مجله دانشگاه علوم پزشکی جیرفت

سال ۱ (۱)، خرداد ۱۳۹۳، صفحه ۴۸-۳۷

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد حذف ٤-کلروفنل از آب‌های آلـوده توسط سلول الکتروشیمیایی تک‌قطبی

ابوالفضل حسن‌بیکی[1]، ام‌البنین حسن‌بیکی[2*]

[1]دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران

[2]کارشناسی‌ارشد مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، کاشان، ایران

چکیده

مقدمه: ۴-کلروفنل از ترکیبات فنلی کلردار است که همانند دیگر ترکیبات فنلی برای موجودات زنده سمی بوده و می‌تواند به صورت بیولوژیکی در بدن آن‌ها تجمع پیدا کند. تاکنون از روش‌های متنوعی به منظور حذف این گروه از آلاینده‌ها از آب و فاضلاب استفاده شده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی عملکرد یک سیستم الکتروشیمیایی در حذف ۴-کلروفنل از آب‌های آلوده می‌باشد.

روش کار: این مطالعه از نوع تجربی بوده که در آن از یک سلول الکتروشیمیایی تک‌قطبی به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر مجهز به آند استیل و کاتد گرافیت استفاده گردید. اثر پارامترهای pH، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت اولیه ۴-کلروفنل، غلظت نمک‌های NaCl و Na_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی و اثر مدت زمان فرآیند الکترولیز مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که راندمان حذف ۴-کلروفنل با pH، دانسیته جریان، غلظت حمایت‌کننده الکترولیتی و زمان رابطه مستقیم و با غلظت اولیه ۴-کلروفنل رابطه عکس دارد. بهترین کارآیی حذف ۴-کلروفنل، در شرایط pH=۱۱، دانسیته جریان ۲۰ mA/cm^2، غلظت ۲۰ mM نمک NaCl و ۳/۵ mM نمک Na_2SO_4 بدست آمد و راندمان به میزان بیش از ۹۹ درصد رسید.

نتیجه‌گیری: فن‌آوری الکتروشیمیایی، قادر به حذف ۴-کلروفنل از آب‌های آلوده با کارآیی بسیار بالا می‌باشد ومی توان از این روش جهت حذف ۴-کلروفنل از محلول‌های آبی محتوی مقدار مناسب نمک‌های محلول استفاده کرد. هم‌چنین امکان دستیابی به راندمان حذف ۴-کلروفنل بیش از ۹۹ درصد در این روش وجود دارد.

کلید واژه‌ها : فن‌آوری الکتروشیمیایی، ۴-کلروفنل، رادیکال‌های آزاد

اطلاعات مقاله

دریافت : ۱۳۹۳/۰۲/۱۰

پذیرش : ۱۳۹۳/۰۴/۱۲

***مولف مسئول**

ایـران، کاشـان، کیلـومتر ۵ بلـوار قطـب راونـدی، دانشـگاه علـوم پزشکی کاشان، دانشکده بهداشت

تلفن: ۰۳۶۱۴۴۶۰۰۱۶

۰۹۱۳۲۷۷۷۲۷۵

نمابر: ۰۳۶۱۵۵۵۰۱۱۱

پست الکترونیک:

hasanbeiki@yahoo.com

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

Vol. 1, No. 1, June 2014, P.37-48

Journal of Jiroft University of Medical Sciences

Original Article

Evaluation The Performance of 4-Chlorophenol Removal from Contaminated Waters Using a Monopolar Electrochemical Cell

Abolfazl Hasanbeiki[1], Omolbanin Hasanbeiki[2*]

[1]MSc Student of Environmental Health Engineering, Faculty of Medicine, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2]MSc of Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, Iran

Abstract

Introduction: 4-chlorophenol is one of the chlorinated phenolic compounds that are like to other phenolic compounds is toxic to organisms and can accumulate in their bodies biologically. So far, a variety of methods are used in order to remove these contaminants from water and wastewater. The aim of this study was to evaluate the performance of an electrochemical system to the removal of 4-chlorophenol from contaminated waters.

Methods: This is an experimental study where a 500 ml electrochemical cell was used that consist of stainless steel as anode and graphite as cathode. The effect of some factors included pH, current density, initial concentrations of 4-chlorophenol, the concentration of salts NaCl and Na_2SO_4 as supporting electrolyte and the effect of the duration of the electrolysis process were examined.

Results: There were direct relationship between 4-chlorophenol removal efficiency and pH, current density, and supporting electrolyte concentration. With the raising of 4-chlorophenol initial concentration, the removal efficiency was decreased. The best performance of 4-chlorophenol removal efficiency (over 99%) was gained at pH 11, current density of 10 mA/cm^2, and NaCl and Na_2SO_4 concentrations of 20 and 3.5 mM, respectively.

Conclusion: Electrochemical technology is able to remove the 4-chlorophenol with high efficiency from contaminated waters. It is possible to use this technics to remove the content of 4-chlorophenol when there are the right amounts of soluble salts as supporting electrolyte. In this way, there is the possibility of achieving more than 99% efficiency of removal of the 4-chlorophenol.

Keywords: Electrochemical Techniques, 4-Chlorophenol, Free Radicals

Article Info
Received: Apr. 30, 2014
Accepted: Jun. 03, 2014

***Corresponding Author:**
Iran, Kashan, Ghotb Ravandi Blvd, Kashan University of Medical Sciences, Faculty of Health

Tel: +983614460016
+989132777275

Fax: +983615550111

Email:
hasanbeiki@yahoo.com

Vancouver referencing:
Hasanbeiki A, Hasanbeiki O. Evaluation The Performance of 4-Chlorophenol Removal from Contaminated Waters Using a Monopolar Electrochemical Cell. *Journal of Jiroft University of Medical Sciences* 2014; 1(1): 37-48.

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

مقدمه

حذف آلاینده‌های آلی خطرناک از منابع آب و فاضلاب یکی از حیاتی‌ترین و ضروری‌ترین موضوعات در پژوهش‌های زیست محیطی می‌باشد. در میان آلاینده‌های موجود در محیط، فنل‌ها و ترکیبات فنلی به عنوان آلاینده‌های خطرناک شناخته شده‌اند (۱). زائدات فنلی به دلیل مقاومت در برابر تجزیه توسط میکروارگانیسم‌های فعال در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب، به شیوه‌های معمول قابل تصفیه نیستند. بنابراین، حذف آلاینده‌های فنلی از نظر زیست‌محیطی اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کنند (۲).

