

مقایسه روشهای اکسیداسیون پیشرفته در تجزیه فنل در مقیاس آزمایشگاهی

رضا شکوهی^۱ لیلا ابراهیمزاده^۲ علیرضا رحمانی^۳
سیدجمال‌الدین ابراهیمی^۴ محمدرضا سمرقندی^۵

(دریافت ۸۷/۶/۲۳ پذیرش ۸۸/۷/۵)

چکیده

فنل یا هیدروکسی بنزن یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک سمی است. این ماده از طریق دفع فاضلاب تعدادی از صنایع باعث آلودگی محیط‌زیست و به‌خصوص منابع آبی می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، مقایسه راندمان تجزیه فنل با استفاده از روش‌های اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن و پرتوتابی اشعه فرا بنفش بود. محفظه واکنش در این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی و با ظرفیت ۳ لیتر به‌کار گرفته شد. در این تحقیق از یک لامپ UV ۱۲۵ وات استفاده شد. ازن مصرفی قبل از ورود به راکتور تولید و از طریق ازن‌ساز مدل COG-OM با مقدار تولید ۱ گرم ازن بر ساعت به راکتور منتقل می‌شد. به‌منظور بررسی تأثیر pH بر تجزیه فنل، آزمایش‌هایی در pHهای ۵، ۷، ۹ و ۱۱ انجام و نمونه‌های جمع‌آوری شده با دستگاه اسپکتروفتومتر مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که فنل با روش ازن دهی در pH برابر ۱۱ و با استفاده از اشعه UV در pH معادل ۵ قابل تجزیه می‌باشد. درصد تجزیه فنل با استفاده از لامپ ۱۲۵ وات UV پس از یک ساعت زمان تماس، ۳۲/۴ بود در حالی که طی همین مدت زمان و با استفاده از روش ازن‌دهی به ۹۳/۶ درصد رسید. می‌توان انتظار داشت فرایند اکسیداسیون پیشرفته با مزایایی از قبیل جنبه‌های بهداشتی و زیست محیطی مطلوب و بازده بسیار بالا، چشم‌انداز مطلوبی در حذف فنل و سایر آلاینده‌های مشابه از آب و فاضلاب به‌دست آورد.

واژه‌های کلیدی: اکسیداسیون پیشرفته، پرتوفا بنفش، فنل، ازن‌دهی.

Comparison of the Advanced Oxidation Processes in Phenol Degradation in Laboratory Scale

Reza Shokoohi¹ Leila Ebrahimzadeh² Ali Reza Rahmani³
Seyyed Jamaledin Ebrahimi⁴ Mohammad Reza Samarghandi⁵

(Received Sep. 14, 2008 Accepted Sep. 27, 2009)

Abstract

Phenol, or Benzene hydroxyl, is a toxic aromatic hydrocarbon which finds its way into the environment and water resources as a serious environmental hazard in the effluent from a number of industrial processes. The objective of this investigation was to compare the efficiency of advanced oxidation methods with that of O₃ and UV radiation in Phenol degradation. For this purpose, a reaction chamber with a capacity of 3 liters (laboratory scale) was used. A photolytic cell system with a 125W UV lamp was designed and manufactured. The ozone used in the reaction was produced at a rate of 1g/h in a COG-OM ozonizer before entering the reactor. A set of experiments was carried out at pH levels of 5, 7, 9, and 11 to investigate the effect of pH on phenol degradation rate. Samples were then collected for analysis by a spectrophotometer. Our findings show that phenol is degradable at a basic pH of 11 with ozone application and at an acidic pH of 5 with UV radiation. Using a 125 WUV- light source, phenol degradation after one hour was 32.4% while it reached 93.6% after the same period when using ozone. Due to their desirable health and environmental impacts as well as their high efficiency, advanced oxidation processes are expected to be a promising technology for the removal of phenol and other similar pollutants from water and wastewater.

