

## Electrochemical Oxidation of Phenol in Aquatic Solutions

Rezaei M\*, Zadehjalil N

Department of Environmental Health Engineering, Ardabil University of Medical Sciences, Daneshgah St., Ardabil, Iran

\* *Corresponding author.* Tel: +989127242792, Fax: +982188284551, E-mail: Rezaei.m1984@gmail.com

Received: Sep 28, 2016 Accepted: Jan 4, 2017

### ABSTRACT

**Background & objectives:** Presence of toxic organic compounds such as phenol in industrial effluents is considered as a serious environmental concern. Most environmental laws focus on reducing these compounds in wastewater using different technologies. This research was conducted to evaluate the efficiency of electrochemical processes using iron electrodes to reduce phenol content from man-made wastewater under different operational conditions.

**Methods:** A Plexiglas cell with a volume of 95.9 L and iron electrodes with dimensions of 0.3×1×10 cm (thickness × width × length) were used as anode and cathode. The experiments were carried out at different pH, different initial concentrations of phenol, constant electrolyte amounts, and different range of electrical current. Measurements of phenol and total iron were performed using phenanthroline method.

**Results:** Maximum removal efficiency of ~97% was observed at pH=8, initial phenol concentration of 50 mg/L, electrolyte concentration of 2.5 g/L, electrical current of 40 mA/min, and the reaction time of 120 min.

**Conclusion:** The results showed that the electrochemical oxidation method using iron electrodes has appropriate efficiency to remove phenol from aquatic matrixes in laboratory scale.

**Keywords:** Phenol; Electrochemical Oxidation; Persistent Organic Compounds.

# اکسیداسیون الکتروشیمیایی فنل در محلول‌های آبی

محسن رضایی<sup>۱\*</sup>، نسرين زاده جلیل<sup>۲</sup>

۱. مربی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل

۲. دانش آموخته مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل

\* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۹۱۲۷۲۴۲۷۹۲ فکس: ۰۲۱۸۸۲۸۴۵۵۱ ایمیل: Rezaei.m1984@gmail.com

## چکیده

**زمینه و هدف:** وجود ترکیبات آلی مقاوم همچون فنول در پساب‌های صنعتی یک معضل جدی زیست محیطی تلقی می‌شود. اغلب قوانین زیست محیطی بر کاهش این ترکیبات از پساب‌های صنعتی از طریق تکنولوژی‌های مختلف تأکید دارند. این تحقیق با هدف ارزیابی کارایی فرآیند الکتروشیمیایی با الکتروود آهن جهت کاهش فنل از پساب دست‌ساز در شرایط مختلف راهبری انجام گرفت.

**روش کار:** سلولی از جنس پلکسی گلاس با حجم ۱/۹۵ لیتر مورد استفاده قرار گرفت. از الکتروود آهن با ابعاد ۱۰×۳×۰/۱ سانتی متر (ضخامت×عرض×طول) بعنوان آند و کاتد استفاده گردید. آزمایش‌ها در شرایط مختلف pH، غلظت‌های متفاوت ورودی فنل، مقادیر ثابت الکتروولیت و شدت متنوعی از جریان الکتروسیته، در زمان‌های ماند مشخص انجام گرفت. سنجش نمونه‌های فنل و آهن کل، بترتیب با استفاده از روش E-آمینو آنتی پیرین و فنانترولین انجام گرفت. **یافته‌ها:** در pH اولیه ۸، غلظت ورودی ۵۰ میلی گرم بر لیتر، میزان الکتروولیت ۲/۵ گرم در لیتر، جریان الکتروولیتی ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع و زمان ماند ۱۲۰ دقیقه، راندمان حذف حداکثر و در حدود ۹۷ درصد مشاهده گردید. **نتیجه گیری:** نتایج حاصله نشان داد که روش الکتروشیمیایی، راندمان غیر ایده آل اما تقریباً مناسبی در حذف فنل با بکارگیری الکتروود آهن از پساب‌های دست‌ساز در مقیاس آزمایشگاهی دارد. در عین حال احتمالاً با تلفیق روش‌های پیشرفته اکسیداسیون با الکتروشیمیایی بتوان مقادیر به مقادیر بالای حذف دست یافت.