بسیاری از صنایع مانند پالایشگاه‌های نفت، تولید پلاستیک، کاغذ، مواد شیمیایی، آفت‌کش‌ها و تبدیل ذغال‌سنگ از منابع واردکننده ترکیبات فنلی به محیط زیست می‌باشند. کلروفنل‌ها در مقادیر بسیار زیادی به عنوان محافظ چوب کاربرد دارند (۳). ۴-کلروفنل در صنعت به منظور تولید عوامل ضدعفونی کننده و گندزدا به کار برده می‌شود (۱). برخی کلروفنل‌ها به عنوان سرطان‌زا (مانند ۲-کلروفنل) و بعضی دیگر به عنوان مختل کننده‌های غدد درون‌ریز شناخته می‌شوند. برای مثال، پنتاکلروفنل و ۲و۴-دی‌کلروفنل دو نمونه از ۲۰ ماده مختل‌کننده غدد درون‌ریز شناسایی شده می‌باشند که بوسیله سازمان‌های حفاظت از محیط زیست فهرست‌بندی شده‌اند (۴). علاوه بر این ۲و۴-دی‌کلروفنل توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا در لیست مهم‌ترین آلاینده‌های ایالات متحده آورده شده است (۵). سازمان جهانی بهداشت غلظت مجاز کلروفنل‌ها در آب آشامیدنی را یک میکروگرم بر لیتر اعلام کرده است (۶).

ترکیبات فنلی و به ویژه ۴-کلروفنل (C_6H_5ClO) به دلیل داشتن سمیت برای موجودات زنده و نیز قابلیت تجمع بیولوژیکی در حیوانات و انسان توجه زیادی به خود جلب کرده‌اند (۱). مطالعات نشان داده‌اند که ترکیبات فنلی کلردار موجود در پساب‌های صنعتی در برابر تصفیه بیولوژیکی بسیار مقاوم می‌باشند. به همین دلیل از روش‌هایی مانند جذب سطحی و جذب الکتریکی بر روی الکترودهای با سطح ویژه بالا، اکسیداسیون شیمیایی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و تخریب الکتروشیمیایی به منظور تجزیه این آلاینده‌ها استفاده می‌شود (۷). خوشبختانه تجزیه الکتروشیمیایی این ترکیبات نتایج امیدبخشی نشان داده است. فرآیندهای الکتروشیمیایی دارای مزایایی مانند سازگاری با محیط زیست، ایمنی بالا، تجهیزات ساده، گزینش‌پذیری واکنش‌ها، امکان دست‌یابی به راندمان‌های بالای انرژی مصرفی، امکان بهره‌برداری خودکار و توانایی بسیار بالا در حذف آلاینده‌های مختلف می‌باشند (۸). به هر حال، حذف و معدنی‌سازی کامل و نیز کاهش سمیت ترکیبات فنلی با چالش‌هایی مانند سمیت و تولید محصولات فرعی مقاوم و خطرناک رو به رو می‌باشد(۷).

در فرآیندهای حذف الکتروشیمیایی آلاینده‌ها از پتانسیل اکسیداسیون– احیای بالا در آند و پتانسیل کم‌تری در کاتد جهت اکسیداسیون یا احیای آلاینده‌ها استفاده می‌شود. مکانیسم تجزیه الکتروشیمیایی مواد آلی در آند به وسیله کومنیلیس پیشنهاد شده است (۹) که آب به کمک کاتالیز آندی، الکترولیز شده و رادیکال‌های هیدروکسیل جذب‌سطحی‌شده ($^{\bullet}OH$) تولید می‌شود.

$$H_2O + MO_X \rightarrow MO_X\,[OH] + H^+ + e^-$$

رادیکال‌های هیدروکسیل جذب‌سطحی‌شده توانایی تولید اکسیژن فعال را دارا می‌باشند که این اکسیژن به صورت شیمیایی جذب سطوح می‌شود.

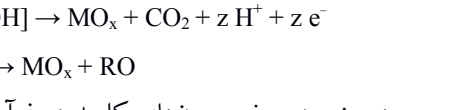
$$MO_x[OH] \rightarrow MO_x + H^+ + e^-$$

سپس رادیکال‌های هیدروکسیل با یکدیگر واکنش داده و اکسیژن مولکولی تولید می‌کنند تا الکترولیز آب را کامل کنند.

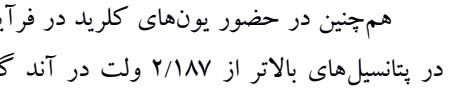
$$MO_x[OH] \rightarrow M + O + H^+ + e^-$$

مواد آلی موجود در فاضلاب به وسیله رادیکال‌های هیدروکسیل اکسید می‌شوند.

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]



$$R + MO_x[OH] \rightarrow MO_x + CO_2 + z\,H^+ + z\,e^-$$



$$MO_x^+ + R \rightarrow MO_x + RO$$

هم‌چنین در حضور یون‌های کلرید در فرآیند الکترولیز، در پتانسیل‌های بالاتر از ۲/۱۸۷ ولت در آند گاز کلر تولید می‌شود. در ادامه تشکیل گاز کلر، اسید هیپوکلریت طی واکنش‌های الکترولیز تولید می‌شود (۸). اسید هیپوکلریت اکساینده‌ای قوی می‌باشد که توانایی اکسید کردن ترکیبات حلقوی موجود در محلول را داراست. این توانایی با افزایش تولید یون OCl^- کاهش پیدا می‌کند، بنابراین اکسیداسیون مستقیم ۴-کلروفنل در آند و اکسیداسیون غیرمستقیم آن بوسیله اکساینده‌هایی مانند HOCl انجام می‌گیرد (۱۰).

