

ELECTROCUAGULATION AND ELECTRO-FENTON IN SALINE WASTEWATER TREATMENT

The comparison of the electrocuagulation and electro-Fenton Processes Performance in Phenolic Saline Wastewater Treatment by Taguchi method

Ghorban Asgari

Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran.

Javad Faradmal

Associate Professor, Department of Biostatistics and Epidemiology, Faculty of Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran.

Abdolmoteleb Seid-mohammadi

Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Social Determinants of Health Research Center, Faculty of public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

Halime Almasi

Ph.D. Department of Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.

Saba Majidi

M.Sc. Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran.

Somaye Akbari

* M.Sc. Department of Environmental Health Engineering, University of Applied Science and Technology (UAST), Zar Center, Karaj, Iran. (Corresponding author) s.akbari2017@yahoo.com

Received: 2017/01/22

Accepted: 2017/02/19

ABSTRACT

Background & objective: Industrialization has led not only to an increase in water demand, but also to an increase in water pollution due to the discharge of polluted industrial wastewaters with high salt content, and the organic compounds such as phenol into the water bodies.

This study aimed to investigate the efficiency of electrocuagulation and electro-Fenton processes in phenol removal from saline wastewater using Taguchi experimental design method.

Material & methods: This experimental study was performed in a reactor (1 liter) with synthetic phenolic saline wastewater. In this study for electrocoagulation process, the effects of five operation parameters on phenol removal efficiency including reaction time (20-80 min), electrolyte (1-4%), pH (3-5-7-9), initial phenol concentration (500-1000-1500-250 mg/L) and current density (4-16 mA/cm²) were investigated in four levels by Taguchi L16 orthogonal array. Also for electro-Fenton process, the effects of six operation parameters on removal efficiency in five levels including reaction time (20-80 min), electrolyte (0-4%), pH (2-3-4-6-8), initial phenol concentration (250-500-1000-1500-2000), current density (0-16 mA/cm²) and hydrogen peroxide (50-300 mg/L) were evaluated by Taguchi L25 orthogonal array. The concentration of phenol was determined according to the standard method in spectrophotometric wavelength of 500 nm.

Results: Experimental data showed that the optimum phenol elimination condition in electrocuagulation process was initial phenol concentration of 250 mg/L, pH = 5, electrolyte = 3%, current density of 8 mA/cm² and reaction time of 60 min. The most influential factor in removal efficiency was the initial concentration (63.2%), and the lowest effect belonged to the electrolyte (4.2%).

The optimum phenol removal condition for electro-Fenton process was initial concentration of 250 mg/L, pH:3, electrolyte:2%, hydrogen peroxide:150 mg/L, current density of 8 mA/cm² and 20 min contact time. The most influential factor in elimination efficiency was the current density (29.12%), and the lowest influence on response variable belonged to the reaction time (3.08%).

Conclusion: This study showed the electro-Fenton process was effective in the removal of phenol that can be used as an appropriate process in wastewater treatment.

Document Type: Research article

Keywords: Electrocuagulation, Electro-Fenton, Phenol.

► **Citation:** Asgari G, Faradmal J, Seid-mohammadi A, Almasi H, Majidi S, Akbari S. The comparison of the electrocuagulation and electro-Fenton Processes Performance in Phenolic Saline Wastewater Treatment by Taguchi method. *Journal of Research in Environmental Health*. Winter 2016;2 (4) : 321-332 .

الکتروکواگولاسیون و الکتروفتون در تصفیه فاضلاب شور

مقایسه کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون و الکتروفتون در تصفیه فاضلاب شور

حاوی فنل: طراحی آزمایشات بر پایه مدل آماری تاگوچی

چکیده

زمینه و هدف: توسعه صنعت و شهرنشینی علاوه بر افزایش مصرف آب، باعث آلودگی آب‌ها در اثر تخلیه پساب صنایع با محتوای شوری بالا و ترکیبات آروماتیک از قبیل فنل شده است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی فرآیند الکتروکواگولاسیون و الکتروفتون در تصفیه فاضلاب شور حاوی فنل با بهره‌گیری از مدل آماری تاگوچی انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تجربی - آزمایشگاهی از یک ظرف واکنش به حجم یک لیتر حاوی نمونه‌های سنتتیک فنل استفاده شد. فرآیند الکتروکواگولاسیون با ۵ عامل در ۴ سطح شامل زمان واکنش (۸۰-۲۰ دقیقه)، غلظت شوری (۴-۱ درصد)، pH (۹.۷، ۵.۳)، غلظت اولیه فنل (۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰)، غلظت اولیه فنل (۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰)، غلظت شوری (۴-۰ درصد)، pH (۲.۳، ۴.۶، ۸)، غلظت اولیه فنل (۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰) میلی گرم بر لیتر) و دانسیته جریان (۱۶-۴ میلی آمپر بر سانتی متر مربع) به کمک طرح ماتریکس ترکیبی L_{16} و فرآیند الکتروفتون نیز با ۶ عامل در ۵ سطح شامل زمان واکنش (۴۰-۲۰ دقیقه)، غلظت شوری (۴-۰ درصد)، pH (۲.۳، ۴.۶، ۸)، غلظت اولیه فنل (۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰) میلی گرم بر لیتر)، دانسیته جریان (۱۶-۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع)، غلظت پراکسید هیدروژن (۳۰۰، ۲۲۵، ۱۵۰، ۷۵، ۵۰ میلی گرم بر لیتر) به کمک طرح ماتریکس ترکیبی L_{25} روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. غلظت فنل طبق روش استاندارد متد با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: در مطالعه حاضر شرایط بهینه حذف در فرآیند الکتروکواگولاسیون شامل غلظت فنل ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر ۵، دانسیته جریان ۸ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، شوری ۳ درصد و زمان ۶۰ دقیقه دارای راندمان ۵۸ درصد بود. بیشترین میزان تأثیر مربوط به غلظت اولیه ۶۳/۲ درصد و کمترین تأثیر مربوط به شوری ۴/۲ درصد بود. این شرایط در فرآیند الکتروفتون برابر با غلظت فنل ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر ۳ و دانسیته جریان ۸ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، شوری ۲ درصد، غلظت پراکسید هیدروژن ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر و زمان ۲۰ دقیقه دارای راندمان ۹۷ درصد بود. بیشترین تأثیر مربوط به دانسیته جریان ۲۹/۱۲ درصد و کمترین مقدار مربوط به زمان واکنش ۳/۰۸ درصد بود.

نتیجه‌گیری: فرآیند الکتروفتون فرآیند مؤثرتری در حذف فنل می‌باشد که می‌تواند به عنوان یک فرآیند مناسب در تصفیه فاضلاب به کار گرفته شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

کلیدواژه‌ها: الکتروفتون، الکتروکواگولاسیون، فنل

قربان عسگری

دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

جواد فردمال

دانشیار، گروه آمار زیستی و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

عبدالمطلب صید محمدی

استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم اجتماعی مؤثر بر سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

حلیمه الماسی

دکترای تخصصی، گروه مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران.

