

تأثیر شرایط عملیاتی بر کارایی حذف همزمان فسفات، نیترات و COD از پساب رختشوی خانه با استفاده از روش انعقاد الکتریکی با الکتروالومینیمی

مرضیه رضوی^۱، محسن سعیدی^{۲*}، ابراهیم جباری^۳

۱-دانشجوی ارشد مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران Marzie.Razavi@Gmail.com

۲-دانشیار گروه آب و محیط زیست دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

Jabbari@iust.ac.ir

۳-دانشیار گروه آب و محیط زیست دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۲۲

چکیده

امروزه استفاده از انواع شوینده‌ها و پاک کننده‌ها به عنوان یکی از ملزومات زندگی انسان درآمده است. این مواد افزون بر خاصیت پاک کنندگی خود، پس از ورود به سیستم‌های فاضلاب به دلیل حضور پلی فسفات‌های موجود، با آب واکنش داده و بتدریج به یون فسفات تبدیل شده و باعث بروز مسائل و مشکلات زیست محیطی بشمار می‌شوند که همواره مورد توجه کارشناسان محیط زیست بوده است. در تحقیق حاضر به بررسی حذف همزمان سه آلاینده فسفات، نیترات و COD با استفاده از روش انعقاد الکتریکی و الکتروالومینیمی پرداخته شد. فرایند انعقاد الکتریکی، یک واکنش الکترولیز است که اجرای واکنش‌های الکتروشیمیایی در آن مستلزم اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب بین دو یا چند الکتروود (از جنس آهن، آلومینیم، تیتانیوم و ...) برای انجام واکنش در سطح مشترک الکتروود و محلول، از طریق منبع جریان الکتریکی است. در این فرایند عامل حذف آلاینده‌ها (لخته‌های هیدروکسید آهن یا آلومینیم) با اعمال جریان الکتریکی به الکترودهای صفحه‌ای شناور در نمونه مورد تصفیه، تولید می‌شود. نتایج در تحقیق حاضر نشان داد که pH فاصله بین الکترودها و همچنین شدت جریان الکتریکی سه مشخصه مؤثر در کارایی حذف شاخص‌های مذکور است. بهترین کارایی حذف آلاینده‌ها در pH=7، فاصله بین الکتروود برابر با ۱۰ میلی‌متر و شدت جریان الکتریکی ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به دست آمد. همچنین کارایی حذف فسفات، نیترات و COD در شرایط بهینه به ترتیب ۹۹/۹۳٪، ۶۷/۸۵٪ و ۷۰/۸۳٪ به دست آمد. آزمایش‌های XRD و XRF انجام شده در این تحقیق نشان از خوردگی الکترودها و حضور آنها در لجن به صورت اکسید فلزی Al_2O_3 بوده است.

کلید واژه

انعقاد الکتریکی، فسفات، نیترات، COD، تصفیه پساب

سر آغاز

ترسیب و جداسازی فسفات در اثر واکنش با کاتیون‌های مذکور می‌شود. در سالهای اخیر، روش انعقاد الکتریکی به صورت موفقی در زمینه حذف فسفات از پساب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Irdemez, et al., 2006).

انعقاد الکتریکی فرایندی است که در آن با انحلال فلز آند، لخته‌های هیدروکسید فلزی در محیط، تشکیل شده و در اثر واکنش ایجاد شده، موجب حذف آلاینده می‌شود. مهمترین تفاوت بین روش انعقاد الکتریکی و انعقاد شیمیایی در شیوه ایجاد لخته است به این شکل که روش انعقاد شیمیایی با اضافه کردن منعقدکننده‌های شیمیایی به پساب، سبب ترسیب و جداسازی آلاینده می‌شود، در حالی که در روش انعقاد الکتریکی با استفاده از حضور فلزات و

فسفات از جمله ترکیبات حاوی ماده مغذی فسفر است که ورود آن به محیط‌های آبی در اثر تخلیه پساب‌های خام یا خوب تصفیه نشده، منجر به ایجاد مشکلات کیفیت آب از جمله پدیده تغذیه‌گرایی می‌شود. از روشهای مختلف حذف فسفات می‌توان به روشهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اشاره کرد.

در میان روشهای شیمیایی، جذب و ترسیب شیمیایی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و به صورت گسترده‌ای در زمینه حذف فسفات استفاده می‌شود (Vasudevan, et al., 2009). در این روشها که تجربه‌های موفقی در زمینه حذف فسفات از پساب‌ها بوده است، اضافه کردن کاتیون‌های Al^{3+} ، Ca^{2+} و Fe^{3+} به پساب، سبب

در تحقیق حاضر اثر شرایط بهینه عملیاتی از قبیل pH اولیه، فواصل الکترودها، شدت جریان الکتریکی و زمان ماند با استفاده از الکترودهای آلومینیمی برای حذف همزمان سه شاخص فسفات، نیترات و COD از نمونه پساب واقعی رختشوی‌خانه با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. سینتیک حذف فسفات و نیترات در طول فرایند انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش بررسی

سل انعقاد الکتریکی استفاده شده در این تحقیق یک بشر استاندارد به حجم اسمی ۸۵۰ میلی‌لیتر از جنس پیرکس بوده که دارای قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۴ سانتیمتر است. همچنین از ۴ عدد الکترودهای آلومینیمی در ابعاد ۱۴ در ۶ سانتیمتر و ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شد (شکل شماره ۱).