از آن‌جا که اکسیداسیون فاضلاب در ابتدا به حضور رادیکال‌های هیدروکسیل تولیدی در سطح الکترودها بستگی دارد، فرآیندهای الکتروشیمیایی حذف آلاینده‌های فاضلاب تحت عنوان اکسیداسیون الکتروشیمیایی پیشرفته[1] شناخته می‌شوند (۱۱). علاوه بر واکنش‌های اکسایشی که می‌توانند باعث حذف ۴-کلروفنل از فاضلاب شوند، حذف ۴-کلروفنل به وسیله واکنش‌های احیاء در کاتد نیز امکان‌پذیر می‌باشد. مطالعات نشان داده‌اند که پنتاکلروفنل به صورت تدریجی در یک کاتد الیافی کربنی کلرزدایی می‌شود. هم‌چنین جنس الکترودها در احیای کاتدی ۴-کلروفنل نقشی اساسی دارد. سه مکانیسم احتمالی برای احیای ۴-کلروفنل به فنل ارایه شده است: ۱- احیای مستقیم در کاتد، ۲- هیدروژناسیون (احیاء به وسیله گاز هیدروژن) در سطح کاتالیزور و ۳- جذب سطحی ۴-کلروفنل در سطح کاتد با هیدروژناسیون در سطح یک الکترود یا کاتالیزور (۹). مطالعات اخیر نشان داده اند که تولید گاز هیدروژن در کاتد جهت انجام واکنش کلرزدایی مستقیم اهمیت زیادی دارد و کاتدهای ساخته شده از موادی که قادر به جذب سطحی هیدروژن می‌باشند راندمان بیش‌تری نشان می‌دهند (۱۱). انتخاب حمایت کننده الکترولیتی نباید تنها با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی انجام پذیرد، بلکه توانایی آن جهت شرکت در فرآیندهای اکسیداسیون و احیاء الکتروشیمیایی از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۲). غلظت‌های بالای حمایت‌کننده‌های الکترولیتی به معنی هزینه اضافی جهت تصفیه و دفع فاضلاب مورد تصفیه و هم‌چنین افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری می‌باشد (۱۳). به دلیل هدایت الکتریکی بالای الکترود گرافیت، در صورت کاربرد این جنس الکترود، به غلظت بالای حمایت‌کننده الکترولیتی در سیستم نیاز نمی‌باشد (۱۴). لازم به ذکر است گرافیت تمایل بالایی نسبت به جذب ترکیبات حلقوی دارد و سینتیک جذب سطحی آن ۴۰ برابر بیش‌تر از کربن فعال می‌باشد (۱۵). تمرکز این مطالعه بر روی حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل می‌باشد. هدف از انجام این مطالعه بررسی کارآیی حذف ۴-کلروفنل و معدنی‌سازی آن به روش الکتروشیمیایی از محلول‌های آبی بوده است . میزان حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل تحت تاثیر پارامترهای pH، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت اولیه ۴-کلروفنل و غلظت حمایت‌کننده الکترولیتی مورد بررسی قرار گرفت.

روش کار

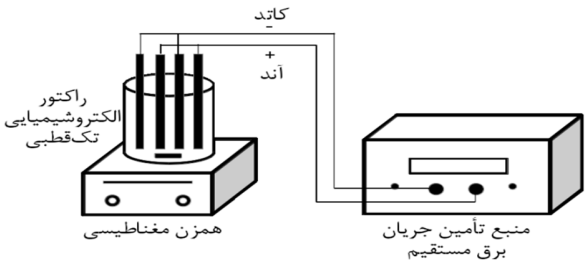
مطالعه حاضر از نوع تجربی بوده که به منظور بررسی کارایی سیستم الکتروشیمیایی در حذف ۴-کلروفنل انجام گرفت. تعیین نوع و دامنه تغییرات پارامترها با توجه به مطالعات مشابه انجام گردید (۵، ۷، ۱۰ و ۱۴). جهت تعیین شرایط بهینه حذف ۴-کلروفنل در سیستم الکتروشیمیایی از محلول دست‌ساز با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل استفاده گردید. طرح آزمایش به این شکل بود که در هر مرحله تمامی پارامترها ثابت نگه‌داشته شده و با تغییر یک پارامتر، مقدار بهینه آن بدست آمد. اثر پارامترهای pH، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت اولیه ۴-کلروفنل، غلظت NaCl و Na_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده‌های الکترولیتی و زمان واکنش بر میزان حذف ۴-کلروفنل بررسی گردید که به این منظور مقادیر غلظت ۴-کلروفنل، COD، pH، کلرور و

[1]. AEOPs

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

زمان مورد سنجش قرار گرفت. از pHهای ۲، ۵، ۷، ۹ و ۱۱، دانسیته جریان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل استفاده شد. اندازه گیری ۴-کلروفنل بر طبق روش D-5530 ذکر شده در کتاب روش‌های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب و به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر UV-visible در طول موج ۵۰۰ نانومتر انجام گرفت. در تمامی مراحل به منظور جلوگیری از بروز خطا از شاهد استفاده شد. مقدار COD نیز به روش اسپکتروفتومتری ذکر شده در کتاب روش‌های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب سنجش گردید. هم‌چنین غلظت کلرور تجمع یافته در سیستم به روش آرژانتومتری ذکر شده مورد سنجش قرار گرفت (۱۶).

در این مطالعه از ظرف استوانه‌ای شکل به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر از جنس شیشه، کاتد گرافیتی و آند استیل هر کدام به ابعاد ۱۰×۵ سانتی‌متر و منبع برق جریان مستقیم با حداکثر ولتاژ ۳۵ ولت و حداکثر جریان ۳ آمپر استفاده گردید. آند و کاتد به صورت موازی و عمودی به فاصله ۱ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. برای تهیه محلول حاوی ۴-کلروفنل، پس از توزین مقدار معینی از پودر ۴-کلروفنل و وارد نمودن آن به آب دو بار تقطیر یون‌زدایی‌شده، محلول به مدت ۲ ساعت در تاریکی در ظرف دربسته تکان داده شد. سپس pH آن بوسیله اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم تنظیم شده و پس از وارد نمودن مقادیر مشخصی از نمک‌های NaCl و Na_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی، محلول به راکتور وارد گردید. آزمایشات به صورت یک فرآیند بسته و در دمای محیط راهبری شد. پس از نمونه‌برداری جهت از بین بردن اثر رادیکال‌های آزاد بر ۴-کلروفنل، از تیوسولفات سدیم استفاده گردید. محلول داخل راکتور به طور پیوسته به وسیله همزن مغناطیسی با چرخش ۲۰۰ دور در دقیقه حرکت داده شد. شکل ۱ نمایی از سیستم الکتروشیمیایی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شمایی از سیستم الکتروشیمیایی مورد استفاده در این مطالعه

دستگاه‌های مورد استفاده در سنجش شامل اسپکتروفتومتر Cecil Aquarius CE 7200 ساخت انگلستان، pHسنج دیجیتال Metrohm 691 ساخت کشور کانادا، راکتور COD مدل Hach DRb200 ساخت کشور آلمان می‌باشد. تمامی آزمایش‌ها با سه مرتبه تکرار انجام گرفت. با توجه به مقادیر متغیرهای انتخابی و تکرار آزمایش‌ها، تعداد کل نمونه‌ها ۲۵۰ عدد بود. نتایج ارایه شده میانگین مقادیر به دست آمده در آزمایش‌ها می‌باشد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار مایکروسافت اکسل انجام پذیرفت.