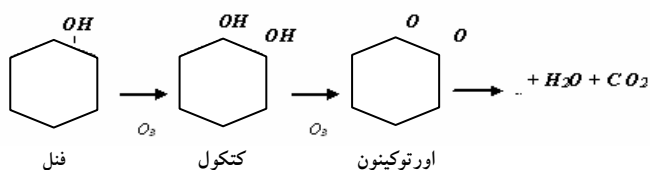
Keywords: Advanced Oxidation, UV Radiation, Phenol, Ozonation.

1. Assist. Prof., Dept. of Environmental Health Eng., Hamadan University of Medical Sciences
2. M.Sc. of Environmental Health, Kurdistan University of Medical Sciences (Corresponding Author) (+98 871) 3244989 leila.e980@gmail.com
3. Assoc. Prof., Dept. of Environmental Health Eng., Hamadan University of Medical Sciences
4. M.Sc. of Environmental Health Eng., Kurdistan University of Medical Science
5. Assist. Prof. of Environmental Health Eng., Hamadan University of Medical Sciences

- ۱- استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کردستان (نویسنده مسئول) ۳۳۴۴۹۸۹ (۸۷۱) leila.e980@gmail.com
- ۳- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان
- ۴- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کردستان
- ۵- استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان

هستند [۵]. ازن و رادیکال‌های هیدروکسیل در ردیف قوی‌ترین عوامل اکسیدکننده قرار دارند. ازن می‌تواند به‌طور مستقیم با یک ترکیب شیمیایی واکنش نشان دهد یا رادیکال هیدروکسیلی تولید نماید که بعداً با آن ماده واکنش دهد.

واکنش بین ازن و مولکول‌های آلی شامل الحاق اکسیژن به حلقه بنزن، شکستن حلقه‌های دو تایی و اکسیداسیون الکل‌ها می‌باشد. شکستن زنجیر C=C توسط ازن، آلدئیدها و کتون‌ها را تولید می‌کند. محصولات نهایی ناشی از اکسیداسیون فنل توسط ازن H₂O و CO₂ می‌باشد. محصولات میانی اکسیداسیون فنل (مطابق شکل ۱) شامل کتکول^۶ و اورتو کینون^۷ می‌باشند [۵].



شکل ۱- مراحل اکسیداسیون فنل توسط ازن و محصولات ناشی از آن [۵]

یکی از عوامل فیزیکی مؤثر بر مواد آلی، انرژی تابشی است که از این میان، پرتو فرابنفش UVR^۸ مابین نوربنفش از تابش مرئی و نرم‌ترین تابش یونیزه کننده قرار گرفته و محدوده طول موج از ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر را شامل می‌شود [۶]. مکانیسم اثر UV بر پایه وارد نمودن انرژی به ترکیبات شیمیایی است که این انرژی توسط مولکول‌های واکنش‌گر جذب شده و قادر است با عبور از محلهای تحریک شده منجر به پیشرفت واکنش‌ها طی مدت زمان کافی گردد [۷].

هدف از انجام این تحقیق، مقایسه راندمان حذف فنل از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از روشهای اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن و پرتو تابشی اشعه فرا بنفش بود.

۲- مواد و روشها

محفظه واکنش در این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی و با ظرفیت ۳ لیتر به کار گرفته شد. اجزای مورد استفاده شامل یک لامپ UV ۱۲۵ وات بود و ازن مصرفی قبل از ورود به راکتور تولید و از طریق ازن ساز مدل COG-OM با مقدار تولید ۱ گرم ازن بر ساعت به راکتور منتقل می‌شد.

فنل یا هیدروکسی بنزن^۱ یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک سمی است که سازمان حفاظت محیط زیست^۲ آن را در دسته آلاینده‌های متقدم^۳ قرار داده است [۱]. این ماده و مشتقات آن در صنایع متعددی از جمله در ساخت رزین، پلاستیک، چسب، لاستیک، فولاد، آلومینیوم، کاغذ، صنعت چوب [۲]، سموم حشره‌کش، قارچ‌کش، علف‌کش، محصولات بهداشتی و پزشکی نظیر روغن‌های نرم‌کننده، پمادهای روغنی، اسپری و لوسیون‌های ترمیم زخم و صنایع مختلف دیگری کاربرد دارد و از طریق دفع غیربهداشتی فاضلاب صنایع مذکور باعث آلودگی محیط زیست و به‌خصوص منابع آب می‌شود [۲ و ۳].

