

## Evaluation of phosphorus removal from filtered effluent of activated sludge using the electrochemical process

Rabbani D<sup>1</sup>, Rashidipour F<sup>2\*</sup>, Akbari H<sup>3</sup>, Mostafaii GH<sup>1</sup>, Deghani R<sup>1</sup>

1- Department of Environmental Health, Faculty of Health, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I. R. Iran.

2- Student Research Committee, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I.R. Iran.

3- Trauma Research Center, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I. R. Iran.

Received October 28, 2012; Accepted February 20, 2013

### Abstract:

**Background:** Phosphorus (in a concentration range of 0.005-0.05 mg/L-P) is enough for eutrophication of water bodies; therefore, phosphorus removal from effluents is necessary. The electrochemical process is one of the methods used for phosphorus removal. Thus, this study aimed to examine the effect of the electrochemical process on phosphorus removal from filtered effluent of activated sludge.

**Materials and Methods:** This bench-scale experimental study was carried out on the samples of filtered effluent of activated sludge in a batch system. Phosphorus concentrations for 210 samples were measured through stannous-chloride method (The Standard Method, 4500 P-D.). Data were analyzed using Green house Geisser, one-way ANOVA and the Tukey's post-hoc tests.

**Results:** The average phosphorus concentration before the electrochemical process in the filtered samples and the maximum efficiency of phosphorus removal were  $1.93 \pm 0.86$  mg/L-P and 98%, respectively. The residual phosphorus concentrations (electrical current  $\geq 0.3A$ , reaction time  $\geq 10$ min) in all samples were decreased to less than 1mg/L-P.

**Conclusion:** Results showed that the electrochemical process can decrease the residual phosphorus to less than the standard limit (1mg/L-P) in Iran. The plot for the average residual phosphorus concentrations versus reaction time is a straight line ( $R^2=0.837$ ). Phosphorus removal from the samples of filtered effluent of activated sludge is considered as a second-order reaction and the fitted model can be formulated as  $y = -0.001x^2 + 0.133x + 0.875$  ( $R^2=0.925$ ).

**Keywords:** Wastewater, Phosphorus, Electrochemical process

\* Corresponding Author.

Email: kashanfaezeh@gmail.com

Tel: 0098 936 313 1703

Fax: 0098 361 5550 111

Conflict of Interests: No

Feyz, Journal of Kashan University of Medical Sciences May, 2013; Vol. 17, No 2, Pages 157-164

Please cite this article as: Rabbani D, Rashidipour F, Akbari H, Mostafaii GH, Deghani R. Evaluation of phosphorus removal from filtered effluent of activated sludge using the electrochemical process. *Feyz* 2013; 17(2): 157-64.

## بررسی میزان حذف فسفر با استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی از پساب فیلتر شده لجن فعال

داورخواه ربانی<sup>۱</sup>، فائزه رشیدی پور<sup>۲\*</sup>، حسین اکبری<sup>۳</sup>، غلامرضا مصطفایی<sup>۴</sup>، روح اله دهقانی<sup>۵</sup>

خلاصه:

**سابقه و هدف:** غلظت فسفر L-P mg/ ۰/۰۵ - ۰/۰۰۵ برای ایجاد اتروفیکاسیون در پیکره‌های آبی کافی است. بنابراین حذف فسفر از پساب‌ها لازم است. فرآیند الکتروشیمیایی یکی از روش‌های حذف فسفر است. در این مطالعه اثر فرآیند الکتروشیمیایی بر حذف فسفر از پساب فیلتر شده لجن فعال مورد بررسی قرار گرفته است.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه یک بررسی تجربی در مقیاس آزمایشگاهی است که در سیستم بسته روی نمونه‌های پساب فیلتر شده لجن فعال انجام شد. غلظت فسفر ۲۱۰ نمونه به روش کلرید قلع (استاندارد متد، P-D. ۴۵۰۰) اندازه‌گیری شد. نتایج با استفاده از آزمون‌های آماری Green House Geisser، آنالیز واریانس یک طرفه و آزمون تعقیبی Tukey تجزیه و تحلیل شدند.

**نتایج:** میانگین غلظت فسفر در نمونه‌های فیلتر شده قبل از فرآیند الکتروشیمیایی و حداکثر کارایی حذف فسفر به ترتیب معادل mg/L-P ۱/۸۶±۰/۹۳ و ۹۸ درصد بودند. در شدت جریان الکتریکی ۰/۳ آمپر و بالاتر با زمان واکنش ۱۰ دقیقه و بیشتر، غلظت فسفر باقیمانده همه نمونه‌ها به کمتر از ۱ mg/L-P کاهش یافت.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد فرآیند الکتروشیمیایی می‌تواند فسفر باقیمانده را به کمتر از استاندارد ایران (۱ mg/L-P) کاهش دهد. ترسیم عکس غلظت برای میانگین غلظت‌های فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش، به صورت خط مستقیم است ( $R^2=0/۸۳۷$ ). حذف فسفر از نمونه‌های پساب فیلتر شده لجن فعال به صورت یک واکنش درجه دو در نظر گرفته شده و فرمول مدل برازش شده به صورت  $Y=-0.001x^2+0.133x+0.875$  است ( $R^2=0/۹۲۵$ ).