یافته‌ها

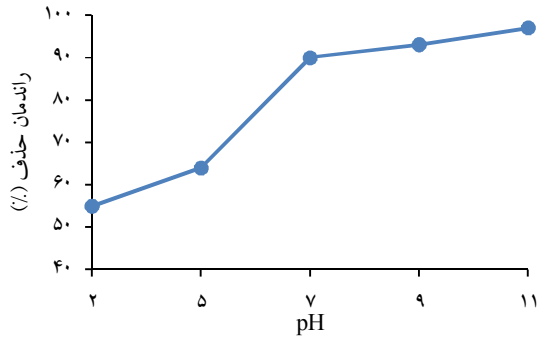
آزمایش‌های مقدماتی در مورد بررسی میزان جذب‌سطحی ۴-کلروفنل بر روی الکترود گرافیت نشان داد که ایزوترم جذب سطحی با غلظت فاز مایع نسبت خطی دارد، به این صورت که در حدود ۸ درصد جرم ۴-کلروفنل قبل از انجام آزمایش جذب سطحی گرافیت می‌شود.

اثر pH اولیه بر راندمان حذف ٤-کلروفنل

اثر pH اولیه محلول بر کارایی حذف ۴-کلروفنل با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط دانسیته جریان ۱۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و غلظت‌های ۵ و ۳/۵ میلی‌مولار NaCl و Na_2SO_4 مورد بررسی قرار گرفت. در نمودار ۱ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش pH، راندمان کلی حذف ۴-کلروفنل افزایش می‌یابد. روند تغییرات حذف ۴-کلروفنل در شرایط اسیدی، خنثی و قلیایی به یکدیگر شباهت دارد، به

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

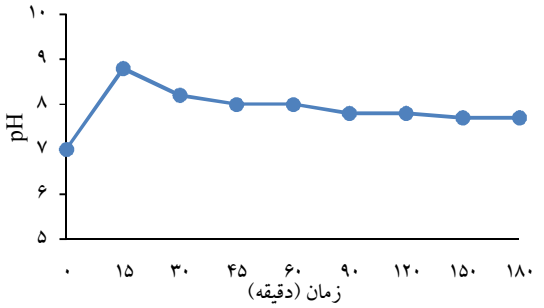
این صورت که همواره افزایش pH باعث بهبود کارآیی حذف می‌گردد.



نمودار ۱: اثر pH اولیه محلول بر راندمان حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل

بعد از مدت زمان ۱۸۰ دقیقه، میزان حذف ۴-کلروفنل در pHهای ۲، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ به ترتیب برابر ۵۵، ۶۴، ۹۰، ۹۳ و ۹۷ درصد می‌باشد. با توجه به کارآیی سیستم در حذف ۴-کلروفنل در pH ابتدایی ۷، این pH مورد بررسی بیش‌تر قرار گرفت. نمودار ۲ تغییرات pH در طی فرآیند الکترولیز را با pH اولیه ۷ در شرایط مشابه قبل نشان می‌دهد.

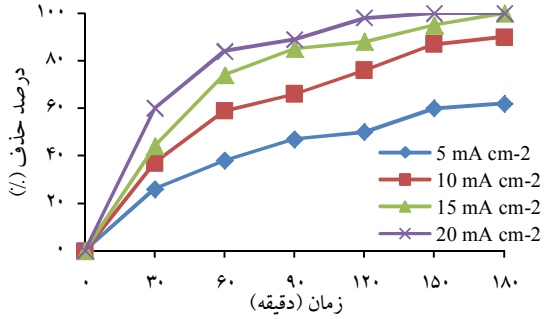
حداکثر میزان pH در ۱۵ دقیقه ابتدایی واکنش بدست می‌آید که برابر ۸/۸ است و در ادامه به سرعت کاهش می‌یابد. سپس pH به میزان کمی کاهش داشته و در زمان‌های پایانی فرآیند تقریباً ثابت می‌ماند (نمودار ۲).



نمودار ۲: تغییرات pH محلول در حین فرآیند حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه و دانسیته جریان ۱۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع

اثر دانسیته جریان الکتریکی بر راندمان حذف ٤-کلروفنل

به منظور بررسی اثر دانسیته جریان بر راندمان حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل، دانسیته جریان‌های ۵ تا ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به کار گرفته شد. شرایط بررسی اثر دانسیته جریان شامل pH=۷، غلظت اولیه ۴-کلروفنل ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت‌های NaCl و Na_2SO_4، به ترتیب ۵ و ۳/۵ میلی‌مولار بود. نمودار ۳ نشان می‌دهد که درصد حذف ۴-کلروفنل در طول زمان و هم‌چنین سرعت حذف همراه با افزایش دانسیته جریان مصرفی افزایش پیدا می‌کند. راندمان حذف ۴-کلروفنل در دانسیته جریان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب ۶۲، ۹۰، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد می باشد. در تمامی موارد، سرعت حذف ۴-کلروفنل در طول ۶۰ دقیقه اول بسیار سریع‌تر است.