**واژه‌های کلیدی:** فنل، تصفیه الکتروشیمیایی، ترکیبات آلی مقاوم

دریافت: ۹۵/۷/۷ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۵

## مقدمه

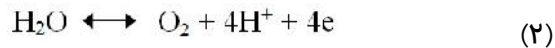
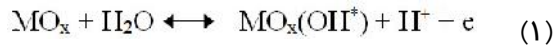
فنل جزئی از ترکیبات آلی مقاوم و دارای تقدم (درجه اول) در پساب‌های صنعتی می‌باشد (۱). مشکل اصلی ایجاد شده بوسیله فنل مقاومت در برابر تجزیه بیولوژیکی و سمیت بالقوه آن است (۲). اغلب قوانین زیست محیطی بر کاهش این ترکیبات از پساب‌های صنعتی از طریق تکنولوژی‌های مختلف تأکید دارند (۱). ترکیبات فنلی دارای اثرات با اهمیت همچون سرطانزایی احتمالی، جهش‌زایی و آسیب‌رسانی به جنین هستند. بنابراین پایه‌ریزی راهکارهایی جهت کاهش این ترکیبات در محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. پساب

صنایعی مانند صنایع کک‌سازی، لاستیک‌سازی، پلاستیک، پتروشیمی، سرامیک، فولاد و ساخت رزین‌های فنولی حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات فنلی هستند (۳، ۴). مقدار مجاز پیشنهادی آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA) برای حضور ترکیبات فنول در پساب‌های صنعتی کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

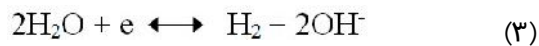
تاکنون روش‌های متعددی به منظور حذف فنل از فاضلاب مورد مطالعه قرار گرفته است. که از جمله آنها شامل جذب روی جاذب‌ها مانند کربن فعال، تبادل یون، تثبیت به وسیله غشای میکروبی، فرایندهای غشایی نظیر اولترافیلتراسیون، اسمز

می‌کند. این فرایند تحت عنوان روش فنتون شناخته می‌شود. به ترکیب این فرایند با روش الکتروشیمیایی فن آوری الکتروفنتون اطلاق می‌شود. اساس فرایند در واکنش‌های زیر ساده سازی شده است (۱۲).

آند:



کاتد:



هدف از این تحقیق بررسی کارایی سلول الکتروشیمیایی برای تصفیه فنل از فاضلاب سنتتیک با استفاده از الکترودهای آهن تحت شرایط مختلف فرآیندی بود.

### روش کار

مطالعه حاضر یک تحقیق تجربی بوده و کارآیی فرایند الکتروشیمیایی جهت حذف فنل در مقیاس آزمایشگاهی و در سلول با سیستم منقطع بر روی فاضلاب سنتتیک در محل آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی اردبیل مورد بررسی قرار گرفت.

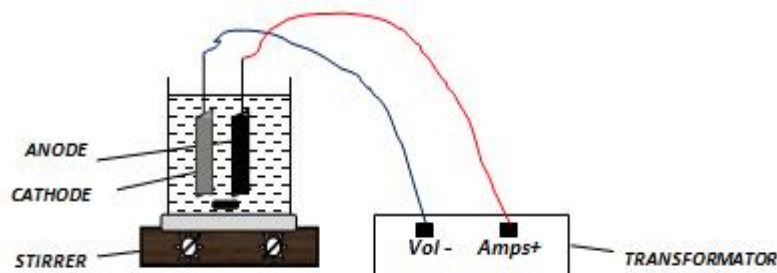
سلولی با ابعاد  $۱۳ \times ۱۰ \times ۱۵$  سانتیمتر (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) با حجم  $۱/۹۵$  لیتر از جنس پلکسی گلاس و الکترودهایی از جنس آهن با ابعاد  $۱۰ \times ۳ \times ۱$  سانتیمتر (طول  $\times$  عرض  $\times$  ضخامت) با مساحت مستغرق  $۳۰$  سانتیمتر مربع مورد بهره برداری قرار گرفت. شماتیک سلول الکتروشیمیایی در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها در چندین مرحله بانجام رسیدند که در هر مرحله میزان بهینه یک پارامتر بعنوان متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار بهینه آن برای ادامه مراحل تعیین شد. مرحله اول فرآیند جهت تعیین pH بهینه در محدوده ۲ تا ۸، مرحله دوم بمنظور تعیین دانسیته جریان بهینه در محدوده  $۰/۵$  تا  $۱/۲$  آمپر و مرحله سوم جهت تعیین