برای تغذیه جریان الکتریکی از یک منبع تولید جریان مستقیم با مدل DAZHENG PS-302D استفاده شد. همچنین از دو عدد مولتی‌متر برای اندازه‌گیری شدت جریان عبوری و ولتاژ استفاده شد. نمونه‌های مورد نظر از یک واحد رختشوی‌خانه واقع در شرق شهر تهران گرفته می‌شد و بی‌درنگ پس از انتقال نمونه به آزمایشگاه، به انجام آزمایش پرداخته شد.

همچنین در صورت نیاز به استفاده مجدد از نمونه تهیه شده، در شرایط استاندارد (pH < 2) و استفاده از H₂SO₄ در ظرف پلی‌اتیلن و در سرمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شد.

زمان نگهداری پساب با توجه به اندازه‌گیری فسفات، نیترات و COD، ۷ روز در نظر گرفته شد. مقادیر pH با استفاده از pH سنج کالیبره شده مدل PC 510 صورت گرفت. برای قرائت مقادیر فسفات، نیترات و COD در زمان‌های مشخص از پساب در حال تصفیه نمونه‌برداری شد و پس از حذف کدورت در سل‌های مخصوص نگهداری و عملیات قرائت انجام شد. مشخصات پساب در جدول شماره (۱) ارائه شده است.

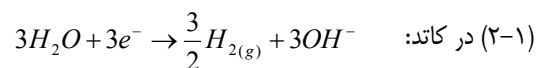
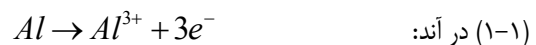
برای تنظیم pH محلول از NaOH، ۵. نرمال و HCl، ۱ نرمال استفاده شد. NaOH و HCl مورد استفاده، ساخته شرکت مرک آلمان بودند.

همچنین تجزیه و تحلیل فسفات بر اساس روش اسید وانادومولیدوفسفر صورت گرفت و مطابق با روش‌های استاندارد برای آزمایش‌ها آب و فاضلاب و همچنین مقالات بین‌المللی معتبر انجام شد (Irdemez, et al., 2006).

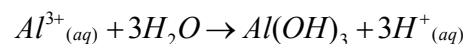
هیدروکسیدهای فلزی در محیط، عمل جداسازی صورت می‌گیرد. الکترودهای مورد استفاده در این روش معمولاً آهن و آلومینیم هستند. این فلزات در دسترس هستند و در ضمن منعقدکننده‌های خوبی به شمار می‌روند.

از ویژگی‌های این روش می‌توان به توانایی استفاده برای تصفیه انواع پساب، هزینه راه اندازی و بهره‌برداری معقول، سازگاری با محیط زیست، زمان ماند پایین، بهره‌برداری آسان، عدم نیاز به افزودنی‌های شیمیایی برای انعقاد اشاره کرد که به دنبال آن تولید اندک لجن، تولید آبی بی‌رنگ، بی‌بو و تمیز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Mollah, et al., 2001) و (Merzouk, et al., 2011) (جعفرزاده و دانشور، ۱۳۸۵).

هنگامی که از الکترودهای آلومینیم استفاده می‌شود، سازوکارهای زیر در فرایند انعقاد الکتریکی به وقوع می‌پیوندد:



(3-1) در محلول:



یون Al^{3+} و OH^{-} با واکنش‌های موجود در آند و کاتد تولید شده و در پایان به شکل $Al(OH)_3$ جامد در می‌آید (Cerqueira, 2009; Akyol, 2012). همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش انعقاد الکتریکی، ترکیبی از اکسیداسیون، لخته‌سازی و شناورسازی است.

در واقع انعقاد الکتریکی در سه گام صورت می‌گیرد:

۱- گام اول با اکسیداسیون آند لخته‌ها تولید می‌شوند. ۲- گام دوم آلایندگی‌های موجود ناپایدار شده و

۳- در گام سوم مواد ناپایدار شده به صورت مجتمع (لخته) در می‌آیند (Irdemez, et al., 2006).

در این آزمایش ابتدا به بررسی pH در کارایی حذف فسفات، نیترات و COD پرداخته شد و به این منظور آزمایش در ۶، pH مختلف (۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۹) انجام شد و سایر مشخصه‌ها اعم از فاصله بین الکترودها و شدت جریان الکتریکی و زمان ماند ثابت فرض شد. در مرحله بعد، پس از به دست آوردن pH ای که بیشترین کارایی حذف در آن رخ می‌دهد، سایر مشخصه‌ها را ثابت نگه داشته و فاصله بین الکترودها تغییر داده شد. این فواصل عبارت بودند از: ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر. در این مرحله نیز بهترین فاصله بین الکترود از نظر حذف آلاینده انتخاب شده و در مرحله بعد شدت جریان الکتریکی تغییر داده شد (در حالی که سایر مشخصه‌ها ثابت در نظر گرفته شده بودند) و از بین ۴ شدت جریان انتخابی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ آمپر بهترین شدت جریان الکتریکی از نظر بالاترین کارایی حذف آلاینده انتخاب شد.

در تمام مراحل انجام آزمایش کلیه مقادیر pH، اختلاف نیروی الکتریکی و دما، به طور مرتب اندازه‌گیری و ثبت شد.

