Original Article

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

Rabbani D[1], Rashidipour F[2*], Akbari H[3], Mostafaii GH[1], Dehghani R[1]

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±0.86 mg/L-P and 98%, respectively. The residual phosphorus concentrations (electrical current ≥0.3A, reaction time ≥10min) 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, Dehghani R. Evaluation of phosphorus removal from filtered effluent of activated sludge using the electrochemical process. ***Feyz*** 2013; 17(2): 157-64.

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]

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

داورخواه ربانی [۱]، فائزه رشیدی پور [۲*]، حسین اکبری [۳]، غلامرضا مصطفایی [۱]، روح اله دهقانی [٤]

خلاصه:

سابقه و هدف: غلظت فسفر mg/ L-P ۰/۰۰۵ – ۰/۰۵ 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 به‌روش کلرید قلع (استاندارد متد، P-D ٤٥٠٠) اندازه‌گیری شد. نتایج با استفاده از آزمون های آماری Green House Geisser، آنالیز واریانس یک طرفه وآزمون تعقیبی Tukey تجزیه و تحلیل شدند.

نتایج: میانگین غلظت فسفر در نمونه‌های فیلتر شده قبل از فرآیند الکتروشیمیایی و حداکثر کارآیی حذف فسفر به‌ترتیب معادل mg/L-P ۱/۹۳±۰/۸٦ 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 mg/L-P۱ کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد فرآیند الکتروشیمیایی می‌تواند فسفر باقیمانده را به کمتر از استاندارد ایران (mg/L-P۱) کاهش دهد. ترسیم عکس غلظت برای میانگین غلظت‌های فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش، به‌صورت خط مستقیم است (R^2=۰/۸۳۷). حذف فسفر از نمونه‌های پساب فیلتر شده لجن فعال به صورت یک واکنش درجه دو در نظر گرفته شده و فرمول مدل برازش شده به‌صورت $y=-0.001x^2+0.133x+0.875$ است (R^2=۰/۹۲۵).

واژگان کلیدی: فاضلاب، فسفر، فرآیند الکتروشیمیایی

دو ماه‌نامه علمی– پژوهشی فیض، دوره هفدهم، شماره ۲، خرداد و تیر ۱۳۹۲، صفحات ۱٦۰-۱۵۳

مقدمه

جهت بروز پدیده اتروفیکاسیون فقط غلظت ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۵ mg/L-P کافی است [۱]. به‌دلیل 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 [٦،٤]. طبق استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران حداکثر غلظت مجاز فسفر در فاضلاب‌های شهری تصفیه شده جهت تخلیه به آب‌های سطحی mg/L-P۱ می‌باشد که این مقدار با استاندارد برخی کشورها هم‌خوانی داشته و از برخی کشورها بسیار کمتر است [۹-۷].

غلظت فسفات در فاضلاب‌های شهری معمولاmg/L-P ۱٦-٤ است که تقریبا ۳۰ درصد آن در فرآیندهای متداول تصفیه فاضلاب حذف شده و بنابراین غلظت آن در خروجی حدود ۱۱-۳ میلی‌گرم در لیتر می‌شود [۱۱،۱۰،۸]. 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 کارآیی چندان بالایی نداشته و مشکلات بهره برداری زیادی دارند [۱۵،۱٤،۱۱]. برای روش‌های شیمیایی نیز انواع مختلفی ذکر شده که به‌علت تولید لجن زیاد و هزینه‌های بالا و سایر مشکلات بهره-برداری 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

[۱] استادیار، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

[۳] مربی، مرکز تحقیقات تروما، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

[٤] استاد، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

***نشانی نویسنده مسئول:**

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

تلفن: ۰۹۳٦ ۳۱۳۱۷۰۳ **دورنویس:** ۰۳٦۱ ۵۵۵۰۱۱۱

پست الکترونیک: kashanfaezeh@gmail.com

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

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]

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 [۱۲،۱۹-۱۶]. تا کنون مطالعات زیادی در این راستا انجام گرفته است [۸،۱۰،۱۸،۲٤-۲۰]. هم‌چنین، اخیرا مطالعات مختلفی از جمله مطالعه ربانی و همکاران بر روی حذف پلی‌فسفات از فاضلاب دست‌ساز از طریق فرآیند الکتروشیمیایی [۲۵]، مطالعه دهقان و همکاران در زمینه بررسی کارایی فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فسفر آلی از فاضلاب دست‌ساز [۲٦] 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 و دستاوردهای فرآیند 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 فرآیند 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