**واژگان کلیدی:** فاضلاب، فسفر، فرآیند الکتروشیمیایی

دو ماه‌نامه علمی- پژوهشی فیض، دوره هفدهم، شماره ۲، خرداد و تیر ۱۳۹۲، صفحات ۱۶۰-۱۵۳

### مقدمه

غلظت فسفات در فاضلاب‌های شهری معمولاً ۱۶-۴ mg/L-P است که تقریباً ۳۰ درصد آن در فرآیندهای متداول تصفیه فاضلاب حذف شده و بنابراین غلظت آن در خروجی حدود ۱۱-۳ میلی‌گرم در لیتر می‌شود [۱۱،۱۰۸]. تاکنون روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای حذف فسفر باقیمانده در پساب تصفیه خانه‌ها پیشنهاد شده است [۱۳،۱۲]. در این میان روش‌های فیزیکی مقرون به صرفه نمی‌باشند [۱۵،۱۱-۱۳]. روش‌های بیولوژیکی کارایی چندان بالایی نداشته و مشکلات بهره برداری زیادی دارند [۱۵،۱۴،۱۱]. برای روش‌های شیمیایی نیز انواع مختلفی ذکر شده که به علت تولید لجن زیاد و هزینه‌های بالا و سایر مشکلات بهره‌برداری کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. این در حالی است که طی سال‌های اخیر روش الکتروشیمیایی مورد توجه محققان قرار گرفته است. این روش برای حذف فسفر باقیمانده در خروجی تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری نیز کارآمد می‌باشد که البته فیلتراسیون پساب هم می‌تواند با حذف لخته‌های حاوی ترکیبات فسفر به کاهش آن کمک نماید. در روش الکتروشیمیایی عامل اصلی تصفیه، انتقال الکترون‌هاست و با عبور جریان الکتریکی واکنش‌های اکسیداسیون و احیا در داخل سلول‌های الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. از مزایای روش الکتروشیمیایی می‌توان به کاربرد آسان، زمان ماند کوتاه، تجهیزات ساده، امکان کاهش یا حذف

جهت بروز پدیده اتروفیکاسیون فقط غلظت ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۵ mg/L-P کافی است [۱]. به دلیل ایجاد و تشدید این پدیده از اوایل سال ۱۹۷۰ در بسیاری از کشورها محدودیت‌هایی برای تخلیه فسفر به منابع آب وضع شده است [۵-۲]. در این میان بهترین راه‌کار جهت کاهش فسفر در منابع آب، تصفیه فاضلاب ورودی است [۴، ۶]. طبق استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران حداکثر غلظت مجاز فسفر در فاضلاب‌های شهری تصفیه شده جهت تخلیه به آب‌های سطحی ۱ mg/L-P می‌باشد که این مقدار با استاندارد برخی کشورها هم‌خوانی داشته و از برخی کشورها بسیار کمتر است [۹-۷].

<sup>۱</sup> استادیار، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

<sup>۳</sup> مربی، مرکز تحقیقات تروما، دانشگاه علوم پزشکی کاشان  
<sup>۴</sup> استاد، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

### \*نشانی نویسنده مسئول:

کاشان، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط

تلفن: ۰۳۶۳۱۳۱۷۰۳ - دوتول: ۰۳۶۱ ۵۵۵۰۱۱۱

پست الکترونیک: kashanfaezeh@gmail.com

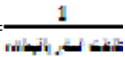
تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۱/۱۲/۲