معکوس و روش‌های الکتروشیمیایی (۹-۵). اگرچه عملکرد این روش‌ها کاملاً رضایت بخش است ولی مشکل رو به افزایش اغلب روش‌های شیمیایی استفاده از تجهیزات زیاد، انرژی بالا، افزایش هزینه، تولید آلودگی ثانویه و سمی است (۸). با توجه به پیشرفت دانش بشری در دهه‌های اخیر در زمینه تصفیه پساب، روش‌های کارآمدتر با راندمان بالاتر تحت عنوان تصفیه پیشرفته جهت تصفیه پساب مورد استفاده قرار گرفته است. روش الکتروشیمیایی جزئی از این روش‌ها است که به علت عدم مصرف محلول‌های سمی و متعاقباً با تولید اندک محصولات جانبی خطرناک برای تصفیه فاضلاب حاوی آلودگی‌های آلی و معدنی توجهات زیادی را به خود معطوف داشته است. کاربرد روش‌های الکتروشیمیایی، بدلیل مزایای متعددی از قبیل سهولت کنترل و راهبری آسان، سرعت بالا، نیاز به زمان ماند کوتاه جهت حذف آلاینده‌ها، نیاز به فضای کم، کارکرد خوب در دمای اتاق و بازدهی بالا، رو به افزایش است (۸). مشکل مطرح شده در رابطه با این روش‌ها، خوردگی الکترودها و مصرف زیاد انرژی برق است که با انجام مطالعات بیشتر در این زمینه می‌توان این مشکلات را به حداقل ممکن کاهش داد (۱۰). مکانیسم حذف ترکیبات آلی در یک سلول الکتروشیمیایی در سه مرحله کلی انجام می‌گیرد. مرحله اول تولید یون فلز حاصل از اکسایش در آند است. مرحله دوم ترکیب هیدروکسیدهای حاصل از تجزیه آب در قطب کاتد، با یون‌های فلزی و متعاقباً تشکیل لخته‌های هیدروکسید فلز و مرحله سوم جذب سطحی مواد آلی بر روی لخته‌های هیدروکسید فلز و ته نشینی این رسوبات می‌باشد (۱۱). در طی واکنش‌هایی رخ داده در آند و کاتد مقداری رادیکال هیدروکسل نیز در خلال فرایند الکتروشیمیایی تولید می‌شود که این رادیکال اکسنده قوی بوده و به اکسیداسیون بخشی از ترکیبات آلی و تبدیل آنها به ترکیبات معدنی و ساده‌تر کمک

۰/۴۵ میکرونی به وسیله پمپ خلاء فیلتر شدند. غلظت فنل و آهن کل در تمامی نمونه‌های فیلترشده براساس دستور العمل کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب بترتیب با بهره‌گیری از روش ۴-آمینو آنتی پیرین و روش فئاترولین با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری (DR5000-HACH LANGE Co.) در طول موج بترتیب ۵۰۰ و ۵۱۰ نانومتر قرائت شد (۱۳). رابطه زیر جهت تخمین راندمان حذف مورد استفاده قرار گرفت:

$$X (\%) = (C_0 - C/C_0) \times 100$$

در این فرمول  $C_0$  غلظت اولیه فنل و  $C$  غلظت فنل در زمان  $t$  است. جریان برق بوسیله یک منبع تغذیه ترانسفورماتور (مبدل جریان متناوب به جریان مستقیم) تأمین شد. pH نمونه‌ها از طریق pH متر (مدل 1500-Cyberscan Co.) اندازه‌گیری شد و برای تنظیم pH از اسید سولفوریک ۱۰٪ و هیدروکسید سدیم ۱۰٪ نرمال استفاده گردید. تمامی مواد شامل معرف‌های فئاترولین، آمونیوم استات، اسید کلریدریک غلیظ، هیدروکسید آمین، فنل و دیگر مواد از شرکت مرک آلمان خریداری شدند.



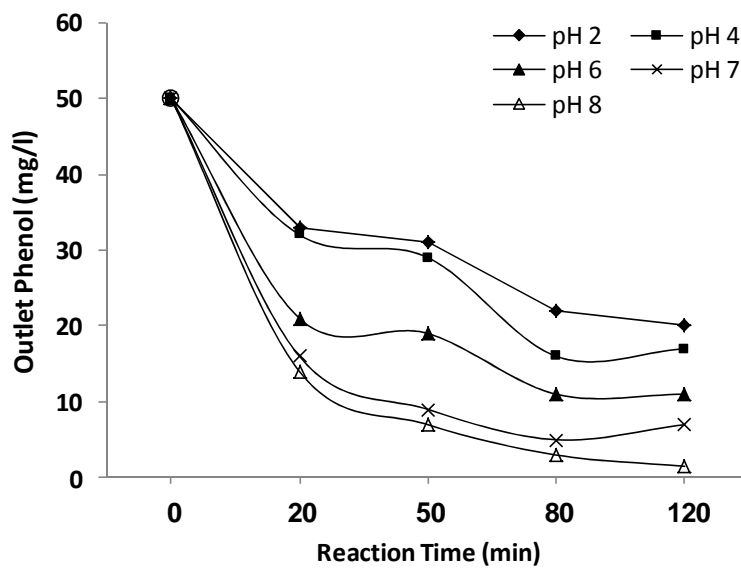
شکل ۱. شماتیک سلول الکتروشیمیایی

سانتیمترمربع مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر راندمان حذف مربوط به تغییرات pH در شکل ۲ ثبت گردیده است. pH قلیایی دارای بالاترین راندمان و در حدود ۹۷٪ بود.

