

## بررسی اثر فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فسفر از پساب تصفیه شده خروجی از سیستم لجن فعال

داورخواه ربانی<sup>۱</sup>، دکترعلیرضا مصداقی نیا<sup>۲</sup>، دکترسپهر ناصری<sup>۲</sup>، دکترکاظم ندافی<sup>۲</sup>

### خلاصه:

سابقه و هدف: با توجه به نقش غذایی فسفر برای گیاهان میکروسکوپی و ماکروسکوپی که در نهایت به اوتروفیکاسیون آب‌های سطحی می‌انجامد و نیز موفقیت فرآیند الکتروشیمیایی در تصفیه انواع فاضلاب‌ها، این تحقیق با هدف " تعیین اثر فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فسفر از پساب تصفیه شده خروجی از سیستم لجن فعال "، در سال ۱۳۸۱ بر روی پساب ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب مجتمع مسکونی دانشگاه علوم پزشکی کاشان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: این تحقیق به صورت تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی در سیستم بسته انجام شد. تأثیر شدت جریان الکتریکی، نوع الکترود مصرفی، زمان واکنش، خصوصیات اولیه نمونه (دما، pH، هدایت الکتریکی) و افزودن آهک بر بازده فرآیند مورد تحقیق قرارگرفت. در هر بار فرآیند ۱۵۰۰ ml پساب مرحله دوم در یک سلول الکترولیتیک ریخته شد. کاتد و آند، هر کدام شامل چهار قطعه فولاد (یا آلومینیوم)، به فاصله تقریبی ۱/۵cm در فاضلاب قرار گرفت. کل سطح مؤثر الکترودها  $336 \text{ cm}^2$  بود. قدرت ورودی توسط آمپر متر و ولت متر کنترل گردید. کاهش باقی مانده فسفر کل به کمتر از  $1 \text{ mg/L-P}$  (استاندارد) به عنوان حذف آن تلقی شد.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش شدت جریان DC و زمان واکنش، بازده حذف فسفر افزایش می‌یابد و الکترود فولادی نسبت به الکترود آلومینیوم بازده حذف بهتری دارد. تنظیم دما، pH و هدایت الکتریکی اولیه نمونه هر کدام در محدوده معینی بازده حذف فسفر را بهبود بخشید و افزودن آهک، اثر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود حذف فسفر نداشت و برای حذف فسفر، دانسیته جریان الکتریکی باگستره  $1/78$  تا  $3/7 \text{ amp/cm}^2$  و زمان واکنش ۱۰ تا ۳۰ دقیقه کافی بود.

نتیجه‌گیری: فرآیند الکتروشیمیایی با الکترود فولادی بدون نیاز به تغییر دما، pH و هدایت الکتریکی اولیه نمونه می‌تواند فسفر کل باقی مانده در پساب خروجی از سیستم لجن فعال را با موفقیت حذف نماید.

واژگان کلیدی: حذف فسفر، فرآیند الکتروشیمیایی، فاضلاب، تصفیه پیشرفته فاضلاب، اوتروفیکاسیون