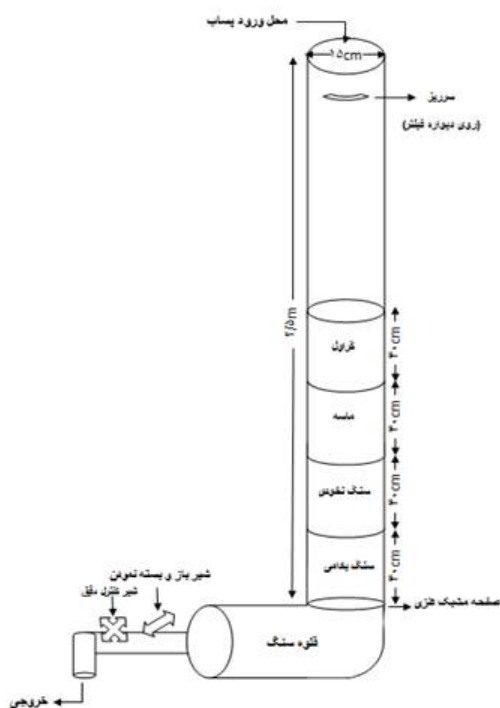
لحاظ اختلاف پتانسیل اکسیداسیون آهن و آلومینیوم و اینکه الکترودهای فولادی راحت‌تر از آلومینیوم اکسیده می‌شوند و تولید  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  بیشتری نسبت به  $\text{Al}(\text{OH})_3$  می‌نمایند، کاربرد الکترودهای فولادی حذف بیشتر فسفر را از طریق مکانیسم الکتروکواگولاسیون به‌همراه خواهد داشت [۲۹]. هم‌چنین، نتایج حاصل از مطالعه ربانی و همکاران در زمینه بررسی اثر فرایند الکتروشیمیایی در حذف فسفر از پساب تصفیه شده خروجی از سیستم لجن فعال نیز حاکی از ارجحیت کاربرد الکترودهای فولادی نسبت به الکتروده آلومینیومی می‌باشد [۲۰]. در هر بار فرایند الکتروشیمیایی ۲۰۰۰ میلی‌لیتر نمونه فیلتر شده در یک سلول الکترولیتی ریخته شد. با کمک ۸ عدد الکتروده فولادی با عرض ۲/۵ سانتی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر با فاصله تقریبی ۱/۵ سانتی‌متر از یکدیگر، به‌عنوان کاتد و آند که به‌میزان ۹ سانتی‌متر در نمونه مغروق بودند، فرایند الکتروشیمیایی بر آن اعمال گردید. با توجه به اینکه مکانیسم‌های اصلی حذف در فرایند الکتروشیمیایی شامل الکتروکواگولاسیون، الکتروفلوتاسیون و الکترواکسیداسیون می‌باشد، هم‌زدن محتوای درون سل الکترو-شیمیایی به دو مکانیسم اول کمک شایان توجهی نموده و اختلاط در سیستم راکتور بسته با هدف ایجاد شرایط پایدار در کل سیستم جزء جدائی ناپذیر سیستم Batch می‌باشد؛ لذا در تمام مدت فرایند محتوای درون سلول توسط یک هم‌زن مغناطیسی با ۳۰۰ دور در دقیقه به‌هم می‌خورد. در ضمن قبل از هر بار فرایند، الکترودها با محلول اسید کلریدریک غلیظ تمیز شد. هر سلول شیمیایی در واقع یک واکنش اکسایشی - کاهشی است. هر واکنش اکسایش-کاهش شامل دو نیم واکنش است. هر نیم واکنش در یک الکتروده انجام می‌شود. نیم واکنش اکسایش در آند و نیم واکنش کاهش در کاتد رخ می‌دهد. در فرایند الکتروشیمیایی در مطالعه حاضر اثر شدت جریان‌های مختلف شامل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ آمپر به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. بدین معنا که بر روی هر یک از نمونه‌های فیلتر شده موجود در سلول الکتروشیمیایی به‌مدت یک ساعت یکی از شدت جریان‌های یاد شده اعمال گردید و در شروع فرایند و پس از گذشت هر ۱۰ دقیقه یک نمونه به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر برداشت شد و پس از ۳۰ دقیقه ته نشینی ۵۰ میلی‌لیتر بالای آن جهت تعیین مقدار فسفر مورد آزمایش قرار گرفت. فسفر باقیمانده در کلیه نمونه‌ها با استفاده از روش هضم پرسولفات (استاندارد متد 5 P-B-۴۵۰۰) تبدیل به ارتوفسفات شده و غلظت ارتوفسفات تشکیل شده به روش کلرید قلع (استاندارد متود P-D. Stannous Chloride ۴۵۰۰) بر حسب فسفر اندازه‌گیری شد [۳۰]. کاهش باقیمانده فسفر

تجهیزات، اضافه کردن مواد شیمیایی، کاهش حجم لجن، سازگاری با محیط زیست، چند منظوره بودن، بازدهی انرژی، ایمن بودن، سازگاری با تکنولوژی و ارزانی نسبی آن اشاره نمود [۱۶-۱۹، ۱۲]. تا کنون مطالعات زیادی در این راستا انجام گرفته است [۲۰-۲۴، ۱۸، ۱۰، ۸]. هم‌چنین، اخیراً مطالعات مختلفی از جمله مطالعه ربانی و همکاران بر روی حذف پلی‌فسفات از فاضلاب دست‌ساز از طریق فرایند الکتروشیمیایی [۲۵]، مطالعه دهقان و همکاران در زمینه بررسی کارایی فرایند الکتروشیمیایی در حذف فسفر آلی از فاضلاب دست‌ساز [۲۶] و مطالعه میران زاده و همکاران با عنوان فرایند الکتروکواگولاسیون برای حذف آدنوزین ۵-مونوفسفات و سدیم هگزامتافسفات از فاضلاب دست‌ساز [۲۷] به انجام رسیده و نتایج مورد توجهی را به‌همراه داشته است. از آنجایی که تاکنون مطالعه‌ای بر روی پساب فیلتر شده لجن فعال صورت نگرفته و وجود لخته‌های بیولوژیکی حاوی ترکیبات فسفر می‌تواند نتایج دستاوردهای فرایند الکتروشیمیایی در حذف فسفر را مورد تردید قرار داده و حذف آن‌ها را به حذف فیزیکی شناورسازی خودبه‌خودی نسبت دهد، لذا در این مطالعه برای حذف این شبهه ابتدا نمونه فیلتر شده و سپس فرایند الکترو-شیمیایی بر آن اعمال گردید. این تحقیق به بررسی اثر روش الکتروشیمیایی بر حذف فسفر از پساب فیلتر شده لجن فعال پرداخته است.

