

Investigation of Hybrid Process of Fenton Oxidation and Adsorption in Phenol Removal from Water

Ehsan Mohammadrezaei^{1*}, Roshanak Rezaei Kalantari² and Mohammad Reza Lotfi³

1- M.Sc., Environment Engineering - Water and Wastewater, Azad University, West Tehran Branch, Tehran, Iran.

2- Professor, Faculty of Environmental Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

3- M.Sc., Civil-Environment Engineering, Collage of Environment, Karaj, Iran.

* Corresponding Author: eh.rezaei@yahoo.com

Received: 14/6/2017

Revised: 13/6/2018

Accepted: 19/6/2018

Abstract

Phenol is one of the aromatic hydrocarbons with high toxicity and adverse health effects on living beings. It can be found in wastewater from industries such as chemical and petrochemical industries and oil refineries. The aim of this study is to evaluate the hybrid process of Fenton oxidation and adsorption on removal of phenol from water. In this paper an experimental study in laboratory scale is implemented. Variables such as: concentration of Fe^{2+} , H_2O_2 , pH, activated carbon and time are tested in order to impact on the rate of removal of phenol in water. Finally, optimal conditions for the removal of phenol through the hybrid process of adsorption test and oxidation Fenton test is introduced. Results show that 95, 94 and 96 percent of Phenol is removed, respectively with initial concentration of 50, 150 and 250 mg/L by combination of adsorption test and Fenton test, in pH = 3, $Fe^{2+} = 10$ mg/L, $H_2O_2 = 150$ mg/L, activated carbon = 2.5 g/L and time = 90 min. It can be concluded that hybrid process of adsorption and oxidation of Fenton can be used as a suitable method to reduce of Phenol from water.

Keywords: Activated Carbon, Adsorption, Fenton Oxidation, Phenol.

بررسی فرآیند تلفیقی اکسیداسیون فنتون و جذب در حذف فنل از آب

احسان محمدرضائی^{۱*}، روشنگ رضائی کلانتری^۲ و محمدرضا لطفی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست - آب و فاضلاب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران

* نویسنده مسئول، ایمیل: eh.rezaei@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۴

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

چکیده

فنل یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک با سمیت بالا و اثرات سوء بر سلامتی موجودات زنده است که در پساب صنایعی مانند ساخت مواد شیمیایی، پالایشگاه‌های نفت، پتروشیمی و ... وجود دارد. هدف اصلی این مطالعه بررسی فرآیند تلفیقی اکسیداسیون فنتون و جذب در حذف فنل از آب می‌باشد. این تحقیق یک مطالعه تجربی بوده که در مقیاس آزمایشگاهی و از طریق آزمایش جذب و اکسیداسیون فنتون انجام شده است. در این تحقیق با تغییر متغیرهایی همچون: غلظت Fe^{2+} ، H_2O_2 ، pH، جذب کربن فعال و زمان، تاثیر آن‌ها بر میزان حذف آلاینده فنل از آب سنجیده و در نهایت شرایط بهینه حذف فنل از طریق آزمایش تلفیقی جذب و اکسیداسیون فنتون معرفی می‌شود. براساس یافته‌های این پژوهش، فنل با غلظت اولیه ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در مواجهه با آزمایش تلفیقی جذب و فنتون در شرایط $pH=3$ ، $Fe^{2+}=10$ mg/L، $H_2O_2=150$ mg/L، $H_2O_2=2/5$ g/L، کربن فعال و 15 min زمان، به ترتیب به میزان ۹۵، ۹۴ و ۹۶ درصد حذف شد. در نتیجه فرآیند تلفیقی جذب و اکسیداسیون فنتون می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش آلاینده فنل از آب مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: فنل، جذب، کربن فعال، اکسیداسیون، فنتون.

برای تخلیه فنل به این شرح است: حداکثر غلظت مجاز تخلیه فنل به آب‌های سطحی، مصارف کشاورزی و آبیاری ۱ mg/l و برای تخلیه به چاه جذب ناچیز است (دفتر حقوقی مجلس، ۱۳۷۹).

در خصوص حذف فنل از محیط‌های آبی تحقیقاتی متعددی با روش‌های مختلف انجام شده است. برخی محققین به بررسی میزان حذف فنل با استفاده از خاکستر پوسته پسته در محیط آبی پرداخته و نشان دادند که حذف فنل به میزان ۹۸ درصد نیز در شرایط آزمایشی به دست آمده است (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۲) و یا با روش اکسیداسیون فنتون فنل با غلظت ۱۰۰ mg/l در شرایط بهینه آزمایش که در آن pH=۳-۴، زمان برابر ۳۰ دقیقه، بوده است تا مرز ۹۶ درصد حذف شده است (ملکوتیان و همکاران، ۱۳۹۰).