صبا مجیدی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران.

سمیه اکبری

✱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علمی و کاربردی، مرکز زر، کرج، البرز، ایران. (نویسنده مسئول):
s.akbari2017@yahoo.com...

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۱

◀ **استناد:** عسگری ق، فردمال ج، صید محمدی ع، الماسی ح، مجیدی ص، اکبری س. مقایسه کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون و الکتروفتون در تصفیه فاضلاب شور حاوی فنل: طراحی آزمایشات بر پایه مدل آماری تاگوچی. فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط. زمستان ۱۳۹۵؛ ۲(۴): ۳۳۱-۳۳۲.

مقدمه

صنایع متعددی از قبیل چرم‌سازی، دباغی، پتروشیمی، کارخانجات صنایع غذایی، داروسازی و تولید کننده رزین، فاضلابی با میزان شوری بالا تولید می‌کنند. چالش اصلی در تصفیه این نوع فاضلاب‌ها، محتوای شوری بالا و همچنین حضور مواد آلی مقاوم و تجزیه‌ناپذیر می‌باشد (۱). شوری به عنوان یک عامل سمی جهت فعالیت میکروارگانیسم‌ها، باعث دهیدراته شدن و در نهایت نابودی آنها می‌شود. از عمده‌ترین مواد آلی موجود در فاضلاب‌های شور، فنل و ترکیبات فنلی می‌باشند. برخی منابع میزان غلظت فنل در فاضلاب صنایع پتروشیمی و تولید کننده رزین را به ترتیب ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر گزارش کرده‌اند (۲). این ترکیبات به دلیل تجزیه بیولوژیکی پایین، سمیت بالا و خطرات اکولوژیکی دارای اهمیت می‌باشند. از این رو سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، فنل را به عنوان ترکیب اولویت‌دار دسته‌بندی کرده است (۳). تکنولوژی‌های اتخاذ شده جهت تصفیه فاضلاب‌های شور حاوی فنل بوده که می‌توان به روش‌های بیولوژیکی، اکسیداسیون پیشرفته، فرایندهای حرارتی و غشایی اشاره کرد (۱، ۴). در انتخاب روش تصفیه فاضلاب علاوه بر در نظر گرفتن راندمان، سازگاری با محیط زیست، صرفه اقتصادی فرایند و توجه به خصوصیات فاضلاب حائز اهمیت می‌باشد. فاضلاب‌های شور به دلیل محتوای شوری بالا و حضور آنیون‌ها و کاتیون‌های مختلف، از هدایت الکتریکی بالایی برخوردار هستند. لذا فرایندهای الکتروشیمیایی می‌توانند یک انتخاب مناسب جهت تصفیه این نوع فاضلاب‌ها باشند (۵). فرایندهای الکتروفتون و الکتروکواگولاسیون از جمله روش‌های الکتروشیمیایی در حذف آلاینده‌های مختلف از آب و فاضلاب می‌باشند (۶). در فرایند الکتروکواگولاسیون (Electrocoagulation: EC) با اعمال جریان الکتریسیته، الکترودها طی فرایند الکترولیز تجزیه شده و با تشکیل عوامل منعقد کننده و هیدروکسیدهای فلزی، منجر به ناپایدارسازی آلاینده‌ها و تشکیل لخته می‌گردند (۷، ۲).

در روش الکتروفتون (Electro-Fenton: EF) که تلفیقی

از فرایندهای الکتروشیمیایی و اکسیداسیون پیشرفته می‌باشد، یون‌های Fe^{+2} و H_2O_2 به طریق الکتریکی به ترتیب در سطح الکتروود آند قربانی و الکتروود کاتد تولید می‌شوند. رادیکال هیدروکسیل حاصل از واکنش پراکسید هیدروژن و یون‌های آهن با بیشترین پتانسیل اکسیداسیون و احیاء قادر به تخریب بیشتر آلاینده‌ها می‌باشد (۸). فرایندهای الکتروشیمیایی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند غلظت آلاینده، pH، زمان واکنش و دانسیته جریان می‌باشند. پرداختن به تأثیر تک تک عوامل یاده شده نیازمند صرف زمان طولانی و هزینه بسیار می‌باشد. تاگوچی از جمله مدل‌های آماری است که ضمن حفظ صحت و دقت قابل قبول در نتایج با تعیین تعداد معینی از آزمایشات بر اساس ترکیب‌های خاص و از پیش تعیین شده سطوح، باعث کاهش چشم‌گیر تعداد آزمایشات و هزینه‌ها می‌شود (۹). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه فرایندهای الکتروشیمیایی صورت گرفته است که بخشی از آنها مربوط به ایران می‌باشد. این در حالی است که تاکنون مطالعه‌ای مبنی بر طراحی آزمایش در خصوص بکارگیری این فرایند در خصوص فاضلاب شور حاوی فنل صورت نگرفته است، لذا مطالعه حاضر با هدف بررسی کارایی فرایند EC و EF با بهره‌گیری از مدل آماری تاگوچی در حذف غلظت بالای فنل از فاضلاب شور انجام شد. در این راستا پارامترهای متداول شامل pH، غلظت الکترولیت و آلاینده، دانسیته جریان و زمان تماس مورد مطالعه قرار گرفت.

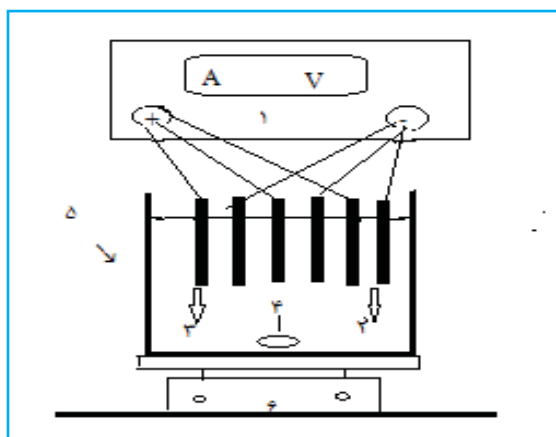
روش کار

در این مطالعه تجربی-آزمایشگاهی یک سلول الکتروشیمیایی از جنس پلکسی گلاس به حجم ۱ لیتر، راکتور مورد نظر را تشکیل می‌داد. ۶ الکتروود آهن جهت فرایند EF و ۳ الکتروود آهن و ۳ الکتروود آلومینوم (آند-کاتد) جهت فرایند EC به صورت یک در میان با فاصله ۱۰ میلی‌متر در ابعاد $200 \times 20 \times 20$ میلی‌متر به صورت عمودی داخل راکتور تعبیه شد (شکل ۱). نمونه حاوی غلظت‌های مورد نظر از فنل با استفاده از محلول استوک (۱ گرم

فنل در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) تهیه و استفاده شد.