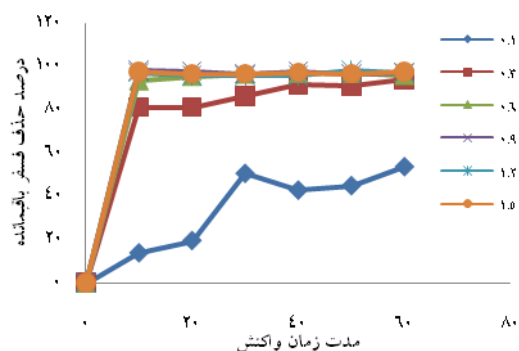
## مواد و روش‌ها

این تحقیق یک مطالعه تجربی است که در مقیاس آزمایشگاهی بر روی پساب یک سیستم لجن فعال به‌روش هوادهی گسترده انجام گرفت. سپس نمونه‌ها از فیلتر شنی آزمایشگاهی عبور داده شد. فیلتر مورد نظر بر اساس معیارهای ارائه شده در کتاب مهندسی فاضلاب و مطابق مشخصات ارائه شده در شکل شماره ۱ طراحی و ساخته شد [۲۸]. لازم به ذکر است که هر بار قبل از فیلتر کردن نمونه‌ها ابتدا نسبت به شستشوی معکوس فیلتر اقدام گردید. پنج مرتبه هر بار ۲۰ لیتر از پساب تصفیه‌خانه از فیلتر عبور داده شد و سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و فرایند الکتروشیمیایی بر روی پساب فیلتر شده اعمال گردید. در مجموع در این بررسی ۲۱۰ نمونه تحت اعمال فرایند الکترو-شیمیایی قرار گرفت که از ترکیب ۷ زمان واکنش مختلف و ۶ شدت جریان متفاوت بر روی ۵ نمونه برداشت شده از پساب لجن فعال حاصل شد. در این مطالعه از الکتروده فولادی جهت اعمال فرایند الکتروشیمیایی استفاده شد. علت این انتخاب، مزایای بیشتر الکترودهای فولادی نسبت به الکترودهای آلومینیومی می‌باشد. به

زمان واکنش ۱۰ دقیقه در تمامی شدت جریان های بیشتر از ۰/۱ آمپر افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان درصد حذف فسفر مشاهده می‌شود. نمودار شماره ۲ نمودار خطی عکس میانگین غلظت‌های فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش در شدت جریان‌های متفاوت را نشان می‌دهد ( $R^2=0/837$ ). نمودار شماره ۳ مدل برازش شده بر داده‌های مذکور را نشان می‌دهد که به صورت معادله درجه دوم  $y=-0.001x^2+0.133x+0.875$  می‌باشد که در آن  $y=$   و  $x$  مدت زمان واکنش (دقیقه) می‌باشد ( $R^2=0/925$ ).



شکل شماره ۱- فیلتر شنی تند ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی

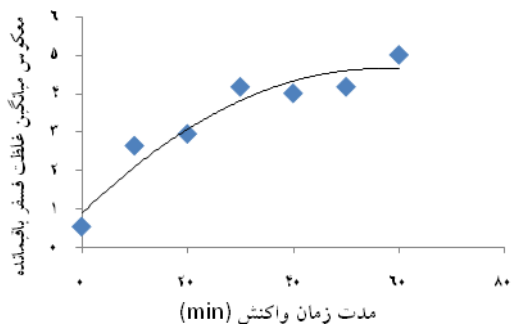


نمودار شماره ۱- روند حذف فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش در شدت جریان‌های متفاوت

کل به کمتر از ۱mg/L-P (استاندارد ایران) به‌عنوان حذف آن تلقی گردیده است. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با روش‌های آماری شامل آنالیز اندازه‌گیری تکراری با استفاده از معیار Green house Geisser و همچنین به‌کارگیری آنالیز واریانس یک طرفه برای مقایسه آمپرهاي مختلف در زمان‌های واکنش ثابت و آزمون تعقیبی Tukey برای مقایسه دو به‌دوی متغیرها با یکدیگر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