اثرات بهداشتی ناشی از مواجهه با فنل بستگی به میزان جذب و مدت زمان تماس با آن دارد و از تحریک مخاطی و سوزش و سوختگی‌های پوستی تا مسمومیت‌های سیستماتیک همراه با کاهش فشارخون، افزایش ضربان قلب و کما متغیر است. رهنمود سازمان جهانی بهداشت برای غلظت فنل در آب آشامیدنی کمتر از ۰/۱ میکروگرم در لیتر (۰/۱ ppb)^۴ می‌باشد که این رهنمود بر مبنای تولید بو و مزه ناشی از ترکیب فنل با کلر است.

برای تصفیه فاضلابهای حاوی فنل روشهای متعددی وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به اکسیداسیون پیشرفته^۵، اکسیداسیون شیمیایی، جذب سطحی، تصفیه بیولوژیکی و ترکیبی از روشهای مذکور اشاره نمود [۳ و ۴].

روشهای اکسیداسیون به دو روش اکسیداسیون شیمیایی با استفاده از مواد اکسید کننده نظیر اشعه فرا بنفش، کلر، آب اکسیژنه، معرف فنتون، اشعه گاما و فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته شامل کاربرد O₃/UV، O₃/H₂O₂، O₃/H₂O₂/UV، H₂O₂/UV، TiO₂/UV و Fe/UV انجام می‌گیرد. دلیل نام‌گذاری این فرایندها به نام فرایند اکسیداسیون پیشرفته، تولید رادیکال هیدروکسیل است که ضمن بالاتر بودن قدرت اکسیداسیون از نظر شرایط عملیاتی و محصولات جانبی مضر برای محیط‌زیست تفاوت بسیار زیادی با روشهای متعارف دارد.

ازن یک گاز آبی رنگ با بوی تند و یک اکسید کننده قوی است که به مدت طولانی به‌عنوان گندزدا در آب و فاضلاب کاربرد داشته است و قادر است به سرعت با اکثر ترکیبات سمی واکنش دهد و معمولاً محصولات ناشی از این واکنش دارای سمیت کمتری

⁶ Catechol

⁷ O- quinone

⁸ Ultraviolet ray

¹ Benzene hydroxy

² Environmental Protection Agency (EPA)

³ Priority pollutants

⁴ World Health Organization (WHO)

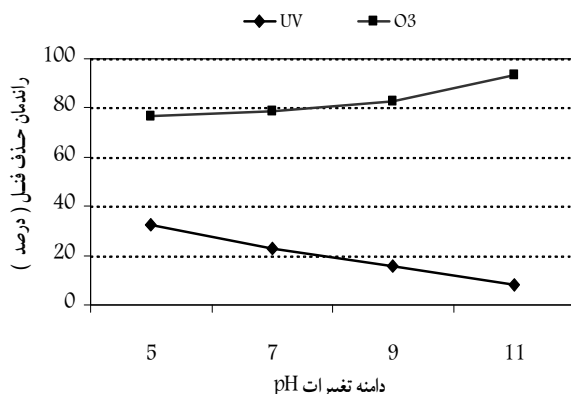
⁵ Advanced oxidation processes

مقدار فنل موجود در نمونه‌های مورد مطالعه، مطابق با روش ذکر شده در بخش D 5530 کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب و با روش رنگ‌سنجی، توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر (در طول موج 500 nm) اندازه‌گیری گردید [۸]. pH با استفاده از دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد و برای تنظیم محدوده‌های pH از اسید نیتریک و هیدروکسید سدیم استفاده گردید. در نهایت اطلاعات به‌دست آمده از بررسی تأثیر عوامل مختلف بر کارایی روش‌های حذف با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون‌های آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