محتویات داخل راکتور، توسط مگنت مغناطیسی و هم‌زن با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه مخلوط گردید. بعد از پایان هر آزمایش ۱۰ میلی‌لیتر نمونه از سلول الکتروشیمیایی مورد نظر جهت آنالیز برداشت شد. به منظور رفع اثر سوء لخته‌ها در قرائت، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه توسط سانتریفوژ sigma ساخت کشور آمریکا ته‌نشین شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. تمام ترکیبات شیمیایی مورد استفاده از قبیل ۴ آمینو آنتی‌پیرین، پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد، پتاسیم فری سیانید، هیدروکسید آمونیوم ۵/۰ نرمال و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات ساخت شرکت مرک آلمان بود. غلظت‌های مختلف کلرید سدیم به عنوان عامل شوری به راکتور اضافه شد. محلول استوک فنل با حل کردن مقدار معین فنل تعیین شده در هر مرحله به‌دست آمد و غلظت‌های مورد نظر از محلول استوک تهیه شد.

مقادیر جذب فنل باقی‌مانده در نمونه‌ها طبق دستورالعمل D5530، استاندارد متد با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر DR (HACH 5000) ساخت کشور آلمان در طول موج ۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۱).



شکل ۱. طرح شماتیک سلول الکتروشیمیایی

۱. منبع تولید انرژی الکتریکی، ۲. الکتروکاتد، ۳. الکتروکاتد، ۴. آهنربای مغناطیسی، ۵. سلول الکتروشیمیایی، ۶. هم‌زن مغناطیسی

طراحی مدل تاگوچی و آزمایشات آن

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد فرآیند الکتروشیمیایی ۵ پارامتر تأثیرگذار در فرآیند حذف فنل شامل pH، غلظت اولیه فنل، دانسیته جریان، زمان واکنش و غلظت شوری، غلظت پراکسید هیدروژن به عنوان پارامتر انتخاب شد که هرکدام از پارامترها در فرآیند EC دارای ۴ سطح و در فرآیند EF دارای ۵ سطح می‌باشند که سطوح انتخابی هریک از آنها برای ارائه به روش تاگوچی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای کنترل و سطوح مختلف آنها جهت فرآیند EC

شماره	پارامتر	واحد	سطوح انتخابی			
			سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	دانسیته جریان	mA/cm ²	۴	۸	۱۲	۱۶
۲	غلظت اولیه فنل	mg/L	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
۳	غلظت الکترولیت (شوری)	%	۱	۲	۳	۴
۴	pH اولیه	-	۳	۵	۷	۹
۵	زمان واکنش	Min	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰

جدول ۲. پارامترهای کنترل و سطوح مختلف آنها جهت فرآیند EF

شماره	پارامتر	واحد	سطوح انتخابی				
			سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
۱	دانسیته جریان	mA/cm ²	۰	۴	۸	۱۲	۱۶
۲	غلظت اولیه فنل	mg/L	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰
۳	شوری	%	۰	۱	۲	۳	۴
۴	pH اولیه	-	-	۲	۴	۶	۸
	غلظت پراکسید	mg/L	۰	۷۵	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰
۵	زمان واکنش	Min	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰

در روش تاگوچی جهت مقایسه بزرگی اثرات ناشی از هر عامل اصلی (S) با اثرات ناشی از عوامل خطا و اغتشاش (N) از یک تابع پاسخ تبدیل یافته استفاده می‌شود که در نتیجه منجر به برداشت دقیق‌تری از تأثیر واقعی عوامل بر سیستم خواهد شد. در این مطالعه پاسخ در نظر گرفته شده، درصد حذف فنل می‌باشد. نسبت S/N به صورت معادله (۱) محاسبه می‌شود (۱).

یافته‌ها

برای تعیین شرایط بهینه هر فاکتور (ماکزیمم نرخ میانگین S/N هر فاکتور از بین ۴ سطح) و پیش‌بینی ۴ فاکتور بهینه بر اساس روش‌های تحلیلی و آنالیز، میانگین نرخ S/N هر فاکتور در ۴ سطح اندازه‌گیری و بیشترین میزان S/N به‌دست آمده، به عنوان سطح بهینه آن فاکتور لحاظ گردید. جدول ۳ و نمودار ۱ نرخ S/N و میزان بهینه هر فاکتور را نشان می‌دهند. بر این اساس شرایط بهینه پیش‌بینی شده (به‌صورت پرنرنگ شده در جدول) شامل سطح سوم زمان (۶۰ دقیقه)، سطح اول غلظت (۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر)، سطح دوم pH (۵) و سطح دوم دانسیته جریان (۸ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) و سطح سوم شوری (۳ درصد) می‌باشد.

معادله (۱)

$$\text{Signal to noise ratio (S/N)} = -\Phi \log_0 \left[\frac{1}{n} \sum \left(\frac{1}{PRE_i} \right)^2 \right]$$

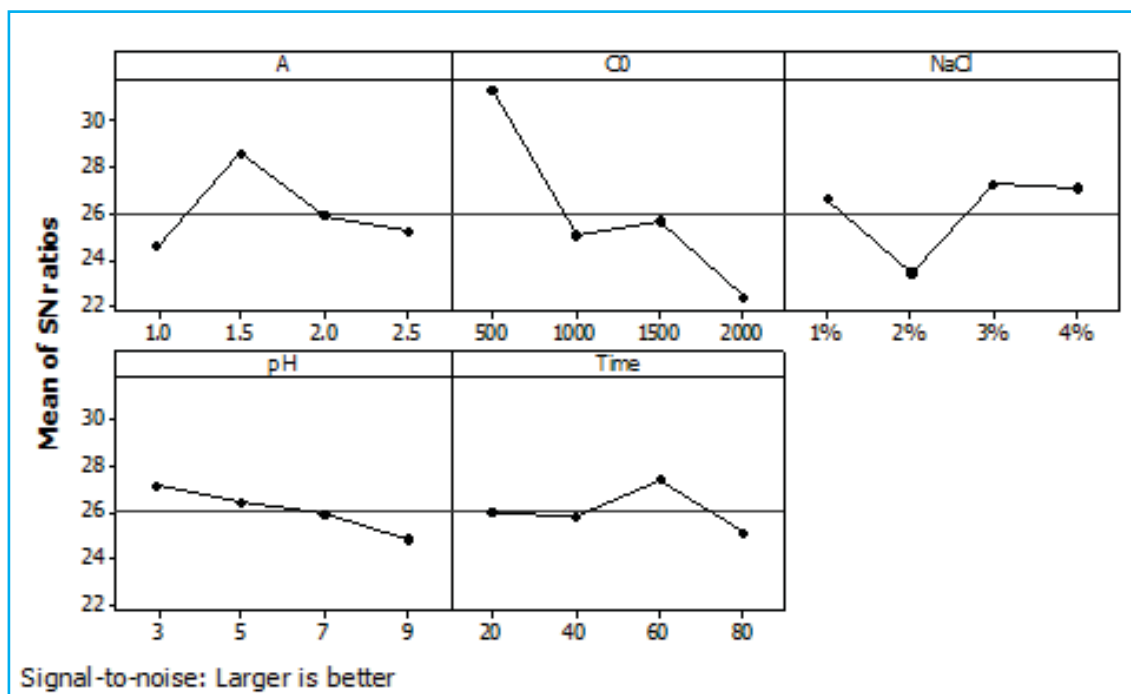
در این معادله PREi مقدار راندمان برای هر آزمایش در هر آزمون و n تعداد تکرار آزمایش‌ها (در اینجا برابر ۲) می‌باشد. C₀ و C_e غلظت اولیه و غلظت نهایی پس از انجام واکنش می‌باشد (۹).