### نتایج

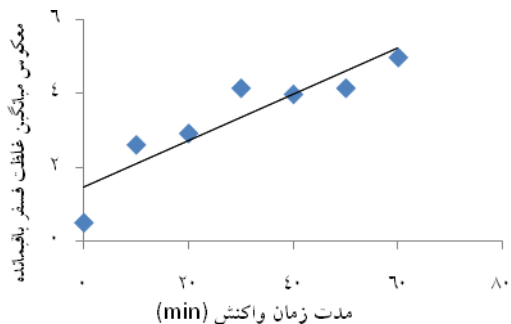
در این بررسی ۲۱۰ مورد واکنش الکتروشیمیایی بر روی ۵ نمونه مختلف از پساب فیلتر شده صورت گرفت. جدول شماره ۱ میانگین مقادیر باقیمانده فسفر در شدت جریان‌ها و مدت زمان‌های واکنش مختلف طی فرآیند الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. میانگین غلظت فسفر کل باقیمانده در نمونه‌های فیلتر شده قبل از اعمال فرآیند الکتروشیمیایی (فاضلاب خام)  $1/93 \pm 0/86$  میلی‌گرم بر لیتر بر حسب فسفر بوده است. در این جدول ملاحظه می‌شود تقریباً در تمامی شدت جریان‌ها با افزایش مدت زمان واکنش میزان فسفر باقیمانده کاهش یافته است. همچنین، در هر زمان واکنش معین با افزایش شدت جریان الکتریکی کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان فسفر باقیمانده مشاهده می‌شود. همچنین، این جدول نشان می‌دهد کمترین مقدار فسفر باقیمانده مربوط به شدت جریان الکتریکی ۰/۹ آمپر و زمان واکنش ۱۰ دقیقه بوده است ( $0/03 \pm 0/02$ ). مقایسه میانگین فسفر باقیمانده در شدت جریان‌های الکتریکی مختلف بر حسب زمان واکنش، تفاوت معنی‌داری را بین شدت جریان الکتریکی ۰/۱ آمپر و سایر شدت جریان‌ها نشان داد ( $P < 0/001$ ). آنالیز اندازه‌گیری تکراری نیز نشان دهنده اثر زمان واکنش بر افزایش میزان درصد حذف می‌باشد ( $P < 0/001$ )، ولی اثر متقابل زمان واکنش و شدت جریان الکتریکی بر کاهش فسفر باقیمانده دیده نشد ( $P = 0/104$ ). نمودار شماره ۱ روند حذف فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش در شدت جریان‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در شدت جریان ۰/۱ آمپر حداکثر حذف فسفر ۵۳/۸۹ درصد بوده است که مربوط به زمان واکنش ۶۰ دقیقه می‌باشد، در حالی که در شدت جریان‌های الکتریکی ۰/۳ آمپر و بالاتر، روند حذف فسفر تقریباً به‌صورت موازی درآمده و در مدت زمان واکنش ۱۰ دقیقه به بیشترین مقدار خود نزدیک می‌شود. طبق نمودار ۱ بیشترین شیب درصد حذف فسفر تا شدت جریان الکتریکی ۰/۶ مشاهده شده و پس از آن تغییر چندانی در میزان درصد حذف این ماده دیده نمی‌شود. در



نمودار شماره ۳- منحنی درجه دوی معکوس میانگین غلظت‌های فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش در شدت جریان‌های متفاوت

$$*y = -0.001x^2 + 0.133x + 0.875$$

$$**R^2 = 0.925$$



نمودار شماره ۲- روند تغییرات عکس میانگین غلظت‌های فسفر باقیمانده (در شدت جریان‌های متفاوت)

$$*y = 0.062x + 1.464$$

$$**R^2 = 0.837$$

جدول شماره ۱- میانگین مقادیر باقیمانده فسفر در شدت جریان‌ها و مدت زمان‌های واکنش مختلف طی فرآیند الکتروشیمیایی

میانگین	شدت جریان الکتریکی (A)						مدت زمان واکنش (min)
	۱/۵	۱/۲	۰/۹	۰/۶	۰/۳	۰/۱	
	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	(فاضلاب خام)
۱۰	۰/۳۸±۰/۷۱	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۰۵±۰/۰۱	۰/۰۳±۰/۰۲	۰/۱۲±۰/۱۳	۱/۶۶±۰/۸۸	۱۰
۲۰	۰/۳۶±۰/۰۷	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۰۸±۰/۰۴	۰/۰۴±۰/۰۲	۰/۰۸±۰/۰۳	۱/۵۵±۰/۹۵	۲۰
۳۰	۰/۲۴±۰/۴۱	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۰۸±۰/۰۳	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۲۶±۰/۴۹	۰/۹۵±۰/۴۳	۳۰
۴۰	۰/۲۵±۰/۵۵	۰/۰۵±۰/۰۴	۰/۰۸±۰/۰۳	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۱۶±۰/۲۷	۱/۱۰±۰/۹۹	۴۰
۵۰	۰/۲۴±۰/۵۳	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۰۳±۰/۰۱	۰/۰۶±۰/۰۲	۰/۱۷±۰/۲۴	۱/۰۶±۰/۹۸	۵۰
۶۰	۰/۲۲±۰/۴	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۰۵±۰/۰۲	۰/۰۵±۰/۰۲	۰/۱۱±۰/۱۵	۰/۸۹±۰/۶۷	۶۰
میانگین	-	۰/۳۲±۰/۷۴	۰/۳۳±۰/۷۴	۰/۳۲±۰/۷۴	۰/۳۴±۰/۷۴	۱/۳±۰/۸۷	