غلظت‌های اولیه بهینه فنل در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ mg/l انجام گردید. تمامی آزمایش‌ها در زمان واکنش ۲۰ تا ۱۲۰ دقیقه و غلظت ثابت الکترولیت سدیم کلراید ۲/۵ گرم در لیتر انجام گرفت. با توجه به نتایج مطالعات اخیر در این زمینه فاصله، ۱ سانتیمتر به عنوان فاصله مناسب مابین دو الکتروود برای تمامی آزمایش‌ها انتخاب گردید. بعد از هر مرحله از آزمایش‌ها الکتروودها با اسید کلریدریک ۱۰ درصد و آب مقطر شستشو داده و تمیز شدند. همچنین فاصله الکتروودها از کف سلول، ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای اتاق ( $25^{\circ}\text{C}$ ) با یک تنظیم کننده دما انجام گردید. غلظت‌های مورد نظر فنل از طریق رقیق سازی میزان میزان مشخصی از محلول استوک فنل تهیه گردید. حجم محلول مورد آزمایش ۱/۵ لیتر بود. اختلاط محلول جهت جلوگیری از ته نشینی رسوبات تولیدی، در همه مراحل، از طریق همزن مگنتیک با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه انجام گرفت. پس از گذشت مدت زمان لازم برای اتمام هر بار آزمایش با استفاده از پیت مدرج اقدام به نمونه برداری کرده و نمونه‌ها جهت جداسازی جامدات تشکیل شده در طی آزمایش با استفاده از صافی غشایی

## یافته‌ها

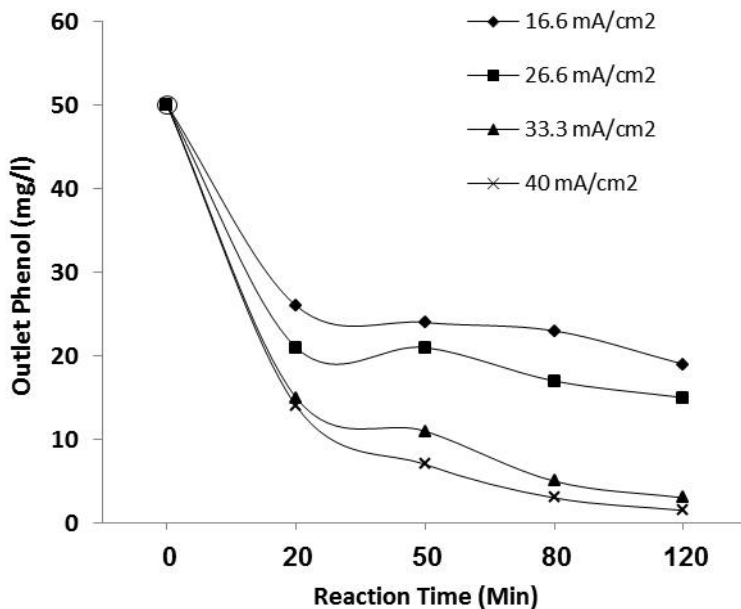
اثر pH در حذف فنل در pH اولیه ۲ تا ۸ با غلظت ثابت ۵۰ میلی گرم فنل بر لیتر، الکترولیت ۲/۵ گرم بر لیتر و دانسیته جریان ۴۰ میلی آمپر بر



شکل ۲. اثر pH اولیه بر عملکرد فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فنل در غلظت فنل ورودی ۵۰ mg/l، در دانسیته جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع و الکترولیت ورودی ۲/۵g/l

راندمان مربوط به دانسیته جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع که در حدود ۹۷٪ و پایینترین مربوط به دانسیته ۰/۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع که در حدود ۴۸٪ می باشد.

