ارزیابی کاربرد روش انعقاد الکتریکی در حذف همزمان فسفات، نیترات و COD از پساب رختشوی‌خانه با استفاده از الکترودهای آهنی

مرضیه رضوی*[1]، محسن سعیدی[2]، مهدی کماسی[3]

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست، مدرس دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد، لرستان، ایران
۲. دانشیار گروه آب و محیط زیست دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. دکتری مهندسی عمران، عضو هیأت علمی دانشگاه آیت ا... العظمی بروجردی(ره)

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۷/٤ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۱

چکیده

زمینه و هدف: تخلیه و ورود فاضلاب‌های حاوی شوینده‌ها چه از طریق کارخانجات سازنده و چه از طریق مصارف خانگی و صنعتی باعث بروز مسائل و مشکلات زیست محیطی عدیده ای گردیده است. ورود این مواد به آب‌های سطحی، سبب کاهش میزان اکسیژن محلول در آب، بد منظره شدن محیط و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود که همواره مورد توجه کارشناسان محیط زیست بوده است.

روش بررسی: در این پژوهش به بررسی حذف همزمان سه فاکتور فسفات، نیترات و COD با استفاده از روش انعقاد الکتریکی و الکترودهای آهنی پرداخته شد. راندمان حذف پارامترهای ذکر شده با استفاده از شش pH مختلف (۳، ٤، ٥، ٦، ۷ و ۹) ، همراه با تغییرات فاصله بین الکترودهای قرار گرفته در نمونه مورد مطالعه (۳و٥و۱۰و۱٥میلیمتر) و همچنین تغییرات چگالی جریان (۳-۱۲ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع) انجام شد. همچنین سینتیک درجه ۱ و۲ واکنش بررسی گردیده و آنالیز XRF لجن بدست آمده از پساب ارائه گردید.

یافته‌ها: نتایج بدست آمده نشان داد که pH ، فاصله بین الکترودها و همچنین شدت جریان الکتریکی سه پارامتر موثر در کارایی حذف فاکتورهای مذکور می‌باشد. بهترین کارایی حذف آلاینده ها در pH=7 ، فاصله بین الکترود برابر با ده میلی‌متر و شدت جریان الکتریکی دوازده میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به دست آمد. کارایی حذف فسفات، نیترات و COD در شرایط بهینه به ترتیب ۹۹/۳۳٪، ۹٦/٦۷٪ و ۹۱/٤۳٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که سینتیک واکنش فرآیند حذف فسفات از مدل سینتیکی درجه دوم پیروی می‌کند.

نتیجه گیری: مطابق نتایج به دست آمده، فلز آهن در حذف فسفات، نیترات و COD با استفاده از روش انعقاد الکتریکی عمکرد بسیار خوبی داشته و به راندمان‌های حذف بالایی با استفاده از این روش دست یافته شده است.

.

کلمات کلیدی: انعقاد الکتریکی، فسفات، نیترات، COD

کارشناس ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست، مدرس دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد، لرستان، ایران
ایمیل: marzie.razavi@gmail.com

