

## مقایسه کارایی الکترودهای آلومینیومی و آهنی از لحاظ راندمان و هزینه در حذف فسفات، نیتрат و COD از پساب یک واحد رختشویی خانه به روش انعقاد الکتریکی

مرضیه رضوی<sup>۱</sup>، محسن سعیدی<sup>۲</sup>، ابراهیم جباری<sup>۳</sup>

دریافت: ۹۱/۰۴/۳۱ پذیرش: ۹۱/۰۷/۲۴

### چکیده

**زمینه و هدف:** در این تحقیق تصفیه پذیری پساب یک واحد خشک شویی و لباس شویی به روش انعقاد الکتریکی و با استفاده از دو جفت الکتروده آلومینیومی و آهنی بررسی شد. روش انعقاد الکتریکی یک روش نوین در تصفیه انواع پساب است که در سال‌های اخیر به صورت ویژه‌ای مورد ملاحظه محققین قرار گرفته است. اعمال جریان برق مستقیم به دو یا چندین الکتروده فلزی مناسب در یک راکتور ناپیوسته حاوی پساب، سبب تولید لخته‌های هیدروکسید فلزی می‌گردد.

**روش بررسی:** در این روش تغییرات شرایط عملیاتی شامل pH، فاصله بین الکترودها، شدت جریان الکتریکی و جنس الکترودها مورد بررسی قرار گرفت و با تغییر pH از ۳ تا ۷ و هم‌چنین ۹ راندمان حذف فسفات، نیترات و COD ثبت شد.

**یافته‌ها:** مطابق با نتایج به دست آمده در این تحقیق الکتروده آلومینیومی عملکرد بهتری در حذف فسفات و الکتروده آهنی نتایج بهتری در حذف نیترات و COD از خود نشان داد. بیشترین میزان حذف فسفات در pH=۷ و با استفاده از الکتروده آلومینیومی برابر با ۹۹/۹۳٪ به دست آمد و این در حالی است که بیشترین میزان حذف نیترات توسط الکتروده آهنی و در pH=۹ که برابر با ۹۷/۶۲٪ و بالاترین میزان حذف COD توسط همین الکتروده برابر با ۸۰٪ و در pH=۶ تعیین گردید. هم‌چنین در این تحقیق به مقایسه نتایج هزینه‌های عملیاتی در استفاده از این دو الکتروده پرداخته شد و نشان داده شد که نسبت هزینه‌ها در شرایط استفاده از الکتروده آلومینیومی به هزینه‌ها در شرایط استفاده از الکتروده آهنی متفاوت است. **نتیجه‌گیری:** اگرچه دستیابی به مقادیر قابل توجه حذف نیترات، فسفات و COD، با استفاده از هر دو نوع الکتروده میسر است، اما برآورد هزینه‌های عملیاتی جهت تصفیه پساب‌های حاوی فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکتروده آهنی از نظر دستیابی به استانداردهای زیست محیطی نتایج بهتری نسبت به الکتروده آلومینیومی ارائه می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** انعقاد الکتریکی، راندمان حذف، فسفات، نیترات، COD، هزینه عملیاتی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران (محیط زیست)، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

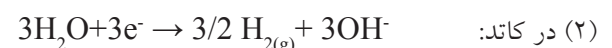
۲- (نویسنده مسئول): دکترای عمران (محیط زیست)، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران [msaeedi@iust.ac.ir](mailto:msaeedi@iust.ac.ir)

۳- دکترای عمران (آب)، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

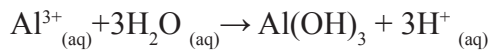
## مقدمه

پساب رخت‌شوی‌خانه‌ها همواره حاوی مقادیر زیادی سفید کننده (Bleach)، نرم‌کننده‌ها و سورفکتانت‌هاست (surfactant) (۱). امروزه قوانین زیست محیطی سخت گیرانه‌ای در ارتباط با کاهش سورفکتانت‌ها در پساب خروجی رخت‌شوی‌خانه‌ها وضع گردیده است. در گزارشی که در خصوص مواد موجود در پساب رخت‌شوی‌خانه‌ها ارائه گردیده است، به وجود مقادیر زیادی از روغن‌های معدنی، فلزات سنگین و مواد خطرناکی که COD در حدود ۲۰۰۰-۱۲۰۰ mg/L دارند، اشاره کرده و در حالی که COD پساب بیمارستان‌ها در حدود ۱۲۰۰-۴۰۰ mg/L و پساب هتل‌ها در حدود ۲۵۰۰-۶۰۰ mg/L است (۲). در سال‌های اخیر تحقیق بر روی استفاده از جریان برق در تصفیه آب و فاضلاب به دلیل سازگاری با محیط زیست، موسوم به روش انعقاد الکتریکی توسعه یافته است (۳ و ۴). فرایند انعقاد الکتریکی یک واکنش الکترولیز است که اجرای واکنش‌های الکتروشیمیایی در آن مستلزم اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب بین دو یا چند الکترود (هم‌چون آهن، آلومینیوم یا تیتانیوم) جهت انجام واکنش در سطح مشترک الکترود و محلول، از طریق یک منبع الکتریکی خارجی است. در این فرایند عامل حذف آلاینده‌ها که همان لخته‌های هیدروکسید آهن یا آلومینیوم هستند، با اعمال جریان الکتریکی به الکترودهای صفحه‌ای شناور در نمونه مورد تصفیه تولید می‌شوند (۵). از ویژگی‌های این روش می‌توان به قابلیت استفاده برای تصفیه انواع پساب، هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری پایین، سازگاری با محیط زیست، زمان ماند پایین، بهره‌برداری آسان، عدم نیاز به افزودنی‌های شیمیایی جهت انعقاد اشاره کرد که به دنبال آن تولید اندک لجن، تولید آبی بی‌رنگ، بی‌بو و تمیز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عبارت دیگر واکنش‌های الکتروشیمیایی وابستگی کمی به شرایط فاضلاب داشته و تا زمانی که منبع انرژی الکترودها تامین می‌شود، می‌تواند ادامه یابد (۷-۵). مکانیسم فرایند انعقاد الکتریکی در صورت استفاده از الکترود آلومینیومی یا الکترود آهنی به شکل زیر است:

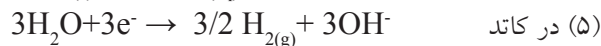
برای الکترود آلومینیومی



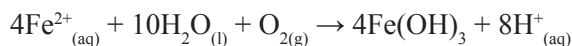
(۳) در محلول:



برای الکترود آهنی



(۶) واکنش در محلول



روش انعقاد الکتریکی، ترکیبی از اکسیداسیون، لخته‌سازی و شناورسازی است. در واقع انعقاد الکتریکی در سه گام صورت می‌گیرد: در گام اول به وسیله اکسیداسیون آند لخته‌ها تولید می‌شوند. سپس آلاینده‌های موجود ناپایدار گشته و در گام سوم مواد ناپایدار شده به صورت مجتمع (لخته) در می‌آیند (۸). در تحقیق حاضر اثر شرایط بهینه عملیاتی از قبیل pH اولیه، فواصل الکترودها، شدت جریان الکتریکی و زمان ماند با استفاده از الکترودهای آلومینیومی و آهنی، برای حذف هم‌زمان سه فاکتور فسفات، نترات و COD از نمونه پساب واقعی یک واحد رخت‌شوی‌خانه، با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین مقایسه هزینه‌های عملیاتی برای استفاده از دو الکترود آلومینیومی و آهنی ارائه شده است.

## مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر یک تحقیق آزمایشگاهی است که به منظور بررسی و مقایسه اثر شرایط عملیاتی از جمله pH، فاصله بین الکترودها و شدت جریان الکتریکی و هم‌چنین جنس الکترودها، بر روی حذف هم‌زمان سه فاکتور فسفات، نترات و COD از پساب واقعی واحد خشک‌شویی و لباس‌شویی واقع در دانشگاه علم و صنعت ایران صورت گرفته است. در جدول ۱ مشخصات عمومی پساب خام ارائه گردیده است. انتقال نمونه‌ها در ظروف پلی اتیلنی صورت گرفت. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه بلافاصله به انجام آزمایش پرداخته شد. هم‌چنین در صورت نیاز به استفاده مجدد از پساب، نمونه تهیه

جدول ۱: مشخصات پساب خام واحد رختشوی‌خانه

پارامتر	واحد	مقدار اولیه	استفاده ملی تخلیه پسابها به خط جلاب
رنگ	-	حماکتري	-
درجه اسیدی	pH	۴/۱۵-۹/۵۲	۵-۹
صا	°C	۱۹/۸-۲۲	-
ارزیه COD	Mg/l	۱۲۰۰-۲۲۰۰	۶۰ (مطلوبی ۱۰۰)
TDS	NTU	۷۰۹-۸۱۲	-
صلابت الکتریکی	µs/cm	۱۲۵۰-۱۳۸۵	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Mg/l	۲/۵-۱۲	۶ بر حسب فنر
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg/l	۲۳-۶۳	۱۰

شده، در شرایط استاندارد مطابق با دستورالعمل‌های موجود در کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب نگه‌داری شد. در انجام این تحقیق تا حد امکان از استانداردهای معتبر بین‌المللی و در مواردی که دسترسی به استانداردها امکان‌پذیر نبود از مقالات معتبر خارجی استفاده گردید. پس از انجام هر آزمایش تیغه‌های آلومینیومی و آهنی شسته شده و با اسکاچ نرم تمیز شدند تا اثری از آلودگی آزمایش قبلی به مرحله بعد منتقل نگردد. در ضمن وزن تیغه‌ها قبل و بعد از هر آزمایش با ترازوی آزمایشگاهی به دقت اندازه‌گیری شد. این کار به جهت ارزیابی‌های اقتصادی صورت می‌گرفت. برای تنظیم pH از محلول‌های اسید هیدروکلریک و هیدروکسید سدیم در غلظت‌های ۱ N و ۵ استفاده گردید. هم‌چنین در طول مدت زمان آزمایش و در بازه‌های زمانی مشخص، مقادیر ولتاژ، شدت جریان، pH و دما اندازه‌گیری شد. در پایان هر آزمایش راکتور آزمایش تخلیه و سپس با آب و صابون و در نهایت با استفاده از اسید هیدروکلریک یک نرمال شسته شد. راکتور مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها یک بشر به حجم اسمی ۸۵۰ mL و هم‌چنین دو جفت الکتروود از جنس آلومینیوم و آهن به ابعاد ۱۴×۶×۰/۳ cm بود که به یک منبع تولید جریان مستقیم با مدل DAZHENG PS-302D متصل گردید (شکل ۱). و نیز از دو عدد مولتی‌متر جهت اندازه‌گیری شدت جریان عبوری و ولتاژ استفاده شد. جهت اندازه‌گیری مقادیر فسفات، COD از دستگاه