## بحث

است. در مطالعات مصداقی نیا و همکاران در زمینه بررسی نقش منعقدکننده‌ها در بازده حذف فسفر خروجی از فرآیند لجن فعال، بازده حذف فسفر بدون افزودن مواد منعقدکننده در بیشترین مقدار خود به ۸۵/۲۱ درصد رسیده که نتایج به دست آمده تا حدودی با نتایج حاصل از این مطالعه متفاوت است [۸]. این تفاوت می‌تواند مربوط به عدم وجود لخته‌های حاوی غلظت‌های بالای فسفر در اثر انجام فیلتراسیون قبل از فرآیند الکتروشیمیایی و بنابراین تفاوت در میزان غلظت‌های اولیه فسفر در نمونه‌ها باشد. Irdemez و همکاران در مطالعه‌ای با عنوان اثرات pH بر حذف فسفات از فاضلاب به‌روش الکتروکواگولاسیون با الکتروده آهنی بالاترین میزان حذف فسفر را ۸۶ درصد بیان کرده‌اند که به دلیل تفاوت میان شدت جریان‌های اعمال شده در مطالعه حاضر و آن مطالعه نمی‌توان به‌طور قطع در خصوص درصد حذف در شدت جریان ۰/۷۵ آمپر ایراد نظر نمود [۲۳]. هم‌چنین، مطالعه حاضر با آزمایش بر روی نمونه فیلتر شده پساب لجن فعال توانسته به میزان حذف ۹۸ درصدی دست یابد، درحالی‌که در آن مطالعه این آزمایشات بر روی فاضلاب خام انجام گرفته است. در مطالعه محوی و همکاران

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فرآیند الکترو-شیمیایی در کاهش غلظت فسفر باقیمانده پساب فیلتر شده سیستم لجن فعال به کمتر از ۱ mg/L-P (استاندارد ایران) بسیار مؤثر می‌باشد. هم‌چنین، حداقل شدت جریان الکتریکی که طی آن در کلیه زمان‌های واکنش میزان فسفر باقیمانده به کمتر از ۱ mg/L-P (استاندارد ایران) رسیده است، ۰/۳ آمپر می‌باشد. یافته‌های تحقیق حاضر نشان داد با استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی به کمک الکتروده آهنی می‌توان به بازده ۹۸ درصد در حذف فسفر دست یافت. این نتیجه نسبتاً بالاتر از مقدار اعلام شده توسط ربانی و همکاران در زمینه اثر فرآیند الکتروشیمیایی بر حذف فسفر از پساب فیلتر نشده لجن فعال می‌باشد که در زمان واکنش ۱۰ دقیقه و جریان الکتریکی ۱۲ آمپر به میزان حذف ۹۳/۱۱ درصد دست یافته‌اند [۲۰]. به احتمال زیاد این تفاوت می‌تواند مربوط به انجام فیلتراسیون قبل از اعمال فرآیند الکتروشیمیایی در مطالعه حاضر باشد که در نهایت منجر به افزایش بازده حذف و کاهش شدت جریان الکتریکی به ۰/۹ آمپر برای رسیدن به ۹۸ درصد حذف شده

همکاران طی مطالعه‌ای حذف الکتروشیمیایی پلی‌فسفات از فاضلاب دست‌ساز را از نوع واکنش‌های درجه اول معرفی کرده‌اند ( $R^2=0.925$ ) [۲۵]. دلیل وجود این تفاوت را می‌توان مربوط به این دانست که در مطالعه حاضر بر روی فسفر کل و انواع ترکیبات آن بحث شده است، در صورتی‌که مطالعه ربانی و همکاران انحصاراً پلی‌فسفات را مدنظر قرار داده و در ضمن نمونه‌های مورد آزمایش در مطالعه حاضر از پساب واقعی سیستم لجن فعال بوده است، در حالی‌که مطالعه مذکور روی فاضلاب دست‌ساز صورت گرفته که شرایط کنترل شده‌تری نسبت به این مطالعه داشته است. در نهایت با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از این بررسی توصیه می‌شود در مطالعات بعدی حتی الامکان شدت جریان الکتریکی ۰/۱ آمپر لحاظ نشده و بررسی دقیق‌تر در محدوده شدت جریان الکتریکی ۰/۳ تا ۰/۹ آمپر صورت گیرد که محدوده به‌دست آمده توسط اکثریت مطالعات می‌باشد. همچنین، می‌توان چنین اظهار نمود که در مطالعات آتی در نظر گرفتن محدوده زمانی ۱۰ تا ۳۰ دقیقه نیز با در نظر گرفتن محدوده شدت جریان‌های مذکور کفایت نموده و نتایج قابل توجهی را فراهم خواهد آورد. به‌علاوه، با بررسی نتایج این مطالعه با سایر مطالعات نیز مشاهده می‌شود درصد حذف فسفر در مطالعه حاضر در اکثر موارد بالاتر از سایرین ذکر شده که می‌توان این نتیجه را با اثربخشی فیلتراسیون بر افزایش میزان درصد حذف مرتبط دانسته و بنابراین با صرف شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش کمتر، امکان رسیدن به درصد حذف قابل توجهی را فراهم آورد. لذا، توصیه می‌شود انجام فیلتراسیون قبل از اعمال فرآیند الکتروشیمیایی جهت کاربرد وسیع‌تر در مطالعات آتی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

#### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که فرآیند الکتروشیمیایی می‌تواند فسفر باقیمانده را به کمتر از میزان استاندارد ایران ( $1\text{mg/L-P}$ ) کاهش دهد. انجام فیلتراسیون نیز به این روند کمک نموده و بنابراین شدت جریان الکتریکی مورد نیاز و در نتیجه انرژی مصرفی کمتری مورد نیاز خواهد بود. ترسیم عکس غلظت برای میانگین غلظت‌های فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش، به‌صورت خط مستقیم بود ( $R^2=0.837$ )؛ بنابراین حذف فسفر از نمونه‌های پساب فیلتر شده لجن فعال یک واکنش از نوع درجه دوم می‌باشد و فرمول مدل برازش شده به‌صورت  $y=-0.001x^2+0.133x+0.875$  است ( $R^2=0.925$ ). در ضمن جهت دستیابی به نتایج جامع‌تر، توصیه می‌شود در سایر مطالعات در این زمینه، تغییرات فاکتورهای دما، pH و هدایت الکتریکی نیز مدنظر قرار گیرد.