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

مقدمه

امروزه پدیده پرغذایی یکی از مهم‌ترین مسائل و نگرانی‌هایی است که خصوصا در کشورهای صنعتی در زمینه نظارت بر منابع آبی وجود دارد. این پدیده که در نتیجه تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی حاوی فسفات به بدنه‌های آبی رخ می‌دهد سبب رشد نگران‌کننده جلبک‌ها در داخل و حواشی سواحل آب‌ها می‌گردد. در کشورهایی که صنعت عمده آن‌ها کشاورزی و دامپروری است تجمع فسفر و نیتروژن در خاک و آب به وفور دیده می‌شود. این اجزا فسفر محلول در آب‌های سطحی و زیرزمینی، سبب بروز پدیده پرغذایی در بدنه‌های آبی می‌گردند. شکل‌های متداول فسفر محلول شامل سه شکل به نام‌های اورتوفسفات، پلی فسفات و فسفات آلی می‌باشد. اصلی‌ترین جز فسفر موجود در فاضلاب بطورکلی به شکل اورتوفسفات و در مقدار بسیار کمتر، شامل فسفات آلی است.[۱و۲] از شیوه‌های حذف فسفات می‌توان به جذب، ترسیب شیمیایی، تبادل یونی، الکترودیالیز، سیستم‌های هیبریدی، فیلتراسیون و انعقاد الکتریکی اشاره کرد. در تصفیه فاضلاب یکی از روش‌های متداول و موفق ترسیب فسفات، استفاده از کاتیون‌های محلولی همچون Al^{3+}، Ca^{2+} ، Fe^{3+} و به میزان کمتر Fe^{2+} می‌باشد. در سال‌های اخیر انعقاد الکتریکی به طور موفقی در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است. فرآیند انعقاد الکتریکی اولین بار در سال ۱۸۸۹ جهت تصفیه فاضلاب همراه با اختلاط با آب دریا و فرآیند الکترولیز در تصفیه خانه فاضلاب لندن انجام شد. در سال ۱۹۰۹ و در آمریکا این روش توسط هریس جهت تصفیه فاضلاب با استفاده از انحلال فلزات آلومینیوم و آهن در آند انجام گرفت. از ابتدای دهه ۱۹۷۰ به بعد این روش به خصوص در اروپا و روسیه جهت تصفیه اولیه آب مورد نیاز صنایع آبکاری و تکمیل فلزات و همچنین تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفت.[۳] در سال ۱۹۸٤ یک سیستم انعقاد الکتریکی برای تصفیه آب آشامیدنی در آمریکا توسط ویک و همکاران ارائه گردید.[٤] در سال ۱۹۹۵ ماتسون و همکاران طرحی را که در سال ۱۹٤۰ ارائه شده بود و منعقد کننده الکتریکی نام داشت ، تشریح کردند. بر اساس طرح، آلومینیوم به صورت الکتروشیمیایی حل می شود و با یون های هیدروکسیل آزاد شده از کاتد ترکیب شده و هیدروکسید آلومینیوم جهت فرآیند انعقاد به کار می‌رفت. فرآیندی مشابه نیز در سال ۱۹٥٦ در انگلستان جهت تصفیه آب به کار گرفته شد. در آمریکای شمالی بیشتر از این روش در تصفیه فاضلاب صنایع چوب و کاغذ، معادن و تکمیل فلزات استفاده می‌شود.[۳] در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۰۲ توسط کوپارال و همکاران انجام شد، به بررسی اثر pH بر روی راندمان حذف مواد آلی از فاضلاب به وسیله انعقاد الکتریکی پرداخته و نشان داده شد که راندمان حذف آلاینده در pH های پائین‌تر بیشتر است.[٥] پژوهش دیگر انجام شده در این زمینه بررسی اثر pH بر روی راندمان حذف کروم شش ظرفیتی از فاضلاب در یک راکتور ناپیوسته و با استفاده از الکترودهای آهنی با استفاده از روش انعقاد الکتریکی توسط آرویو و دیگر همکاران در سال ۲۰۰۹ بوده است. در این پژوهش نیز نشان داده شد که راندمان حذف آلاینده در pH های اسیدی بهتر است و در واقع Fe^{3+} در این pH واکنش بهتری جهت رسوب با آلاینده برقرار می‌نماید.[٤] انعقاد الکتریکی فرآیندی است که در آن لخته‌های هیدروکسیدهای فلزی در اثر انحلال آند، که معمولا از جنس آلومینیوم یا آهن است تولید می‌شوند.[۱و٦] فرآیند انعقاد الکتریکی یکی از روش‌های موفق در تصفیه پساب‌های حاوی فسفات می‌باشد[۱و۲و۳]. فرآیند انعقاد الکتریکی یک واکنش الکترولیز است که اجرای واکنش‌های الکتروشیمیایی در آن مستلزم اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب بین دو یا چند الکترود (از جنس آهن و آلومینیوم) جهت انجام واکنش در سطح مشترک الکترود و محلول از طریق یک منبع الکتریکی خارجی است. در این فرآیند، عامل حذف آلاینده‌ها (لخته‌های هیدروکسید آهن یا آلومینیوم) با اعمال جریان الکتریکی به الکترودهای صفحه ای شناور در نمونه مورد

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

تصفیه، تولید می‌شود. از ویژگی‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد : قابلیت استفاده برای تصفیه انواع پساب، هزینه راه اندازی و بهره‌برداری معقول، سازگاری با محیط‌زیست، زمان‌ماند پائین، بهره‌برداری آسان، عدم نیاز به افزودنی‌های شیمیایی جهت انعقاد و به دنبال آن تولید اندک لجن و تولید آبی بی‌رنگ. فرآیند انعقاد الکتریکی نیاز به برقراری یک جریان الکتریکی بین دو الکترود، به عنوان آند و کاتد دارد.[۷و۸] لخته‌ها با قربانی‌شدن الکترود آند ایجاد شده و این درحالی است که به‌طور هم‌زمان گاز هیدروژن در الکترود کاتد تشکیل می‌گردد. با گذشت زمان و پیشرفت واکنش کاتیون بیشتری وارد محلول شده و هیدروکسید فلزی بیشتری تولید می‌گردد که اغلب به صورت رسوب نمایان می‌شود. مرحله نهایی حذف آلاینده وقتی است که ذرات مجتمع شده آلاینده توسط حباب‌های هوا در محیط شناور شده و گاه به سمت سطح محیط بالا رفته و گاه به شکل رسوب در راکتور ته‌نشین می‌شوند.[۹و۱۰] در فرآیند انعقاد الکتریکی، ماده منعقدکننده در محل و توسط اکسیداسیون الکترولیتی یک ماده مناسب آندی مانند آهن می‌شود .تولید یون‌های فلزی در آند رخ می‌دهد و از کاتد نیز گاز هیدروژن آزاد می‌شود (واکنش‌های الف و ب).[۸] گاز هیدروژن به شناوری ذرات لخته شده کمک می‌کند. در واقع حباب‌ها سهم قابل توجهی در شناورسازی لخته ها به سطح دارند .این فرآیند را شناورسازی الکتریکی نیز می‌نامند. در این فرآیند، اجزا یونی باردار - فلزات یا مواد دیگر - با واکنش با یک یون دارای بار مخالف، یا با لخته هیدروکسیدهای فلزی تولید شده در پساب از فاضلاب حذف می‌شود(واکنش ج).[۱۰] به طور کلی فرآیند انعقاد الکتریکی در سه مرحله اصلی به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

الف) تشکیل منعقد کننده ها با اکسید شدن الکترود،

ب) ناپایدار کردن آلاینده ها، ذرات معلق و شکستن امولسیونها،

ج) تجمع ذرات ناپایدار شده در داخل فاضلاب و تبدیل شدن به لخته.[۸] در ادامه به بیان واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده با استفاده از الکترود آهنی که در بالا توضیح داده شد پرداخته می‌شود.