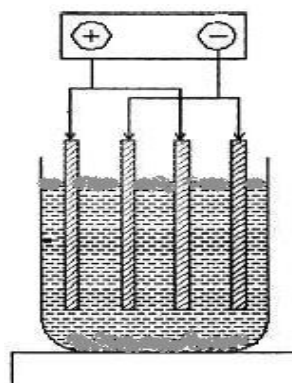
نتایج

تأثیر pH اولیه محلول بر کاهش میزان فسفات، نیترات و COD

نتایج نشان می‌دهد کارایی حذف فسفات، نیترات و COD، تابعی از pH اولیه است. (Ge, et al., 2002) & (Koparal, et al., 2002) همچنین عامل pH به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی بر کارایی حذف آلاینده‌ها اثرگذار است (Vasudevan, et al., 2008; Akyol, 2012).

آلومینیم تحت تأثیر pH محیط و مواد شیمیایی موجود در محیط واکنش می‌تواند به فرم‌های مختلف آزاد شود (سعیدی و خلوتی، ۱۳۸۹). وقتی pH اولیه محیط در محدوده خنثی باشد، آلومینیم تولید شده در آند، به شکل پلی‌مر $Al_13O_4(OH)_{24}^{7+}$ و رسوب $Al(OH)_3$ در می‌آید که موجب افزایش تولید لخته و در نتیجه افزایش کارایی حذف فسفات می‌شود (Vasudevan, et al., 2009).

یون‌های Al^{3+} به شکل ترکیب آبی $Al(H_2O)_6^{3+}$ در pH کمتر از ۴ تولید می‌شوند. در pH بین ۵ تا ۶ محصول تولید شده به شکل‌های $Al(OH)^{2+}$ و $Al(OH)_2$ است. در pH های بین ۵/۲ تا ۸/۸ محصول تولیدی اغلب به صورت $Al(OH)_3(s)$ است. در pH های بالای ۹، محصول واکنش به صورت محلول $Al(OH)_4^+$ است. روند افزایشی pH گواهی بر تولید محصولاتی به صورت $Al(OH)_3(s)$ و $Al(OH)_4^+$ به صورت محلول و بازی شدن محیط



شکل شماره (۱): سل انعقاد الکتریکی استفاده شده در تحقیق

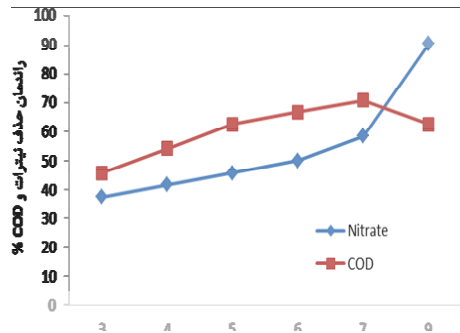
جدول شماره (۱): مشخصات عمومی پساب خام واحد رختشوی‌خانه

مشخصه	واحد	مقدار اولیه	استاندارد ملی تخلیه پساب‌ها به چاه جاذب
رنگ	-	خاکستری	-
درجه اسیدی	pH	۶/۱۵-۹/۵۲	۵-۹
دما	سلسیوس	۱۹/۷-۲۲	-
COD اولیه	$\frac{mg}{l}$	۱۲۰۰-۲۲۰۰	۶۰ (لحظه‌ای ۱۰۰)
TDS	NTU	۷۰۹-۸۱۲	-
هدایت الکتریکی	$\frac{\mu s}{cm}$	۱۳۵۰-۱۳۸۵	-
PO_4^{3-}	$\frac{mg}{l}$	۴/۵-۱۴	۶ برحسب سفر
NO_3^-	$\frac{mg}{l}$	۲۴-۶۳	۱۰

برای انتخاب زمان واکنش، ابتدا با استفاده از آزمایش‌های مقدماتی زمان تصفیه پساب مشخص شد. بدین منظور آزمایشی با مدت زمان ۱۲۰ دقیقه انجام شد و بهره‌وری حذف آلاینده مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به این که از زمان ۶۰ دقیقه به بعد تغییر چندانی در کارایی حذف فسفات مشاهده نشد، در نتیجه زمان تصفیه در سایر آزمایش‌ها نیز زمان ۶۰ دقیقه انتخاب شد.

pH های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ به ترتیب برابر با ۴۱/۶۷٪، ۳۷/۵۰٪، ۴۵/۸۳٪، ۵۰٪، ۵۸/۳۳٪ و ۹۰/۴۲٪ گزارش شد.



شکل شماره (۳): بررسی کارایی حذف نیترات و COD در pH های مختلف در بازه های زمانی یکسان ۶۰ دقیقه و چگالی جریان ۱۲ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع

همچنین کارایی حذف COD در pH های مختلف با زمان

تغییر می کند.

در این تحقیق مقادیر حذف COD در pH های ذکر شده به ترتیب برابر است با ۴۵/۸۳٪، ۵۴/۱۷٪، ۶۲/۵۰٪، ۶۶/۶۷٪، ۷۰/۵۰٪ و ۶۲/۵۰٪. pH بهینه در فرایند حذف COD برابر با ۷ در نظر گرفته شد.