اسپکتروفتومتر پالیتست مدل ۷۱۰۰ و جهت اندازه‌گیری نیترات، از دستگاه اسپکتروفتومتر هچ، مدل UV4500 استفاده شد. جهت انتخاب زمان واکنش، با استفاده از آزمایش‌های مقدماتی زمان تصفیه پساب مشخص شد. بدین منظور آزمایشی با مدت زمان ۱۲۰ min انجام شد و راندمان حذف آلاینده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که از زمان ۶۰ min به بعد تغییر چندانی در کارایی حذف هم‌زمان فسفات، نیترات و COD مشاهده نشد. زمان تصفیه در سایر آزمایش‌ها نیز زمان ۶۰ min انتخاب گردید. در این آزمایش ابتدا به بررسی تاثیر pH در کارایی حذف فسفات، نیترات و COD پرداخته شد و به این منظور آزمایش در pH ۶، مختلف (۳ الی ۷ و ۹) انجام شد و سایر پارامترها اعم از فاصله بین الکتروودها و شدت جریان الکتریکی و زمان ماند ثابت فرض گردید. در مرحله بعد، پس از به دست آوردن pH منکه بیشترین کارایی حذف در آن رخ می‌دهد، سایر پارامترها را ثابت نگه‌داشته و فاصله بین الکتروودها به ۱۵، ۱۰، ۵، ۳ تغییر داده شد. در این مرحله نیز بهترین فاصله بین الکتروودها از نظر حذف آلاینده انتخاب شده و در مرحله بعد شدت جریان الکتریکی تغییر داده شد (درحالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده بودند) و از بین ۴ شدت جریان انتخابی ۲ A، ۱/۵، ۱ و ۰/۵ بهترین شدت جریان الکتریکی از نظر بالاترین کارایی حذف آلاینده انتخاب گردید.



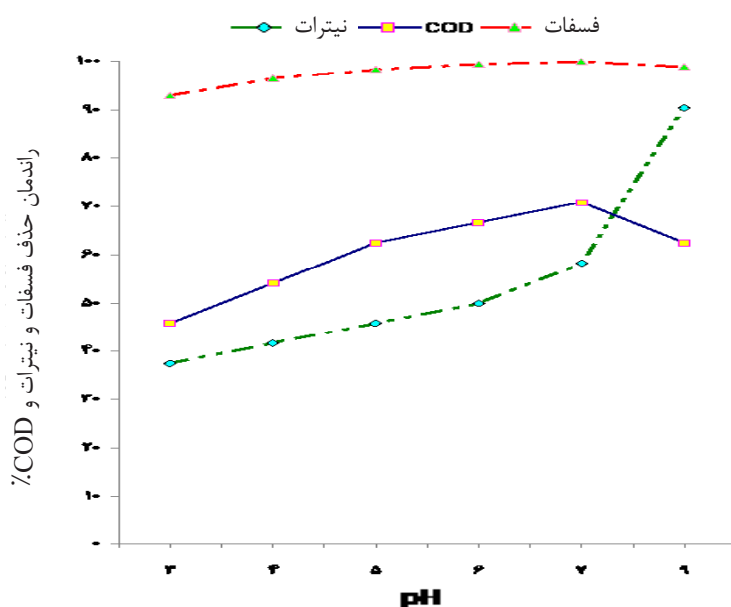
شکل ۱: راکتور انعقاد الکتریکی مورد استفاده در تحقیق حاضر

## یافته‌ها

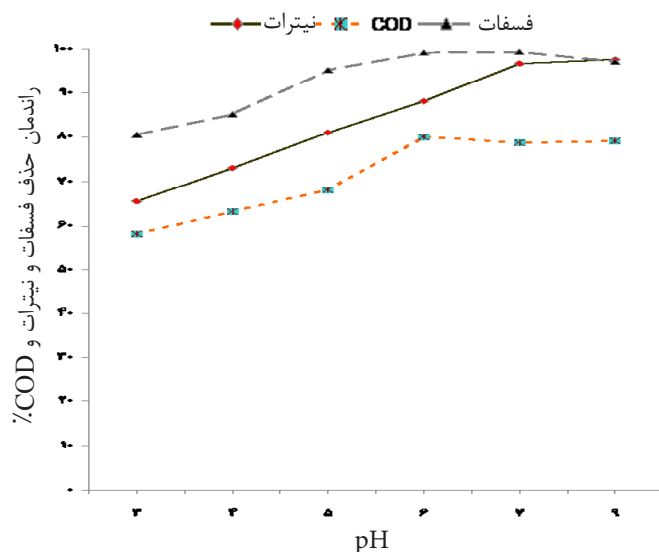
بررسی تاثیر تغییرات pH بر کارایی حذف فسفات، نیتрат و COD و

در این تحقیق آزمایش‌ها در شش pH مختلف انجام گردید. نتایج نشان داد که بیشترین کارایی حذف فسفات در  $pH = 7$  و برای الکتروده آلومینیومی و به میزان ۹۹/۹۳ رخ می‌دهد (شکل ۲). هم‌چنین بیشترین کارایی حذف نیترات در  $pH = 9$  و برای الکتروده آهنی به میزان ۹۷/۶۲٪ به دست آمد. بالاترین میزان کارایی حذف COD نیز در  $pH = 6$  و به میزان ۸۰٪ برای

الکتروده آهنی حاصل شد (شکل ۳). مطابق شکل‌های ۲ و ۳ و هم‌چنین تحقیقات پیشین کاملاً واضح است که حذف فسفات و COD در pH خنثی و اسیدی و حذف نیترات در pH های قلیایی از بالاترین مقدار راندمان حذف برخوردار است. در واقع در pH های اسیدی مقادیری از بارهای مثبت بر سطح خارجی فلز آزاد شده در محیط نمایان گردیده و به این ترتیب جذب آنیون فسفات را افزایش می‌دهد. در pH های بالاتر سطح خارجی فلز آزاد شده در محیط پساب، دارای مقادیری



شکل ۲: مقادیر حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکتروده آلومینیومی و تغییر pH