در زمینه بررسی کارایی روش الکترولیز در حذف فسفر از پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب، با استفاده از الکترودهای آلومینیومی در مدت زمان واکنش ۱۰ دقیقه، میزان حذف فسفر معادل ۹۰/۱ درصد بیان شده که با نتایج به‌دست آمده از این مطالعه در مدت زمان‌های واکنش ۱۰ دقیقه نسبتاً هم‌خوانی داشته و احتمالاً تفاوت‌های جزئی آن‌ها مربوط به نوع الکترودهای به‌کار گرفته شده و نقش فیلتراسیون در افزایش میزان بازده حذف می‌باشد [۱۸]. در بررسی‌های انجام شده توسط سمرقندی و همکاران در خصوص کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در حذف فسفات از محلول‌های آبی درصد حذف معادل ۹۵ درصد اعلام شده است که مربوط به شرایط بهینه ۱۲۰ دقیقه و ولتاژ ثابت ۲۰ ولت و  $\text{pH}=7$  می‌باشد [۱۰]. نتایج مطالعه حاضر دال بر کاربردی‌تر بودن نتایج به‌دست آمده می‌باشد، چرا که حجم راکتور مورد نیاز ۸/۳۳ درصد مقدار مورد نیاز در بررسی مذکور است. همچنین، مطالعه حاضر نشان داد شدت جریان الکتریکی ۰/۳ آمپر و زمان واکنش ۱۰ دقیقه برای رسیدن به استاندارد ایران کفایت می‌کند. با توجه به این‌که با شرایط موجود در این مطالعه، مقدار فسفر باقیمانده در حضور مقادیر نسبتاً پایین دو متغیر مدت زمان واکنش و شدت جریان الکتریکی به کمتر از میزان استاندارد رسیده است، نسبت به نتایج حاصل از برخی مطالعات دیگر که در آن‌ها شدت جریان‌های اعلام شده یا زمان‌های ماند، بالاتر از مطالعه حاضر بوده است، از نظر اقتصادی به شرایط مقرون به صرفه‌تری دست یافته که البته این می‌تواند مربوط به انجام آزمایشات این مطالعه بر روی نمونه‌های فیلتر شده پساب لجن فعال باشد، در صورتی‌که در اکثر مطالعاتی که قبلاً انجام شده، فیلتری وجود نداشته است. البته همین موضوع بر غلظت اولیه فسفر نیز تأثیرگذار است که همین امر خود می‌تواند بر میزان بازده حذف اثر داشته باشد. همچنین، در برخی مطالعات الکترو آلومینیومی به‌کار گرفته شده است که این مورد خود باعث می‌شود تفاوت بیشتری در درصد حذف فسفر نشان داده شود؛ زیرا همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، الکتروود فولادی نسبت به الکتروود آلومینیومی دارای مزایای بیشتری بوده و درصد حذف بالاتری را در رابطه با حذف فسفر نشان داده است. نمودار شماره ۲ نشان می‌دهد که واکنش حذف فسفر به واکنش‌های درجه ۲ نزدیک است و مدل برازش شده به‌صورت معادله درجه دوم  $y=-0.001x^2+0.133x+0.875$  بوده و از اعتبار خوبی برخوردار است ( $R^2=0.925$ ). این مدل در محدوده ۶۰-۰ دقیقه غلظت‌های فسفر از پساب فیلتر شده لجن فعال با میانگین  $(\text{mg/L-P})$   $0.2 \pm 0.4$  تا  $1.93 \pm 0.86$  و میانگین شدت جریان الکتریکی ۰/۷۷ آمپر معتبر است. این در حالی است که ربانی و

طرح تحقیقاتی شماره ۹۰۵۵ بوده که با حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی کاشان به انجام رسیده است.