شکل ۳ اثر دانسیته جریان را در pH اولیه بهینه ۸، غلظت فنل ۵۰ میلی گرم بر لیتر، میزان الکترولیت ۲/۵ گرم بر لیتر در دانسیته جریان ۱۶/۶ تا ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع نشان می دهد. بالاترین



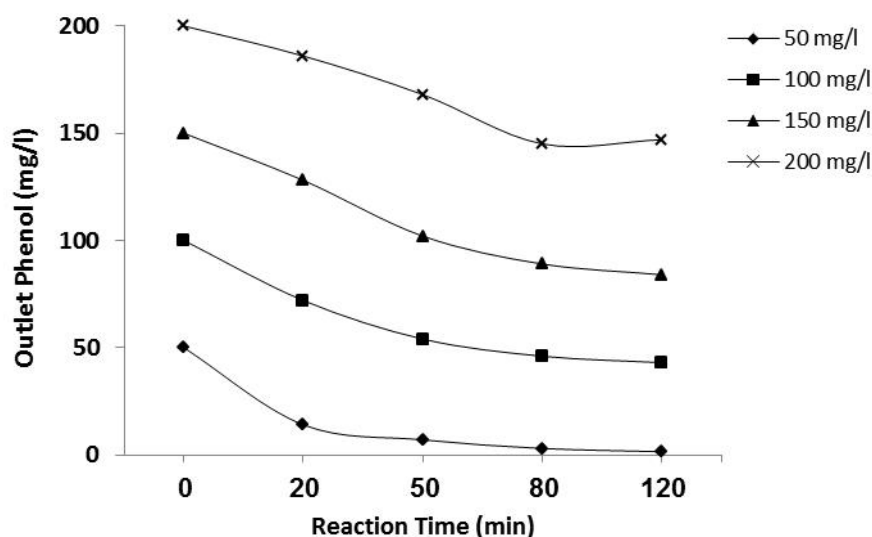
شکل ۳. اثر دانسیته جریان بر عملکرد فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فنل در غلظت فنل ورودی ۵۰ mg/l، pH اولیه ۸ و الکترولیت ورودی ۲/۵g/l

در pH اولیه بهینه ۸، میزان الکترولیت ۲/۵ گرم بر لیتر در دانسیته جریان بهینه ۴۰ میلی آمپر بر

شکل ۴ نیز اثر غلظت ورودی فنل را در میزان حذف آن در غلظت ورودی ۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر

میزان آهن خروجی در pH قلبی، دانسیته جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع و غلظت ورودی فنل ۵۰ میلیگرم بر لیتر در حدود ۲ میلیگرم بر لیتر مشاهده گردید.

سانتیمتر مربع نشان می‌دهد. بالاترین راندمان مربوط به پایینترین غلظت ورودی و پایینترین راندمان حذف مربوط به بالاترین غلظت ورودی فنل بوده که بترتیب ۹۷٪ و ۲۶/۵٪ ثبت گردید. مقادیر آهن کل در نمونه‌های پساب خروجی از فرآیند در جدول ۱ نشان داده شده است. پایینترین



شکل ۳. اثر غلظت ورودی فنل بر عملکرد فرآیند الکتروشیمیایی در حذف فنل در دانسیته جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع، pH اولیه ۸ و الکترولیت ورودی ۲/۵g/l

جدول ۱. میانگین غلظت آهن کل در پساب خروجی در زمان‌های ماند مختلف و شرایط فرآیندی مختلف

شرایط آزمایش	آهن کل خروجی (mg/l)				زمان واکنش (دقیقه)
	۲۰	۵۰	۸۰	۱۲۰	
pH	۲	۱۵	۱۲	۱۶	۲۱
	۴	۱۷	۲۱	۲۱	۲۴
	۶	۱۲	۱۵	۱۷	۲۲
	۷	۴	۷	۹	۸
	۸	۲	۳	۷	۷
جریان (mA/cm <sup>2</sup> )	۱۶/۶	۳۲	۳۴	۳۱	۳۶
	۲۶/۶	۱۸	۲۱	۲۰	۲۴
	۳۳/۳	۹	۱۱	۱۴	۱۵
	۴۰	۲	۳	۷	۷
غلظت فنل ورودی (mg/l)	۵۰	۲	۳	۷	۷
	۱۰۰	۵	۷	۵	۹
	۱۵۰	۲	۴	۵	۶
	۲۰۰	۶	۵	۶	۹