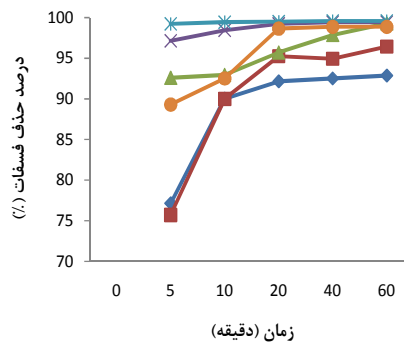
در تشریح فرایند حذف COD می توان به این مورد اشاره کرد که تولید Al^{3+} در محیط به pH موجود بستگی دارد. در pH های پایین به دلیل تولید کم Al^{3+} در محیط کارایی حذف COD پایین است.

در pH های بین ۵ تا ۹ با تشکیل کمپلکس های آلومینیم همانند $Al(OH)_3$ ، $Al(OH)_2^+$ ، $Al_2(OH)_4^+$ ، $Al_{17}(OH)_{32}^{7+}$ برای تولید لخته، میزان کارایی حذف COD افزایش می یابد. شکل شماره (۴) مبین تغییرات pH اولیه و خروجی و سیر صعودی آن در محیط است. یکی دیگر از مشخصه های مورد بررسی در کارایی حذف آلاینده ها، فاصله بین الکترودهاست. اثر تغییرات فاصله به منظور دستیابی به بهترین کارایی حذف آلاینده مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می رسد که افزایش فاصله بین الکترودها با توجه به جنس الکترودها، تأثیر افزایشی ناچیزی بر روی کارایی حذف آلاینده دارد (Nanseu-Njiki, et al., 2009).

است (Gomes, et al., 2007). بنابراین با گذشت زمان افزایش pH در محیط محرز است.

در آزمایش حاضر در مدت زمان انجام آزمایش، pH پساب به طور منظم و افزایشی تغییر کرد و در بالاترین میزان به مقدار ۹/۲۵ رسید. شکل شماره (۲) نشان می دهد که کارایی حذف فسفات در pH های مختلف با زمان تغییر می کند.

حداکثر میزان حذف فسفات در این آزمایش در pH=7 مشاهده شد. در نمودار شکل زیر مقادیر pH و کارایی حذف در یک بازه زمانی ۶۰ دقیقه ای نمایش داده شده است. همان طور که از نتایج بر می آید، مقدار حداکثر کارایی حذف فسفات در pH=3 برابر با ۹۲/۸۶٪، در pH=4 برابر با ۹۶/۴۳٪، در pH=5 برابر با ۹۹/۲۹٪، در pH=6 برابر با ۹۹/۴۳٪، در pH=7 برابر با ۹۹/۵۷٪ و در pH=9 میزان کارایی حذف فسفات برابر ۹۸/۸۶٪ گزارش شد. بیشترین میزان حذف فسفات در بازه زمانی ۶۰ دقیقه صورت گرفت. از این مرحله به بعد سایر مشخصه ها با توجه به ثابت بودن pH بر روی مقدار ۷ بررسی شد (شکل شماره ۲).



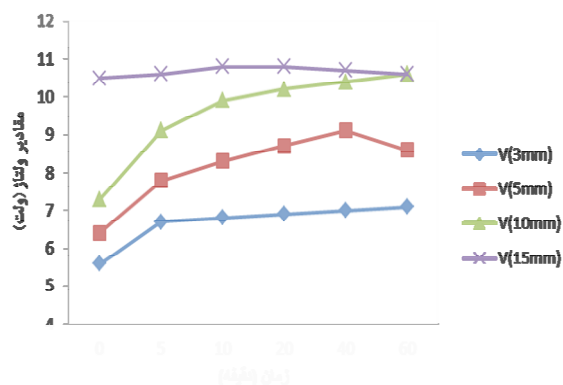
شکل شماره (۲): بررسی اثر pH بر کارایی حذف فسفات در زمان های متفاوت با استفاده از چگالی جریان ۱۲ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع

در مورد حذف نیترات باید به این مسئله توجه داشت که با افزایش pH محیط، کارایی حذف نیترات افزایش می یابد که این مساله می تواند مربوط به واکنش بین فلز و یون های هیدروکسید موجود در محلول باشد (Koparal, et al., 2002). در شکل شماره (۳) نمودار تغییرات حذف نیترات در pH های مختلف دیده می شود. همان طور که در نمودار ملاحظه می شود کارایی حذف نیترات در pH های بازی افزایش می یابد. برای مثال مقادیر حذف نیترات در

این تغییرات ممکن است مربوط به نیروی دافعه الکتروستاتیک در فاصله بین الکترودها باشد، بنابراین هنگامی که فاصله افزایش می‌یابد، جابه‌جایی یون‌های تولید شده آرام‌تر شده و یون‌های تولید شده فرصت بیشتری برای مجتمع شدن و تولید لخته پیدا می‌کنند (Daneshvar, et al., 2004).

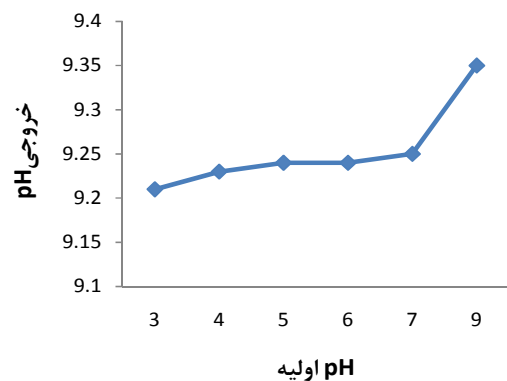
بیشترین میزان حذف نیترات در $\text{pH}=7$ و در زمان ۶۰ دقیقه به میزان $73/3$ درصد و در فاصله 10 میلی‌متر گزارش شد. مسئله مهمی که در این قسمت قابل تأمل است بحث تغییرات ولتاژ با تغییرات فاصله بین الکترودهاست. در واقع، فاصله الکترودها بر روی نرخ حذف آلاینده و همچنین میزان انرژی مصرفی مؤثر است (ضرابی و همکاران، ۱۳۸۹).