در فرایند اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از ازن و پرتوتابی فرابنفش، اثر تغییرات pH بر میزان حذف فنل بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که pH، یک متغیر مهم در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته محسوب می‌گردد و نقش مهمی در تعادل اسید و باز ایفا می‌کند به این صورت که غلظت مواد تجزیه شده و یا تجزیه نشده را در معادله تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مطابق شکل ۳ در فرایند اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از ازن، افزایش در میزان pH، افزایش حذف فنل را به‌دنبال دارد در حالی که در خصوص پرتوتابی فرابنفش عکس این قضیه صدق می‌کند و با توجه به این مطلب می‌توان دریافت که افزایش pH روند حذف فنل از فاضلاب با کاربرد ازن تأثیر مثبت و با استفاده از روش پرتوتابی فرابنفش تأثیر منفی دارد. مطابق آزمون آنالیز واریانس یک طرفه میزان p-value این دو متغیر کوچکتر از ۰/۰۵ و برابر ۰/۰۵ شده، بنابراین نتیجه می‌گیریم اختلاف معنی‌داری بین pH و راندمان وجود دارد، به نحوی که با افزایش pH، راندمان نیز افزایش می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان افزایش تولید رادیکال‌های آزاد در pH‌های بالا دانست.



شکل ۳- مقایسه کارایی فرایندهای O₃ و UV در حذف فنل نسبت به تغییرات pH طی مدت زمان ۶۰ دقیقه

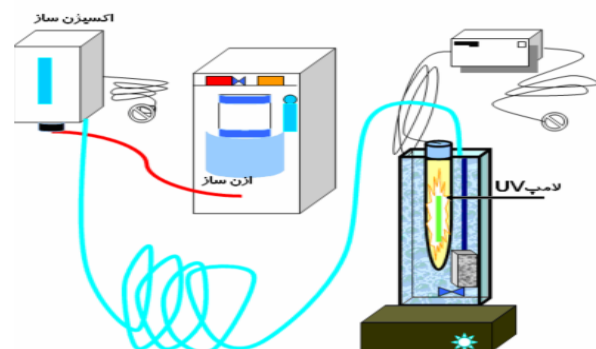
به‌منظور بررسی تأثیر pH بر تجزیه فنل، آزمایش‌ها در pH‌های ۵، ۷، ۹ و ۱۱ انجام و نمونه‌های جمع‌آوری شده با دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد آزمایش قرار گرفتند.

ارزیابی کارایی سیستم مورد مطالعه از طریق نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های ورودی و خروجی بعد از راه‌اندازی موقت با تزریق فنل مورد مطالعه قرار گرفت. در این مرحله با تثبیت شرایط، یک نمونه از محلول ورودی به سیستم، تهیه و مورد آنالیز قرار گرفت. سپس با در نظر گرفتن زمان ماند هیدرولیکی محلول در داخل سیستم، یک نمونه هم از خروجی تهیه و مورد آنالیز قرار گرفت، البته برای افزایش ضریب اطمینان و صحت و دقت آزمایش‌ها، عملیات نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها در هر مرحله سه بار تکرار شد و با احتساب تعداد مراحل نمونه‌برداری و سه مرتبه تکرار در هر مرحله، مطابق شرایط مذکور در مجموع تعداد ۱۲۴ نمونه مورد آنالیز قرار گرفت.

غلظت‌های مختلف فنل ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، دامنه تغییرات pH در چهار محدوده ۵، ۷، ۹ و ۱۱، دامنه تغییرات زمان ماند ۲۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه به‌عنوان متغیرهای این تحقیق و پرتوتابی با کاربرد اشعه ماوراءبنفش (UV) و اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن به‌عنوان دو روش حذف مجزا در تجزیه فنل به‌کار گرفته و مورد مقایسه قرار گرفتند.