واکنش‌های آندی ایجاد شده با استفاده از الکترود آهنی:

الف) در آند $4Fe_{(s)} \rightarrow 4Fe^{2+}{}_{(aq)} + 8e^{-}$

ب) در کاتد $3H_2O + 3e^{-} \rightarrow \frac{3}{2}H_{2(g)} + 3OH^{-}$

ج) واکنش در محلول

$4Fe^{2+}{}_{(aq)} + 10H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^{+}{}_{(aq)}$

د) واکنش کلی

$4Fe_{(s)} + 10H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(s)} + 4H_{2(g)}$

تشکیل هیدروکسید آهن(واکنش‌های ج و د) از قاعده الکتروفورتیک پیروی می‌کند. الکتروفورتیک به معنی حرکت ذرات معلق مایع به وسیله نیروی برق می‌باشد. در واقع تحت اثر این نیرو است که کلوئیدها در نزدیکی آند مجتمع می‌شوند. ذرات تحت اثر واکنش‌های متقابل، جذب هیدروکسید آهن شده و در نتیجه به وسیله اختلاط سطحی یا جذب الکترو استاتیک، از محیط حذف می‌شوند. گسترش اکسیداسیون با گذشت زمان تشکیل لخته های $Fe(OH)_3$ را تحت تأثیر قرار می‌دهد[۱۴]. با توجه به اینکه معمولا در پژوهش‌های انجام شده فرآیند حذف یک آلاینده مورد بررسی بوده است، بنابراین در این پژوهش به کاربرد روش انعقاد الکتریکی در حذف همزمان سه آلاینده، فسفات، نیترات و COD و همچنین چگونگی مصرف انرژی و خوردگی فلز در جریان حذف پرداخته شده است. همچنین سینتیک حذف فسفات در طول فرآیند انعقاد الکتریکی از جنبه های نوآوری و بدیع بودن پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها

آماده سازی راکتور

سل انعقاد الکتریکی استفاده شده در این پژوهش یک بشر

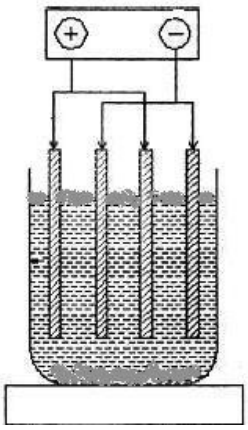
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

استاندارد به حجم اسمی ۸۵۰ میلی‌لیتر از جنس پیرکس است که دارای قطر ده و ارتفاع چهارده سانتی‌متر می باشد. همچنین از چهار عدد الکترود آهنی در ابعاد ٦*١٤ سانتی‌متر و ضخامت سه میلی‌متر استفاده گردید (شکل ۱). جهت تغذیه جریان الکتریکی از یک منبع تولید جریان مستقیم با مدل DAZHENG PS-302D بهره‌گیری شد. همچنین از دو عدد مولتی‌متر جهت اندازه‌گیری شدت جریان عبوری و ولتاژ استفاده شد. نمونه های مورد نظر از یک واحد رختشوی‌خانه واقع در شرق شهر تهران گرفته می‌شد و بلافاصله پس از انتقال نمونه به آزمایشگاه، به انجام آزمایش پرداخته می‌شد. همچنین در صورت نیاز به استفاده مجدد از نمونه تهیه شده، در شرایط استاندارد (pH<2 و استفاده از H_2SO_4 در ظرف پلی‌اتیلن و در سرمای ٤ درجه‌سانتی‌گراد) نگهداری می‌شد. زمان نگه‌داری پساب با توجه به اندازه‌گیری فسفات، نیترات و COD مدت زمان ۷ روز در نظرگرفته شد. مقادیر pH با استفاده از pH سنج کالیبره شده مدل 510 PC صورت گرفت. جهت قرائت مقادیر فسفات، نیترات و COD در زمان‌های مشخص از پساب در حال تصفیه نمونه برداری شد و پس از حذف کدورت در سل‌های مخصوص نگهداری و عملیات قرائت انجام گردید. مشخصات پساب در جدول۱ آورده شده است. جهت تنظیم pH محلول از NaOH پنج نرمال و HCl یک نرمال استفاده شد. NaOH و HCl مورد استفاده، ساخته شرکت مرک آلمان بودند. همچنین آنالیز فسفات بر اساس روش اسید وانادومولیبدوفسفر صورت گرفت و مطابق با روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب انجام شد.

آزمایشات ستون ناپیوسته

جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا با استفاده از آزمایش‌های مقدماتی زمان تصفیه پساب انتخاب شد. بدین منظور آزمایشی با مدت زمان ۱۲۰ دقیقه انجام شد و راندمان حذف آلاینده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این‌که از زمان ٦٠ دقیقه به بعد تغییر چندانی در کارایی حذف فسفات مشاهده نشد لذا زمان تصفیه در سایر آزمایش ها نیز زمان ٦٠ دقیقه انتخاب گردید. در این آزمایش ابتدا به بررسی pH در کارایی حذف فسفات، نیترات و COD پرداخته شد و به این منظور آزمایش در شش pH مختلف ۳، ٤، ٥، ٦، ۷ و ۹ انجام شد و سایر پارامترها اعم از فاصله بین الکترودها و شدت جریان الکتریکی و زمان ماند ثابت فرض گردید. در مرحله بعد، پس از به دست آوردن pH که بیشترین کارایی حذف در آن رخ می‌دهد سایر پارامترها را ثابت نگهداشته و فاصله بین الکترودها تغییر داده شد.