$$PRE_i(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad \text{معادله (۲)}$$

لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر طراحی، تحلیل آزمایش‌ها و تعیین سطح بهینه با استفاده از نرم‌افزار Minitab (نسخه ۱۶) انجام شد. در نهایت به منظور مقایسه این دو فرآیند در میزان حذف COD پس از به‌دست آوردن شرایط بهینه، آزمایش COD بر اساس روش دی کرومات انجام شد (۱).

جدول ۳. نتایج میزان حذف فنل و محاسبه میزان S/N در فرآیند EC

شماره آزمون	شدت جریان (mA/cm ^۲)	غلظت فنل (mg/L)	شوری (درصد)	pH	زمان (min)	راندمان تکرار اول (درصد)	راندمان تکرار دوم (درصد)	S/N
۱	۴	۲۵۰	۱	۳	۲۰	۳۶	۳۸	۳۱/۳۵
۲	۴	۵۰۰	۲	۵	۴۰	۱۰	۱۳	۲۰/۹۹
۳	۴	۱۰۰۰	۳	۷	۶۰	۲۰	۲۲	۲۶/۴۱
۴	۴	۱۵۰۰	۴	۹	۸۰	۹	۱۰	۱۹/۵۱
۵	۸	۲۵۰	۲	۷	۸۰	۳۰	۳۳	۲۹/۹۳
۶	۸	۵۰۰	۱	۹	۶۰	۲۵	۲۶	۲۸/۱۲
۷	۸	۱۰۰۰	۴	۳	۴۰	۳۰	۳۳	۲۹/۹۳
۸	۸	۱۵۰۰	۳	۵	۲۰	۲۰	۲۱	۲۶/۲۲
۹	۱۲	۲۵۰	۳	۹	۴۰	۳۳	۳۶	۳۰/۷۳
۱۰	۱۲	۵۰۰	۴	۷	۲۰	۱۹	۱۹	۲۵/۵۷
۱۱	۱۲	۱۰۰۰	۱	۵	۸۰	۱۸	۱۹	۲۵/۳۳
۱۲	۱۲	۱۵۰۰	۲	۳	۶۰	۱۰	۱۱	۱۸/۵
۱۳	۱۶	۲۵۰	۴	۵	۶۰	۵۱	۵۳	۳۲/۹۲
۱۴	۱۶	۵۰۰	۳	۳	۸۰	۱۸	۱۹	۲۵/۳۳
۱۵	۱۶	۱۰۰۰	۲	۹	۲۰	۱۰	۱۲	۲۰/۷۲
۱۶	۱۶	۱۵۰۰	۱	۷	۴۰	۱۲	۱۲	۲۱/۵۸



نمودار ۱. نتایج نسبت S/N پارامترهای مؤثر بر حذف فنل در فرآیند EC

بر اساس نتایج حاصل در جدول ۴، میزان تأثیر گذاری و مشارکت هر آلاینده در فرآیند بر اساس آنالیز واریانس تعیین گردید.

جدول ۴. آنالیز ANOVA برای درصد مشارکت هر پارامتر در فرآیند EC

پارامترهای واکنش	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مجموع میانگین مربعات	سهم مشارکتی
زمان واکنش (min)	۳	۳۷/۳۰۳	۳۷/۳۰۳	۱۲/۴۳۴۳	۱۳/۹۷
غلظت آلاینده (mg/L)	۳	۱۶۸/۶۹۹	۱۶۸/۶۸۸	۵۶/۲۲۹۵	۶۳/۲
دانسیته جریان (mA/cm ^۲)	۳	۳۸/۰۸۵	۳۸/۰۸۵	۱۲/۶۹۵۱	۱۴/۲۶
pH	۳	۱۱/۷۵۳	۱۱/۷۵۳	۳/۹۱۷۷	۴/۴
شوری (%)	۳	۱۱/۱۲۷	۱۱/۱۲۷	۳/۷۰۹۱	۴/۲

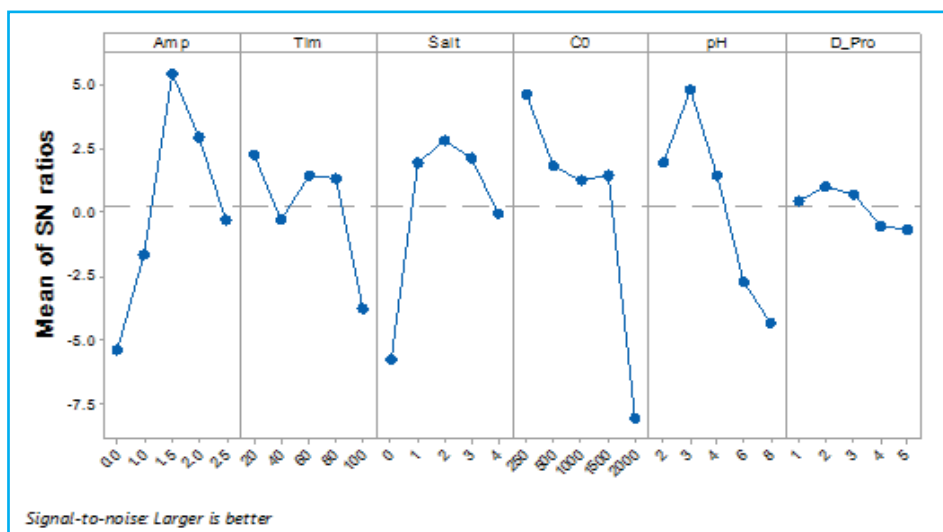
شرایط بهینه پیش‌بینی شده در فرآیند EF بر اساس جدول ۵ جریان (۸ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع)، سطح سوم شوری (۲) و نمودار ۲، شامل سطح اول زمان (۲۰ دقیقه)، سطح اول غلظت (۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر)، سطح دوم pH (۳)، سطح سوم دانسیته (۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر)، به‌دست آمد.