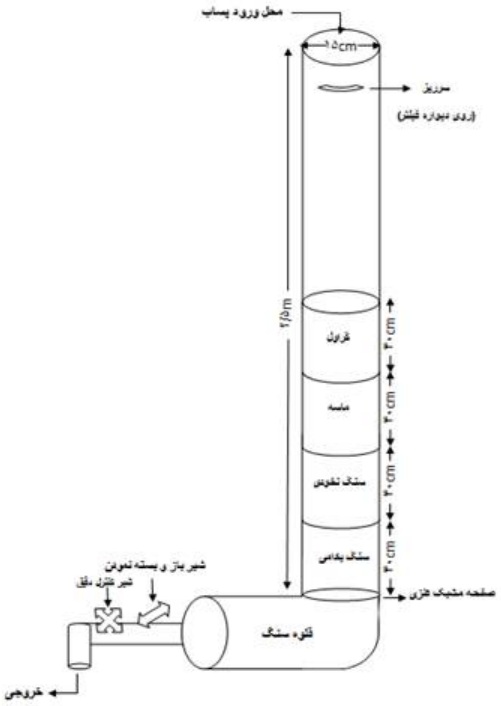
این تحقیق یک مطالعه‌ی تجربی است که در مقیاس آزمایشگاهی بر روی پساب یک سیستم لجن فعال به‌روش هوادهی گسترده انجام گرفت. سپس نمونه‌ها از فیلتر شنی آزمایشگاهی عبور داده شد. فیلتر مورد نظر بر اساس معیارهای ارائه شده در کتاب مهندسی فاضلاب و مطابق مشخصات ارائه شده در شکل شماره ۱ طراحی و ساخته شد [۲۸]. لازم به ذکر است که هر بار قبل از فیلتر کردن نمونه‌ها ابتدا نسبت به شستشوی معکوس فیلتر اقدام گردید. پنج مرتبه هر بار۲۰ لیتر از پساب تصفیه خانه از فیلتر عبور داده شد و سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و فرآیند الکتروشیمیایی بر روی پساب فیلتر شده اعمال گردید. در مجموع در این بررسی ۲۱۰ نمونه تحت اعمال فرآیند الکترو-شیمیایی قرار گرفت که از ترکیب ۷ زمان واکنش مختلف و ٦ شدت جریان متفاوت بر روی ۵ نمونه برداشت شده از پساب لجن فعال حاصل شد. در این مطالعه از الکترود فولادی جهت اعمال فرآیند الکتروشیمیایی استفاده شد. علت این انتخاب، مزایای بیشتر الکترودهای فولادی نسبت به الکترودهای آلومینیومی می‌باشد. به لحاظ اختلاف پتانسیل اکسیداسیون آهن و آلومینیوم و اینکه الکترودهای فولادی راحت‌تر از آلومینیوم اکسیده می‌شوند و تولید $Fe(OH)_3$ بیشتری نسبت به $Al(OH)_3$ 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 الکترود فولادی نسبت به الکترود آلومینیومی می‌باشد [۲۰]. در هربار فرآیند الکتروشیمیایی ۲۰۰۰ میلی‌لیتر نمونه فیلتر شده در یک سلول الکترولیتی ریخته شد. با کمک ۸ عدد الکترود 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، فرآیند الکتروشیمیایی بر آن اعمال گردید. با توجه به اینکه مکانیسم‌های اصلی حذف در فرآیند 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 فرآیند محتوای درون سلول توسط یک هم‌زن مغناطیسی با ۳۰۰ دور در دقیقه به‌هم می‌خورد. در ضمن قبل از هر بار فرآیند، 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 الکترود انجام می‌شود. نیم واکنش اکسایش در آند و نیم واکنش کاهش در کاتد رخ می‌دهد. در فرآیند الکتروشیمیایی در مطالعه حاضر اثر شدت جریان‌های مختلف شامل ۰/۱، ۰/۳، ۰/٦، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ آمپر به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. بدین معنا که بر روی هریک از نمونه‌های فیلتر شده موجود در سلول الکتروشیمیایی به‌مدت یک ساعت یکی از شدت جریان‌های یاد شده اعمال گردید و در شروع فرآیند و پس از گذشت هر ۱۰ دقیقه یک نمونه به حجم ۱۰۰ میلی لیتر برداشت شد و پس از ۳۰ دقیقه ته نشینی ۵۰ میلی لیتر بالای آن جهت تعیین مقدار فسفر مورد آزمایش قرار گرفت. فسفر باقیمانده در کلیه نمونه‌ها با استفاده از روش هضم پرسولفات (استاندارد متد P-B. 5 ٤۵۰۰) تبدیل به ارتوفسفات شده و غلظت ارتوفسفات تشکیل شده به روش کلرید قلع (استاندارد متود P-D. Stannous Chloride ٤۵۰۰) بر حسب فسفر اندازه‌گیری شد [۳۰]. کاهش باقیمانده فسفر