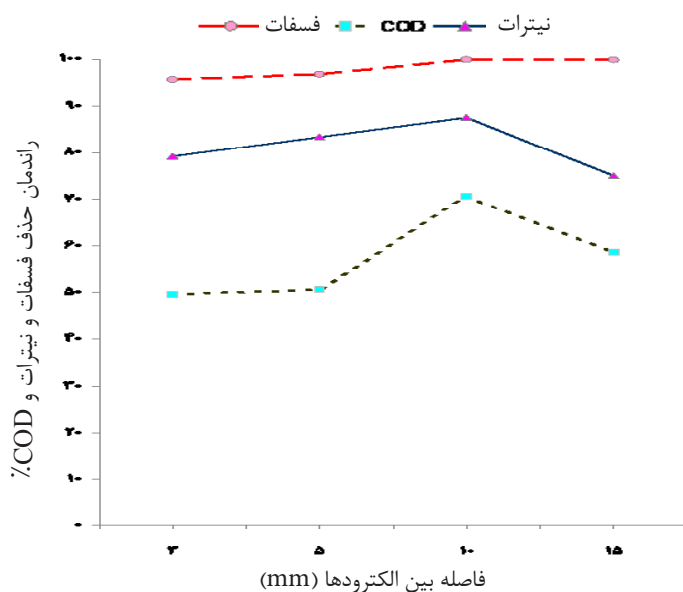
شکل ۳: مقادیر حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکترود آهنی و تغییر pH

حذف فسفات افزایش می‌یابد (شکل ۴ و ۵). بالاترین کارایی حذف فسفات در شرایطی که فاصله الکترودها ۱۰ mm و الکترود مصرفی آلومینیوم بود به دست آمد. بالاترین کارایی حذف نیترات در شرایطی که فاصله بین الکترودها ۱۰ mm و الکترود مصرفی آهن بود حاصل گردید. و نیز بیشترین کارایی حذف COD در شرایطی که فاصله بین الکترودها ۱۵ mm و الکترود مصرفی از جنس آهن بود به دست آمد. با توجه

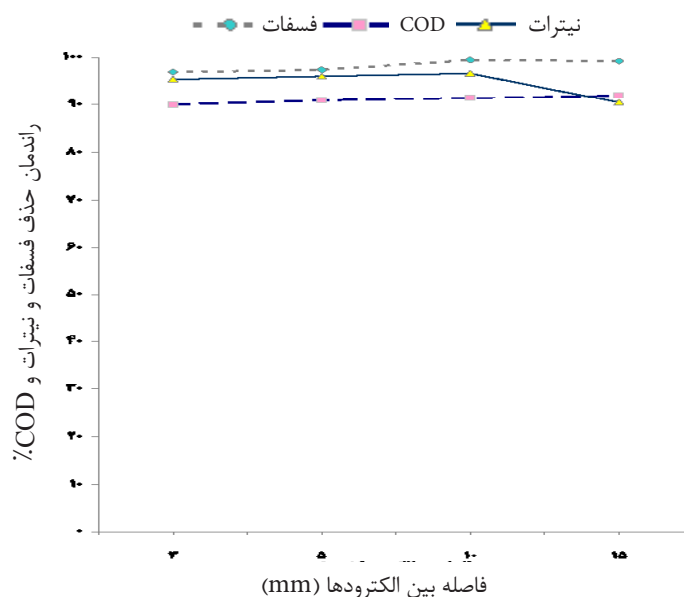
از بارهای منفی نیز می‌شود و همین عامل سبب می‌گردد که نیروی دافعه ای با آنیون‌های فسفات پیدا کرده و مانع از ایجاد واکنش و ترکیب این دو گردد (۹).

بررسی تاثیر فاصله بین الکترودها بر کارایی حذف فسفات، نیترات و COD

همچنین نتایج حاصل از بررسی اثر تغییرات فواصل بین صفحات الکترودها نشان داد که با افزایش فاصله از ۱۰-۳ mm، کارایی



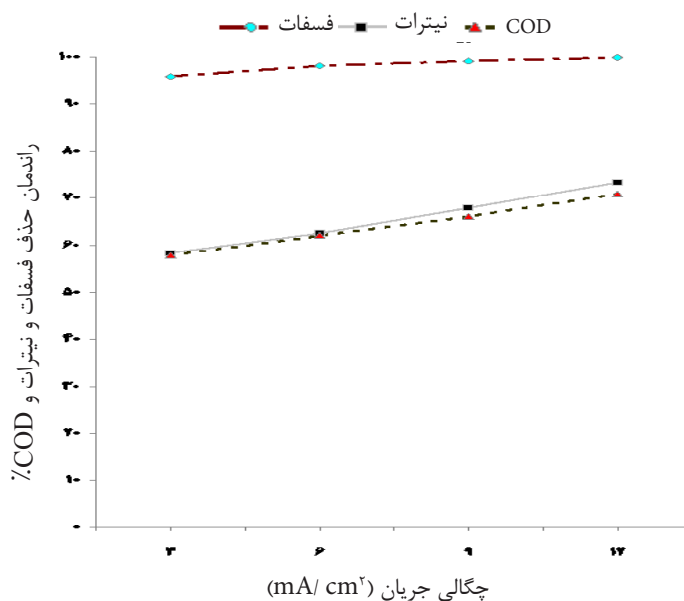
شکل ۴: مقادیر حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکترود آلومینیومی و تغییر فاصله بین الکترودها



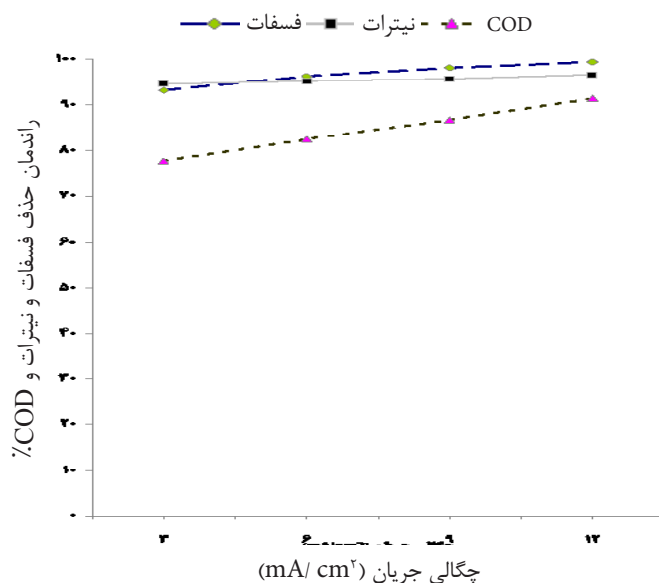
شکل ۵: مقادیر حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکتروده آهنی و تغییر فاصله بین الکترودها