۱- گروه بهداشت محیط، دانشگاه تربیت مدرس

۲- گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران

## مقدمه

فسفر همانند نیتروژن ماده غذایی گیاهان میکروسکوپی و ماکروسکوپی است و می‌تواند در پدیده اوتروفیکاسیون آب‌های سطحی نقش داشته باشد. برای به وجود آمدن پدیده شکوفه جلبکی فقط غلظت  $0/005$  تا  $0/05 \text{mg/L}$  آن برحسب فسفر کافی است (۱) وقتی فسفر عامل اصلی محدودکننده رشد جلبک‌ها باشد، باعث افزایش قدرت تکثیر آنها شده و اوتروفیکاسیون را تشدید می‌کند (۲). فسفر از منابع متمرکز و غیرمتمرکز به محیط وارد می‌شود. فاضلاب شهری به عنوان یک منبع متمرکز آلوده‌کننده محیط، حاوی اشکال مختلف فسفر است. فسفر کل موجود در فاضلاب خام شهری حدود  $10-8 \text{mg/L}$  است و حداکثر  $40-20$  درصد این مقدار در فرآیند تصفیه متداول قابل حذف می‌باشد. در منابع آب، فسفر به هر دو شکل محلول و غیر محلول یافت می‌شود و تقریباً همه فسفر موجود در آب‌های طبیعی و فاضلاب‌ها به صورت فسفات است (۷-۳). به طور معمول برای تکمیل حذف فسفر از روش‌های شیمیایی و بیولوژیکی استفاده می‌شود. در حذف شیمیایی فسفر، مواد منعقدکننده یا آهک را در مراحل مختلفی از تصفیه فاضلاب به کار می‌برند. افزودن مواد شیمیایی در هر مرحله از تصفیه مزایا و معایب خاص خود را به همراه دارد (۸). به هر حال روش‌های شیمیایی مشکلاتی نظیر تولید لجن زیاد، هزینه بهره‌برداری بالا، کاهش قدرت ته‌نشینی و آبگیری لجن و تغییر pH را به همراه دارند (۹). در روش بیولوژیکی از فرآیندهای حذف بیولوژیکی مواد مغذی (Biological Nutrient Removal) استفاده می‌شود. این فرآیند ناحیه‌ها یا ردیف‌های پی در پی، بی‌هوای، فاقد اکسیژن و هوای را

برای آزادشدن فسفر و جذب آن مورد استفاده قرار می‌دهد (۱۰). فرآیندهای بیولوژیکی نیز معایب خاص خود را به همراه دارد.

روش الکتروشیمیایی در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی مختلف به طور موفقیت‌آمیزی آزمایش شده است، اما تحقیقات ناچیزی در زمینه کارایی آن در حذف فسفر از فاضلاب صورت گرفته است. اصول کلی این روش بدین صورت است که جریان برق مستقیم از طریق آند و کاتد مستقیماً به مایع وارد می‌شود. مکانیسم‌های اصلی حذف در فرآیند الکتروشیمیایی شامل الکتروکواگولاسیون، الکتروفلوتاسیون و الکترواکسیداسیون است (۱۱).

نشان داده شده است که فرآیند الکترولیتیک جدید با استفاده از الکترودهای یونی، فسفات موجود در نمونه دست‌ساز را به صورت توده‌های غنی از فسفات در سطح آند بازیافت می‌نماید (۱۲). روش الکتروشیمیایی در تصفیه فاضلاب‌های حاوی فنل (۱۳)، آب شستشوی آبکاری (۱۴)، حذف کروم و روی از آب برج خنک‌کننده (۱۵) و نیز در حذف ذرات کلوئیدی موجود در فاضلاب (۱۶) موفقیت‌آمیز بوده است و در احیاء الکتروشیمیایی ترکیبات هالوژنه با استفاده از الکتروود گرافیتی نیز کارایی خوبی را نشان داده است (۱۷). اکسیداسیون الکتروشیمیایی در تصفیه فاضلاب کارخانجات روغن زیتون غلظت COD، را از  $20000 \text{mg/L}$  به  $5000 \text{mg/L}$  کاهش داده است (۱۸). این روش در زمان واکنش  $10-8$  دقیقه در حذف رنگ و COD از فاضلاب‌های نساجی کاملاً مؤثر بوده است و حساسیت کمتری به pH نشان داده است. نتایج آزمایش هم در سیستم بسته و هم با جریان پیوسته رضایت‌بخش بوده است (۱۱). با توجه به مزایای یاد شده، این تحقیق با هدف تعیین

کاهش باقی مانده فسفر به کمتر از مقدار استاندارد یعنی  $1\text{mg/L-P}$  (۱۹)، به عنوان حذف آن تلقی شد.