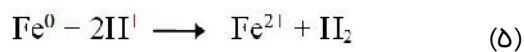
## بحث

### اثر pH

بالاترین میزان حذف فنل در مطالعه حاضر در حدود ۹۷٪ ثبت گردید. همانطور که در شکل ۲ مشهود است در pH ۲، درصد حذف فنل کمتر است که ظاهراً علت حذف کمتر فنل در این pH افزایش تولید یون‌های  $H^+$  و همچنین وجود اسید سولفوریک است. چون خود فنل نیز خاصیت اسیدیته دارد. علت اسیدی بودن ترکیبات فنلی این است که با جدا شدن  $H^+$  از اکسیژن فنل، بار منفی روی اکسیژن قرار گرفته و با حلق بنزن رزونانس می‌کند. رزونانس باعث پایداری بار منفی شده و باعث آزاد شدن  $H^+$  می‌شود (۱۴). در pH در طول فرآیند الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد. افزایش pH بطور کلی بدلیل تولید OH در الکتروکاتد و حضور هیدروکسیدهای فلزی تشکیل شده در آنند که بطور کامل ترسیب نیافته اند رخ می‌دهد (۸). همچنین افزایش در مقدار pH نهایی حاصل شده می‌تواند نتیجه متصاعد شدن گاز هیدروژن در کاتد باشد (واکنش ۵). مقادیر افزایش pH در مطالعه حاضر در تمامی آزمایش‌هایی که در شرایط ثابتی از غلظت ورودی فنل، شدت جریان و میزان الکترولیت به منظور تعیین pH بهینه انجام گردیدند، مقادیر مختلفی را نشان دادند. در آزمایش‌های مربوط به pH اولیه ۲، میزان افزایش pH بطور کلی حداکثر تا حدود ۵/۸ افزایش یافت. افزایش pH در شرایط اسیدی به مراتب کمتر از شرایط قلیایی اتفاق می‌افتد. به این علت رسوبات قهوه‌ای رنگ هیدروکسید آهن ( $Fe(OH)_3$ ) در شرایط قلیایی نسبت به شرایط اسیدی بیشتر قابل مشاهده بود. حداکثر افزایش pH در pH اولیه ۴، ۶ و ۷ در آزمایش‌هایی که در این pH به انجام رسیدند بترتیب تا حدود ۲/۵، ۹/۳ و ۱۰/۴ بود. در pH اولیه ۸ بیشترین میزان رسوب مشاهده شد و پایین‌ترین غلظت فنل در پساب خروجی نیز در این مرحله در حدود ۱/۵ mg/l در زمان واکنش ۱۲۰ دقیقه بود. در

این مرحله، افزایش pH تا حدود ۱۱ امکانپذیر شد. در محیط قلیایی pH نهایی از تغییرات چندانی در طی زمان‌های ماند سپری شده، برخوردار نبود و تنها یک افت ناچیز در مقدار آن مشاهده شد. بنابراین حذف فنل در pH قلیایی بیشتر از pH اسیدی اتفاق افتاد. مطالعات انجام یافته در گذشته این یافته را تأیید می‌کند. عبدالوهاب و همکاران در مطالعه‌ای که بمنظور حذف فنل از فاضلاب پالایشگاه نفت از فرآیند الکتروشیمیایی استفاده کردند، نشان دادند که در pH ۷ حذف قابل توجه فنل بعد از ۲ ساعت نسبت به pH‌های پایین‌تر می‌تواند رخ دهد (۱۵).

آهن محلول در تمامی آزمایش‌ها در پساب خروجی ظاهر شد. این امر بدلیل اکسیداسیون آهن فلزی به آهن دو ظرفیتی طی فرآیند الکتروشیمیایی، طبق واکنش ۱ است. آهن دو ظرفیتی در مقادیر pH بالاتر (حدود ۶) تبدیل به آهن سه ظرفیتی شده و بصورت هیدروکسید آهن ( $Fe(OH)_3$ ) از پساب خروجی جدا شده و رسوب می‌کند (۸). اثر pH بر آهن خروجی از سیستم را این چنین می‌توان توضیح داد که در آزمایش‌هایی که با pH ۲ انجام شده اند غلظت آهن محلول در پساب عدد بالایی را نشان داد. علت آن تشکیل نامناسب رسوبات  $Fe(OH)_3$  در pH اولیه و نهایی پایین در این مرحله از آزمایش‌ها بود. در pH کمتر از ۷/۵ آهن طبق واکنش زیر به  $Fe^{2+}$  اکسید می‌شود (۱۶):



### اثر شدت جریان الکتریکی

اثر شدت جریان الکتریکی در حذف فنل در جریان ۱۶/۶ تا ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمترمربع، در غلظت ثابت ۵۰ میلی گرم بر لیتر فنل ورودی، الکترولیت ۲/۵ گرم بر لیتر و pH ثابت ۸ بررسی گردید. مطابق با شکل ۳ جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمترمربع از راندمان حذف فنل بالاتری برخوردار بود و با اعمال میزان جریان پایینتر میزان حذف کاهش یافته است. این روند افزایش راندمان با

بر روی تولید حباب‌های هیدروژن و اندازه و رشد لخته‌های تولیدی نیز تأثیر گذار بود. با افزایش شدت جریان حباب‌ها افزایش می‌یافت که احتمالاً نشان‌دهنده هیدرولیز سریع‌تر و بیشتر آب در کاتد بوده است، که این امر به نوبه خود می‌تواند نشانه تولید بیشتر هیدروکسیل نیز باشد. همانطور که پیش‌تر بیان شد، در شدت جریان‌های بالا فرض بر این است که بدلیل تولید یون‌ها و رادیکال‌های هیدروکسیل مقدار تجزیه فنل توسط رادیکال هیدروکسیل و همچنین تولید آهن اکسید شده در حضور یون هیدروکسیل افزایش یافته که باعث تولید مقادیر بیشتر رسوبات و لخته‌های هیدروکسیدی جهت جذب فنل و ترکیبات حاصل از تجزیه آن می‌شود.