شکل ۱: سل انعقاد الکتریکی استفاده شده در پژوهش حاضر

جدول ۱: مشخصات عمومی پساب خام واحد رختشوی‌خانه

پارامتر	واحد	مقدار اولیه	استاندارد ملی تخلیه پساب‌ها به چاه جاذب
رنگ	-	خاکستری	-
درجه اسیدی	pH	٦-٩	٥-٩
دما	سانتیگراد	١٩-٢٢	-

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

COD_0	$\frac{mg}{l}$	۱۲۰۰-۲۲۰۰	٦۰ (لحظه ای ۱۰۰)
TDS	NTU	۷۰۹-۸۱۲	-
هدایت الکتریکی	$\frac{\mu s}{cm}$	۱۳۵۰-۱۳۸۵	-
PO_4^{3-}	$\frac{mg}{l}$	٤/٥-١٤	٦ برحسب فسفر
NO_3^-	$\frac{mg}{l}$	٢٥-٦٠	١٠

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 پارامترها ثابت در نظر گرفته شده بودند) و از بین ٤ شدت جریان انتخابی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ آمپر بهترین شدت جریان الکتریکی از نظر بالاترین کارایی حذف آلاینده انتخاب گردید. در تمام مراحل انجام آزمایش کلیه مقادیر pH، اختلاف پتانسیل الکتریکی و دما، به طور مرتب اندازه‌گیری و ثبت شد.

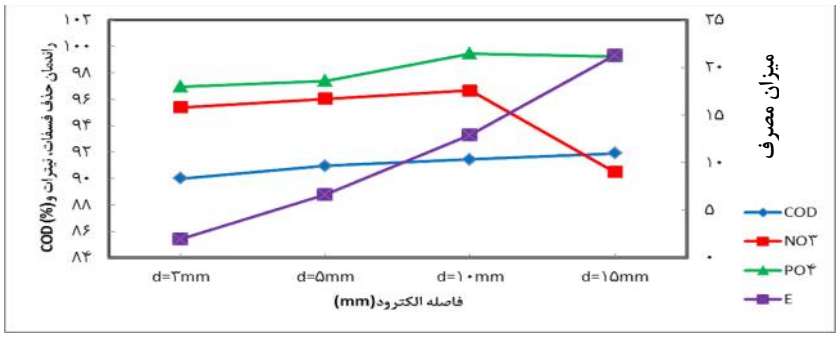
یافته‌ها

در سل انعقاد الکتریکی حاضر پساب آلوده در فضای بین الکترودها حضور دارد و در تماس با یون هیدروکسیدآهن امکان تصفیه پیدا می‌کند. از این رو با تغییر در فاصله بین صفحه الکترودها می‌توان تغییرات ایجاد شده بر روی کارایی حذف فسفات، نیترات و COD را به‌دست آورد. به همین منظور از چهار فاصله انتخابی ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلیمتر جهت انجام آزمایش‌ها بهره گرفته شد. در واقع شرایط عملیاتی در این قسمت، pH=7، $j=12mA/cm^2$، $t=60\ min$ و $d=3, 5, 10, 15mm$ بود. نتایج حاصل از بررسی اثر تغییرات فواصل بین صفحات الکترودها (شکل ۲) نشان داد که با افزایش فاصله از ۳ تا ۱۰ میلی‌متر حداکثر کارایی حذف فسفات افزایش می‌یابد اما با افزایش فاصله از ۱۰ به ۱۵ میلی‌متر، این حداکثر سیر نزولی پیدا کرده و کاهش می‌یابد. در این مرحله حداکثر کارایی حذف فسفات، نیترات و COD، در شرایط عملیاتی pH=7، $J=12mA/cm^2$، زمان الکترولیز ٦۰ دقیقه و فاصله الکترود ۱۰ میلیمتر برابر با ۹۹/٤٥٪، ۹٦/٦۷٪ و ۹۱/٤۳٪ به‌دست آمد.

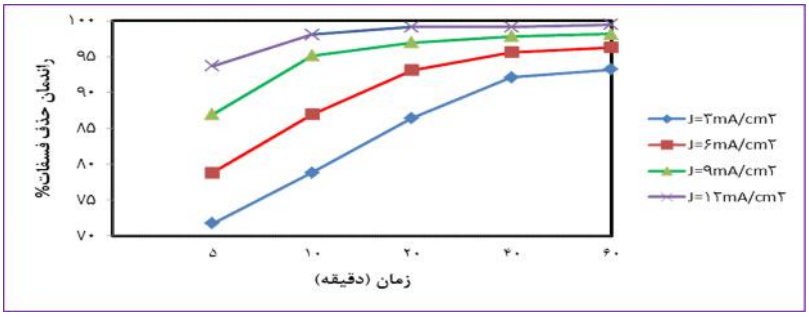
در شکل۲ مقایسه‌ای بین تاثیر فاصله الکترودها و میزان مصرف انرژی الکتریکی بر کاهش فسفات، نیترات و COD موجود در پساب صورت گرفته است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان مصرف انرژی با افزایش فاصله الکترودها افزایش یافته است. در واقع افزایش فاصله الکترودها نمایانگر یک روند صعودی در مصرف انرژی است. حال آن‌که کارایی حذف فسفات، نیترات و COD در هنگام آزمایش در فاصله ۳ میلی‌متر به میزان ۹٦/۹۵٪، ۹۵/۳۹٪ و ۹۰٪ ، در فاصله ۵ میلی‌متر به میزان ۹۷/٤۰٪، ۹٦/۰۳٪ و ۹۰/۹۵٪ و در فاصله ۱۵ میلی‌متر به میزان ۹۹/۲٤٪، ۹۰/٤۸٪ و ۹۱/۹۰٪ رسیده است. همچنین میزان مصرف انرژی به ازای یک متر مکعب پساب حاوی سه فاکتور فسفات، نیترات و COD به ترتیب در فواصل ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر برابر با ۱/۹۳، ٦/٦۱، ۱۲/۹۰ و ۲۱/۲۸ کیلو وات ساعت گزارش گردید.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]