ابتدا زمان واکنش ده دقیقه و الکتروود فولادی انتخاب شد و در طی ۶ مرحله فرآیند با اعمال جریان های الکتریکی متفاوت پس از اندازه گیری فسفر باقی مانده، شدت جریان  $0/6$  آمپر به عنوان بهینه برگزیده شد. سپس این آزمایشات با الکتروود آلومینیوم انجام گرفت که با توجه به مزیت الکتروود فولادی، در مرحله بعد با استفاده از این نوع الکتروود و شدت جریان  $0/6$  آمپر، در طی ۶ فرآیند با اعمال زمان واکنش های مختلف اثر آن بر حذف الکتروشیمیایی فسفر بررسی شد. اگرچه کمترین نسبت زمان واکنش به ازای ۱ درصد حذف فسفر در زمان واکنش ۱۵ دقیقه به دست می آید، لیکن به منظور بررسی بهتر نقش سایر عوامل، در ادامه مطالعه زمان واکنش ۱۲ دقیقه به عنوان مبنا قرار گرفت.

در ادامه مطالعه به منظور تعیین اثر دما، pH و هدایت الکتریکی نمونه آزمایشات جداگانه ای ترتیب داده شد که در کلیه این آزمایشات از الکتروود فولادی استفاده به عمل آمد. در همه این آزمایشات شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش به ترتیب  $0/6$  آمپر و ۱۲ دقیقه بود ولی در هر آزمایش عامل مورد نظر تغییر داده می شد. اثر افزودن آهک، بر بهبود بازده فرآیند نیز تحت همان شرایط یاد شده و بدون تغییر دما، pH و هدایت الکتریکی اولیه پساب بررسی شد. به این منظور مقادیر مختلف آهک تجارتمی در طی ۶ آزمایش به فرآیند اضافه شد و چون آهک به تنهایی نیز قادر است فسفر موجود در فاضلاب را حذف نماید، برای تعیین اثر افزودن آهک به فرآیند

اثر فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فسفر از پساب تصفیه شده خروجی از سیستم لجن فعال، در سال ۱۳۸۱، بر روی پساب ثانویه تصفیه خانه فاضلاب دانشگاه علوم پزشکی کاشان انجام گرفت.

### مواد و روش ها

این تحقیق مطالعه ای تجربی در مقیاس آزمایشگاهی (Bench Scale) است که در یک سیستم بسته (Batch) بر روی پساب خروجی از حوض ته نشینی ثانویه تصفیه خانه فاضلاب مجتمع مسکونی و دانشکده پرستاری و مامایی دانشگاه علوم پزشکی کاشان، صورت گرفت. سیستم تصفیه فاضلاب یاد شده از نوع لجن فعال به روش هوادهی گسترده است که با ظرفیت ۱۰۰ متر مکعب در شبانه روز فاضلاب را تصفیه می نماید.

در این تحقیق اثر شدت جریان الکتریکی (در محدوده ۳۰۰ تا ۱۲۰۰۰ میلی آمپر)، نوع الکتروود مصرفی (فولاد یا آلومینیم)، زمان واکنش (در محدوده ۳۰۰ تا ۱۸۰۰ ثانیه) و خصوصیات اولیه نمونه شامل دما (در محدوده ۱ تا ۸۶ درجه سلسیوس)، pH (در محدوده ۴ تا ۱۰)، هدایت الکتریکی (در محدوده  $2946/7$  تا  $4171/2$  میکرومhos بر سانتیمتر) و افزودن آهک بر بازده فرآیند حذف فسفر مورد بررسی قرار گرفت.

در هر فرآیند،  $1500\text{ml}$  پساب مرحله دوم تصفیه خانه مذکور در یک سلول الکترولیتیک ریخته شد. کاتد و آند هر کدام شامل چهار قطعه فولاد یا آلومینیوم به فاصله تقریبی  $1/5\text{cm}$  در فاضلاب قرار گرفت. کل سطح مؤثر الکتروودها  $336$  سانتی متر مربع بود. قدرت ورودی توسط آمپر متر و ولت متر کنترل می شد. قبل و بعد از هر بار اعمال فرآیند، فسفر کل اندازه گیری شد. میزان فسفر موجود در نمونه ها به روش اسکورییک اسید (۶)، تعیین شد.

می‌دهد که با افزایش جریان الکتریکی، درصد حذف فسفر افزایش می‌یابد. این فرآیند توانست به کمک الکتروود فولادی تا ۹۳/۱۱ درصد فسفر کل اولیه را حذف نماید و باقی‌مانده فسفر را از ۵/۹۵ به ۰/۴۱ mg/L کاهش دهد.