#### اثر غلظت ورودی

اثر غلظت ورودی فنل در غلظت‌های ورودی ۵۰ تا ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر در غلظت الکترولیت ورودی ثابت ۲/۵ گرم بر لیتر، جریان ثابت ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع و pH ثابت ۸ مطالعه شد. شکل ۴ بطور واضح نشان می‌دهد که در غلظت‌های ورودی پایینتر، راندمان حذف فنل در مقدار ماکزیمم خود قرار دارد. نتایج حاصل در مطالعه حاضر با مطالعاتی که توسط محققین دیگر انجام گرفته مطابقت دارد (۱۷،۹). لازم به ذکر است که اگرچه مقادیر راندمان حذف در مطالعات مختلف به دلیل شرایط متفاوت آزمایش با هم تفاوت دارد ولی علیرغم این تفاوت در راندمان، تغییرات راندمان حذف از روند مشابهی در اغلب این مطالعات برخوردار است. مطالعه حاضر و همچنین مطالعه یاووز نشان داد که برای غلظت‌های بالاتر شدت جریان‌های بالا و زمان واکنش طولانی‌تر نیاز است (۹). افزایش میزان آهن کل (که بیشتر معرف  $Fe^{2+}$  می‌باشد) موجود در پساب با افزایش غلظت فنل ورودی نسبت به غلظت‌های ورودی پایین و شرایط ثابت آزمایش برای الکتروکود آهن، ممکن است به علت افزایش کمتر pH در حضور

افزایش جریان الکتریکی در مطالعات دیگر نیز مشاهده می‌شود (۹). در مطالعه ای که توسط کانیزارس<sup>۱</sup> و همکاران انجام گرفت، از فولاد ضدزنگ به عنوان الکتروکود برای فرآیند الکتروشیمیایی استفاده شد و اثر اکسیداسیون الکتریکی و الکتروفلوکولاسیون حاصل از این فرآیند جهت حذف فنل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کربن اولیه، دما و همچنین با اعمال دانسیته جریان بالاتر، میزان الکتروفلوکولاسیون افزایش می‌یابد (۶).

اوغورلو<sup>۲</sup> و همکاران به منظور حذف لیگنین و فنل از پساب صنایع کاغذسازی با استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی با کاربرد الکتروده‌های آهن و آلومینیوم بالاترین میزان حذف را در شدت جریان بالا گزارش نمودند (۱۷). در مطالعه ای که یاووز<sup>۳</sup> و همکاران به منظور حذف فنل از فاضلاب سنتتیک و فاضلاب واقعی صنایع پالایش نفت با استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی همراه با الکتروکود رتونیوم به نتایج حذف بالاتری در دانسیته جریان بالاتر دست یافتند (۹). با توجه به نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر و اغلب مطالعات دیگر، مشاهده گردید که با افزایش شدت جریان، زمان مورد نیاز جهت تصفیه نیز کاهش می‌یابد. در شرایط آزمایش ثابت (غلظت فنل ورودی، pH و میزان الکترولیت) جهت تعیین شدت جریان بهینه، غلظت فنل در پساب در شدت جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع عدد پایینتری نسبت به شدت جریان پایین‌تر از آن نشان داد. این نتیجه نشان داد که احتمالاً در شدت جریان پایین بدلیل هیدرولیز و اکسایش کمتر آب بترتیب در کاتد و آند، متعاقباً عدم پیشرفت بهتر واکنش ۴ در زمینه تولید پراکسید هیدروژن و آزادسازی کمتر یون‌های آهن و رادیکال هیدروکسیل در آند، بنابراین میزان فنل نیز کمتر قابل حذف بود. تغییرات شدت جریان

<sup>1</sup> Canizares

<sup>2</sup> Ugurlu

<sup>3</sup> Yavuz



اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر مشاهده شد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت فرایند جذب و تجزیه الکتريکال فنل در شرایط ذکر شده در بالا به میزان قابل قبولی قابل انجام است و در عین حال با در نظر گرفتن تمهیدات لازم و مناسب برای کاهش هزینه بالای مصرف برق در این گونه فرایندها، می‌تواند بعنوان روش مناسب در پاکسازی پساب‌های حاوی فنل در مقیاس کامل کاربرد داشته باشد.