شکل ۲: نتایج حاصل از بررسی اثر تغییرات فاصله بر کارایی حذف فسفات، نیترات و COD و همچنین مقایسه اثرات بر روی میزان مصرف انرژی (شرایط عملیاتی pH=7، J=3,6,9,12mA/cm2، d=10mm)

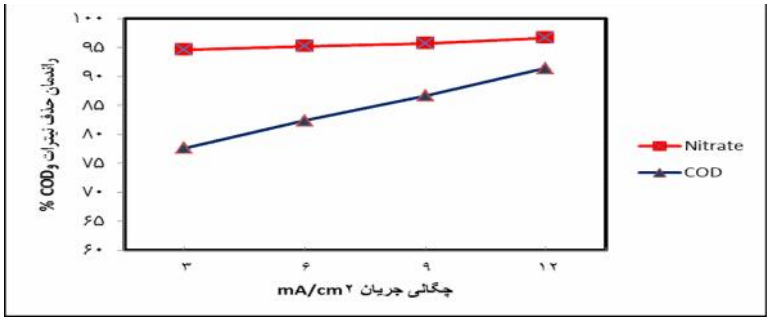


شکل ۳: نتایج حاصل از بررسی اثرات تغییرات چگالی جریان بر کارایی حذف فسفات (شرایط عملیاتی pH=7، J=3,6,9,12mA/cm2، d=10mm)

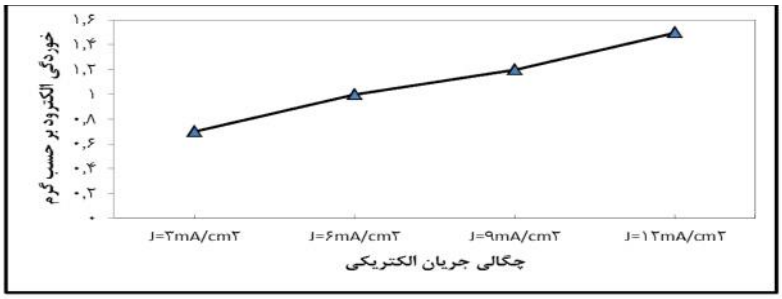
به منظور بررسی اثرات دانسیته جریان، آزمایش در چهار دانسیته جریان مختلف ۳، ٦، ۹و ۱۲میلی آمپر برسانتی‌مترمربع و با ثابت نگه‌داشتن سایر شرایط عملیاتی (pH=7، t=60min و d=10mm) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ حذف فسفات در دقایق آغازین عملیات الکترولیز بالاست (شیب تند اولیه نمودارها)، ولی رفته‌رفته با گذشت زمان کاهش می‌یابد (کاهش شیب نمودارها). هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی جریان، نرخ حذف فسفات افزایش می‌یابد. در مورد کارایی حذف COD در پساب مورد نظر بیشترین میزان حذف در چگالی جریان ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به میزان ۹۱/٤۳٪ به دست آمد. کارایی جداسازی COD پس از گذشت ٦۰ دقیقه از زمان شروع واکنش برای چگالی جریان‌های ۳ و٦ و ۹ و ۱۲ میلی‌آمپر بر-سانتی‌مترمربع به ترتیب برابر با ۷۷/٦۲٪، ۸۲/۳۸٪، ۸٦/٦۷٪ و۹۱/٤۳٪ گزارش شد. مورد کارایی حذف نیترات بیشترین میزان حذف در چگالی جریان۱۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع به میزان ۹٦/٦۷٪ بود. سایر مقادیر کارایی حذف نیترات در چگالی جریان‌های ۳، ٦ و ۹ میلی‌آمپر برسانتی‌مترمربع به ترتیب ۹٤/٦۰٪، ۹۵/۲٤٪ و ۹۵/۷۱٪ گزارش گردید (شکل٤).