فرآیند الکتروشیمیایی تا دانسیته جریان ۱۵/۱۸ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع موجب تغییر رنگ در نمونه تحت واکنش می‌شود که رنگ حاصل پس از خاتمه فرآیند با گذشت زمان زایل می‌شود.

الکتروشیمیایی، لازم بود عملکرد آهک تنها در فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی (بدون فرآیند الکتروشیمیایی) نیز مورد بررسی قرار گیرد، که به این منظور با همان نوع آهک، آزمایش جار (Jar Test) انجام گرفت.

#### یافته‌ها

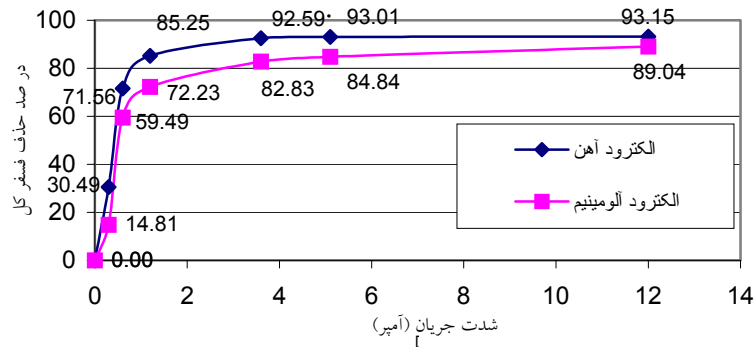
نتایج مربوط به حذف الکتروشیمیایی فسفر از پساب در جدول شماره ۱ ارائه شده است و نشان

جدول ۱- اثر تغییرات جریان الکتریکی در فرآیند الکتروشیمیایی حذف فسفر

مشخصات نمونه	شدت جریان الکتریکی mamp	زمان واکنش min	دانسیته جریان الکتریکی mamp/cm <sup>2</sup>	باقیمانده فسفر کل mg/L	درصد حذف فسفر کل	mamp/ درصد حذف	خصوصیات نمونه بعد از واکنش
نمونه پساب لجن فعال	-	-	-	۵/۹۵	۰/۰۰	-	-
آزمایش شماره ۱	۳۰۰	۱۰	۰/۸۹	۴/۱۴	۳۰/۴۲	۹/۸۶	زرد کم رنگ با لایه نازک کف در سطح
آزمایش شماره ۲	۶۰۰	۱۰	۱/۷۶	۱/۶۹	۷۱/۶۰	۸/۳۸	سبز کم رنگ با لایه کف جزئی در سطح
آزمایش شماره ۳	۱۲۰۰	۱۰	۳/۵۷	۰/۸۸	۸۵/۲۱	۱۴/۰۸	سبز با لایه کف در سطح
آزمایش شماره ۴	۳۶۰۰	۱۰	۱۰/۷۱	۰/۴۴	۹۲/۶۱	۳۸/۸۷	سبزه‌تمایل به تیره با لایه کف زیاد در سطح
آزمایش شماره ۵	۵۱۰۰	۱۰	۱۵/۱۸	۰/۴۲	۹۲/۹۴	۵۴/۸۷	سبزه‌تیره با لایه ضخیم ۳/۵ سانتیمتری در سطح
آزمایش شماره ۶	۱۲۰۰۰	۱۰	۳۵/۷۱	۰/۴۱	۹۳/۱۱	۱۲۸/۸۸	سفید و شفاف با لایه در سطح و کف

آلومینیمی در مقایسه با الکتروود فولادی نیاز به شدت جریان الکتریکی بیشتری بود.

نقش الکتروود فولادی در مقایسه با الکتروود آلومینیمی در نمودار ۱ ارائه شده است و برای دستیابی به یک درصد حذف معین الکتروود



نمودار ۱ - روند حذف الکتروشیمیایی فسفر نسبت به تغییرات شدت جریان الکتریکی با الکتروود فولادی، در مقایسه با الکتروود آلومینیومی

توانست فسفر کل را از  $5/37 \text{ mg/L}$  به  $0/65 \text{ mg/L}$  کاهش دهد. همین بازده با زمان واکنش ده دقیقه و شدت جریان  $1/2$  آمپر به دست آمد. با مشاهده جداول ۱ و ۲ مشخص می‌شود که فرآیند الکتروشیمیایی به کمک الکتروود فولادی در دانسیته جریانی با گستره  $1/78 \text{ amp/cm}^2$  تا  $3/57 \text{ amp/cm}^2$ ، در زمان واکنش مناسب فسفر را حذف نموده است.