در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر فاصله الکترودها بر روی نرخ حذف آلاینده، ۴ فاصله الکترودها ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر آزمایش شد. به طوری که در تحقیق مشاهده شد با افزایش فاصله بین الکترودها، ولتاژ موجود افزایش می‌یابد که این مسئله به معنی مصرف بیشتر جریان الکتریسیته و در نتیجه مصرف بیشتر انرژی برق است. در شکل شماره (۶) تغییرات ولتاژ در زمان‌های مختلف و بر حسب فاصله الکترودها نمایش داده شده است. با توجه به نتایج موجود و مقادیر نرخ حذف آلاینده، بهترین فاصله الکترودها ۱۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود.



شکل شماره (۶): اثر فاصله الکترودها بر تغییرات ولتاژ موجود در آزمایش در چگالی جریان 12 میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع و $\text{pH}=7$
تأثیر چگالی جریان بر کاهش میزان فسفات، نیترات و COD

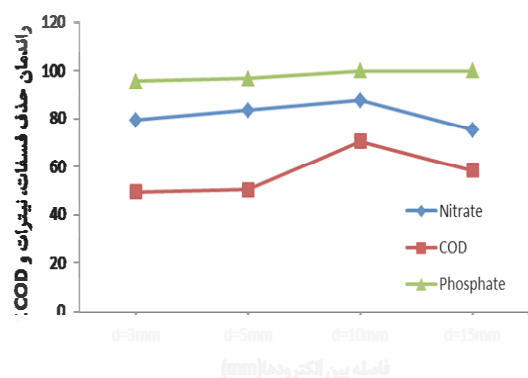
مطالعات، تأثیر چگالی جریان را به عنوان عاملی مهم در انجام انعقاد الکتریکی اثبات کرده است. افزون بر دانسیته جریان در میزان



شکل شماره (۴): نمودار تغییرات pH اولیه و خروجی در شرایط عملیاتی مدت زمان ۶۰ دقیقه، جریان 2 میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع و فاصله الکترودها 10 میلی‌متر در ۶ آزمایش انجام شده

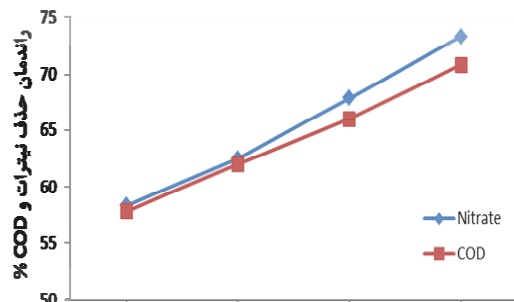
تأثیر فاصله بین الکترودها بر کارایی حذف فسفات، نیترات و COD و همچنین مصرف انرژی

شکل شماره (۵) نشان دهنده نتایج بررسی اثر فاصله بین الکترودها بر کارایی حذف آلاینده‌هاست. بیشترین میزان حذف فسفات در فاصله الکترودها 10 میلی‌متر و به میزان $99/93\%$ گزارش شد. همچنین بیشترین میزان حذف COD در فاصله الکترودها 10 میلی‌متر $70/50\%$ مشاهده شد. همان‌طور که در نمودار ملاحظه می‌شود، روند افزایشی کارایی حذف آلاینده، ناچیز است. این مسئله ممکن است به دلیل جابه‌جایی‌های بسیار ناچیز یون‌های تشکیل شده در حین فرایند الکترولیز باشد (Nanseu-Njiki, et al., 2009).



شکل شماره (۵): مقایسه اثر فاصله الکترودها بر کارایی حذف آلاینده در چگالی جریان 12 میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع و $\text{pH}=7$

چگالی جریان‌های ۳، ۶ و ۹ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به ترتیب ۵۸/۳۳٪، ۶۲/۵۰٪ و ۶۷/۸۵٪ گزارش شد (شکل شماره ۸).



شکل شماره (۸): نتایج حاصل از بررسی تغییرات چگالی جریان بر حذف نیترات و COD (شرایط عملیاتی pH=7، J=3,6,9,12 mA/cm²، d=10mm)

تأثیر چگالی جریان الکتریکی بر میزان خوردگی الکترودها و میزان مصرف انرژی الکتریکی ویژه در شرایط بهینه

مشخصه‌های عملیاتی که در فرایند انعقاد الکتریکی مشارکت دارند عبارتند از هزینه الکترودهای مصرفی و هزینه انرژی الکتریسیته مورد نیاز (Morthy, et al., 2007).

چگالی جریان الکتریکی در سل انعقاد الکتریکی عبارت است از نیروی الکتریکی اعمالی بر واحد سطح الکترود کاتد که در سیستم SI با واحد آمپر بر متر مربع بیان می‌شود.