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]



شکل ٤: نتایج حاصل از بررسی اثرات تغییرات چگالی جریان بر کارایی حذف نیترات و COD (شرایط عملیاتی pH=7، J=3,6,9,12mA/cm2، d=10mm)

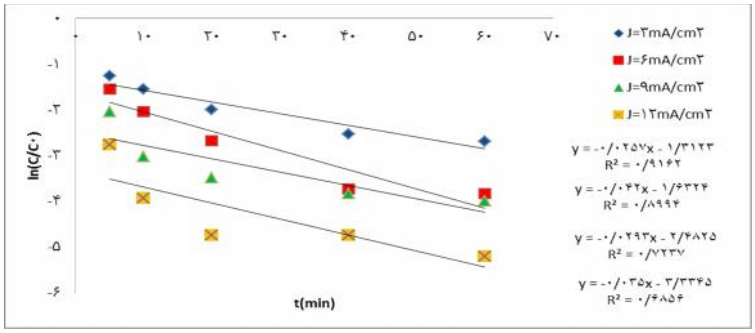


شکل ۵: نمودار میزان خوردگی الکترود آهنی در چگالی جریان‌های مختلف و pH=7 و فاصله الکترود ۱سانتی متر

همچنین در تحقیق حاضر با افزایش چگالی جریان میزان خوردگی فلز آهنی افزایش می‌یابد. میزان خوردگی الکترودهای آهنی در شدت جریان های ۳، ٦، ۹ و ۱۲ میلی آمپر بر سانتی-مترمربع به ترتیب برابر با ۰/۷، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۵ گرم گزارش گردید (شکل۵).

مقادیر ثابت واکنش سینتیک درجه ۱و ۲ به ترتیب در شکل‌های ٦ و۷ نمایش داده شده است. همچنین مقادیر ثابت‌های سنیتیکی نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقدار R^2 یا ضریب همبستگی، در سینتیک درجه ۲ بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و نتایج بهتری نسبت به سینتیک درجه ۱، در حذف فسفات از نمونه موردی پساب ارائه می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در نتیجه افزایش چگالی جریان از ۳ به ۱۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع، واکنش حذف آلاینده در حدود ۱۳ برابر سریع‌تر صورت می‌گیرد.

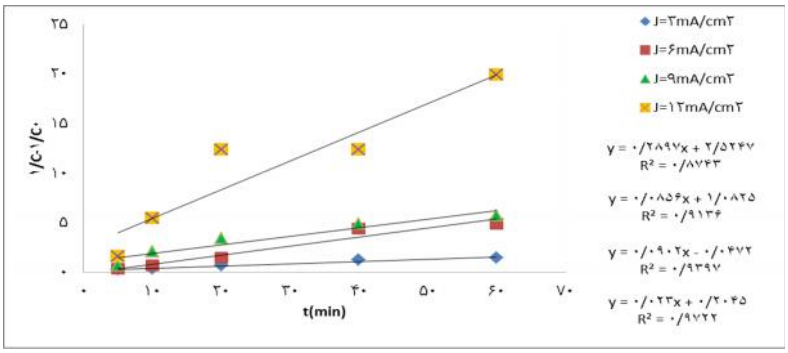
در این تحقیق پس از به‌دست آوردن شرایط بهینه، بار دیگر آزمایش تکرار گردیده و از آنالیز XRF جهت تعیین عناصر تشکیل دهنده لجن تولیدی استفاده گردید (جدول۳).



شکل ۶: نمودار سینتیک واکنش درجه ۱ بر حسب زمان

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]



شکل۷: نمودار سینتیک واکنش درجه ۲ بر حسب زمان

جدول ۲: پارامترهای معادلات سینتیک برای حذف فسفات به وسیله الکترود آهن

	$k1(\frac{1}{\min})\times10^3$	R^2	$k_2(\frac{L}{mg.\min})\times10^3$	R^2
$3\frac{mA}{cm^2}$	-۲۵	۰/۹۱۶	۲۳	۰/۹۷۲
$6\frac{mA}{cm^2}$	-۴۲	۰/۸۹۹	۹۰	۰/۹۳۹
$9\frac{mA}{cm^2}$	-۲۹	۰/۷۲۳	۸۵	۰/۹۱۳
$12\frac{mA}{cm^2}$	-۳۵	۰/۶۸۵	۲۸۹	۰/۸۷۴

جدول ۳: آنالیز XRF لجن تولیدی در فرآیند حذف فسفات به وسیله الکترود آهن در شرایط بهینه

ترکیبات	درصد	ترکیبات	درصد
Al_2O_3	۰/۲۹	L.O.I	۲۴/۱۱
Fe_2O_3	۷۱/۱۹	MgO	۰/۳۱
Na_2O	۰/۵۴	CaO	۰/۵۸
SiO_2	۱/۴۳	K_2O	۰/۱۱
SO_3	۲/۲۹	MnO	۰/۱۷۴

بحث

نتایج حاصل از بررسی اثر تغییرات فواصل بین صفحات الکترودها نشان داد که با افزایش فاصله از ۳ تا ۱۰ میلی‌متر حداکثر کارایی حذف فسفات افزایش می‌یابد اما با افزایش فاصله از ۱۰ به ۱۵ میلی‌متر، این حداکثر سیر نزولی پیدا کرده و کاهش می‌یابد. در مورد علت این مساله می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که با افزایش فاصله بین آند و کاتد، احتمال حضور تعداد بیشتری از ذرات آلودگی پساب جهت واکنش با هیدروکسیدهای تولید شده ایجاد می‌شود. این مساله در افزایش فاصله الکترود از ۳ تا ۱۰ میلی‌متر حاکم است. با افزایش فاصله صفحات به بیش از ۱۰ میلی‌متر تغییر چندانی در میزان کارایی حذف آلاینده مشاهده نگردید. این مساله ممکن است به دلیل جابجایی‌های بسیار ناچیز یون‌های تشکیل شده در حین فرآیند الکترولیز باشد[11]. مساله مهمی که در این قسمت قابل تامل