در جدول ۲، تأثیر زمان واکنش بر حذف فسفر نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان واکنش، درصد حذف فسفر افزایش می‌یابد. کم‌ترین نسبت زمان واکنش به ازای ۱ درصد حذف فسفر در زمان واکنش ۱۵ دقیقه به دست آمد. تصفیه الکتروشیمیایی با الکتروود فولادی، شدت جریان  $0/6$  آمپر و زمان واکنش ۳۰ دقیقه، بازده حذف  $87/9$  درصدی را به همراه داشت و

جدول ۲- اثر تغییرات زمان واکنش در فرآیند الکتروشیمیایی حذف فسفر

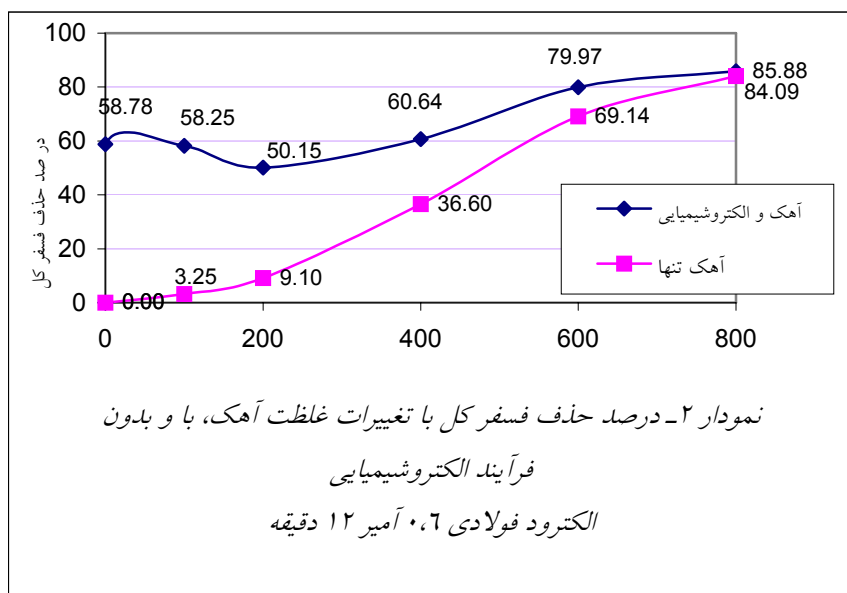
مشخصات نمونه	زمان واکنش (ثانیه)	شدت جریان الکتریکی (میلی آمپر)	باقیمانده فسفر کل (میلی گرم در لیتر)	درصد حذف فسفر کل (درصد)	درصد حذف فسفر کل در واحد زمان (درصد/ثانیه)
نمونه پساب لجن فعال	-	-	5/37	-	-
آزمایش شماره ۱	۱۸۰۰	۶۰۰	0/65	87/90	20/48
آزمایش شماره ۲	۱۵۰۰	۶۰۰	1/6	70/20	21/37
آزمایش شماره ۳	۱۲۰۰	۶۰۰	1/90	64/62	18/57
آزمایش شماره ۴	۹۰۰	۶۰۰	1/93	64/06	14/05
آزمایش شماره ۵	۶۰۰	۶۰۰	3/43	37/13	16/61
آزمایش شماره ۶	۳۰۰	۶۰۰	5/34	0/56	535/71

بازده حذف فسفر در جدول ۳ ارایه شده است

اثر تغییر دما، pH و هدایت الکتریکی اولیه نمونه بر

جدول ۳- اثر تغییر دما، pH و هدایت الکتریکی اولیه نمونه در فرآیند الکتروشیمیایی حذف فسفر