مطابق قانون فارادی افزایش شدت جریان اعمالی باعث افزایش یون‌های فلزی خورده شده از سطح الکترود قربانی (آند) می‌شود (Daneshvar, et al., 2006).

میزان الکترود مصرفی در آند به صورت تجربی از اختلاف وزن الکترود، قبل و بعد از انجام آزمایش تعیین می‌شود. همچنین میزان نظریه مصرف الکترود با استفاده از قانون فارادی از رابطه زیر به دست می‌آید (جعفرزاده و دانشور، ۱۳۸۵، ۲۰۱۲؛ Akyol, 2012).

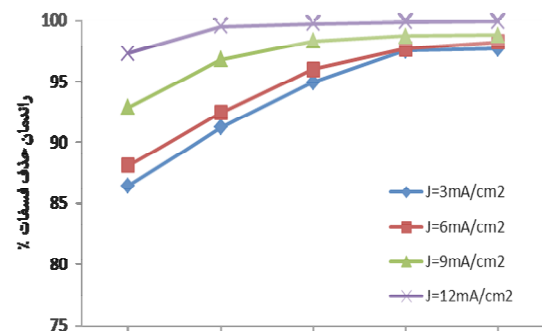
$$\Delta M_{theory} = \frac{M \times I \times t_{EC}}{n \times F} \quad (4)$$

مصرف الکترود تولید کننده ترکیبات منعقد کننده مؤثر است. به منظور بررسی آثار دانسیته جریان، آزمایش در ۴ دانسیته جریان مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

کارایی حذف فسفات پس از ۶۰ دقیقه از شروع زمان واکنش برای چگالی جریان‌های ۱۲ و ۳، ۶، ۹ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به ترتیب برابر با ۹۷/۱، ۹۸، ۹۹/۵ و ۹۹/۹۳ درصد به دست آمد (شکل شماره ۷).

با افزایش چگالی جریان، میزان واکنش صفحات آلومینیمی بیشتر شده و در نتیجه میزان حذف فسفات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی جریان، میزان تولید حباب‌ها افزایش و اندازه قطر آنها کاهش می‌یابد.

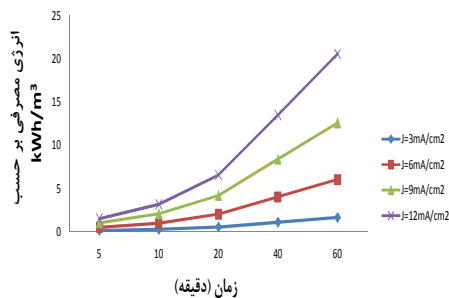
این دو عامل در افزایش کارایی حذف آلاینده با حباب‌های گاز هیدروژن مفید است (Daneshvar, et al., 2006).



شکل شماره (۷): نتایج حاصل از بررسی تغییرات چگالی جریان بر حذف فسفات در شرایط عملیاتی pH=7، d=10mm، J=3,6,9,12 mA/cm²

در مورد کارایی حذف COD در پساب مورد نظر بیشترین میزان حذف در چگالی جریان ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به میزان ۷۰/۸۳٪ به دست آمد. کارایی جداسازی COD پس از گذشت ۶۰ دقیقه از زمان شروع واکنش برای چگالی جریان‌های ۱۲ و ۳، ۶ و ۹ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به ترتیب برابر با ۵۷/۸۰٪، ۶۲٪ و ۶۶٪ و ۷۰/۸۳٪ گزارش شد. تغییرات چگالی جریان بر روی کارایی حذف نیترات اثر کاملاً مشخصی دارد. به این ترتیب که با افزایش چگالی جریان، کارایی حذف نیترات افزایش می‌یابد (Vasudevan, et al., 2010). در مورد کارایی حذف نیترات بیشترین میزان حذف در چگالی جریان ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به میزان ۷۳/۳٪ بود. سایر مقادیر کارایی حذف نیترات در

می‌یابد. در تحقیق حاضر بیشترین میزان مصرف انرژی الکتریکی در زمان ۶۰ دقیقه پس از شروع آزمایش برای چگالی جریان های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتیمترمربع به ترتیب ۱/۶۵، ۶/۰۳۳، ۱۲/۶۰ و ۲۰/۵۶۷ کیلو وات ساعت بر متر مکعب به دست آمد.



شکل شماره (۱۰): نمودار میزان انرژی الکتریکی مصرفی در چگالی جریان های مختلف و pH=7 و فاصله الکترود اسانتیتر

مصرف انرژی الکتریکی ویژه به میزان انرژی الکتریکی مصرف شده در واحد جرم بار آلاینده حذف شده اطلاق می‌شود که در بررسی‌های اقتصادی فرایند انعقاد الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف انرژی الکتریکی ویژه از رابطه ۶ به دست می‌آید. در این رابطه نیز C0: غلظت اولیه آلاینده، C: غلظت پس از تصفیه پساب و مقدار Δ عبارت است از حجم پساب مورد آزمایش.