غلظت عوامل منعقدکننده در پساب افزایش می‌یابد، بنابراین میزان حذف فسفات، نیترات و COD شتاب می‌گیرد. در این تحقیق مشاهده گردید که هرچه میزان شدت جریان الکتریکی افزایش می‌یابد راندمان حذف آلاینده‌های مورد بحث افزایش می‌یابد به گونه‌ای که کمترین میزان حذف فسفات، نیترات و COD برای هر دو الکتروده آهن و آلومینیوم در شدت جریان الکتریکی  $3 \text{ mA/cm}^2$  و بیشترین میزان حذف در  $12 \text{ mA/cm}^2$

به نزدیک بودن مقادیر راندمان به هم و در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری‌ها برای پارامترها می‌توان گفت که تغییر فاصله بین الکترودها تاثیری بر راندمان حذف این پارامترها نداشته است. بررسی تاثیر شدت جریان الکتریکی در کارایی حذف فسفات، نیترات و COD با افزایش شدت جریان و متعاقب آن افزایش در چگالی جریان، تجزیه صفحات آلومینیومی و آهنی افزایش یافته و در نتیجه



شکل ۶: مقادیر حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکتروده آلومینیومی و تغییر شدت جریان الکتریکی



شکل ۷: مقادیر حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکترود آهنی و تغییر شدت جریان الکتریکی

بررسی هزینه‌های عملیاتی جهت تصفیه یک متر مکعب پساب  
هم‌چنین مقادیر محاسبه شده برای هزینه‌های عملیاتی در هر آزمایش به ازای یک متر مکعب پساب در زمان‌های ۱۰ و ۶۰ min واکنش در جدول ۲ برای الکترود آلومینیومی و آهنی گزارش شده است.

رخ می‌دهد (شکل ۷و۶). با افزایش شدت جریان و متعاقب آن افزایش در چگالی جریان، تجزیه صفحات آلومینیومی و آهنی افزایش یافته و در نتیجه غلظت عوامل منعقدکننده در پساب افزایش می‌یابد، بنابراین میزان حذف آلاینده شتاب می‌گیرد. هم‌چنین با افزایش چگالی جریان میزان تولید حباب‌ها افزایش و قطر آنها کاهش می‌یابد. این دو عامل در افزایش کارایی حذف آلاینده توسط حباب‌های گاز هیدروژن بسیار مفید است (۱۰).

جدول ۲: مقایسه هزینه‌های عملیاتی در روش انعقاد الکتریکی در حذف هم‌زمان فسفات، نیترات و COD در زمان ۶۰ min

ردیف	الکترود آهنی					الکترود آلومینیومی				
	نیترات	فسفات	COD	هزینه برق (کWh/m <sup>3</sup> )	هزینه مواد (تومان/m <sup>3</sup> )	نیترات	فسفات	COD	هزینه برق (کWh/m <sup>3</sup> )	هزینه مواد (تومان/m <sup>3</sup> )
۱	۹۵	۹۵	۷۸	۰.۰۳	۱۰۰	۹۷	۹۷	۹۵	۰.۰۳	۱۰۰
۲	۹۶	۹۶	۸۵	۰.۰۳	۱۰۰	۹۸	۹۸	۹۵	۰.۰۳	۱۰۰
۳	۹۷	۹۷	۹۰	۰.۰۳	۱۰۰	۹۹	۹۹	۹۵	۰.۰۳	۱۰۰
۴	۹۸	۹۸	۹۵	۰.۰۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۰.۰۳	۱۰۰

نتیجه افزایش چگالی جریان از  $3 \text{ mA/cm}^2$  به  $12$  و با توجه به مقدار سرعت واکنش ( $k_2$ ) برای الکتروده آلومینیومی، واکنش حذف آلاینده در حدود  $44$  برابر و برای الکتروده آهنی در حدود  $13$  برابر سریع تر صورت می گیرد. این شرایط در حالی است که حجم راکتور ثابت فرض گردد. در غیر این صورت با توجه به سرعت انجام واکنش، می توان از راکتوری با حجم کمتر در شدت جریان کمتر استفاده نمود. هم چنین در تحقیقی که توسط Koparal و همکاران در سال  $2008$  بر روی حذف فسفات از آب آشامیدنی صورت گرفت، نشان داده شد که فرایند جذب فسفات بر سینتیک درجه دوم منطبق است (۱۱). در جدول ۳ مقادیر ثابت سرعت واکنش درجه ۱ و ۲ و هم چنین مقادیر  $R^2$  نمایش داده شده است.

مطابق جدول ۳ و با توجه به مقادیر بالای ضرایب رگرسیون و هم چنین مقادیر بالای سرعت واکنش در حذف فسفات کارایی حذف در شرایط استفاده از الکتروده آلومینیومی نسبت به الکتروده آهنی بیشتر است.

