاد ضدزنگ حذف شدند. کارایی حذف با افزایش دانسته جریان به علت افزایش میزان تشکیل فلوک های

تشکیل و اتصال فلوک ها به هم و متعاقب آن ته نشینی آسان تر می باشد. در سرعت اختلاط بیش از 200 rpm انتقال خارجی جرم بسیار ناچیز می شود یا قابل چشم پوشی است (۳۶، ۴۲). بر خلاف این، در مطالعه Sirajuddin و همکاران در بازیابی الکترولیتیکی نمک های کروم از فاضلاب دباغی سرعت اختلاط 500 rpm به عنوان مقدار بهینه حاصل شد (۵۱)، در حالیکه در مطالعه Ilhan و همکاران با تصفیه شیرابه توسط الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی و آهنی سرعت اختلاط 200 rpm به عنوان مقدار بهینه حاصل شد (۵۰). همچنین با کاربرد الکترودهای میله ای به جای مسطح امکان جای دادن تعداد بیشتری الکترودهای فضای راکتور فراهم شد. از طرفی عمل اختلاط در مقایسه با حالتی که الکترودها مسطح و کنار هم باشند بهتر انجام گرفت و به علت تولید مقدار بیشتری لخته هیدروکسید فلزی در زمان معین، زمان لازم برای انجام فرآیند کوتاه شده و مشکلات بهره برداری کاهش می یابد (۵۲، ۱۷).

تولید لجن، یکی دیگر از پارامترهای مهم در توصیف فرایند EC می باشد. مقدار لجن تولیدی در مدت EC، با صنعت تصفیه در ارتباط است. این نکته با مشکل تولید و دفع جامدات زائد از این فرایند مرتبط می باشد. در این فرایند بسیاری از آلاینده ها جدا شده و بر سطح فاضلاب به شکل لجن شناور می شوند. لجن تولیدی از EC متناسب با ویژگی های فاضلاب خام، جامدات قابل ته نشینی و مواد ناپایدار شده از طریق انعقاد و غلظت کواگولانت و همچنین متناسب با دانسته جریان و زمان ماند می باشد (۲۶). مقدار لجن تولیدی در این مطالعه در نمودار ۳ نشان داده شده است. مقدار لجن



در جریان متناوب بدست آمد. همچنین در جریان متناوب میزان لجن کمتری نسبت به جریان مستقیم تولید شد.

تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می دانند، از معاونت محترم تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی زاهدان که با تصویب طرح مذکور، راه را برای انجام این تحقیق هموار نمودند تشکر نمایند (شماره طرح: ۲۴۵۸-۹۰).

هیدروکسید آهن و فولاد افزایش می یابد. نتایج نشان داد که در جریان متناوب با الکتروکواگولاسیون فولاد حذف بهینه سرب در دانسیته جریان 6mA/cm^2 و ۸ حاصل شد که به ترتیب برابر با ۹۶/۷٪ و ۹۵/۲٪ بود. در جریان مستقیم حذف بهینه سرب با الکتروکواگولاسیون برابر با ۹۷/۲٪ و با الکتروکواگولاسیون فولاد ضدزنگ برابر با ۹۳/۲٪ در دانسیته جریان 6mA/cm^2 حاصل شد. زمان بهینه الکترولیز با الکتروکواگولاسیون آهن ۳۰min و با الکتروکواگولاسیون فولاد ضد زنگ ۴۰min بود. کمترین هزینه بهره برداری از نظر مصرف انرژی و الکتروکواگولاسیون نیز

References

- 1-Afkhami A, Saber-Tehrani M, Bagheri H. Simultaneous removal of heavy-metal ions in wastewater samples using nano-alumina modified with 2,4-dinitrophenylhydrazine. *Journal of Hazardous Materials* 2010; 181(1-3): 836-44.
- 2-Ahluwalia S S, Goyal D. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology* 2007; 98(12): 2243-57.
- 3-Acharya J, Sahu JN, Mohanty CR, et al. Removal of lead(II) from wastewater by activated carbon developed from Tamarind wood by chloride activation. *Chemical Engineering Journal* 2009; 149(1-3): 249-62.
- 4-Borbély G, Nagy E. Removal and nickel ions by complexation-membrane filtration process from industrial wastewater. *Desalination journal* 2009; 240(1-3): 218-26.
- 5-Kaczala F, Marques M, Hogland W. Lead and vanadium removal from a real industrial wastewater by gravitational settling/sedimentation and sorption onto *Pinus sylvestris* sawdust. *Journal of Bioresource Technology* 2009; 100(1): 235-43.
- 6-Kazemipour M, Ansari M, Tajrobehkar S, et al. Removal of lead, cadmium, zinc, and copper from industrial wastewater by carbon developed from walnut, hazelnut, almond, pistachio shell, and apricot stone. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 150(2): 322-7.
- 7-Hua M, Zhang S, Pan B, et al. Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: A review. *Journal of Hazardous Materials* 2012; 211-212: 317-31.