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]

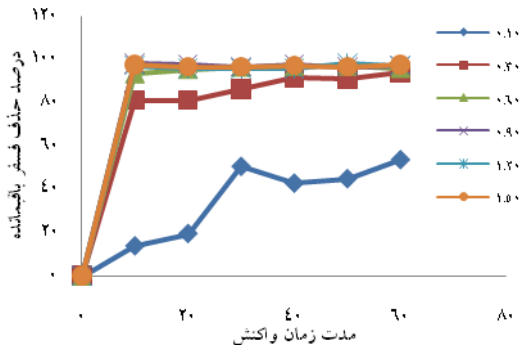
کل به کمتر از ۱mg/L-P (استاندارد ایران) به‌عنوان حذف آن تلقی گردیده است. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با روش‌های آماری شامل آنالیز اندازه‌گیری تکراری با استفاده از معیار Green house Geisser و هم‌چنین به‌کارگیری آنالیز واریانس یک طرفه برای مقایسه آمپرهای مختلف در زمان‌های واکنش ثابت و آزمون تعقیبی Tukey 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 زمان-های واکنش مختلف طی فرآیند الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. میانگین غلظت فسفر کل باقیمانده در نمونه‌های فیلتر شده قبل از اعمال فرآیند الکتروشیمیایی (فاضلاب خام) ۱/۹۳±۰/۸۶ میلی‌گرم بر لیتر بر حسب فسفر بوده است. در این جدول ملاحظه می‌شود تقریبا 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 (۰/۰۲±۰/۰۳). 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 اندازه گیری تکراری نیز نشان دهنده‌ی 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 حالی‌که در شدت جریان-های الکتریکی ۰/۳ آمپر و بالاتر، روند حذف فسفر تقریبا 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 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 می دهد که به‌صورت معادله درجه دوم $y=-0.001x^2+0.133x+0.875$ می‌باشد که در آن $y=\frac{1}{\text{غلظت فسفر باقیمانده}}$ و x مدت زمان واکنش (دقیقه) می‌باشد ($R^2=0/925$).

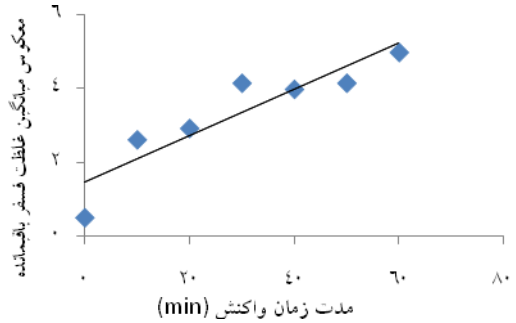


شکل شماره ۱- فیلتر شنی تند ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی



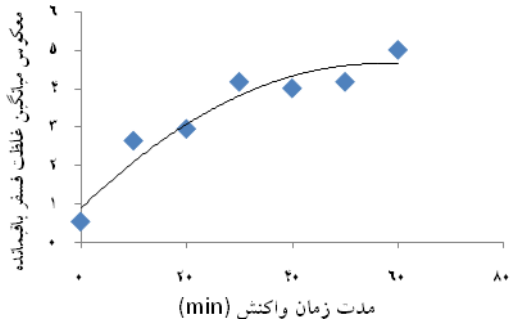
نمودار شماره ۱- روند حذف فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش در شدت جریان‌های متفاوت

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]