جدول ۵. نتایج میزان حذف فنل و محاسبه میزان S/N در فرآیند EF

آزمایش	شدت جریان (mA/cm ^۲)	غلظت فنل (mg/L)	شوری (درصد)	pH	زمان (min)	پراکسید (mg/L)	راندمان تکرار اول (درصد)	راندمان تکرار دوم (درصد)	S/N
۱	۰	۲۵۰	۰	۲	۲۰	۵۰	۳۰	۳۳	-۳
۲	۰	۵۰۰	۱	۳	۴۰	۷۵	۴۵	۵۰	۲/۸
۳	۰	۱۰۰۰	۲	۴	۶۰	۱۵۰	۴۰	۴۳	۱/۲

ادامه جدول ۵. نتایج میزان حذف فتل و محاسبه میزان S/N در فرآیند EF

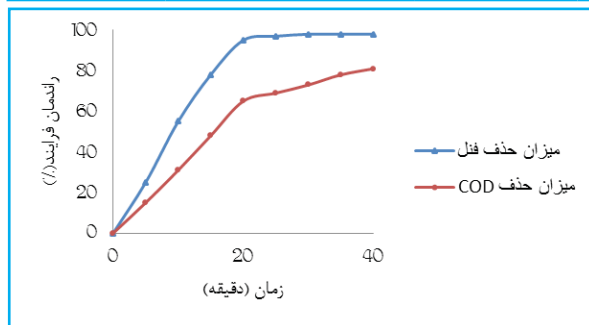
آزمایش	شدت جریان (mA/cm ²)	غلظت فتل (mg/L)	شوری (درصد)	pH	زمان (min)	پراکسید (mg/L)	راندمان تکرار اول (درصد)	راندمان تکرار دوم (درصد)	S/N
۴	۰	۱۵۰۰	۳	۶	۸۰	۲۲۵	۲۸	۲۹	-۴/۷
۵	۰	۲۰۰۰	۴	۸	۱۰۰	۳۰۰	۱۹	۲۲	-۲۳/۲
۶	۴	۱۰۰۰	۱	۶	۲۰	۳۰۰	۳۵	۳۸	-۰/۵
۷	۴	۱۵۰۰	۲	۸	۴۰	۵۰	۳۰	۳۵	-۲/۵
۸	۴	۲۰۰۰	۳	۲	۶۰	۷۵	۲۸	۳۱	-۴/۲
۹	۴	۲۵۰	۴	۳	۸۰	۱۵۰	۷۵	۸۰	۸/۷
۱۰	۴	۵۰۰	۰	۴	۱۰۰	۲۲۵	۲۳	۲۵	-۹/۵
۱۱	۸	۲۰۰۰	۲	۳	۲۰	۲۲۵	۵۹	۶۲	۵/۷
۱۲	۸	۲۵۰	۳	۴	۴۰	۳۰۰	۸۷	۹۵	۱۱/۶
۱۳	۸	۵۰۰	۴	۶	۶۰	۵۰	۵۷	۶۱	۵/۴
۱۴	۸	۱۰۰۰	۰	۸	۸۰	۷۵	۳۲	۳۴	-۲
۱۵	۸	۱۵۰۰	۱	۲	۱۰۰	۱۵۰	۶۳	۶۹	۷
۱۶	۱۲	۵۰۰	۳	۸	۲۰	۱۵۰	۵۴	۵۵	۴/۵
۱۷	۱۲	۱۰۰۰	۴	۲	۴۰	۲۲۵	۵۳	۵۴	۴/۲
۱۸	۱۲	۱۵۰۰	۰	۳	۶۰	۳۰۰	۴۸	۴۹	۳/۱۶
۱۹	۱۲	۲۰۰۰	۱	۴	۸۰	۵۰	۳۴	۳۷	-۱
۲۰	۱۲	۲۵۰	۲	۶	۱۰۰	۷۵	۵۱	۵۲	۴
۲۱	۱۶	۱۵۰۰	۴	۴	۲۰	۷۵	۵۵	۵۷	۵
۲۲	۱۶	۲۰۰۰	۰	۶	۴۰	۱۵۰	۲۰	۲۱	-۱۷
۲۳	۱۶	۲۵۰	۱	۸	۶۰	۲۲۵	۴۲	۴۵	۲
۲۴	۱۶	۵۰۰	۲	۲	۸۰	۳۰۰	۶۰	۶۳	۶
۲۵	۱۶	۱۰۰۰	۳	۳	۱۰۰	۵۰	۴۹	۵۱	۴



نمودار ۲. نتایج نسبت S/N پارامترهای مؤثر بر حذف فتل در فرآیند EC

جدول ۶. آنالیز ANOVA برای درصد مشارکت هر پارامتر در فرآیند EF

پارامترهای واکنش	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مجموع میانگین مربعات	سهم مشارکتی
زمان واکنش (min)	۴	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۱۳	۳/۰۸
غلظت آلاینده (mg/L)	۴	۴/۳۲	۴/۳۲	۱/۰۸	۲۵/۲۵
دانسیته جریان (mA/cm ²)	۴	۴/۹۸	۴/۹۸	۱/۲۴	۲۹/۱۲
pH	۴	۲/۸۵	۲/۸۵	۰/۷۱	۱۶/۶۶
شوری (%)	۴	۳/۱۳	۳/۱۳	۰/۷۸	۱۸/۳
پراکسید هیدروژن (mg/L)	۴	۱/۳	۱/۳	۰/۳۲	۷/۶

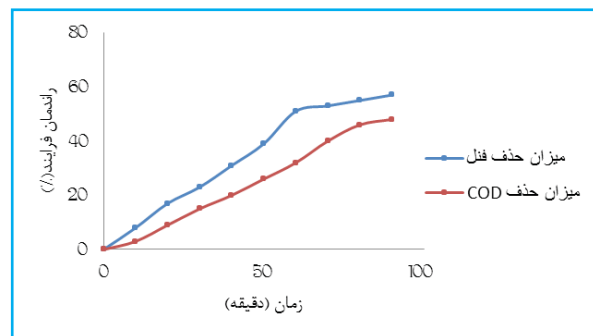


نمودار ۴. راندمان فرآیند EF در حذف فتل و COD (غلظت فتل ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر ۳، شوری ۲ درصد، جریان ۸ میلی آمپر، پراکسید هیدروژن ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر)