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

است بحث تغییرات ولتاژ با تغییرات فاصله بین الکترودهاست. در واقع فاصله الکترودها روی نرخ حذف آلاینده و همچنین میزان انرژی مصرفی موثر است.[۱و۲] به‌طوری‌که در تحقیق مشاهده گردید با افزایش فاصله بین الکترودها ولتاژ موجود افزایش می‌یابد که این مساله به معنی مصرف بیش‌تر جریان الکتریسیته و در نتیجه مصرف بیش‌تر انرژی برق می‌باشد. مطالعات تاثیر چگالی جریان را به عنوان یک عامل مهم در انجام انعقاد الکتریکی اثبات کرده است. به علاوه دانسیته جریان در میزان مصرف الکترود تولیدکننده ترکیبات منعقدکننده موثر است. چگالی جریان‌الکتریکی در یک سل الکتروشیمیایی، عبارت است از پتانسیل الکتریکی اعمالی بر واحد سطح الکترود کاتد که در سیستم SI با واحد آمپر بر مترمربع و یا میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع بیان می‌شود. مطابق قانون فارادی رابطه (۱) افزایش شدت جریان اعمالی باعث افزایش یون‌های فلزی خورده شده از سطح الکترود آند قربانی می‌شود.[۷و۱۲]

$$C = \frac{I \times t \times M}{n \times F \times V} \quad (۱)$$

در رابطه فوق C غلظت ورودی بر حسب mg/l و v حجم پساب بر حسب لیتر هستند، سایر پارامترها عبارتند از I: شدت جریان عبوری از مدار الکتریکی (A)، t: مدت زمان الکترولیز (s)، M: جرم مولی فلز مورد استفاده (gr/mol)، n: تعداد الکترون‌های مبادله شده در آند و کاتد و F: ثابت فارادی (F=96487 C/mol) [۷و۱۱]. با توجه به رابطه (۱) با افزایش شدت جریان و متعاقب آن افزایش در چگالی جریان، تجزیه صفحات آهنی افزایش یافته و در نتیجه غلظت عوامل منعقدکننده در پساب افزایش می‌یابد، لذا میزان حذف فسفات 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 مفید می‌باشد[۱۱]. بیشترین کارایی حذف فسفات در چگالی جریان ۱۲ میلی‌آمپر برسانتی‌مترمربع دیده شده است که با توجه به تأثیر منفی افزایش هزینه انرژی الکتریکی مصرفی بر ارزیابی اقتصادی روش به‌کارگیری انعقاد الکتریکی، افزایش مجدد مقدار چگالی جریان به بیش از مقدار مذکور توجیه پذیر نبوده و لذا مقدار $J=12mA/cm^2$ با کارایی حذف ۹۹/۴۵٪ به عنوان بهترین چگالی جریان در این پژوهش در نظر گرفته شد(شکل۳). تغییرات چگالی جریان بر کارایی حذف نیترات اثر کاملاً مشخصی دارد. به این ترتیب که با افزایش چگالی جریان کارایی حذف نیترات افزایش می‌یابد[۱۳].

در این بخش به بررسی سینتیک درجه ۱و۲ در فرآیند حذف فسفات پرداخته شد. همانطور که می‌دانیم نرخ حذف آلاینده به مقدار یون‌های تولیدشده در محیط واکنش، جنس الکترود، شدت جریان الکتریسیته و واکنش‌های الکتروشیمیایی موجود بستگی دارد[۱۴]. در مهندسی محیط زیست معمولاً طراحی فرآیندهای شیمیایی مبتنی بر تعیین بهترین مدل حذف آلاینده می‌باشد. بنابراین به منظور طراحی فرآیندهای شیمیایی، لازم است که سینتیک حذف آلاینده به خوبی بررسی شود[۱۵].

طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس XRF یا طیف‌سنجی پرتو ایکس یکی از روش های آنالیز عنصری است که از آن به طور وسیعی در صنعت استفاده می شود. این روش، به ویژه به علت سرعت زیاد در شناسایی عنصری، برای برخی از صنایع، ضروری است. در این روش، پرتو ایکس به نمونه مجهول تابیده و در اثر برانگیختن اتم‌ها باعث پدید آمدن پرتو ایکس ثانویه می‌شود. سپس با تعیین طول موج انرژی پرتو ایکس ثانویه، عنصر یا عناصر مورد نظر را می‌توان شناسایی کرد. مطابق جدول (۳) مشاهده می‌شود که ترکیبات آهن سه ظرفیتی در محیط بسیار بیشتر از سایر ترکیبات می‌باشد و دلیل روشنی بر جذب آلاینده‌های موجود در محیط بر روی فلز آهن می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش به بررسی کاربرد فرآیند انعقاد الکتریکی بر روی حذف همزمان فسفات، نیترات و COD در پساب یک