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

*y = 0.062x + 1.464
**R² = 0.837



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

*y= -0.001x² + 0.133x + 0.875
**R²= 0.925

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

شدت جریان الکتریکی (A) / مدت زمان واکنش (min)	۰/۱	۰/۳	۰/۶	۰/۹	۱/۲	۱/۵	میانگین
(فاضلاب خام)	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶	۱/۹۳±۰/۸۶
۱۰	۱/۶۶±۰/۸۸	۰/۳۶±۰/۵۳	۰/۱۲±۰/۱۳	۰/۰۳±۰/۰۲	۰/۰۵±۰/۰۱	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۳۸±۰/۷۱
۲۰	۱/۵۵±۰/۹۵	۰/۳۶±۰/۶۸	۰/۰۸±۰/۰۳	۰/۰۴±۰/۰۲	۰/۰۸±۰/۰۴	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۳۶±۰/۷
۳۰	۰/۹۵±۰/۴۳	۰/۲۶±۰/۴۹	۰/۰۶±۰/۰۲	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۰۸±۰/۰۳	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۲۴±۰/۴۱
۴۰	۱/۱۰±۰/۹۹	۰/۱۶±۰/۲۷	۰/۰۵±۰/۰۲	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۰۸±۰/۰۳	۰/۰۵±۰/۰۴	۰/۲۵±۰/۵۵
۵۰	۱/۰۶±۰/۹۸	۰/۱۷±۰/۲۴	۰/۰۵±۰/۰۳	۰/۰۶±۰/۰۲	۰/۰۳±۰/۰۱	۰/۰۶±۰/۰۳	۰/۲۴±۰/۵۳
۶۰	۰/۸۹±۰/۶۷	۰/۱۱±۰/۱۵	۰/۰۷±۰/۰۳	۰/۰۵±۰/۰۲	۰/۰۵±۰/۰۲	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۲±۰/۴
میانگین	۱/۳±۰/۸۷	۰/۴۸±۰/۷۸	۰/۳۴±۰/۷۴	۰/۳۲±۰/۷۴	۰/۳۳±۰/۷۴	۰/۳۲±۰/۷۴	-

بحث

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فرآیند الکترو-شیمیایی در کاهش غلظت فسفر باقیمانده پساب فیلتر شده سیستم لجن فعال به کمتر از mg/L-P ۱ (استاندارد ایران) بسیار مؤثر می‌باشد. هم‌چنین، حداقل شدت جریان الکتریکی که طی آن در کلیه زمان‌های واکنش میزان فسفر باقیمانده به کمتر از mg/L-P ۱ (استاندارد ایران) رسیده است، ۰/۳ آمپر می‌باشد. یافته‌های تحقیق حاضر نشان داد با استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی به کمک الکترود آهنی می‌توان به بازده ۹۸ درصد در حذف فسفر دست یافت. این نتیجه نسبتا 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 است. در مطالعات مصداقی نیا و همکاران در زمینه بررسی نقش منعقد کننده‌ها در بازده حذف فسفر خروجی از فرآیند لجن فعال، بازده حذف فسفر بدون افزودن مواد منعقد کننده در بیشترین مقدار خود به ۸۵/۲۱ درصد رسیده که نتایج به‌دست 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 الکترود آهنی بالاترین میزان حذف فسفر را ۸۶ درصد بیان کرده‌اند که به‌دلیل تفاوت میان شدت جریان‌های اعمال شده در مطالعه حاضر و آن مطالعه نمی-توان 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

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]

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 نسبتا هم‌خوانی داشته و احتمالا تفاوت-های 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 کارآیی 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 pH=۷ 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 قبلا 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 الکترود آلومینیومی به‌کار گرفته شده است که این مورد خود باعث می‌شود تفاوت بیشتری در درصد حذف فسفر نشان داده شود؛ زیرا همان‌طور که قبلا ذکر شده است، الکترود فولادی نسبت به الکترود 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=۰/۹۲۵). این مدل در محدوده ۶۰-۰ دقیقه غلظت‌های فسفر از پساب فیلتر شده لجن فعال با میانگین (mg/L-P) ۰/۲±۰/٤ تا (mg/L-P) ۱/۹۳±۰/۸٦ و میانگین شدت جریان الکتریکی ۰/۷۷ آمپر معتبر است. این در حالی است که ربانی و همکاران طی مطالعه‌ای حذف الکتروشیمیایی پلی‌فسفات از فاضلاب دست‌ساز را از نوع واکنش‌های درجه اول معرفی کرده‌اند (R^2=۰/۹۲۵) [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 دقیق تر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که فرآیند الکتروشیمیایی می‌تواند فسفر باقیمانده را به کمتر از میزان استاندارد ایران (۱mg/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 غلظت-های فسفر باقیمانده نسبت به زمان واکنش، به‌صورت خط مستقیم بود (R^2=۰/۸۳۷)؛ 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=۰/۹۲۵). 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.

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]

تشکر و قدردانی

این مطالعه بخشی از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد و طرح تحقیقاتی شماره ۹۰۵۵ بوده که با حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی کاشان به انجام رسیده است.

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, Nasseri 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. ***12th 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 aqeous solutions. ***10th 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, Nasseri 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

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]

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). 4th 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. 20th ed. 1999, Washington.

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-09-16]