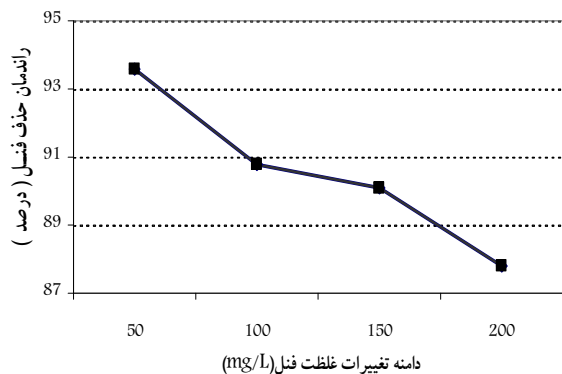
برای ایجاد اختلاط و توزیع هر چه بهتر رادیکال‌های آزاد تولیدی در حین اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از ازن، یک مگنت کوچک با استفاده از جریان الکتریسته، به‌منظور اختلاط دائم نمونه‌ها به کار گرفته شد. شکل ۲ اجزای مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

لامپ UV (۱۲۵ وات با طول موج ۲۵۴ نانومتر)، اکسیژن ساز مدل 7F-3 و ازن ساز مدل COG-OM با میزان تولید یک‌گرم ازن بر ساعت، هر سه محصول شرکت آردای^۱ فرانسه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند.

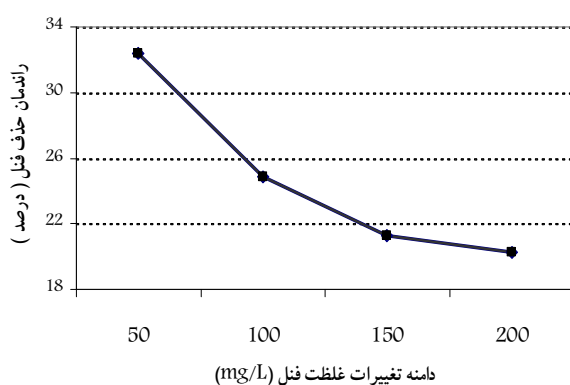


شکل ۲- اجزای مورد استفاده در این تحقیق

^۱ Arda



شکل ۶- تأثیر افزایش غلظت فنل در روند حذف آن توسط روش اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن در pH برابر ۱۱



شکل ۷- تأثیر افزایش غلظت فنل در روند حذف آن توسط اشعه UV در pH برابر ۵

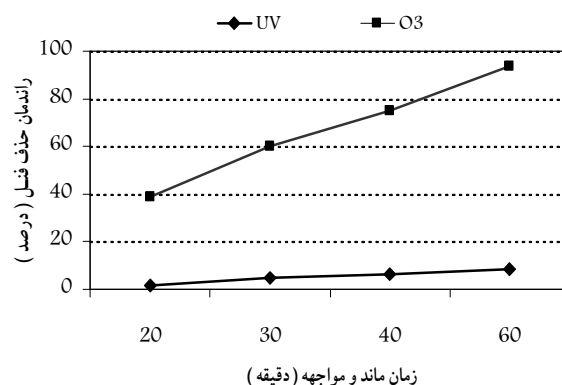
به منظور انتخاب شرایط بهینه دو روش حذف مذکور، تأثیر متغیرهای مختلف (pH، زمان ماند و غلظت‌های مختلف آلاینده) در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نمودارهای موجود در روش اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن، بهترین راندمان (۹۳/۶ درصد حذف) در pH قلیایی ۱۱، زمان ماند یک ساعت و غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر فنل حاصل شد. ضمناً بالاترین راندمان حذف فنل با روش پرتودهی فرابنفش (۳۲/۴ درصد)، در شرایط اسیدی (pH برابر ۵) و طی زمان مواجهه یک ساعت و غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر این آلاینده حاصل گردید.

در فرایند اکسیداسیون پیشرفته با به‌کارگیری ازن، افزایش pH، افزایش راندمان حذف فنل (۹۳/۶ درصد حذف) را به دنبال دارد که دلیل این امر اکسیداسیون غیر مستقیم فنل با رادیکال‌های آزاد هیدروکسید و افزایش توزیع رادیکال‌ها با افزایش pH است اما در pH برابر ۵ به دلیل کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و اکسیداسیون