حذف فسفر کل (درصد)	باقیمانده فسفر کل (میلی گرم در لیتر)	زمان واکنش الکتروشیمیایی (دقیقه)	شدت جریان DC واکنش (میلی آمپر)	EC قبل از واکنش (میکرومhos بر سانتیمتر)	pH قبل از واکنش	دما قبل از واکنش (درجه سلسیوس)	مشخصات نمونه
-	۳/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۲۴	نمونه پساب لجن فعال
۱۲/۶۳	۳/۴۶	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۱	آزمایش شماره ۱
۲۰/۴۵	۳/۱۵	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۱۴	آزمایش شماره ۲
۲۵/۵۱	۲/۹۵	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۳
۴۱/۶۷	۲/۳۱	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۴۹	آزمایش شماره ۴
۵۰/۷۶	۱/۹۵	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۷۲	آزمایش شماره ۵
۳۲/۵۸	۲/۶۷	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۸۶	آزمایش شماره ۶
۹/۳۴	۳/۵۹	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۴	۲۴	آزمایش شماره ۷
۳/۲۸	۳/۸۳	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۵/۵	۲۴	آزمایش شماره ۸
۲۵/۵۱	۲/۹۵	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۹
۳۴/۶۰	۲/۵۹	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۸/۵	۲۴	آزمایش شماره ۱۰
۵۶/۵۷	۱/۷۲	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۱۰	۲۴	آزمایش شماره ۱۱
۲۳/۴۸	۳/۰۳	۱۲	۶۰۰	۲۹۴۶/۷	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۱۲
۲۵/۵۱	۲/۹۵	۱۲	۶۰۰	۳۳۵۷/۵	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۱۳
۴۲/۴۲	۲/۲۸	۱۲	۶۰۰	۳۴۹۹/۷	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۱۴
۴۳/۱۸	۲/۲۵	۱۲	۶۰۰	۳۹۵۰	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۱۵
۳۱/۸۲	۲/۷۰	۱۲	۶۰۰	۴۱۷۱/۲	۷/۷۷	۲۴	آزمایش شماره ۱۶



تنهایی قادر است حدود ۶۰ درصد فسفر موجود در نمونه را حذف نماید در حالی که در ترسیب شیمیایی با آهک برای دستیابی به همین میزان

به طوری که از نمودار ۲ برمی‌آید فرآیند الکتروشیمیایی با الکتروود فولادی، شدت جریان الکتریکی ۰/۶ آمپر و زمان واکنش ۱۲ دقیقه به

علاوه بر این در مطالعه‌ای که توسط Sheng H و همکاران، با استفاده از الکتروکودن بر روی فاضلاب نساجی صورت گرفت در دانسیته جریان الکتریکی  $92/5 \text{ amp/m}^2$  حداکثر حذف COD ۶۱ درصد بود (۱۱). اختلاف در نتایج این تحقیق با مطالعات یاد شده را می‌توان به اختلاف در نمونه تحت بررسی و شرایط واکنش نسبت داد. در کلیه فرآیندهای انجام شده در این تحقیق لایه کفمانندی به رنگ‌های تیره در سطح مایع مشاهده شد که مبین فعال بودن مکانیسم الکتروفلوتاسیون است.

به نظر می‌رسد به لحاظ اختلاف پتانسیل اکسیداسیون آهن و آلومینیم، آندهای فولادی راحت‌تر از آلومینیم اکسیده شود و تولید  $\text{Fe(OH)}_3$  بیشتری نسبت به  $\text{Al(OH)}_3$  بنماید که حذف بیشتر فسفر محلول از طریق مکانیسم الکتروکواگولاسیون را به همراه دارد. به موازات آن در کاتد گاز  $\text{H}_2$  بیشتری آزاد می‌شود که از طریق مکانیسم الکتروفلوتاسیون حذف بیشتر فسفر موجود در ترکیبات نامحلول را به دنبال دارد، لذا برتری نسبی الکتروکودن فولادی نسبت به الکتروکودن آلومینیم در شرایط یکسان، قابل توجیه است.