بحث

بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر، در فرآیند EC بالاترین نرخ S/N برابر ۲۸/۵ مربوط به دانسیته جریان ۸ میلی آمپر بود که به عنوان جریان بهینه و در مرتبه دوم مشارکت در نظر گرفته شد. باید در نظر داشت که افزایش راندمان و افزایش جریان، باعث تحمیل هزینه‌های جانبی نظیر ازدیاد مصرف انرژی الکتریکی و وزن الکتروود خواهد شد. در دانسیته جریان بالا مقدار آهن اکسید شده افزایش می‌یابد که نتیجه آن تولید مقادیر بیشتر رسوبات و لخته‌های هیدروکسیدی جهت حذف آلاینده است (۱۰). نتایج مطالعه حاضر در خصوص تغییرات شدت جریان، با نتایج حاصل از مطالعه صید محمدی و همکاران در حذف رنگ راکتیو (سال ۹۴) مطابقت می‌نماید (۱۱). همچنین در مطالعه حاضر در فرآیند EF، بیشترین میزان S/N مربوط به سطح سوم جریان و برابر ۲/۱۳ به دست آمد که بر اساس نتایج

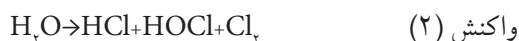
در این مطالعه در شرایط بهینه، عملکرد فرآیند EC در حذف COD مورد بررسی قرار گرفت. نمودار ۳ کارایی فرآیند EC در حذف COD در شرایط بهینه را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار، میزان حذف فتل در زمان بهینه ۶۰ دقیقه از میزان حذف COD بالاتر بود. میزان حذف COD برابر ۲۴ درصد و میزان حذف فتل برابر ۵۸ درصد در زمان ۶۰ دقیقه بود.



نمودار ۳. راندمان فرآیند EC در حذف فتل و COD (غلظت فتل ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر ۵، شوری ۳ درصد، جریان ۸ میلی آمپر)

نمودار ۴ راندمان فرآیند EF را در حذف COD در شرایط بهینه نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است در زمان ۲۰ دقیقه راندمان حذف COD برابر ۵۸ درصد می‌باشد و با گذشت زمان نیز میزان حذف افزایش می‌یابد، در صورتی که میزان حذف همزمان فتل در زمان ۲۰ دقیقه برابر ۹۷ درصد و از میزان حذف COD بیشتر است.

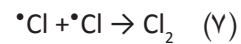
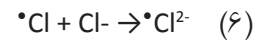
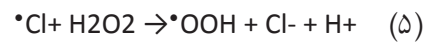
در فرآیند EF افزایش میزان شوری به مقدار ۲ درصد، باعث افزایش راندمان حذف گردید و در مقادیر بالاتر از راندمان حذف کاسته شد. بر اساس واکنش‌های ۷-۳، یون‌های کلرور موجود در فرآیند باعث به دام انداختن رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شوند. لذا واکنش رادیکال‌های هیدروکسیل با یون‌های کلرور باعث تولید رادیکال‌های کلرور می‌شود. رادیکال‌های کلرور با پراکسید هیدروژن واکنش داده و تولید رادیکال پروکسی ($\text{OH}_2^\bullet$) می‌کند که این رادیکال ($1/65$ الکترون ولت) واکنش‌پذیری کمتری نسبت به رادیکال هیدروکسیل ($2/8$ الکترون ولت) دارد. از طرفی دیگر یون‌های کلرور با یون‌های آهن فرو ترکیب شده و مانع از ترکیب هیدروژن پراکسید با یون‌های آهن می‌شوند که باعث کاهش کارایی فرآیند می‌شود (۱۵).



در مطالعه حاضر در فرآیند EF افزایش میزان شوری به میزان ۲ درصد باعث افزایش راندمان حذف گردید و در مقادیر بالاتر از راندمان حذف کاسته شد. بر اساس واکنش‌های ۷-۳، یون‌های کلرور موجود در فرآیند باعث به دام انداختن رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شوند. لذا واکنش رادیکال‌های هیدروکسیل با یون‌های کلرور باعث تولید رادیکال‌های کلرور می‌شود. رادیکال‌های کلرور با پراکسید هیدروژن واکنش داده و تولید رادیکال پروکسی ($\text{OH}_2^\bullet$) می‌کند که این رادیکال ($1/65$ الکترون ولت) واکنش‌پذیری کمتری نسبت به رادیکال هیدروکسیل ($2/8$ الکترون ولت) دارد. از طرفی دیگر یون‌های کلرور با یون‌های آهن فرو ترکیب شده و مانع از ترکیب هیدروژن پراکسید با یون‌های آهن می‌شوند که باعث کاهش کارایی فرآیند می‌گردند (۱، ۱۵). ژاوو و همکاران (سال ۲۰۰۷) در حذف رنگ متیل رد توسط فرآیند EF به این نتیجه رسیدند غلظت الکترولیت بالاتر از ۰/۱ مول تأثیر چندانی بر راندمان حذف رنگ ندارد (۱۴).



حاصل از آنالیز واریانس، این پارامتر با سهم مشارکتی ۲۹/۱۲ درصد، سهم نخست را در تأثیرگذاری بر کارایی فرآیند نسبت به سایر پارامترها بر عهده داشت. از آنجایی که در این پژوهش، تنها منبع یون‌های Fe^{+2} در راکتور برای انجام واکنش EF، الکتروند آند آهن بود، لذا با تغییر جریان در سطح الکتروند آند یون‌های آهن فرو در فرآیند EF تولید می‌گردند. تعیین میزان و غلظت یون‌های آهن آزاد شده از الکتروند آند آهن، انجام فرآیند بازسازی یون‌های Fe^{+2} از طریق احیاء مداوم یون‌های Fe^{+3} در سطح کاتد و در نهایت میزان غلظت تولیدی رادیکال هیدروکسیل با جریان اعمال شده به سلول الکتریکی کنترل می‌شود (۱۲). از لحاظ تأثیرگذار بودن، غلظت آلایند در فرآیند EC بر اساس آنالیز واریانس صورت گرفته، در مکان اول پارامترهای انتخابی (۶۳/۲ درصد) قرار گرفت. با افزایش غلظت فنل از ۲۵۰ به ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، میزان S/N از ۳۱/۲۳ به ۲۱/۴۵ کاهش یافت. با افزایش غلظت آلایند در یک جریان ثابت، مقدار مشخصی از ترکیبات هیدروکسید آهن در محیط تولید می‌شود و این مقدار هیدروکسید آهن تولیدی قادر به حذف مقدار مشخصی از مولکول‌های ماده آلی می‌باشد. هم‌چنین در صورت افزایش غلظت اولیه، مقدار لخته‌های هیدروکسید آهن موجود در محیط برای حذف مولکول‌های اضافی ماده آلی کافی نمی‌باشد، در نتیجه راندمان حذف کاهش می‌یابد (۱۳). در مطالعه حاضر در فرآیند EF سطح اول غلظت دارای بیشترین نرخ S/N برابر با ۴/۶۱ بود. بر اساس آنالیز واریانس صورت گرفته، این پارامتر با سهم مشارکتی ۲۵/۲۵ درصد در مکان دوم تأثیرگذاری قرار گرفت. در این مطالعه افزایش غلظت فنل به عنوان آلایند، کاهش کارایی را به دنبال داشت. افزایش غلظت آلایند به دو دلیل عمده کارایی را کاهش می‌دهد. در مقادیر ثابت $\text{OH}^\bullet$ با افزایش غلظت آلایند، میزان تماس و مواجهه کاهش می‌یابد (۱). هم‌چنین افزایش غلظت آلایند باعث تولید بیشتر محصولات جانبی ناشی از اکسیداسیون خواهد شد که این ترکیبات مصرف کننده مقادیر بیشتری از $\text{OH}^\bullet$ خواهند بود (۱۴). هم‌چنین در مطالعه حاضر