- 8-Kaminari NMS, Ponte MJJS, Ponte HA ,et al.Study of the operational parameters involved in designing a particle bed reactor for the removal of lead from industrial wastewater — central composite design methodology.Chemical Engineering Journal 2005; 105(3):111-5.
- 9-Salamatinia B KamaruddinAH, Abdullah AZ.Regeneration and reuse of spent NaOH-treated oil palm frond for copper and ---removal from wastewater.Chemical Engineering Journal 2010; 156(1): 141-5.
- 10-Sekomo CB, Rousseau DPL, Saleh SA, et al.Heavy metal removal in duckweed and algae ponds as a polishing step for textile wastewater treatment.Ecological Engineering 2012; 44: 102-110.
- 11-Shawabkeh R, Al-Harashsheh A, Hami M, et al.Conversion of oil shale ash into zeolite for cadmiumand lead removal from wastewater.Fuel 2004; 83(7–8): 981-985.
- 12-Bayramoglu M, Kobya M, Eyvaz M, et al.Technical and economic analysis of electrocoagulation for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater.Separation and Purification Technology 2006; 51(3): 404-8.
- 13-Boroski M, Rodrigues AC, Garcia JC, et al.Combined electrocoagulation and TiO₂ photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries.Journal of Hazardous Materials 2009; 162(1): 448-54.
- 14-Bouamra F, Drouiche N, Ahmed DS, et al.Treatment of Water Loaded With Orthophosphate by Electrocoagulation.Procedia Engineering 2012;33: 155-62.
- 15-Chavalparit O,Ongwandee M.Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology.Journal of Environmental Sciences 2009; 21(11): 1491-96.
- 16-Drouiche N, Aoudj S, Hecini M, et al.Study on the treatment of photovoltaic wastewaterusing electrocoagulation: Fluoride removal with aluminium electrodes Characteristics of products.Journal of Hazardous Materials 2009; 169(1–3): 65-9.
- 17-Malakootian M, Mansoorian HJ,Moosazadeh M.Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water.Desalination 2010; 255(1–3): 67-71.
- 18-Akyol A.Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation.Journal of Desalination 2012;285: 91-9.
- 19-Belkacem M, Khodir M, Abdelkrim S.Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique. Journal of Desalination 2008; 228(1–3):245-54.



- 20-Pallier V, Feuillade-Cathalifaud G, Serpaud B. Influence of organic matter on arsenic removal by continuous flow electrocoagulation treatment of weakly mineralized waters. *Chemosphere* 2011; 83(1): 21-8.
- 21-Ricordel C, Darchen A, Hadjiev D. Electrocoagulation–electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. *Journal of Separation and Purification Technology* 2010; 74(3): 342-7.
- 22-Phalakornkule C, Sukkasem P, Mutchimsattha C. Hydrogen recovery from the electrocoagulation treatment of dye-containing wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010; 35(20):10934-43.
- 23-Şengil İA, Kulaç S, Özacar M. Treatment of tannery liming drum wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 167(1–3): 940-6.
- 24-Yetilmmezsoy K, İlhan F, Sapci-Zengin Z, et al. Decolorization and COD reduction of UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: A post-treatment study. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 162(1): 120-32.
- 25-Zodi S, Louvet JN, Michon C, et al. Electrocoagulation as a tertiary treatment for paper mill wastewater: Removal of non-biodegradable organic pollution and arsenic. *Journal of Separation and Purification Technology* 2011; 81(1): 62-8.
- 26-Koby M, Ulu F, Gebologlu U, et al. Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes. *Journal of Separation and Purification Technology* 2011; 77(3): 283-93.
- 27-Yilmaz AE, Boncukcuoğlu R, Kocakerim MM, et al. Boron removal from geothermal waters by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 153(1–2): 146-51.
- 28-Koby M, Demirbas E, Dedeli A, et al. Treatment of rinse water from ---phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials* 2010; 173(1–3): 326-34.
- 29-Vasudevan S, Lakshmi J, Sozhan G. Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water. *Journal of Hazardous Materials* 2011; 192(1): 26-34.
- 30-Vasudevan S, Lakshmi J, Sozhan G. Studies on the Al–Zn–In-alloy as anode material for the removal of chromium from drinking water in electrocoagulation process. *Desalination* 2011; 275(1–3): 260-8.
- 31-Katal R, Pahlavanzadeh H. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Desalination* 2011; 265(1–3): 199-205.