نمودار ۳: اثر دانسیته جریان الکتریکی بر راندمان حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل بر اساس زمان

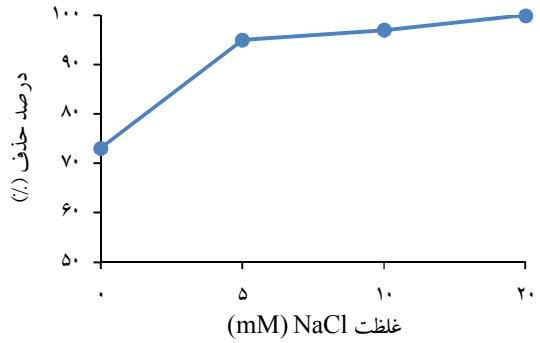
بعد از گذشت مدت زمان ۱۸۰ دقیقه از آغاز فرآیند، راندمان کلی حذف ۴-کلروفنل برای دانسیته جریان‌های ۵ و ۱۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به ترتیب ۶۲ و ۹۰ درصد می‌باشد، در حالی‌که تجزیه کامل (حذف ۱۰۰ درصدی) ۴-کلروفنل در دانسیته جریان‌های ۱۵ و ۲۰ به‌دست می‌آید. غلظت ۴-کلروفنل با تمامی دانسیته جریان‌های مصرفی متناسب است و واکنش اکسیداسیون دارای سینتیک درجه اول می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که راندمان حذف COD با افزایش دانسیته جریان مصرفی افزایش قابل‌توجهی دارد. در دانسیته جریان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به ترتیب راندمان‌های ۱۸، ۴۲، ۵۹ و ۶۵ درصد حذف COD

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

بدست آمد. از آن جا که با افزایش دانسیته جریان از ۱۵ به ۲۰، کارایی حذف رشد زیادی نداشته و دانسیته جریان‌های بالاتر منجر به افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های بهره‌برداری می‌شوند، در این مرحله از آزمایش‌ها، دانسیته جریان ۱۵ mA/cm^2 به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.

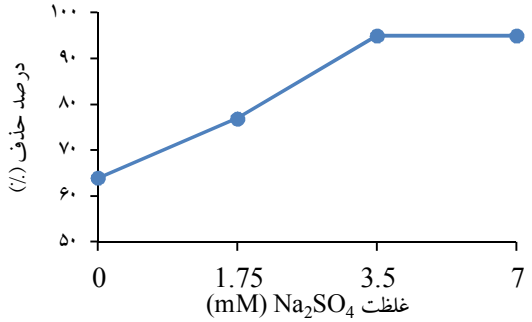
اثر غلظت حمایت‌کننده الکترولیتی بر راندمان حذف ٤-کلروفنل

در این مرحله اثر حضور نمک‌های NaCl و Na_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی در شرایط pH=۷، دانسیته جریان ۱۵ mA/cm^2 و غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار به نمک NaCl در حضور غلظت ۳/۵ میلی‌مولار Na_2SO_4 جهت بررسی تاثیر غلظت نمک NaCl و هم‌چنین مقادیر ۰، ۱/۷۵، ۳/۵ و ۷ میلی‌مولار نمک Na_2SO_4 در حضور غلظت ۵ میلی‌مولار NaCl جهت بررسی تاثیر غلظت Na_2SO_4 استفاده گردید. همان‌طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود در صورت عدم حضور نمک NaCl راندمان حذف ۴-کلروفنل تغییرات دارد. با افزایش غلظت NaCl از ۵ به ۲۰ میلی‌مولار راندمان حذف از ۷۳ به ۹۵ درصد افزایش می‌یابد.



نمودار ٤: اثر غلظت NaCl بر راندمان حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل

هم‌چنین در صورت عدم حضور Na_2SO_4 راندمان حذف ، کاهش نشان می‌دهد که در نمودار ۵ قابل مشاهده است. با افزایش غلظت Na_2SO_4 از ۱/۷۵ به ۳/۵ میلی‌مولار، میزان حذف ۴-کلروفنل به میزان ۲۶ درصد افزایش می‌یابد، اما با افزایش غلظت Na_2SO_4 از ۳/۵ به ۷ تغییری در راندمان حذف مشاهده نمی‌شود.

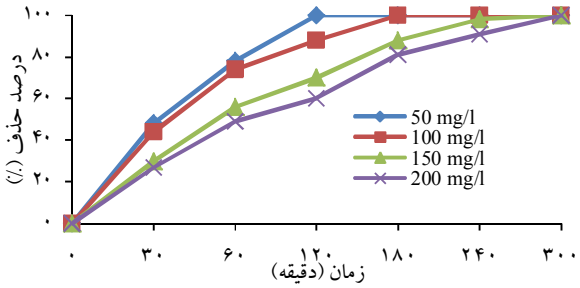


نمودار ٥: اثر غلظت Na_2SO_4 بر راندمان حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل

با توجه به نتایج بدست آمده، بالاترین راندمان حذف ۴-کلروفنل در غلظت‌های ۲۰ و ۳/۵ میلی‌مولار نمک‌های NaCl و Na_2SO_4 می‌باشد و در نتیجه این غلظت‌ها به عنوان مقادیر بهینه انتخاب گردید.

اثر غلظت اولیه بر راندمان حذف ٤-کلروفنل

به منظور بررسی کارایی سیستم در حذف غلظت‌های بالای ۴-کلروفنل، آزمایشات تجزیه الکتروشیمیایی در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل در مقادیر بهینه pH، حمایت‌کننده‌های الکترولیتی و دانسیته جریان به‌دست آمده در مراحل قبل، راهبری گردید. در نمودار ۶ می‌توان مشاهده کرد که حذف کامل غلظت‌های بالاتر ۴-کلروفنل در صورتی امکان‌پذیر است که مدت زمان واکنش به اندازه کافی افزایش یابد.



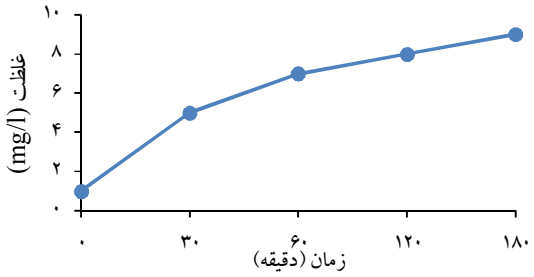
نمودار ٦: اثر غلظت اولیه ۴-کلروفنل بر راندمان حذف آن در دانسیته جریان ۱۵ mA/cm^2 بر اساس زمان

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

زمان مورد نیاز برای حذف کامل ۴-کلروفنل با غلظت این آلاینده متناسب بود. حذف کامل ۴-کلروفنل در غلظت-های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب بعد از گذشت مدت زمان ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۰۰ دقیقه امکان‌پذیر بود.