در مطالعه حاضر در فرآیند EC نتایج آنالیز واریانس تأثیرگذاری pH را برابر ۴/۴ درصد و در اولویت چهارم نشان داد. سرعت واکنش‌های شیمیایی به pH محیط بستگی دارد؛ به گونه‌ای که در pHهای شدیداً اسیدی، آهن به صورت یون فلزی محلول و در pHهای شدیداً بازی به فرم $\text{Fe}(\text{OH})_4^{4-}$ می‌باشد که قادر به حذف آلاینده نمی‌باشد. اما در محدوده pH ۳ تا ۱۲ به فرم گونه‌های هیدروکسیدی است که قادر به عمل حذف می‌باشد (۱۰). حضور یون‌های کلراید در فاضلاب‌های شور حاوی آلاینده‌های مختلف باعث افزایش راندمان حذف می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده، در pHهای متفاوت، گونه‌های مختلفی از یون‌های شوری حضور دارند. در pH برابر ۱-۳ یون‌های کلرور، در pH برابر ۵-۷ اسید هیپوکلروس و در pH بالای ۸، یون هیپوکلرو وجود خواهد داشت (۱۶). لذا با توجه به pH به دست آمده در این فرآیند، حضور اسید هیپوکلروس به عنوان اکسید کننده قوی باعث افزایش راندمان حذف فنل گردید. بر اساس نتایج به دست آمده در فرآیند EF، بیشترین میزان S/N مربوط به سطح دوم یعنی pH برابر ۳ به دست آمد. همچنین این پارامتر با میزان تأثیرگذاری ۱۶/۶۶ درصد در مکان چهارم قرار گرفت. pH تأثیر مستقیم در مدت پایداری پراکسید هیدروژن، میزان تولید $\text{OH}^\bullet$ و تعیین گونه و حالت آهن موجود در محلول دارد. بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعات مختلف، فرآیند فنتون و فرآیندهایی نظیر آن در محلول‌های اسیدی با pH ۲-۴ انجام می‌شوند. در pHهای بالا به خصوص بالای ۵، کارایی فرآیند به شدت کاهش می‌یابد، زیرا پراکسید هیدروژن در محیط قلیایی به دلیل ناپایداری به سرعت به آب و دی اکسیدکربن تجزیه می‌شود، همچنین افزایش pH باعث کاهش پتانسیل اکسیداسیون رادیکال هیدروکسیل خواهد شد (۱۷). در فرآیند

EC زمان تماس با میزان S/N برابر ۲۷/۳۴ بدست آمد که بیانگر بهینه بودن نتایج در سطح سوم یعنی زمان ۶۰ دقیقه و با سهم مشارکتی ۱۳/۹۷ درصد بود. افزایش زمان در فرآیند انعقاد الکتریکی نقش بسزایی در انجام فرآیند حذف دارد و کارایی حذف مستقیماً به غلظت یون‌های تولیدی در الکترودها وابسته می‌باشد، زیرا با افزایش زمان ماند، غلظت این یون‌ها افزایش یافته و در نتیجه لخته‌های هیدروکسید نیز افزایش می‌یابد (۱۸). در مطالعه کان (۲۰۱۴) در حذف COD از فاضلاب، در زمان ۲۵ دقیقه راندمان حذف برابر ۶۰ درصد و با افزایش زمان به ۳۶۰ دقیقه تغییر چشم‌گیری در راندمان مشاهده نشد و به ۶۴/۷ درصد افزایش یافت (۶). در مطالعه حاضر در فرآیند EF با افزایش زمان به بیشتر از سطح اول (۲۰ دقیقه)، میزان حذف فنل کاهش یافت که علل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد، غلظت یون فرو و پراکسید هیدروژن در این زمان در شرایط مناسبی قرار داشته و رادیکال هیدروکسیل به خوبی قادر به تجزیه آلاینده‌ها بوده است. اما در زمان‌های بالاتر، سرعت تجزیه کاهش پیدا کرده است؛ به طوری که پس از زمان ۲۰ دقیقه به دلیل مصرف پراکسید هیدروژن و تکمیل زمان اکسیداسیون و کاهش عملکرد آن به عنوان کاتالیز، کارایی فرآیند کاهش پیدا کرد. در مطالعه عمر و همکاران (۲۰۱۰) در خصوص تصفیه شیرابه با فرآیند الکتروفنتون، کارایی فرآیند پس از زمان ۳۰ دقیقه کاهش پیدا کرد (۱۹). در این مطالعه تأثیر غلظت پراکسید هیدروژن در فرآیند EF در ۵ سطح سنجیده شد. میزان S/N این پارامتر برابر ۴/۷۸ در سطح سوم این پارامتر در غلظت ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر با تأثیرگذاری ۷/۶ درصد به دست آمد. در این مطالعه پراکسید هیدروژن به دلیل منبع تولید رادیکال هیدروکسیل، به صورت دستی به راکتور واکنش افزوده شد. بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه، افزایش غلظت پراکسید هیدروژن به بیش از ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر به دلیل ایجاد نقش رباینده رادیکال هیدروکسیل، باعث کاهش راندمان فرآیند شد. در مطالعه آتماکا (۲۰۰۹) با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن از ۵۰۰ به ۱۲۵۰

همکاران (۲۰۱۰) که در تصفیه فاضلاب پتروشیمی با استفاده از فرآیند الکتروشیمی انجام گرفت، به نتیجه مشابه این مطالعه در معدنی سازی فرآیند دست یافتند (۲۱).