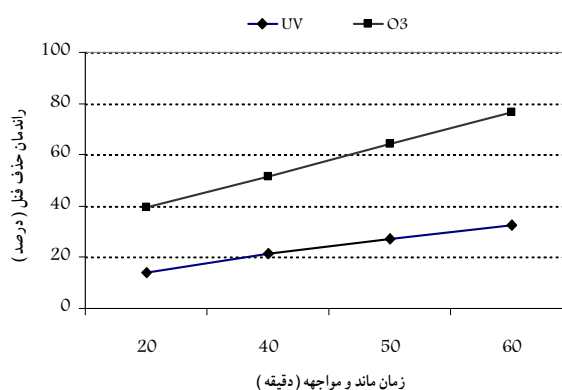
شکل‌های ۴ و ۵ تأثیر زمان ماند و زمان مواجهه در روند حذف فنل با کاربرد ازن و پرتو UV به ترتیب در pH های ۱۱ و ۵ را نشان می‌دهد. این نتایج مؤید آن است که با افزایش زمان انجام فرایند پرتوتابی با اشعه فرابنفش و اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن نیز راندمان حذف فنل افزایش می‌یابد. در بررسی تأثیر زمان ماند و زمان مواجهه در حذف فنل، در هر دو روش حداکثر حذف این ماده در مدت زمان ۶۰ دقیقه حاصل شد. ضمناً فرایند اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن راندمان بیشتری نسبت به روش پرتوتابی با اشعه UV در حذف فنل دارد.

نتایج نشان می‌دهد که در pH برابر ۱۱، افزایش غلظت فنل بر راندمان حذف آن توسط روش اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن تأثیر منفی دارد (شکل ۶).

ضمناً در بررسی اثر افزایش غلظت فنل یعنی بر راندمان حذف آن توسط روش پرتوتابی فرابنفش در pH بهینه ۵، چنانچه مشاهده می‌گردد افزایش غلظت فنل در روند حذف آن، تأثیر منفی دارد (شکل ۷).



شکل ۴- تأثیر زمان ماند و زمان مواجهه در روند حذف فنل با کاربرد ازن و پرتو UV در pH برابر ۱۱



شکل ۵- تأثیر زمان ماند و زمان مواجهه در روند حذف فنل با کاربرد ازن و پرتو UV در pH برابر ۵

مستقیم آلاینده‌ها توسط ازن، راندمان حذف، ۷/۷۶ درصد کاهش می‌یابد.

در بررسی تأثیر pH بر حذف فنل با استفاده از روش پرتودهی فرابنفش، بالاترین راندمان حذف (۳۲/۴ درصد) در شرایط اسیدی (pH برابر ۵) حاصل گردید که این افزایش را می‌توان به افزایش تولید کوانتوم‌ها در pH اسیدی، مرتبط دانست. در شرایط مشابه و افزایش pH به حدود ۱۱ و کاهش تولید کوانتوم، راندمان حذف فنل با این روش کاهش یافته و به میزان ۸/۳ درصد می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش pH در روند حذف فنل از فاضلاب با کاربرد ازن تأثیر مثبت و با استفاده از روش پرتودهی فرابنفش تأثیر منفی دارد.

مطابق نتایج به‌دست آمده در بررسی تأثیر زمان ماند و زمان مواجهه بر حذف فنل توسط روشهای اعمال شده، مشاهده گردید که با افزایش زمان انجام فرایند اکسیداسیون پیشرفته با به‌کارگیری ازن و افزایش زمان مواجهه در روش پرتوتابی فرابنفش، راندمان حذف نیز افزایش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی (درصدهای حذف فنل) در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- تجزیه و تحلیل آماری درصدهای حذف فنل با دو روش حذف ازن‌دهی و پرتودهی اشعه ماوراءبنفش

متغیر / روش	تعداد نمونه‌ها	تعداد تکرار آزمایش‌ها	دامنه	میانگین	میانگین	انحراف معیار
O ₃	۶۲	۳	۵۲/۸	۶۹/۲۷	۶۷/۲	۱۰/۳
UV	۶۲	۳	۲۵/۶	۲۰/۷	۱۹/۴	۱۰/۱

احمدی‌زاد و همکاران تصفیه پسابهای صنعتی حاوی فنل با استفاده از راکتورهای بی‌هوازی با بستر ثابت و بهره‌گیری از جریان‌های روبه بالا و روبه پایین را بررسی و با در نظر گرفتن دبی ۱/۲ لیتر در ساعت، غلظت COD معادل ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و زمان ماند ۷۲ ساعت به راندمان حذف ۸۸ درصدی فنل دست یافتند [۹] که در مقایسه با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نیازمند صرف زمان ماند بیشتر بوده و از راندمان پایین‌تری برخوردار است.