این مطالعه بخشی از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد و

## References:

- [1] McGhee TJ, Steel EW. Water Supply and Sewerage. Singapore. McGraw-Hill. 1991.
- [2] Golder AK, Samanta AN, Ray S. Removal of phosphate from aqueous solutions using calcined metal hydroxides sludge waste generated from electrocoagulation. *Sep Purif Technol* 2006; 52: 102-9.
- [3] Onar AN, Balkaya N, Akyuz T. Phosphate removal by adsorption. *Env Tech* 1996; 17(2): 207-13.
- [4] Ozacar M, Sengil IA. Enhancing phosphate removal from wastewater by using polyelectrolytes and clay injection. *J Hazard Mater* 2003; 100(1-3): 131-46.
- [5] Southam DC, Lewis TW, McFarlane AJ, Johnston JH. Amorphous calcium silicate as a chemisorbent for phosphate. *Curr Appl Phys* 2004; 4: 355-8.
- [6] Clark T, Stephenson T, Pearce PA. Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter. *Water Res* 1997; 31(10): 2557-63.
- [7] Bektaş N, Akbulut H, Inan H, Dimoglo A. Removal of phosphate from aqueous solutions by electro-coagulation. *J Hazard Mater* 2004; 106(2-3): 101-5.
- [8] Mesdaghinia AR, Rabbani D, Nasser S, Vaezi F. Effect of coagulant on electrochemical process for phosphorus removal from activated sludge effluent. *Iran J Public Health* 2003; 32(4): 45-51.
- [9] Vasudevan S, Lakshmi J, Jayaraj J, Sozhan G. Remediation of phosphate-contaminated water by electrocoagulation with aluminium, aluminium alloy and mild steel anodes. *J Hazard Mater* 2009; 164(2-3): 1480-6.
- [10] Samarghandi M, Zarabi M, Safari GH, Shirzad M, Gharibi H, Sheikhmohammadi A. The survey of electro coagulation process efficiency in phosphate removal from aqueous solutions. *12<sup>th</sup> Environmental Health National Congress of Iran*, 2009, Tehran, Iran.
- [11] Zazouli M, Bazrafshan E. Water & Wastewater Technology. Tehran, samat. 2009; 1: 282-3. [in Persian]
- [12] Bayramoglu M, Eyvaz M, Kobya M. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation. *Chem Eng* 2007; 128(2-3): 155-61.
- [13] Zacar M, Sengil IA. Enhancing phosphate removal from wastewater by using polyelectrolytes and clay injection. *J Hazard Mater* 2003; 100(1-3): 131-46.
- [14] Rybicki S. Advanced Wastewater Treatment. Phosphorus Removal from Wastewater, A literature. Review. Stockholm. 1997; 1: 52-5.
- [15] Sedlak R. Phosphorous and Nitrogen removal from municipal wastewater: principles and practice. USA, New York: Lewis Publishers; 1991.
- [16] Mahvi AH, Bazrafshan E, Mesdaghinia AR, Naseri S, Vaezi F. Survey of electrocoagulation process usage capability by AL-electrods in hexavalent Chrome removal from aqueous solutions. *10<sup>th</sup> National Congress of Environmental Health*, 2007, Hamedan, Iran.
- [17] Kobya M, Demirbas E, Dedeli A, Sensoy MT. Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. *J Hazard Mater* 2010; 173(1-3): 326-34.
- [18] Mahvi AH, Ebrahimi SJ, Nouri J, Ebrahimzadeh L. Study of the efficiency of electrolysis process in phosphorus removal from the wastewater effluent treatment plants. *Sci J Kordistan Uni Med Sci* 2007(44): 36-45. [in Persian]
- [19] Zaroual Z, Chaair H, Essadki AH, El Ass K, Azzi M. Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design. *Chem Eng* 2009; 148: 488-95.
- [20] Rabbani D, Mesdaghinia AR, Nasser S, Naddafi K. Effect of electrochemical process on phosphorous removal from activated sludge effluent. *Feyz* 2003; 7(3): 21-9. [in Persian]
- [21] Takdastan A, Azimi A, Salari Zh. The Use of Electrocoagulation Process for Removal of Turbidity, COD, Detergent and Phosphorous from Carwash Effluent. *Water and Wastewater* 1390; 3.
- [22] Sakakibara Y, Nakajima H. Phosphorous removal and recovery by a novel electrolytic process. *Water Sci Technol* 2002; 46(11-12): 147-52.
- [23] Irdemez S, Demircioglu N, Yildiz Y. The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *J Hazard Mater* 2006; 137(2): 1231-5.
- [24] Irdemez S, Yildiz YS, Tosunoglu V. Optimization of phosphorus removal from wastewater by electro coagulation with aluminum plate electrodes. *Sep Purif Technol* 2006; 52: 394-401.
- [25] Rabbani D, Miranzadeh MB, Dehghan S, Mahdizad F. Polyphosphate Removal from Synthetic Wastewater By Electrochemical Process. IACSIT Press, Singapore. 2012; 42(11): 51-5.
- [26] Dehqan S, Miranzadeh M B, Rabbani D. Electrochemical process efficiency for the removal of organic phosphorus from synthetic wastewater. *Feyz* 2012; 16(1): 79-85. [in Persian]
- [27] Miranzadeh MB, Rabbani D, Dehqan S. Electrocoagulation process for removal of

adenosine-5'-monophosphate and sodium hexamethaphosphate from the synthetic wastewater. *Int J Physical Sci.* 2012; 7(10): 1571-77. [in Persian]

[28] Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering (Treatment & Reuse). 4<sup>th</sup> ed. New Dehli: Mc Graw-Hill; 2003. p. 1086.

[29] Sheng H, Lin P, Chi F. Treatment of textile wastewater by electrochemical method. *Water Res* 1994; 28(2): 277-82.

[30] APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> ed. 1999, Washington.