### بحث

**تأثیر تغییرات pH بر حذف فسفات، نترات و COD**  
نتایج نشان می دهد کارایی حذف فسفات، نترات و COD، تابعی از pH اولیه است (۸ و ۱۲ و ۱۳). هم چنین عامل pH به عنوان یکی از فاکتورهای کلیدی بر کارایی حذف آلاینده ها اثرگذار است (۹). بنابر تحقیقات انجام شده لخته های حاصل از اکسیداسیون آلومینیوم و آهن در محیط در حذف

همان طور که از جدول ۲ مشاهده می شود، هزینه های عملیاتی جهت حذف هم زمان سه فاکتور مذکور توسط دو الکتروده آلومینیومی و آهنی ارابه گردیده است. با توجه به این مساله که بیش از  $90\%$  میزان فسفات موجود در پساب در مدت زمان  $10 \text{ min}$  ابتدای آزمایش از محیط حذف گردیده است، پس مقادیر هزینه ها هم در زمان  $10 \text{ min}$  و هم در پایان زمان  $60 \text{ min}$  ارابه شده است. همان طور که ملاحظه می شود هزینه های عملیاتی در هنگام استفاده از الکتروده آلومینیومی در مدت زمان  $60 \text{ min}$  حدود  $3/5$  برابر گران تر از حالتی است که از الکتروده آهنی استفاده شده است. این مساله در حالیکه اگر هدف از تصفیه پساب فقط حذف فاکتور فسفات باشد تفاوت هزینه ها به حدود  $1/2$  برابر کاهش می یابد (نسبت هزینه ها در شرایط استفاده از الکتروده آلومینیومی به هزینه ها در شرایط استفاده از الکتروده آهنی). بنابر مقادیر محاسبه شده هزینه های عملیاتی و با توجه به تامین شدن استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران، پس استفاده از الکتروده آهنی به استفاده از الکتروده آلومینیومی ارجحیت دارد.

### بررسی سینتیک حذف فسفات

نتایج حاصل از سینتیک حذف نشان می دهد، اگرچه مقادیر ضریب هم بستگی در سینتیک درجه یک و دو، بسیار به یکدیگر نزدیک است، اما سینتیک درجه دوم هم بستگی بیشتری در حذف فسفات از نمونه موردی پساب با استفاده از الکتروده آلومینیومی و آهنی از خود ارابه می دهد و به تبع آن مقدار سرعت واکنش نیز در سینتیک درجه ۲ بیشتر از سینتیک درجه ۱ است. هم چنین نتایج نشان می دهد که در

جدول ۳: پارامترهای معادلات سینتیک در حذف فسفات به روش انعقاد الکتریکی

جنس الکتروده	آلومینوم		آهن	
	$K_1(L/min) \times 10^3$	$R^2$	$K_1(L/min) \times 10^3$	$R^2$
$12 \text{ mA/cm}^2$	-277	-0.977	279	-0.987
$6 \text{ mA/cm}^2$	-20.8	-0.882	52.9	-0.969
$3 \text{ mA/cm}^2$	-21.5	-0.928	22.8	-0.958
$12 \text{ mA/cm}^2$	-52.7	-0.811	17.0	-0.971



(gr/mol)، تعداد الکترون مبادله شده در سطح الکترودهای آند و کاتد (۳ برای آلومینیوم و ۲ برای آهن) و شدت جریان اعمالی (۱۹ و ۵). با افزایش چگالی جریان میزان تولید حباب‌ها افزایش و قطر آنها کاهش می‌یابد. این دو عامل در افزایش کارایی حذف آلاینده توسط حباب‌های گاز هیدروژن بسیار مفید است (۱۰). هم‌چنین افزایش جریان الکتریکی بر رشد لخته‌ها اثر گذاشته که می‌تواند در فرایند انعقاد الکتریکی مفید باشد (۱۹ و ۲۰).

#### محاسبه هزینه‌های عملیاتی جهت تصفیه یک متر مکعب پساب

در فرایند انعقاد الکتریکی هزینه بهره‌برداری شامل هزینه‌های مربوط به انرژی الکتریکی، الکترودهای مصرفی، مواد شیمیایی، هزینه نگهداری، دفع لجن و هزینه‌های ثابت است (۲۱). در تحقیق حاضر، به بررسی هزینه‌های مربوط به انرژی و الکترودهای مصرفی جهت ارزیابی اقتصادی در محاسبه هزینه‌های عملیاتی پرداخته شد. محاسبه هزینه‌ها از طریق فرمول زیر انجام شد:

$$\text{Operating Cost} = a \times E_{\text{energy}} + b \times C_{\text{electrodes}} \quad (8)$$

که در این رابطه  $a$  و  $b$  ضرایب مربوط به بازار ایران در سال ۲۰۱۱ است که به ترتیب برابرند با: ضریب  $a$ ، قیمت برق صنعتی، برابر با:  $0.040 \text{ US\$kwh}^{-1}$  (۴۰۰ ریال) و ضریب  $b$ ، قیمت الکترودهای مصرفی آلومینیوم و آهن به ترتیب برابر با:  $2/49 \text{ US\$/kg Al}$  (۲۴۹۰۰ ریال) و  $0/59 \text{ US\$/kg Fe}$  (۵۹۰۰ ریال). میزان انرژی الکتریسیته مصرفی در فرایند انعقاد الکتریکی مطابق قانون ژول از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$E = V \times I \times t_{\text{EC}} \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $E$ : انرژی الکتریکی مصرفی (KW/h)،  $V$ : ولتاژ اعمالی به سل ( $v$ )،  $I$ : شدت جریان عبوری از مدار الکتریکی (A) و  $t$ : زمان الکترولیز (h) است.

#### سیتیک حذف فسفات

نرخ حذف آلاینده به مقدار یون‌های تولید شده در محیط واکنش، جنس الکترودها، شدت جریان الکتریسیته و واکنش‌های الکتروشیمیایی موجود بستگی دارد (۱۶). در مهندسی محیط زیست معمولاً طراحی فرایندهای شیمیایی مبتنی بر تعیین

آلودگی نقش مهمی دارند (۸). هم‌چنین در تحقیق دیگری که توسط Arroyo و همکاران بر روی کارایی حذف کروم شش ظرفیتی از فاضلاب صورت گرفت، نشان داده شد که کارایی حذف آلاینده در pH های اسیدی بهتر است و در واقع  $\text{Fe}^{3+}$  در این pH واکنش بهتری جهت رسوب با آلاینده برقرار می‌نماید (۱۴). در تحقیقی که Katal و همکاران بر روی تصفیه پساب کارخانجات چوب و کاغذ و هم‌چنین Saedi بر روی تصفیه پساب خروجی پالایشگاه گازی پارس جنوبی انجام دادند نشان دادند که pH بهینه جهت حذف COD در بازه ۵ تا ۷ قرار دارد (۱۵ و ۱۶). تحقیق Wang و همکاران در سال ۲۰۰۹ بر روی حذف COD از پساب رخت‌شوی‌خانه تحقیقی نشان داد که pH بهینه جهت حذف COD همان pH خنثی است (۱۷).