رحمانی و همکاران امکان تجزیه فتوکاتالیستی فنل با استفاده از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته با مکانیسم UV/TiO₂ را بررسی و با اعمال زمان ماند ۹ ساعت، غلظت معادل ۰/۱ گرم از دی‌اکسید تیتانیوم در pH برابر ۱۱ موفق به حذف فنل به میزان ۸۳ درصد شدند [۱۰]. میرزایی و دیانتی میزان حذف فنل به‌وسیله کربن فعال دارای پوشش بیولوژیکی را در یک راکتور ناپیوسته با غلظت ۲۰۰

میلی‌گرم در لیتر فنل و زمان ماند ۴۸ ساعت بررسی و به راندمان حذف ۸۴ درصدی فنل دست یافتند [۱۱] که در مقایسه با نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر، از راندمان کمتری برخوردار بوده و ضمناً نیازمند صرف زمان ماند بالاتری نیز می‌باشد.

مکرینی و همکاران نسبت به تجزیه فنل در محلولهای آبی با استفاده از اکسیداسیون پیشرفته با مکانیسم O₃/H₂O₂ اقدام و با اعمال زمان ماند ۶۰ دقیقه، pH برابر ۹/۴، غلظت H₂O₂ معادل ۰/۳۱۹ مول در لیتر و تولید گاز ازن معادل ۰/۲ تا ۰/۳ گرم در ساعت، موفق به حذف ۷۰ درصدی فنل گردیدند [۱۲] که در مقایسه با نتیجه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق (حذف ۹۳/۶ درصدی فنل) ضمن دارا بودن راندمان حذف پایین‌تر، از پراکسید هیدروژن نیز به‌صورت همزمان استفاده نموده است. اسپلاگاس و همکاران^۱ در راکتور بسته با استفاده از اکسیداسیون پیشرفته با مکانیسم O₃ و در نظر گرفتن جریان ورودی معادل ۲/۵ لیتر، غلظت اولیه فنل در محدوده ۹۳ تا ۱۰۵ میلی‌گرم در لیتر، زمان ماند ۸۰ دقیقه و pH برابر ۹ موفق به حذف ۱۰۰ درصدی فنل شده [۱۳] که در مقایسه با نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر، دارای راندمان بیشتری بوده اما نیازمند صرف زمان ماند بیشتری می‌باشد و با استفاده از پرتودهی فرابنفش، غلظت اولیه فنل در محدوده ۹۳ تا ۱۰۵ میلی‌گرم در لیتر، اعمال زمان ماند ۸۰ دقیقه و pH برابر ۴، موفق به حذف ۲۴/۲ درصدی فنل شدند که در مقایسه با نتیجه به‌دست آمده در این بررسی (۳۲/۴ درصد حذف فنل) ضمن صرف زمان ماند بیشتر، از راندمان حذف کمتری نیز برخوردار می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که:

- ۱- روش اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن، کارایی بیشتری نسبت به روش پرتودهی با اشعه فرا بنفش در تجزیه فنل دارد.
- ۲- فنل با روش ازن‌دهی در pH معادل ۱۱ و با استفاده از اشعه UV در pH معادل ۵ قابل تجزیه می‌باشد.
- ۳- در هر دو روش تجزیه، با افزایش زمان ماند، درصد تجزیه فنل نیز افزایش می‌یابد.
- ۴- در بررسی اثر غلظت بر راندمان حذف با توجه به نتایج به‌دست آمده توسط روشهای مذکور، بدون تغییر در زمان ماند، زمان مواجهه و pH می‌توان استنباط کرد که هر چه غلظت فنل در پساب ورودی کمتر باشد، راندمان حذف افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر با افزایش غلظت فنل از ۵۰ به ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف

¹ Splugas et al.