همان‌طور که مشاهده شد در مدت ۱۰ تا ۳۰ دقیقه می‌توان با اعمال جریان DC مناسب، بدون تغییر در خصوصیات نمونه به بازده مطلوب حذف فسفر دست یافت. این نتیجه با زمان ۱۰ دقیقه‌ای که توسط Lin S. H و همکاران برای حذف COD و رنگ از فاضلاب نساجی اعلام شده است مطابقت دارد (۱۱) و کمتر از ۶۰ دقیقه‌ای است که توسط Naumczyk J و همکاران (۲۰) گزارش شده است. افزایش دما تا حدود  $70^\circ\text{C}$  موجب بهبود بازده حذف فسفر می‌شود ولی دماهای بالاتر کاهش آن

درصد حذف، به حدود  $520$  میلی‌گرم در لیتر آهک تجارتي نیاز است. افزودن مقادیر کم آهک در فرآیند الکتروشیمیایی اثر محسوسی بر بازده حذف فسفر ندارد.

### بحث

این تحقیق نشان داد که فرآیند الکتروشیمیایی می‌تواند در حذف فسفر از پساب خروجی از سیستم لجن فعال موفق باشد. حداکثر بازده حذف فسفر (۹۳/۱۱ درصد) در این مطالعه بیش از میزانی است که توسط Lin S. H & Peng C. F و Naumczyk J و همکارانشان برای حذف COD و DOC از فاضلاب نساجی گزارش شده است (۲۰ و ۱۱). دانسیته جریان الکتریکی مناسبی که در این تحقیق تعیین شده است، به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقادیر اعلام شده توسط محققان یاد شده است و حذف آسان‌تر فسفر را نشان می‌دهد. دانسیته جریان به دست آمده در محدوده اعلام شده توسط Sakakibara Y قرار دارد (۱۲).

در مطالعه اخیر که پیرامون حذف و بازیافت فسفر از فاضلاب دست‌ساز صورت گرفته، دانسیته جریان الکتریکی  $0/001 \text{ mamp/cm}^2$  تا  $0/1 \text{ mamp/cm}^2$  باعث شده بود که فسفات فاضلاب دست‌ساز به صورت توده‌های غنی از فسفات در سطح آند الکترودهای یونی، حذف و بازیافت گردد (۱۲).

در مطالعه‌ای که توسط Naumczyk J و همکاران در خصوص تصفیه الکتروشیمیایی فاضلاب نساجی حاوی غلظت بالای کلر و به کمک الکترودهای  $\text{Ti/Pt/Ir}$ ،  $\text{Ti/Pt}$ ،  $\text{Ti/RuO}_2$  صورت گرفت، بعد از ۶۰ دقیقه الکترولیز در دانسیته جریان  $6 \text{ amp/dm}^2$ ، COD به میزان ۹۲ - ۸۵ درصد و DOC به میزان ۸۵ درصد حذف شد (۲۰).

توجه به مشاهدات می‌تواند به دلیل رسوب نمک بر روی الکترودها باشد.

افزودن آهک تجارتي به فرآیند الکتروشیمیایی تا غلظت ۳۵۰ میلی‌گرم در لیتر اثر منفی دارد که دلیل آن را می‌توان به جذب  $H_2$  و اختلال در مکانیسم الکتروفلوئوتاسیون و نیز ایجاد رسوب بر روی الکترودها نسبت داد. در غلظتهای بالاتر از آن، حذف فسفر بیشتری را به همراه دارد که از روند عادی حذف فسفر به وسیله آهک تنها در رسوب‌دهی شیمیایی تبعیت می‌کند. تحقیق حاضر نشان داد که فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فسفر از پساب تصفیه شده خروجی از سیستم لجن فعال، کارآمد است و با استفاده از این فرآیند می‌توان فسفر کل موجود در پساب را بدون نیاز به تنظیم pH، دما و هدایت الکتریکی اولیه نمونه حذف نمود. بنابراین در شرایط عادی، تغییر در دما، pH و هدایت الکتریکی اولیه فاضلاب به لحاظ مسائل فنی، اقتصادی و زیست محیطی توصیه نمی‌شود.

را به دنبال دارد که با توجه به مشاهدات می‌تواند به دلیل رسوب کربنات کلسیم بر روی الکترودها باشد.