در این مرحله راندمان حذف COD نیز مورد بررسی قرار گرفت. میزان حذف COD با افزایش زمان واکنش افزایش و با افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفنل، کاهش داشت. در تمامی آزمایش‌ها، سرعت حذف COD در ۶۰ دقیقه اول بالاتر از زمان‌های پس از دقیقه ۶۰ بود. راندمان حذف COD در زمانی که غلظت ۴-کلروفنل به صفر رسید، برای غلظت‌های اولیه ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل به ترتیب ۷۴، ۵۹، ۴۳ و ۳۷ درصد بود.

اگرچه غلظت ۴-کلروفنل در حین انجام واکنش‌های اکسیداسیون کاهش می‌یابد، به منظور بررسی کلرزدایی ۴-کلروفنل به اندازه‌گیری غلظت کلرید نیاز می‌باشد. موازنه جرمی کلرید با مقایسه غلظت تئوریکی کلرید تولیدی با فرض این که کلرزدایی هر مول از ۴-کلروفنل باعث تولید یک مول کلرید می‌شود انجام گرفت. غلظت اندازه‌گیری‌شده کلرید پس از ۱۲ ساعت از شروع فرآیند جهت ارزیابی موازنه جرم به کار گرفته شد. نتایج بررسی میزان کلرید تجمع یافته در سیستم در شرایط بهینه بدست آمده در مراحل قبل و در غلظت اولیه ۴-کلروفنل برابر ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و در عدم حضور نمک NaCl در نمودار ۷ آورده شده است.

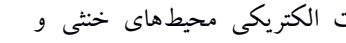


نمودار ۷: تغییرات غلظت یون کلرید در طی فرآیند حذف الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل در طی زمان واکنش ۱۸۰ دقیقه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان و تجزیه ۴-کلروفنل، غلظت یون کلرید در محلول افزایش یافته، اما با توجه به موازنه جرم انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت ۴-کلروفنل به طور کامل کلرزدایی نشده و بخشی از آن به محصولات میانی کلردار تبدیل می‌شود.

بحث

به طور کلی، بهترین کارآیی حذف ۴-کلروفنل در مطالعه حاضر در شرایط pH=۱۱، دانسیته جریان ۲۰ mA/cm^2، غلظت ۲۰ mM نمک NaCl و ۳/۵ mM نمک Na_2SO_4 بدست آمد و برای غلظت اولیه ۴-کلورفنل ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در مدت زمان واکنش ۱۸۰ دقیقه به بیش از ۹۹ درصد رسید. هم‌چنین راندمان حذف COD با افزایش pH اولیه محلول، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت حمایت‌کننده الکترولیتی و مدت زمان واکنش افزایش یافت و با افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفنل کاهش نشان داد. همان‌طور که مشاهده شد با افزایش pH اولیه محلول، کارآیی حذف ۴-کلروفنل افزایش داشت که با نتایج مطالعه لیو و همکاران (۲۰۱۱) بر روی حذف الکتروشیمیایی کلروفنل مطابقت دارد (۱۸). نشان داده شده است که با افزایش pH به پتانسیل الکتریکی کم‌تری برای دستیابی به حداکثر حذف ۴-کلروفنل نیاز است. در محیط قلیایی، هدایت الکتریکی به میزان قابل ملاحظه‌ای بالاتر از هدایت الکتریکی محیط‌های خنثی و اسیدی است (۸). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اکسیداسیون ۴-کلروفنل در شرایط قلیایی بهتر انجام می‌گیرد (۱۷). این امر می‌تواند در نتیجه موازنه تفکیک یونی ۴-کلروفنل به شرح ذیل باشد (۱۸):



$$C_6H_4ClOH \leftrightarrow C_6H_4ClO^- + H^+$$

در pHهای بالاتر، ۴-کلروفنل بیش‌تری به شکل آنیونی تولید می‌شود که با سهولت بیش‌تری به سطح الکترودها جذب خواهد شد و این پدیده اکسیداسیون ۴-کلروفنل را افزایش خواهد داد. رفتار مشابهی در رابطه با بیس‌فنل توسط کورامیتز

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است (۱۹). در مراحل ابتدایی اکسیداسیون، ۴-کلروفنل به رادیکال‌های فنوکسی تبدیل می‌شود که در ادامه به شکل پلیمری در می‌آیند. این پلیمرها پتانسیل اکسیداسیون کم‌تری نسبت به ۴-کلروفنل اولیه دارند و می‌توانند به آسانی به شکل رادیکالی تبدیل شوند. این پلیمرهای رادیکالی با یکدیگر و یا با ۴-کلروفنل واکنش داده و به صورت لایه‌ای محکم به سطح الکترود می‌چسبند و باعث کاهش توانایی الکترود در حذف آلاینده می‌شوند. خوشبختانه سطح الکترود می‌تواند در همان الکترولیت به وسیله یک قطبی‌سازی آندی در محدوده تجزیه آب به شرایط فعال ابتدایی خود برگردد. در شرایط قلیایی نسبت به شرایط اسیدی و خنثی، غیرفعال‌شدن الکترودها با سرعت پایین‌تری رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به دلیل غیرفعال‌سازی سریع‌تر سطح الکترودها در شرایط خنثی و اسیدی باعث اکسیداسیون کم‌تر ۴-کلروفنل در این شرایط می‌شود (۱۴,۱۰).

هم‌چنین در طی فرآیند الکترولیز با گذشت زمان، pH محلول نیز سیر صعودی دارد. افزایش pH محلول در ابتدای فرآیند در اطراف کاتد می‌تواند به دلیل تولید یون‌های هیدروکسید باشد. کاهش pH در ادامه نیز می‌تواند به دلیل مصرف تدریجی آنیون‌های هیدروکسیل و هم‌چنین تولید کاتیون‌های هیدروژن در واکنش‌های تجزیه‌ای HOCl و OCl^-در کنار دیگر واکنش‌های HOCl در محلول مورد تصفیه باشد (۱۲,۸). از آن‌جا که HOCl به سرعت به وسیله اکسیداسیون ۴-کلروفنل در غلظت‌های بالاتر ۴-کلروفنل مصرف می‌شود، pH در زمان‌های طولانی‌تر در مقادیر بین ۷/۵ تا ۸/۵ باقی می‌ماند. علاوه بر این، تولید اسیدهای آلی مختلف می‌تواند باعث افت pH شود (۱۰). زمانی که ۴-کلروفنل به طور کامل از محلول حذف می‌شود pH به طور تقریبی به ۷/۷ می‌رسد.