نتیجه گیری: با توجه به نتایج مطالعه حاضر، فرآیند الکتروفتون در مقایسه با الکتروکواگولاسیون فرآیند مؤثرتری می باشد که قادر به تأمین استانداردهای زیست محیطی در تصفیه فاضلاب شور حاوی غلظت بالای فنل می باشد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش حاصل بخشی از پایان نامه دانشجویی با عنوان «بررسی عملکرد فرآیند الکتروشیمیایی در تصفیه فاضلاب شور حاوی فنل شبیه سازی شده» مصوب معاونت تحقیقات و فناوری و خدمات درمانی دانشگاه علوم پزشکی همدان در سال ۱۳۹۳ با کد ۹۳۰۱۲۶۲۵۹ می باشد که با حمایت مالی آن دانشگاه اجرا شد. بدین وسیله از تمام کسانی که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، تشکر و قدردانی می شود.

References

1. Asgari G, Feradmal J, Poormohammadi A, Sadrnourmohamadi M, Akbari S. Taguchi optimization for the removal of high concentrations of phenol from saline wastewater using electro-Fenton process. *Desalin Water Treat* 2016; 57: 1-8
2. Akbari S, Seid-mohammadi A, Faradmal J, Asgari G. An Investigation of the Performance of Electrochemical Process in Simulated Phenolic Saline Wastewater Treatment. *J Sabzevar Univ Med Sci* 2015; 5: 870-78. (Persian)
3. Akbari S, Ghanbari F, Moradi M. Bisphenol A degradation in aqueous solutions by electrogenerated ferrous ion activated ozone, hydrogen peroxide and persulfate: applying low current density for oxidation mechanism. *Chem Eng J* 2016; 294: 298-30.
4. Gholami M, Davoudi M, Naseri S, Mahvi AH, Farzadkia M, Esrafil A et al. Optimization of phenolic compounds removal from wastewater in electrochemical oxidation process using catalytic anodes and cellulosic separator. *J Res Environ Health* 2016; 2(2):101-11. (Persian)
5. Sundarapandiyan S, Chandrasekar R, Ramanaiah B, Krishnan S, Saravanan P. Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater. *J hazard mater* 2010; 180(1): 197-203
6. Can O. COD removal from fruit-juice production wastewater by electrooxidation electrocoagulation and electro-Fenton processes. *Desalin Water Treat* 2014; 52(3): 65-73
7. Akbari S, Ghanbari F, Almasi H, Asgari GH. Investigation on catalytic potential of marble powder for catalytic ozonation in removal of reactive black 5. *J health field* 2015, 4(2): 10-7. (Persian)
8. Yusefi M, Ghanbari F, Zazouli M.A, Ahmadi Moghaddam M, Akbari S. Investigation of the Efficiency of Electro-Fenton and UV/TiO₂ Processes for Para-Chlorophenol Removal from Aqueous Solutions. *J Health* 2017; 7: 600-10. (Persian)
9. Asgari G, Almasi H, Faradmal J, Ghanbari F, Darai Z, Akbari S. Optimization of Catalytic Ozonation Process for Removal of Reactive Black 5 dye Using Bone Char Ash Modified by Magnesium Oxide and Applying Taguchi Design. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2015; 24: 252-64. (Persian)
10. Seid-Mohammadi A, Asgari Gh, Sammadi M, Ahmadian M, Poormohammadi A. Removal of humic acid from synthetic water using chitosan as coagulant aid in electrocoagulation process for Al and Fe electrodes. *Res J Chem Environ* 2014; 18: 5-10

میلی گرم بر لیتر، افزایش راندمان به میزان ۵ درصد و در غلظت ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر کاهش راندمان مشاهده شد که در تصفیه شیرابه زباله در حذف COD به نتایج مشابه این مطالعه دست یافت (۲۰). از آنجایی که استاندارد تخلیه پساب های صنعتی به آب های پذیرنده بر اساس میزان COD پساب مورد نظر می باشد، لذا بررسی کارایی فرآیندهای تصفیه در حذف و کاهش این فاکتور امری ضروری است. به همین دلیل در مطالعه حاضر توان فرآیندهای EC و EF در حذف COD حاصل از فنل مورد مطالعه قرار گرفت و میزان حذف COD در فرآیند EF در زمان ۴۰ دقیقه برابر ۷۷ درصد و در فرآیند EC در زمان ۹۰ دقیقه برابر ۴۸ درصد به دست آمد. لذا با توجه به نتایج حاصل، فرآیند EF کارایی بالاتری در حذف فنل و COD نسبت به فرآیند EC موجود در محلول داشت، اگرچه میزان حذف COD کمتر از حذف فنل در هر دو فرآیند بود. این مسئله بیان گر آن است که حذف COD سخت تر از حذف فنل می باشد و این امر ناشی از طبیعت پیچیده موادی است که نیاز به معدنی سازی دارند (۱). به همین جهت حذف COD نیاز به زمان های طولانی تر دارد. در مطالعه یاوز و

11. Seid-mohammadi A, Asgari GH, Akbari S, Shabanlo A, Roshanaie GH, Almasi H. A Comparative study on removal of reactive black 5 using Electrocoagulation and Electrocoagulation/Flotation Processes in aqueous solution. *J Health Syst Res* 2015; 11(3): 641-6. (Persian)
12. Rahmani AR, Shabanloo A, Mehralipour J, Fazlzadeh M, Poureshgh Y. Degradation of Phenol in Aqueous Solutions Using Electro-Fenton Process. *Res J Environ Sci* 2015; 9(7): 332-40
13. Dalvand A, Golami M, Ameri A, Mahmudi NA. Treatment of Synthetic Wastewater Containing Reactive Red 198 by Electrocoagulation Process. *J Health Environ* 2011; 22: 401-11. (Persian)
14. Zhou M, Yu Q, Lei L, Barton G. Electro-Fenton method for the removal of methyl red in an efficient electrochemical system. *Sep Purif Technol* 2007; 57(2): 380-7
15. Costa CR, Olivi P. Effect of chloride concentration on the electrochemical treatment of a synthetic tannery wastewater. *Electrochim Acta* 2009; 54(7): 2046-52
16. Zhou M, Tan Q, Wang Q, Jiao Y, Oturan N, Oturan MA. Degradation of organics in reverse osmosis concentrate by electro-Fenton process. *J hazard mater* 2012; 215: 287-93
17. Rahmani AR, Rezaeivahidian H, Almasi M, Shabanlo A, Almasi H. A comparative study on the removal of phenol from aqueous solutions by electro-Fenton and electro-persulfate processes using iron electrodes. *Res Chem Intermed* 2016; 42(2): 1441-50
18. Biglari H, Bazrafshan E. Performance evaluation of electrochemical process using iron and aluminum electrodes in phenol removal from synthetic aqueous environment. *Iran J Health Environ*. 2013;5(4):445-56
19. Umar M, Aziz HA, Yusoff MS. Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. *Waste Manage* 2010; 30(11): 2113-21
20. Atmaca E. Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method. *J Hazard Mater* 2009; 163(1): 109-14
21. Yavuz Y, Koparal AS, Ogutveren UB. Treatment of petroleum refinery wastewater by electrochemical methods. *Desalination* 2010; 258(1): 201-5