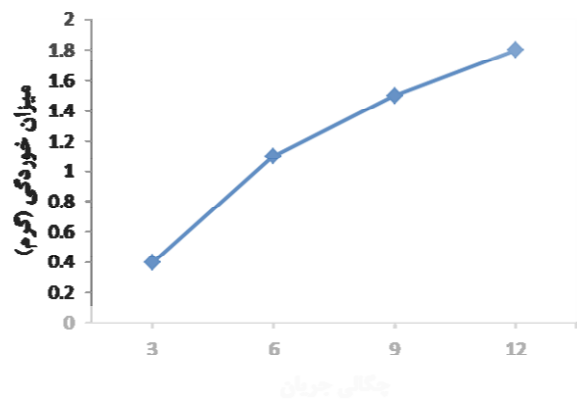
$$SEEC = \frac{V \times I \times t_{EC}}{C_0 - C} \times \Delta \quad (6)$$

در این آزمایش به بررسی میزان انرژی الکتریکی مصرفی ویژه در شرایط بهینه پرداخته شد.

همان‌طور که در شکل شماره (۱۱) مشاهده می‌شود در پایان زمان ۶۰ دقیقه، میزان انرژی الکتریکی مصرفی ویژه برای گرم فسفات برابر با ۷/۱۳، برای گرم نیترات ۴/۷۵ و برای گرم COD در حدود ۰/۵۱ کیلووات ساعت به دست آمد. میزان کل انرژی مصرفی ویژه در مقدار ۱۰ متر مکعب آلاینده برابر با (آلاینده)، $1.4 \times 10^5 \frac{kWh}{mg}$ به دست آمد.

در این رابطه M: جرم مولکولی الکترود مصرفی آند $(\frac{g}{mol})$ ، شدت جریان عبوری از مدار الکتریکی (A)، t_{EC} : زمان انجام فرایند انعقاد الکتریکی (s)، n: تعداد الکترون مبادله شده در سطح الکترودهای آند و کاتد (برای آلومینیم $n=3$)، F: عدد فارادی که برابر با $96487 (\frac{C}{mol})$ است. رابطه مذکور نیز مبین افزایش میزان خوردگی الکترود در اثر افزایش جریان الکتریسیته است (Behbahani, et al., 2011).

در تحقیق حاضر با افزایش چگالی جریان، میزان خوردگی فلز آلومینیم افزایش می‌یابد و در ضمن کارایی حذف فسفات و نیترات و COD همان‌طور که پیشتر اشاره شد، افزایش پیدا می‌کند. میزان خوردگی الکترودهای آلومینیمی در شدت جریان‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتیمترمربع به ترتیب برابر با ۰/۴، ۱/۱، ۱/۵ و ۱/۸ گرم گزارش شد که در شکل شماره (۹) نمایش داده شده است.

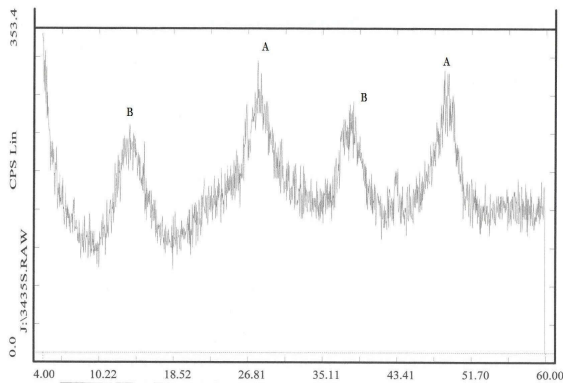


شکل شماره (۹): نمودار میزان خوردگی الکترود آلومینیمی (شرایط عملیاتی pH=7، d=10mm، J=3,6,9,12 mA/cm²)

میزان انرژی الکتریسیته مصرفی در فرایند انعقاد الکتریکی مطابق قانون ژول از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$E = V \cdot I \times t_{EC} \quad (5)$$

در رابطه ۵، E: انرژی الکتریکی مصرفی (kWh)، V: ولتاژ اعمالی به سل (v)، I: شدت جریان عبوری از مدار الکتریکی (A) است. همان‌طور که در شکل شماره (۱۰) مشخص است، هرچه چگالی جریان افزایش می‌یابد، میزان انرژی مصرفی نیز افزایش



شکل شماره (۱۲): نمودار تجزیه و تحلیل XRD لجن در شرایط بهینه (A: $\text{AlO}(\text{OH})$, B: Al_2O_3)

نتیجه گیری

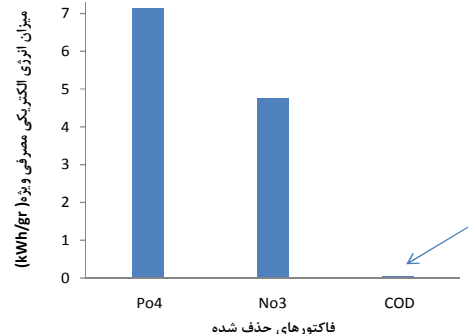
در این تحقیق به بررسی کاربرد فرایند انعقاد الکتریکی بر روی حذف همزمان فسفات، نیترات و COD در پساب یک واحد رختشویی خانه پرداخته شد.

نتایج نشان داد که با استفاده از روش پیش گفته می توان به کارایی حذف ۹۹/۹۳٪ فسفات و کارایی حذف ۶۷/۸۵٪ نیترات با استفاده از الکتروود آلومینیم دست پیدا کرد. همچنین نتایج نشان دادند که با استفاده از این روش و در شرایط یکسان به کارایی حذف ۷۰/۸۳٪ برای COD دست یافته شد. نتایج نشان داد که مشخصه های عملیاتی همچون pH اولیه محلول، فاصله الکتروودها و چگالی جریان، بر کارایی حذف همزمان فسفات، نیترات و COD تأثیر دارد. شرایط بهینه برای حذف فسفات و COD در pH برابر ۷، چگالی جریان ۱۲ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع و فاصله الکتروودها برابر با ۱ سانتیمتر در مدت زمان ۶۰ دقیقه به دست آمد.