در بررسی‌های دیگر فرآیند شبه فنتون در حذف ۴-کلرو فنل از محیط‌های آبی نیز مورد آزمایش قرار گرفته است و یافته‌ها نشان می‌دهد درصد حذف به حدود ۹۴ درصد در شرایط pH=۴ و زمان برابر ۵ دقیقه رسیده است (شیخ محمدی و همکاران، ۱۳۹۲). بررسی فرآیند اکسیداسیون فوتوشیمیایی پیشرفته برای حذف فنل از محیط‌های آبی نیز موضوع تحقیق سایر پژوهشگرها بوده و یافته‌های آن‌ها نشان داده در شرایط بهینه آزمایش، درصد حذف به حدود ۹۷ درصد رسیده است (جمشیدی و همکاران، ۱۳۸۸). در بخش حذف فیزیکی فنل نیز تحقیقات دیگری صورت گرفته و از آن جمله، بررسی حذف فنل با استفاده از خاکستر هسته خرما در محیط آبی است که نتایج نشان داده با اضافه کردن مقدار جاذب از ۲ تا ۱۱ گرم بازده حذف فنل از ۹۸/۹۱ به ۹۸/۹۹ درصد افزایش می‌یابد (رخش خورشید و همکاران، ۱۳۹۱). جذب فنل توسط زیتون آسیاب شده (زایدات زیتون) در فاضلاب‌های صنعتی تحقیق دیگری است و حداکثر میزان جذب فنل ۸۵٪ گزارش شده است (Abdelkreem, 2013). در تحقیقی دیگر حذف فنل از فاضلاب‌های صنعتی با کمک روش جذب توسط خاک اره مورد بررسی قرار گرفته و در شرایط زمان برابر ۱۲۰ دقیقه، میزان جاذب ۰/۸ گرم، فنل با غلظت اولیه ۱۳۰ میلی‌گرم بر لیتر در حدود ۹۲ درصد حذف شده است (Habib, 2013). شرایط اضافه نمودن کربن فعال به فرآیند فنتون در حذف رنگ توسط Wang et al. (2014) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اضافه کردن کاتالیست به فرآیند فنتون در تجزیه آلاینده فنل در آب نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Maekawa et al.,

مسئله آب و کمبود فزاینده آن یکی از مهم‌ترین مسائل دنیای امروز به‌شمار می‌رود. آب به‌عنوان اصلی‌ترین عامل توسعه پایدار و مهم‌ترین عنصر تأمین نیاز بشری شناخته شده و انسان از دیرباز تاکنون به اهمیت این مایع حیاتی پی برده است. افزایش رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، دسترسی هرچه بیشتر به علوم و فنون، توسعه مراکز صنعتی و تجاری و غیره سبب تولید انواع و اقسام مواد زایدی شده که منجر به آلودگی محیط زیست و به‌دنبال آن آلودگی آب‌ها و تهدید سلامت انسان‌ها شده است. در این میان طبیعتاً یکی از مشکلاتی که موجبات نگرانی را فراهم می‌آورد، مسئله حفاظت محیط‌زیست در برابر آلودگی‌های ایجاد شده در ابعاد گسترده آن است.

فنل یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک با سمیت بالا و اثرات سوء بر سلامتی موجودات زنده است که در پساب صنایعی مانند ساخت مواد شیمیایی، پالایشگاه‌های نفت، پتروشیمی و ... وجود دارد. فنل یکی از ترکیبات ساده آلی بوده که از اتصال یک گروه هیدروکسیل و یک حلقه بنزنی تشکیل می‌شود. فنل با فرمول (C₆H₅OH) با نام‌های هیدروکسی بنزن (hydroxyl benzene) و کربولیک اسید (carbolic acid) نیز شناخته می‌شود. فنل خالص جامدی سفید رنگ با دمای ذوب ۴۲ °C یا ۱۰۸ °F است. فنل به‌طور معمول قابل انحلال در آب است و خاصیت اسیدی ضعیفی دارد (pKa=۹/۹). فنل به‌عنوان یک گندزدا استفاده می‌شود. فنل با غلظت بالا می‌تواند باعث سوختگی پوست شود. ترکیباتی که در آن بیش از یک گروه هیدروکسیل متصل به حلقه بنزن باشد را ترکیبات پلی هیدریک فنل (poly hydric phenols) می‌نامند. فنل یکی از ترکیبات مهم آلی مورد استفاده در صنعت است. فنل در بسیاری از صنایع به‌عنوان ماده اولیه کاربرد دارد. برخی از موادی که از این ماده تولید می‌شوند عبارتند از: نایلون، شوینده‌ها، افزودنی‌های بنزین، آسپرین، پلی‌اورتان، رنگ‌ها، علف‌کش‌ها، نرم‌کننده‌ها، ضدآکسنده‌ها، روغن‌های روان‌کننده، قارچ‌کش‌ها.

از آن‌جا که فنل ماده‌ای سمی بوده و در عین حال کاهش و حذف بیولوژیکی آن بسیار مشکل است، بنابراین حدود سخت‌گیرانه‌ای برای تخلیه مواد فنل‌دار به محیط‌زیست در نظر گرفته شده است. سازمان بهداشت جهانی (WHO) غلظت پیشینه ۰/۰۰۱ mg/l در آب آشامیدنی را در نظر گرفته است (WHO, 2003). استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران

در بخش فرآیندهای ترکیبی نیز بررسی محققین بر روی تجزیه ۴-کلروفنل موجود در آب‌های آلوده با کمک دو فرآیند فنتون و فوتوفنتون انجام شده و نتایج نشان داد که با گذشت زمان ۳۰ دقیقه و در نسبت‌های بهینه مواد، راندمان به حدود ۹۰ درصد رسیده است (Wen et al., 2009). همچنین در سایر تحقیقات بر روی حذف PAHs توسط فرآیند فنتون و H_2O_2 نیز با راندمان حذف به ترتیب ۹۵ و ۹۰ درصد نیز پژوهش انجام گرفته است (Ferrarese et al., 2007).