#### تأثیر فاصله بین الکترودها بر حذف فسفات، نیترات و COD

تغییرات راندمان حذف آلاینده‌ها با تغییرات فاصله بین الکترودها ممکن است مربوط به نیروی دافعه الکتروستاتیک در فاصله بین الکترودها باشد، بنابراین هنگامی که فاصله افزایش می‌یابد، جابجایی یون‌های تولید شده آرام‌تر گردیده و یون‌های تولید شده فرصت بیشتری جهت مجتمع شدن و تولید لخته پیدا می‌کنند (۵). اما با افزایش فاصله از ۱۰ mm به ۱۵، تغییرات مشاهده شده بسیار ناچیز است. این مساله ممکن است به دلیل جابه‌جایی‌های بسیار ناچیز یون‌های تشکیل شده در حین فرایند الکترولیز باشد (۱۸).

#### تأثیر شدت جریان الکتریکی در حذف فسفات، نیترات و COD

شدت جریان الکتریکی در یک سل الکتروشیمیایی عبارت است از پتانسیل الکتریکی اعمالی بر واحد سطح الکترودها که در سیستم SI با واحد  $\text{A/m}^2$  بیان می‌شود. مطابق قانون فارادی افزایش شدت جریان اعمالی باعث افزایش یون‌های فلزی خورده شده از سطح الکترودها می‌شود (۵ و ۱۰).

$$W = \frac{M \times I \times t_{\text{EC}}}{n \times F} \quad (7)$$

در رابطه ۷،  $F$  و  $M$  و  $n$  و  $W$  به ترتیب عبارتند از: ثابت فارادی (F=۹۶۴۸۷ c/mol)، جرم مولکولی فلز مورد نظر بر حسب

زیست محیطی نتایج بهتری نسبت به الکترودهای آلومینیومی ارائه می‌دهد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه با عنوان "حذف فسفات به روش انعقاد الکتریکی" در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۹۰ است که با حمایت دانشگاه علم و صنعت ایران اجرا شده است که بدین وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را اعلام می‌نمایم.

### منابع

1. Jakobi G, L'ohr A. Detergents and textile washing: principles and practise. Weinheim, Germany: VHC; 1987.
2. Gosolits J, et al. Waschmittel und Wasserrecycling in Gewerblicher und Krankenhauwaeschereien (Phase 1), project BMBF-FKZ:01 RK 9622. Hohenstein, Germany: Bekleidungs-physiologisches Institut Hohenstein; 1999.
3. Samarghandi M, Zarrabi M, Safari Gh, Shirzad M, Gharibi H, Sheikh Mohammadi A. Performance of electrocoagulation process in removing phosphate from aqueous solutions. Twelfth National Conference on Environmental Health, Iran. Shahid Beheshti University of Medical Sciences, School of Public Health, Tehran; 2009 (In Persian).
4. Takdastan A, Azimi A.A, Salari Zh. Efficient use of electric coagulation process in removing turbidity, COD, and phosphate detergent wastewater from car wash. Journal of Water and Wastewater. Isfahan, Iran; 2011 (In Persian).
5. Jafarzade N, Daneshvar N. Textile wastewater treatment containing dyes basic electric coagulation method. Journal of Water and Wastewater. 2006;57:22-29 (In Persian).
6. Ahmadi Moghaddam M, Amiri H. Investigation of TOC Removal from Industrial Wastewaters using Electrocoagulation Process. Journal of Health and Environment. 2010; 3(2):186-194 (In Persian).

بهترین مدل حذف آلاینده است. بنابراین به منظور طراحی فرایندهای شیمیایی، لازم است که سینتیک حذف آلاینده به خوبی بررسی شود (۲۲). معادله سینتیک درجه ۱، مطابق رابطه زیر است:

$$\ln C/C_0 = -K_1 t \quad (10)$$

شیب نمودار  $\ln C/C_0$  بر حسب زمان عبارت است از ثابت سرعت واکنش،  $K_1 (1/\text{min})$ .  $C_0$  به ترتیب عبارتند از غلظت اولیه و غلظت ثانویه آلاینده بر حسب (mg/l).

معادله سینتیک درجه ۲، نیز مطابق رابطه زیر ارائه می‌گردد:

$$1/C - 1/C_0 = K_2 t \quad (11)$$

شیب نمودار  $1/C - 1/C_0$  بر حسب زمان عبارت است از ثابت سرعت واکنش درجه ۲،  $K_2 (L/\text{mg} \cdot \text{min})$ .

جهت تعیین بهترین معادله سینتیک از رگرسیون خطی استفاده شده است.