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

واحد رختشوی‌خانه پرداخته شد. نتایج نشان داد که با استفاده از روش ذکر شده، می‌توان به کارایی حذف ۹۹/۳۳٪ فسفات، کارایی حذف ۹۶/۶۷٪ نیترات با استفاده از الکترود آهن دست پیدا نمود. هم‌چنین نتایج نشان دادند که با استفاده از این روش و در شرایط یکسان به کارایی حذف ۹۱/۴۳٪ برای COD دست یافته شد. یافته ها حاکی از آن است که پارامترهای عملیاتی هم‌چون pH اولیه محلول، چگالی جریان و فاصله الکترودها بر کارایی حذف همزمان فسفات، نیترات و COD تأثیر دارد. شرایط بهینه جهت حذف فسفات در pH=7، برای نیترات در pH=9 و برای COD در pH=6 ، چگالی جریان ۱۲میلی آمپر بر سانتی‌مترمربع و فاصله الکترودها برابر با یک سانتی‌متر در مدت زمان شصت دقیقه به دست آمد. استفاده از الکترودهای دیگر جهت انجام آزمایش‌ها همچون گرافیت و بررسی اثر آن‌ها در مصرف انرژی و کارایی حذف آلاینده و هزینه‌های عملیاتی در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

1. 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 aluminum and iron plate electrodes. Sep Purif technol. 2006; 52: 218-223.
2. Irdemez S, Demircioglu N, Sevki Yildiz Y. The effect of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. J Hazard Mater. 2006; B137:1231-1235.
3. Paul AB, Electrolytic treatment of turbid water in package plant. 22nd WEDC conference. New Dehli. 1996.
4. Emamjome M M, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/floation processes. J Environ Manage. 2009; 90:1663-1679.
5. Koparal AS, Ogutveren UB. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. J Hazard Mater. 2002; 89: 83–94.
6. Amani-Ghadim AA, Aber S, Olad A, Ashassi-Sorkhabi H.Optimization of electrocoagulation process for removal of an azo dye using response surface methodology and investigation on the occurrence of destructive side reactions, Chem Eng Process. 2013; 64: 68-78.
7. Daneshvar N, Ashassi Sorkhabi H, Kasiri MB.Dechlorization of Dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation of different electrode connections. J Hazard Mater. 2004; B112: 55-62.
8. Mollah M, Schennach R, Parga J, Cocke D. Electrocoagulation (EC)- scince and applications. J Hazard Mater. 2001; B84: 29-41.
9. Taufiq Bin Rahmalan M.electrocoagulation for suspended solid removal in domestic wastewater treatment. A project report submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Engineering, Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia. 2009
10. Holt PK, Barton GW, Mitchell CA. The future for electrocoagulation as localized water treatment technology. Chemosphere. 2005; 45: 355-367.
11. Saeedi M, Khalvati-Fahliyani A. Treatment of Oily Wastewater of a Gas Refinery by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes. Water Environ Res. 2010; 83: 41-50.
12. Tezkan Un U, Koparal AS, Ogutveren U. Fluoride removal from water and wastewater with a bach cylindrical electrode using electro-coagulation. Chem Eng J. 2013; 223: 110-115.
13. Vasudevan S, Epron F, Lakshmi J, Ravichan Dran S, Mohan S, Sozhan J. Removal of NO3 – from Drinking Water by Electrocoagulation – An Alternate Approach. Clean-Soil Air Water. 2010; 38: 225-229.
14. Saleem M, Bukhari M, Noman Akram M. Elecrocoagulation for the Treatment of Wastewater for Reuse in Irrigation and Plantation. J Basic App Sci. 2011; 7: 11-20.
15. Zarrabi M, Samarghandi MR, Rahmani AR, Noori Sepehr M, Mohammadi Kalhori E, Jafari SJ, Namdari S. Kinetic Study of Acid red 18 and Acid red 14 Removal from Aqueous Solution Using Metallic Iron. Health and hygiene 2009; 1: 31-40.[In Persian]

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]

Assessment of Electrocoagulation Method for Simultaneous Removal of Phosphate, Nitrate and COD by Fe Electrodes from Laundry Wastewater

Marzie Razavi[*1], Mohsen Saeedi[2], Mehdi Komasi[3]

1. Department of Engineering, Islamic Azad University Borujerd Branch, Borujerd, Iran

2. Department of Civil Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3. Department of Civil Engineering Faculty, Ayatolah Borujerdi University, Borujerd, Iran

***E-mail:** Marzie.Razavi@gmail.com*

Received: 4 Oct. 2013 ; Accepted: 21 Dec. 2013

ABSTRAC

Background & Objectives: Discharging of wastewaters containing detergents either by manufacturers or through domestic and industrial usages has caused the incidence of serious environmental problems. Entering these materials in to the surface waters reduces the amount of dissolved oxygen in the water and causes unsightly environment and groundwater pollution that is always has been notified by environmental experts.

Methods: This study focuses on the treatment of laundry wastewater containing phosphate, nitrate and COD using iron as sacrificial electrode by EC process. Various operating conditions such as pH (3, 4, 5, 6, 7, 9), distance between the electrode (3, 5, 10,15mm) and current density (3, 6,9,12 mA/cm2) were investigated.

Results: Experimental results showed that pollutant removal efficiency varied by changing pH, distance between the electrodes and current density. According to the results, optimum operating conditions for the removal of phosphate, nitrate and COD, were current density of 12mA/cm2, pH of 7.0, distance between the electrodes equal to 10 mm with Fe electrodes. The removal efficiency of phosphate, nitrate and COD were showed 99.33%, 96.67% and 91.43%. Also Kinetic analysis indicates that the adsorption system obeys a second- order kinetic model.

Conclusion: According to the results, the Fe electrodes have been achieved the high removal efficiency of phosphate, nitrate and COD by using electrocoagulation.

Keywords: Electro-coagulation, Phosphate, Nitrate, COD

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-09-13]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.1.1.56]