- 32-Naas MH, Al-Zuhair S, Al-Lobaney A, et al. Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. *Journal of Environmental Management* 2009; 91(1): 180-5.
- 33-Ghosh D, Solanki H, Purkait MK. Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 155(1–2): 135-43.
- 34-Merzouk B, Gourich B, Sekki A, et al. Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation–electroflotation technique: A case study. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 164(1): 215-22.
- 35-Vasudevan S, Lakshmi J, Jayaraj J, et al. Remediation of phosphate-contaminated water by electrocoagulation with aluminium, aluminium alloy and mild steel anodes. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 164: 1480-6.
- 36-Golder AK, Samanta AN, Ray S. Removal of phosphate from aqueous solutions using calcined metal hydroxides sludge waste generated from electrocoagulation. *Separation and Purification Technology* 2006; 52: 102-9.
- 37-Yıldız YŞ, Koparal AS, Keskinler B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal* 2008; 138(13) :63-72.
- 38-Cañizares P, Jiménez C, Martínez F, et al. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 163(1): 158-64.
- 39-Escobar C, Soto-Salazar C, Inés Toral M. Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater. *Journal of Environmental Management* 2006; 81(4): 384-91.
- 40-Heidmann I, Calmano W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 152(3):934-41.
- 41-Mouedhen G, Feki M, Wery MDP, et al. Behavior of aluminium electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 150(1): 124-35.
- 42-Modirshahla N, Behnajady MA, Mohammadi-Aghdam S. Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4-nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 154(1–3): 778-86.



- 43-Abdelwahab O, Amin NK, El-Ashtoukhy ESZ. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 163(2–3):711-6.
- 44-Chou WL, Huang YH. Electrochemical removal of indium ions from aqueous solution using iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 172(1): 46-53.
- 45-Zaied M, Bellakhal N. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 163(2–3): 995-1000.
- 46-Nanseu-Njiki CP, Tchamango SR, Ngom PC, et al. Mercury(II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 168(2–3): 1430- 36.
- 47-Linares-Hernández I, Barrera-Díaz C, Roa-Morales G, et al. Influence of the anodic material on electrocoagulation performance. *Chemical Engineering Journal* 2009; 148(1):97-105.
- 48-Chou WL, Wang CT, Huang KY. Effect of operating parameters on indium (III) ion removal by iron electrocoagulation and evaluation of specific energy consumption. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 167(1–3): 467-74.
- 49-Moussavi G, Majidi F, Farzadkia M. The influence of operational parameters on elimination of cyanide from wastewater using the electrocoagulation process. *Journal of Desalination* 2011; 280(1–3):127-33.
- 50-Ilhan F, Kurt U, Apaydin O, et al. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 2008; 154(1–3):381-89.
- 51-Sirajuddin LK, Lutfullah G, et al. Electrolytic recovery of chromium salts from tannery wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 2007; 148(3):560- 65.
- 52-Mansoorian HJ, Rajabizadeh A, Bazrafshan E, et al. Practical assessment of electrocoagulation process in removing nickel metal from aqueous solutions using iron rod electrodes. *Journal of Desalination and Water Treatment* 2012; 44:29-35.



Efficiency of the Electrocoagulation Process with Alternating and Direct Current for Eliminating Lead from Battery Industry Wastewater by Using Metal Iron and Stainless Steel Electrodes Jafari Mansoorian H(M.Sc)¹, Mahvi AH(Ph.D)², Bazrafshan E(Ph.D)³, Jonidi Jafari A(Ph.D)⁴

1. Corresponding Author: Instructor, Health Promotion Research Center, Zahedan University of Medical Sciences, Zahedan, Iran
2. Assistant Professor, Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Health Promotion Research Center, Zahedan University of Medical Sciences, Zahedan, Iran
4. Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

Introduction: Lead and zinc are among the most poisonous unnecessary heavy metals available in the environment and are among the first grade poisonous pollutants. In this study the efficiency of electrocoagulation process using alternating and direct current and iron and stainless steel rods for elimination of lead and zinc from battery industrial wastewater has been investigated.

Methods: Wastewater samples were taken from the battery building industry. In the electrochemical cell, metal iron and stainless steel rod electrodes were used and were connected together serially and unipolarly to the feeding source.

Results: By using alternating current, the elimination of lead and zinc was done successfully with iron electrodes and in the density of 6 mA/cm² which were 96.7% and 95.2% and with stainless steel electrodes in density of 8 mA/cm² which were 93.8% and 93.3% respectively. By using direct current, the optimum elimination of lead and zinc with iron electrodes leveled at 97.2% and 95.5% and in density of 6mA/cm² and with stainless steel electrodes was equal to 93.2% and 92.5% in density of 8mA/cm² respectively.

Conclusion: The results from this research are in line with the results from other studies. According to the results, this process can be applied as a suitable method for a wide use of electrolyte reactors in industrial scale and for eliminating lead and zinc from aqueous environments.

Keywords: Lead removal, Electrocoagulation, Direct Current, Alternating Current, Leads and Zinc, Battery Wastewater, Iron and Stainless Steel Electrode