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه شرایط عملیاتی بهینه در حذف هم‌زمان فسفات، نیترات و COD با استفاده از روش انعقاد الکتریکی و الکترودهای آلومینیومی و آهنی پرداخته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، کارایی حذف آلاینده‌ها در pHهای مختلف متفاوت است. بالاترین کارایی حذف فسفات در pH=7 و برای الکترودهای آلومینیومی، بالاترین کارایی حذف نیترات در pH=9 و برای الکترودهای آهنی و بیشترین کارایی حذف COD در pH=6، حاصل گردید. همچنین نتایج نشان داد که الکترودهای آلومینیومی عملکرد بهتری نسبت به الکترودهای آهنی در حذف فسفات از خود نشان می‌دهد و این درحالیست که الکترودهای آهنی نیز کارایی بیشتری در حذف نیترات و COD از خود نشان می‌دهد. محاسبات اقتصادی تعیین شرایط بهینه عملیاتی حاکی از به صرفه اقتصادی بودن استفاده از الکترودهای آهنی در حذف هم‌زمان سه فاکتور فسفات، نیترات و COD نسبت به الکترودهای آلومینیومی بود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که ارزیابی‌های اقتصادی از نظر برآورد هزینه‌های عملیاتی جهت تصفیه پساب‌های حاوی فسفات، نیترات و COD با استفاده از الکترودهای آهنی از نظر تامین استانداردهای

7. Mollah M, Schennach R, Parga J, Cocke D. Electrocoagulation (EC)- science and applications, Journal of Hazardous Materials. 2001; B84: 29-41.
8. Irdemez S, Demircioglu N, Sevki Yildiz Y, Bingul Z. The effect of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium and iron plate electrodes. Separation and Purification technology. 2006; 52: 218-223.
9. Vasudevan S, Sozhan G, Ravichandran S, Jayaraj J, Lakshmi J, Margrat Sheela S. Studies on the Removal of Phosphate from Drinking Water by Electrocoagulation Process. Industrial and Engineering Chemistry Research. 2008; 47: 2018-2023.
10. Daneshvar N, Ashassi Sorkhabi H, Kasiri M.B. Decolorization of Dye Solution Containing Acid Red 14 by Electrocoagulation of Different Electrode Connections. Journal of hazardous materials. 2004; B112:55-62.
11. Kopalav A.S, Ogutveren U.B. Removal of Nitrate from Water by Electroreduction and Electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 2002; B89: 83-94.
12. Kopalav A.S, Ogutveren U.B, Removal of Nitrate from Water by Electroreduction and Electrocoagulation, Journal of Hazardous Materials. 2002; B89: 83-94.
13. Ge J, Qu J, Lei P, Liu H. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. Separation and Purification Technology. 2004; 36(1): 33-39.
14. Arroyo M.G, Pérez-Herranz V, Montañés M.T, García-Antón J, Guiñón J.L. Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor, Journal of Hazardous Materials. 2009; 169: 1127-1133.
15. Katal R, Pahlavanzade H. Influence of Different Combinations of Aluminum and Iron Electrode on Electrocoagulation Efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. Desalination. 2011; 265: 199-205.
16. Saeedi M, Khalvati-Fahlyani A. Treatment of oily wastewater of a Gas Refinery by electrocoagulation Using Aluminum Electrodes. Water Environment Research. 2011; 83: 256- 264.
17. Wang Ch. T, Chou W.L, Kuo Y.M. Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/ electroflotation. Journal of Hazardous Materials. 2009; 164: 81-86.
18. Nanseu-Njiki Ch. P, Raoul Tchamango S, Claude Ngom ph, Darchen A, Ngameni E, Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. Journal of Hazardous materials. 2009; 168: 1430-1436.
19. Saeedi M, Khalvati Fahliyani A. COD Reduction in Effluent from Southern Pars Gas Refinery Using Electrocoagulation. Journal of Water and Wastewater. 2009; 21(1): 40-48(In Persian).
20. Song S, Yao J, He Z, Qiu J, Chen J. Effect of Operational Parameters on the Decolorization of C.I. Reactive blue 19 in Aqueous Solution by Ozoneenhanced Electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 2008; 152(1): 204-210.
21. Kobya M, Demirbas E, Dedeli A, Sensoy M.T. Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. Journal of Hazardous Materials. 2010; 173: 326-334.
22. Zarrabi M, Samarghandi M.R, Rahmani A, Noori Sepehr M, Mohammadi Kalhori A, Jafari S.J, Namdari S. Kinetic Study of Acid red 18 and Acid red 14 Removal from Aqueous Solution Using Metallic Iron. Journal of Health and Environment, Ardebil. 2011; 1(3): 31-40(In Persian).

## Comparison of the Cost and Efficiency of Aluminum and Iron Electrodes Application in the Removal of Phosphate, Nitrate and COD from Laundry Wastewater using Electrocoagulation Process

Marzieh Razavi, \*Mosen Saeedi, Ebrahim Jabaari

Department of Water and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

Received; 21 July 2012 Accepted; 15 October 2012

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** In this study, treatability of wastewater from a laundry unit was investigated by applying electrocoagulation method in which two pairs of aluminum and iron electrodes were utilized. Electrocoagulation is a noble treatment method suitable for different kinds of wastewater which has been given a considerable attentions by researchers recently. Applying direct current to two or several suitable metallic electrode in a batch reactor containing effluent would result in flocks of metal hydroxide.

**Materials and Methods:** We studied the effect of different operational parameters such as pH, electrodes distance, intensity of electrical current, and type of electrodes on the treatment efficiencies.

**Results:** Aluminum electrodes showed better effects on the treatment efficiencies in nitrate and COD removal. Maximum phosphate removal (99.93%) took place at pH=7 using Al electrodes. Whereas, in the case of iron electrode, maximum nitrate and COD removal efficiencies were about 97.60 and 80% at pH=9 and pH=6 respectively. Operational cost analysis showed that the corresponding costs of Al application as an electrode is different from that of iron electrode application.

**Conclusion:** Although application of both iron and aluminum electrodes lead to obtaining considerable removal phosphate, nitrate and COD, iron electrodes could result in reasonable removals to meet Environmental Standards with lower operational costs.

**Keywords:** Electrocoagulation, Removal Efficiency, Phosphate, Nitrate, COD, Operational Costs

---

\*Corresponding Author: [msaeedi@iust.ac.ir](mailto:msaeedi@iust.ac.ir)  
Tel: +98 21 77240399 Fax: +98 2177240398