آبهای تصفیه شده، چشم انداز مطلوبی در صنعت آب و فاضلاب خواهد داشت.

۵- قدردانی

محققان لازم می‌دانند مراتب تشکر و سپاس خود را از مسئولان دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان در قبال اعطای فرصت لازم و تأمین بودجه مطالعه ابراز نمایند.

آن توسط روش اکسیداسیون پیشرفته با کاربرد ازن، کاهش می‌یابد و اختلاف معنی‌داری بین غلظت فنل و راندمان حذف در روش مذکور وجود دارد ($p\text{-value}=0/005$): در نتیجه با افزایش غلظت فنل، راندمان حذف آن کاهش می‌یابد. در روش پرتودهی فرابنفش نیز همین نتیجه (با $p\text{-value}=0/006$) به دست آمد.

می‌توان انتظار داشت فرایند اکسیداسیون پیشرفته با مزایایی از قبیل عدم تولید محصولات جانبی مضر و تولید محصولات جانبی ایمن از نظر جنبه‌های بهداشتی و زیست‌محیطی، راندمان بالا نسبت به روشهایی نظیر کربن فعال و تعیین مقادیر عوامل احیا کننده در

۶- مراجع

- 1- John, B., Sullivan, Jr., and Krieger, G.R. (2001). *Clinical environmental health and toxic exposures*, 2nd Ed., Lippincott Williams and Wilkins Inc, USA.
- 2- Eula, B.M., Barbar, C., Charles, H., and Patty, S. (2001). *Toxicology*, 8th Ed., John Wiley and Sons Inc, New York.
- 3- Karel, V. (2000). *Handbook of environmental data on organic chemicals*, Vol 2, 4th Ed., John Wiley and Sons Inc, Canada.
- 4- Hammer, M. J., and Hammer, J. (2003). *Water and wastewater technology*, 4th Ed., Hall Inc., India.
- 5- Liu, H.F.D., and Liptak, G.B. (2000). *Hazardous waste and solid waste*, Elsevier, Columbia, 68-75.
- ۶- واعظی، ف.، و صیدمحمدی، ع. (۱۳۸۲). *مقررات گندزدایی آب و بهره‌برداری از گندزداها*، انتشارات سه استاد، تهران.
- 7- Legrini, O. (1983). "Photochemical processes for water treatment." *Chem. Rev.*, 93, 671-981.
- 8- American Public Health Association, AWWA, WEF. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th Ed., APHA, Washington.
- ۹- احمدی‌زاد، س.، برقی، م.، حسنی، ا. ح.، و احمدی ارس، ا. (۱۳۸۴). "تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فنل با استفاده از راکتورهای بی‌هوای با بستر ثابت و بهره‌گیری از جریانهای روبه بالا و رو به پایین." *هشتمین همایش ملی بهداشت محیط*، دانشگاه تهران.
- ۱۰- رحمانی، ع.، و عنایتی موفق، ع.، مرادی حیدرنژاد، م.، و شکوهی، ر. (۱۳۸۴). "بررسی امکان تجزیه فتوکاتالیستی فنل با استفاده از فرایند UV/TiO_2 ." *هشتمین همایش ملی بهداشت محیط*، دانشگاه تهران.
- ۱۱- میرزایی، ف.، و دیانتهی تیلکی، ر. (۱۳۸۴). "بررسی میزان حذف فنل بوسیله کربن فعال دارای پوشش بیولوژیکی." *هشتمین همایش ملی بهداشت محیط*، دانشگاه تهران.
- 12- Mokriani, A., Oussi, G., Chamarro, E., and Estlugas, S. (1998). "Photooxidation of phenol in aqueous solution." *Water Sciences Tech.*, 95-102.
- 13- Splugas, S.E., Gimenes, G., Contreras, S., and et al. (2002). "Comparison advanced oxidation processes for phenol degradation." *Water Research*, 36, 1034-1042.