یادداشت ها

1-Eutrophication

2-First and Second order reaction



شکل شماره (۱۱): نمودار میزان انرژی الکتریکی مصرفی ویژه در شرایط بهینه عملیاتی

بررسی و تجزیه و تحلیل لجن حاصل از فرایند انعقاد الکتریکی

در این تحقیق پس از به دست آوردن شرایط بهینه، بار دیگر آزمایش تکرار شده و از تجزیه و تحلیل XRF و همچنین تجزیه و تحلیل XRD، برای تعیین عناصر تشکیل دهنده لجن تولیدی استفاده شد (جدول شماره ۲). آزمایش ها XRD نشان از خوردگی الکتروودها به صورت هیدروکسید فلزی در لجن حاصل است.

جدول شماره (۲): تجزیه و تحلیل XRF لجن تولیدی در فرایند

حذف فسفات به وسیله الکتروود آلومینیم در شرایط بهینه

درصد	ترکیبات	درصد	ترکیبات
۳۲/۷۷	L.O.I	۵۷/۲۰	Al_2O_3
۰/۶۰	MgO	۱/۲۷	Fe_2O_3
۰/۶۵	CaO	۲/۰۲	Na_2O
۰/۱۶	K_2O	۱/۸۷	SiO_2
۰/۰۶۷	MnO	۲/۵۴۸	SO_3

همان طور که در شکل شماره (۱۲) دیده می شود، پیک های نمودار مربوط به حضور ترکیبات Al_2O_3 است که نشان از ایجاد اکسیدهای فلزی در محیط واکنش و دلیل روشنی بر جذب آلاننده بر روی این ترکیب است.

منابع مورد استفاده

جعفرزاده، ن، دانشور، ن. ۱۳۸۵. تصفیه پساب نساجی حاوی مواد رنگزای بازیگ به روش انعقاد الکتریکی، مجله آب و فاضلاب، شماره ۵۷، ۲۹-۲۲.

سعیدی، م، خلوتی فهلیانی، ا. ۱۳۸۹. کاهش COD پساب خروجی پالایشگاه پارس جنوبی به روش انعقاد الکتریکی، مجله آب و فاضلاب، سال ۲۱، شماره ۱، ۴۰ تا ۴۸.

ضرابی، م. و همکاران. ۱۳۸۹. بررسی حذف رنگ‌های Acid red 18 و Acid red 14 با استفاده از پودر آهن صفر ظرفیتی از محیط‌های آبی و تعیین سینتیک‌های آن. مجله سلامت و بهداشت اردبیل، صفحات ۳۱ تا ۴۰.

Akyol, A. 2012. Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation, *Desalination*, 285, 91-99.

Behbahani, M., M.R., Alavi Moghaddam, M., Arami. 2011. Techno-economical evaluation of fluoride removal by electrocoagulation process: Optimization through response surface methodology, *Distillation*, 271, 209-218.

Cerqueira, A., C., Russo, R.C., Marques. 2009. Electro coagulation for textile wastewater treatment, *Brazilian Journal of Chemical engineering*, Vol.26, No.04, pp.659-668.

Daneshvar, N., H., Ashassi Sorkhabi, M.B., Kasiri. 2004. Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections, *Journal of Hazardous Materials*, B112, 55-62.

Daneshvar, N., A., Oladegaragoze, N., Djafarzade. 2006. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters, *Journal of Hazardous Materials* B129, 116-122.

Ge, J., et al. 2004. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater, 36, 33-39.

Gomes, J., et al. 2007. Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products, *Journal of Hazardous Material*, B139, 220-231.

Irdemez, S., et al. 2006. 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* 52, 218-223.

Irdemez, S., Y., Sevki Yildiz, V., Tosunoglu. 2006. Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminium plate electrodes, *Separation and Purification technology* 52, 394-401.

Irdemez, S., N., Demircioglu, Y., Sevki Yildiz. 2006. The effect of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes, *Journal of hazardous materials*, B137, 1231-1235.

Koparal, A.S., U.B., Ogutveren. 2002. Removal of Nitrate from Water by Electro reduction and Electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, B89, 83-94.

Merzouk, B., et al. 2011. Effect of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency, *Desalination*, 275, 181-186.

Mollah, M., et al. 2001. Electrocoagulation (EC)- science and applications, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41.

Murthy, Z.V.P., C., Nancy, A., Kant. 2007. Separation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation, *Separation Science and Technology*, 42, 819-833.

Nanseu-Njiki, Ch., et al .2009. Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes, Journal of Hazardous Materials, 168, 1430-1436.

Vasudevan, S., et al .2008. Studies on the Removal of Phosphate from Drinking Water by Electrocoagulation Process, Ind. Eng. Chem. Res, 47, 2018-2023.

Vasudevan, S., et al .2009. Remediation of Phosphate –contaminated water by electrocoagulation with aluminium, aluminium alloy and mild steel anodes, Journal of Hazardous Materials, 164, 1480-1486.

Vasudevan, S., et al .2010. Removal of NO₃ – from Drinking Water by Electrocoagulation – An Alternate Approach, clean-soil, air, water, 38(3), 225-229.