نتایج نشان داد که با تغییر pH اولیه محلول، کارآیی کلی حذف COD نیز تغییر می‌یابد. در مطالعه ارسلان و همکاران (۲۰۰۵) بر روی بررسی تاثیر pH و غلظت اولیه در اکسیداسیون الکتروشیمیایی فنل نیز مشاهده گردید که pH اولیه محلول اثر زیادی بر راندمان حذف COD فاضلاب حاوی فنل‌ها می‌گذارد (۱۷). توانایی اکسیداسیون توسط رادیکال هیدروکسیل در pHهای اسیدی بیش‌تر از pHهای قلیایی می‌باشد. در شرایط اسیدی، رادیکال‌های آزاد قابلیت تشکیل شدن و اکسید کردن مواد آلی را به سهولت بدست می‌آورند (۱۷,۱۱). در صورتی که pH بافری نشده باشد، در طول مدت واکنش pH افزایش یافته و به ۸/۸ می‌رسد که این پدیده می‌تواند به دلیل تولید گاز هیدروژن باشد (۸).

به طور کلی، فرض بر این است که در طی فرآیندهای رخ داده در سلول الکتروشیمیایی، ابتدا رادیکال‌های کلروفنل تشکیل می‌شوند و به تدریج پروتون‌زدایی انجام می‌گیرد. در صورت ادامه واکنش‌های اکسیداسیون کلروفنل، محصولات تولیدی شامل ۱و۴ بنزوکوئینون، هیدروکوئینون و مشتقات کاتیکول خواهد بود. علاوه بر این، مطالعات، تولید ۱و۲-بنزوکوئینون را نشان داده است. این ترکیبات حلقوی مورد هجوم واکنش‌های شکننده حلقه قرار می‌گیرند و اسیدهای کربوکسیلیک مختلفی مانند مالئیک، فوماریک، سیکلیک، گلیوکسیلیک، سوسینیک، فوماریک، اگزالیک، مالونیک و استیک تولید می‌گردند که در نهایت به دی‌کسید کربن، اکسید می‌شوند (۱۰).

واکنش‌های رقابتی بین الکترودها مانند تولید اکسیژن در دانسیته جریان‌های بالاتر منجر به مصرف بار الکتریکی بیش-تری می‌شود (۸). دلیل تفاوت اندک میزان دانسیته جریان ۱۰ و ۲۰ بر نرخ تجزیه ۴-کلروفنل می‌تواند محدودیت انتقال جرم بین محلول و الکترودها باشد.

مقایسه نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش دانسیته جریان با افزایش عملکرد اکسیداسیون همراه است که با نتایج

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

مطالعه چن و همکاران (۲۰۱۰) بر روی اکسیداسیون الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل مطابقت دارد (۱۴). در حقیقت، در دانسیته جریان‌های بالای mA/cm^2 ۱۰، پس از گذشت ۱۸۰ دقیقه ۴-کلروفنل به کلی حذف می‌شود. تجزیه کلی محصولات فرعی نیز با افزایش دانسیته جریان افزایش می‌یابد، هرچند این مقادیر هنوز در مدت زمان واکنش مورد استفاده کم به نظر می‌رسد. سنجش COD نشان داد که ۶۵-۱۸ درصد کربن آلی پس از مدت ۱۸۰ دقیقه معدنی‌سازی شده است.

همان‌طور که در نمودارهای ۴ و ۵ مشاهده شد، راندمان حذف ۴-کلروفنل در غلظت‌های مختلف NaCl و Na_2SO_4 تغییر می‌کند. غلظت ۴-کلروفنل به طور کلی در طول زمان واکنش با کاهش روبرو می‌شود و با افزایش غلظت NaCl راندمان حذف ۴-کلروفنل افزایش می‌یابد. هم‌چنین تاثیر استفاده از غلظت‌های بالایNa_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی در تجزیه الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل ،کم‌تر از نمک NaCl می‌باشد که با نتایج مطالعه لی و همکاران (۲۰۰۹) بر روی تجزیه الکتروشیمیایی فنل مطابقت دارد (۷). این نتایج پیشنهاد می‌کند NaCl با اکسید شدن به HOCl می‌تواند تجزیه ۴-کلروفنل را افزایش دهد. در غلظت ۵ میلی‌مولار NaCl به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی، تجزیه ۴-کلروفنل در چند دقیقه ابتدایی مشاهده نمی‌شود. اگرچه این پدیده در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار NaCl مشاهده نمی‌شود. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که میزان کافی HOCl در غلظت‌های کم‌تر NaCl در ابتدا تولید نمی‌شود. هم‌چنین پتانسیل الکتریکی سیستم در حین الکترولیز افزایش می‌یابد، اگرچه مقدار آن قابل توجه نیست. علت این امر می تواند تولید HOCl ناشی از تجزیه NaCl باشد که در طول زمان منجر به کاهش هدایت الکتریکی محلول می‌شود (۸). نمودار ۶ تغییرات COD در حین الکترولیز ۴-کلروفنل را با استفاده از حمایت‌کننده الکترولیتی NaCl نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ۴-کلروفنل به طور کامل تجزیه شده و احتمالاً در پایان الکترولیز به گاز دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شود (۱۴).

بر طبق قانون الکترولیز فارادی مقدار اکسیژن کاهش یافته با میزان جریان الکتریکی عبوری از محلول متناسب می‌باشد. به همان مقداری که جریان الکتریکی از محلول عبور می‌کند تولید عوامل اکساینده رخ می‌دهد، بنابراین راندمان حذف افزایش پیدا می‌کند (۸). با افزایش محتوای نمک محلول میزان انرژی مصرفی به مقدار چشمگیری کاهش پیدا می‌کند، بنابراین این فرآیند برای محلول‌های نمکی مناسب‌تر است (۱۲).