در pHهای بالاتر از ۵/۵ بازده حذف فسفر با روند افزایش pH بهبود می‌یابد که با توجه به ترسیب شیمیایی فسفر در pHهای بالا (۲۱) قابل انتظار است. همچنین با کاهش pH تا حد  $H_2$  بازده حذف فسفر افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل آزاد شدن  $H_2$  و کمک به مکانیسم الکتروفلوئوتاسیون و نیز رسوب‌زدایی از سطح الکترودها و کمک به مکانیسم الکتروکواگولاسیون باشد.

افزایش هدایت الکتریکی در محدوده ۲۹۵۰ تا  $3360 \mu \text{ Mohs/cm}$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازده حذف فسفر ندارد. لیکن در فاصله  $3360$  تا  $3950 \mu \text{ Mohs/cm}$  حذف فسفر را بهبود می‌بخشد که به دلیل سهولت تبادل الکتریکی در الکترولیت قویتر قابل توجه است و در هدایت الکتریکی بالاتر از  $3950 \mu \text{ Mohs/cm}$  بازدهی کاهش می‌یابد که با

## References:

- 1- McGhee Terence J. Water supply and sewerage. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- 2- United Nations Environment Program. Water quality monitoring. New York: Chapman & Hall, 1996.
- 3- Chapra SC. Surface water-quality modeling. Singapore: McGraw-Hill, 1997.
- 4- Linsley R, Franzini K, Joseph B. Water resources engineering, Singapore: McGraw-Hill, 1992.
- 5- UNESCO/WHO/UNEP. Water quality assessment. Chapman & Hall. Cambridge University of Britain, 1997.
- 6- American Public Health Association, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, 1992.
- 7- Hammer MJ. Water and wastewater technology. New Jersey: Prentice- Hall, 1996.
- 8- Metcalf and Eddy. Wastewater engineering treatment and reuse. New York: McGraw-Hill, 2003.



- 
- 9- Park JK, et al. Wastewater characterization for evaluation of biological phosphorus removal. Wisconsin department of natural resources, Research report 174,1994.
- 10- Qasim SR. Treatment plants. Pennsylvania: Technomic, 1999.
- 11- Sheng H, Lin Peng, Chi F. Treatment of textile wastewater by electrochemical method. Water Res 1994; 28(2): 277-82.
- 12- Sakakibara Y, Nakajima H. Phosphorus removal and recovery by a novel electrolytic process. Water Sci Tech 2002; 46(11-12): 147-52.
- 13- Cominillis C. Electrochemical treatment of wastewater containing phenol, Trans. Ichem E,pt.B, Process saf. Environ Prot 1992; 70(84): 219-24.
- 14- Poon CPC. Electrochemical treatment of planting rinse water effluent. Water Treat J 1979; 19(7): 351-55.
- 15- Shmitt CR, Demonbrun JR. Electrochemical destruction of chromate and zinc from cooling-tower water. Oake Ridge.Y-12Plant,Y-DA,1975.
- 16- Tunturi PJ. Electrochemical treatment of process water containing colloidal particles. Int Chem Eng 1976; 16(2): 222-28.
- 17- Schmal D, Van-Erkel J, Van-Duin PJ. Electrochemical reduction of halogenated compounds in process wastewater ,Electrochemical Engineering Institution of Chemical Engineers Symposium ,Series No98. EFECT Event No.332,1986; 281-91.
- 18- Vigo F, Avalle L, Paz M. Disposal of vegetation water from Olive Oil Mills, Study of electrochemical oxidation. Riv Ital Sostanze Grass 1983; 60(3): 125-31.
- ۱۹- سازمان حفاظت محیط زیست ایران. آیین نامه های اجرایی بند (ج) ماده ۱۰۴ و ماده ۱۳۴ قانون برنامه سوم توسعه، انتشارات دایره سبز، ۱۳۸۰
- 20- Naumczyk J, et al. Electrochemical treatment of textile wastewater. Water Sci Tech 1996; 34(11): 17-24.
- 21- Peavy H, Rowe D, Tchnobanoglous G. Environmental engineering. Singapore: McGraw-Hill, 1985.