### تشکر و قدردانی

این پژوهش در آزمایشگاه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی اردبیل انجام گرفته است و نویسندگان مقاله از حمایت این دانشگاه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مقادیر بالای فنل، بعلت خاصیت اسیدی فنل و متعاقباً کاهش تشکیل  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  باشد. ولی در عین حال نتایج آهن خروجی حاصل از غلظت‌های ورودی مختلف مغایرت چندانی نداشته و تقریباً مشابه هم هستند.

### نتیجه گیری

نتایج مورد قبول در این مطالعه با افزایش pH و تشکیل بیشتر رسوبات هیدروکسیدی مشاهده شد. افزایش شدت جریان احتمالاً باعث افزایش سرعت و میزان تولید رادیکال‌های هیدروکسیل شده و متعاقباً موجب تجزیه فنل و کاهش غلظت آن در دانسیته بالای جریان شده است. همچنین دانسیته جریان باعث آزادسازی بیشتر یون آهن و تشکیل بیشتر رسوبات هیدروکسید می‌شود. نتیجه قابل قبول در غلظت

### References

- 1- Díaz E, Mohedano AF, Calvo, L, Gilarranz MA, Casas JA, Rodriguez JJ. Hydrogenation of phenol in aqueous phase with palladium on activated carbon catalysts. *Chemical Engineering Journal*. 2007;131 (1):65-71.
- 2- Kennedy L.J, Judith J, Kayalvizhi K, Sekaran G. Adsorption of phenol from aqueous solutions using mesoporous carbon prepared by two-stage process. *Chemical Engineering Journal*. 2007; 132 (1):279-287.
- 3- Huang Xingguo, Wang Xingguo, Jin Qingzhe, Liu Yuanfa, Wang Ying. Removal of phenol from aqueous solution by adsorption onto OTMAC-modified attapulgite. *Journal of environmental management*. 2007; 84 (2): 229-236
- 4- Tepe O, Dursun A.Y. Combined effects of external mass transfer and biodegradation rates on removal of phenol by immobilized *Ralstonia eutropha* in a packed bed reactor. *Journal of hazardous materials*. 2008; 151 (1):9-16.
- 5- Annadurai G, Juang R.S, Lee D.J. Microbiological degradation of phenol using mixed liquors of *Pseudomonas putida* and activated sludge. *Waste Management*. 2002; 22 (7):703-710.
- 6- Canizares P, Martinez F, Garcia-Gomez J, Saez C, Rodrigo MA. Combined electrooxidation and assisted electrochemical coagulation of aqueous phenol wastes. *Journal of applied electrochemistry*. 2002; 32 (11):1241-1246.
- 7- Mohan D, Singh K.P, Single-and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse-an agricultural waste. *Water research*. 2002; 36 (9):2304-2318.
- Ugurlu, M Gürses A, Do ar Ç, Yalçın M. Removal of phenolic and lignin compounds from bleached kraft mill effluent by fly ash and sepiolite. *Adsorption*. 2005; 11 (1): 87-97.
- 8- Yavuz Y, Koparal A.S, Electrochemical oxidation of phenol in a parallel plate reactor using ruthenium mixed metal oxide electrode. *Journal of hazardous materials*. 2006; 136 (2):296-302.
- 9- Barakat, M. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. 2011; 4(4):361-377.
- 10- Abdelwahab O, Amin N, El-Ashtoukhy E.Z. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 163 (2):711-716.
- 11- Padilla-Robles B.G, Alonso A, Martínez-Delgadillo S.A, González-Brambila M, Jaúregui-Haza U.J, Ramírez-Muñoz J. Electrochemical degradation of amoxicillin in aqueous media. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014.

- 12- Association, APH. Standard methods for the examination of water and wastewater. Vol. 2. 1915: American Public Health Association.
- 13- Basha, K.M, Rajendran A, Thangavelu V. Recent advances in the biodegradation of phenol: a review. *Asian J Exp Biol Sci.* 2010; 1 (2):219-234.
- 14- Abdelwahab O, Amin NK, El-Ashtoukhy ESZ. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater. *J. Hazard. Mater.* 2009; 163:711–716.
- 15- Golder A.K, Chanda A, Samanta A.N, Ray S. Removal of hexavalent chromium by electrochemical reduction–precipitation: investigation of process performance and reaction stoichiometry. *Separation and Purification Technology.* 2011;(3)76:345-350.
- 16- U urlu, M, Gürses A, Do ar Ç, Yalçın M. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of environmental management.* 2008: 87(3):420-428.