با افزایش غلظت ۴-کلروفنل از میزان جریان الکتریکی عبوری کاسته می‌شود. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفنل، غیرفعال‌سازی سطح الکترودها سرعت بیش‌تری می‌گیرد (۱۷). چن و همکاران (۲۰۱۰) نیز در بررسی اکسیداسیون الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل نتایج مشابهی بدست آوردند (۱۴). نتایج نشان می‌دهد فرآیندهای الکترودی ۴-کلروفنل در غلظت‌های پائین به وسیله انتشار و در غلظت‌های بالاتر به وسیله جذب سطحی کنترل می‌شود. در نتیجه، در غلظت‌های بالاتر ۴-کلروفنل، غیرفعال‌سازی سطح الکترودها نمود بیش‌تری دارد.

اعتقاد بر این است که تخریب ترکیبات فنلی با غلظت این ترکیبات در محلول نسبت درجه اول دارند (۱۷). بنابراین با افزایش غلظت این ترکیبات به زمان بیش‌تری جهت حذف کامل آن‌ها از محلول نیاز است. از طرف دیگر، کاهش غلظت ترکیبات فنلی در شرایط واکنشی برابر، منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود و به زمان کم‌تری برای حذف کامل آن نیاز است. هم‌چنین از دیگر دلایل کاهش راندمان حذف ۴-کلروفنل با افزایش غلظت اولیه آن می‌توان به اثر حضور محصولات میانی اشاره کرد. در غلظت‌های بالاتر ۴-کلروفنل رقابت بین ۴-کلروفنل و محصولات میانی برای جذب به مناطق فعال سطح الکترودها افزایش می‌یابد. هم‌چنین ممکن

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

است این ترکیبات میانی در آب نامحلول باشند و با رسوب کردن بر سطح الکترودها باعث غیرفعال‌سازی الکترودها شوند (۱۰).

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با تجزیه ۴-کلروفنل در ابتدا ۴-کلروکاتیکول تشکیل می‌شود و بنابراین هیچ مقدار از کلرید در این واکنش تولید نمی‌شود. ۴-کلروکاتیکول تولیدی در نهایت به انواع مختلفی از اسیدهای آلی تبدیل می‌شود (۱۴). با توجه به نتایج بدست آمده در بررسی میزان تغییرات یون کلرید، می‌توان نتیجه گرفت که کلرزدایی اولین مرحله از تجزیه الکتروشیمیایی ۴-کلروفنل نمی‌باشد و کلرزدایی، مرحله محدودکننده تجزیه ۴-کلروفنل نیست.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که کارآیی حذف ۴-کلروفنل با افزایش pH، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت حمایت‌کننده الکترولیتی و مدت زمان واکنش افزایش، و با افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفنل راندمان حذف ،کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که راندمان حذف بسیار بالای ۴-کلروفنل از محیط‌های آبی محتوی الکترولیت‌های کافی، با استفاده از فن‌آوری الکتروشیمیایی قابل دستیابی است.

References

1. Czaplicka M. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment. Science of The Total Environment. 2004;322(1):21–39.
2. Ma W, Cheng Z, Gao Z, Wang R, Wang B, Sun Q. Study of hydrogen gas production coupled with phenol electrochemical oxidation degradation at different stages. Chemical Engineering Journal. 2014;241:167–174.
3. Busca G, Berardinelli S, Resini C, Arrighi L. Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. Journal of Hazardous Materials. 2008;160(2):265–288.
4. Hallenbeck WH. Quantitative Risk Assessment for Environmental and Occupational Health. 2en ed. Chicago: CRC Press; 1993: 198-201.
5. Abdelwahab O, Amin NK, El-Ashtoukhy E-SZ. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater. Journal of Hazardous Materials. 2009;163(2):711–716.
6. Warrington P. Ambient water quality guidelines for chlorophenols. First update. Victoria, BC, Ministry of Environment, Lands and Parks. 1996:45-50.
7. Li M, Feng C, Hu W, Zhang Z, Sugiura N. Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO2–Pt and Ti/IrO2–Pt. Journal of Hazardous Materials. 2009;162(1):455–62.
8. Rajeshwar K, Ibanez JG. Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Sensors and Abatement. Academic Press; 1997;365-470.
9. Comninellis C, Chen G. Electrochemistry for the environment. New York; London: Springer; 2010;152-185.
10. Coteiro RD, Andrade ARD. Electrochemical oxidation of 4-chlorophenol and its by-products using Ti/Ru0.3M0.7O2 (M = Ti or Sn) anodes: preparation route versus degradation efficiency. Journal of Appllied Electrochememistry. 2007;37(6):691–698.
11. Wu D, Liu M, Dong D, Zhou X. Effects of some factors during electrochemical degradation of phenol by hydroxyl radicals. Microchemical Journal. 2007;85(2):250–256.
12. Yildiz Y, Koparal A, Keskinler B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. Chemical Engineering Journal. 2008;138(1):63–72.
13. Jimenez Izquiedro C, Canizares P, Rodrigo M, Leclerc J, Valentin G, Lapicque F. Effect of the nature of the supporting electrolyte on the treatment of soluble oils by electrocoagulation. Desalination. 2010;255(1):15–20.
14. Chen JL, Chiou GC, Wu CC. Electrochemical oxidation of 4-chlorophenol with granular graphite electrodes. Desalination. 2010;264(1):92–96.
15. Hussain S, Roberts E, Asghar H, Campen A, Brown A. Oxidation of phenol and the adsorption of breakdown products using a graphite adsorbent with electrochemical regeneration. Electrochimica Acta. 2013;92:20–30.
16. Federation WE, Association APH. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA. 2005: Section 5530.

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]

17. Arslan G, Yazici B, Erbil M. The effect of pH, temperature and concentration on electrooxidation of phenol. Journal of Hazardous Materials. 2005;124(1):37–43.
18. Liu F, He G, Zhao M, Qu M, Huang L. Electrochemical Behaviors of Chlorophenol Aqueous Solutions at Boron-Doped Diamond Electrode. The Open Materials Science Journal. 2011;511(35):35–39.
19. Kuramitz H, Matsushita M, Tanaka S. Electrochemical removal of bisphenol A based on the anodic polymerization using a column type carbon fiber electrode. Water Research. 2004;38(9):2330–2337.

[Downloaded from journal.jmu.ac.ir on 2026-02-20]