۲- مواد و روش‌ها

این تحقیق یک مطالعه تجربی بوده که در مقیاس آزمایشگاهی و از طریق آزمایش جذب و اکسیداسیون فنتون انجام شد. در این تحقیق با تغییر متغیرهای همچون: غلظت H_2O_2 ، Fe^{2+} ، pH، جذب کربن فعال و زمان، تاثیر آن‌ها بر میزان حذف آلاینده فنل از آب سنجیده و در نهایت شرایط بهینه حذف فنل از طریق آزمایش تلفیقی جذب و اکسیداسیون فنتون معرفی شده است. این تحقیق براساس انجام دو گروه آزمایش مستقل و همچنین انجام یک گروه آزمایش تلفیقی (از نتایج دو گروه آزمایش قبلی) انجام شده است. به این ترتیب گام اول

جدول ۱- مواد اصلی مورد استفاده در تحقیق

شرح	فرمول شیمیایی	شرکت تولیدکننده
فنل	C_6H_5OH	Loba Chemie - هند
کربن فعال	C	Daejung - کره
آب اکسیژنه	H_2O_2	قطران شیمی - ایران
آهن	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	شیمیران - ایران
۴-آمینوانتی پرن	$C_5H_4N-NH_2$	Panreac - اسپانیا

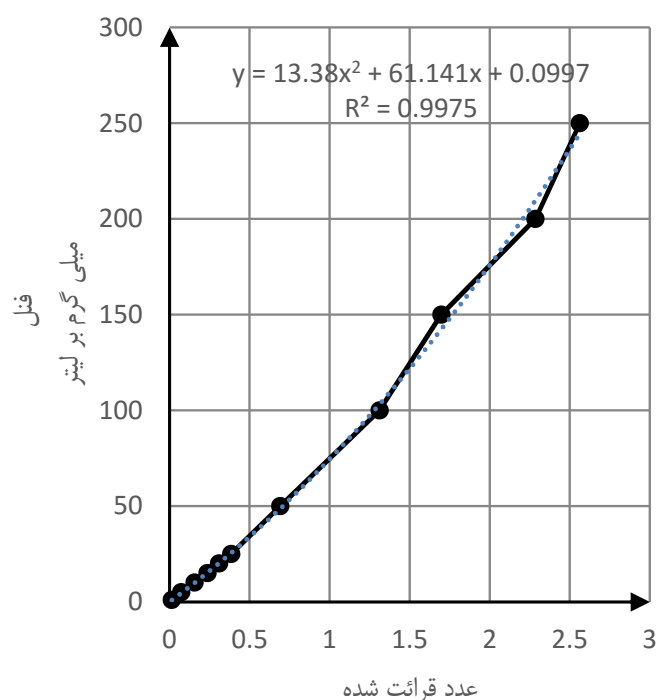
جدول ۲- غلظت متغیرهای مورد استفاده در تحقیق

غلظت آهن (mg/l)	غلظت آب اکسیژنه (mg/l)	غلظت کربن فعال (g/l)	غلظت فنل (mg/l)
۵	۱۰۰	۲/۵	۵۰
۱۰	۱۵۰	۵	۱۵۰
۱۵	۲۰۰	۷/۵	۲۵۰

این تحقیق آزمایش‌های مرتبط با آزمایش جذب سطحی توسط کربن فعال بوده که رویکرد اصلی آن نیز بررسی کارایی این جاذب در حذف فنل از آب است. گام دوم، آزمایش‌ها مرتبط با آزمایش اکسیداسیون فنتون بوده که رویکرد اصلی آن بررسی کارایی اکسیداسیون فنتون در حذف فنل از آب است. در نهایت گام سوم، آزمایش‌های تلفیقی اکسیداسیون فنتون و جذب کربن فعال را شامل می‌شود. مواد اصلی مورد استفاده در این تحقیق به شرح جدول ۱ است.

روش اصلی انجام آزمایش‌ها به این گونه شکل گرفت که ابتدا حد بهینه pH و پس از آن Time برای انجام آزمایش جذب و فنتون از طریق انجام چند آزمایش اولیه (Pretest) به دست آمده و در ادامه با مفروض دانستن آن حدود، با تغییر سایر متغیرها (غلظت فنل و غلظت ماده جاذب و یا اکسیدکننده) میزان حذف فنل بررسی شده است. حدود غلظت متغیرها در این تحقیق که براساس بررسی مطالعات صورت گرفته پیشین بوده است به شرح جدول ۲ انتخاب شده‌اند.

در تمام آزمایش‌ها برای ساخت محلول فنل با غلظت‌های مختلف، ابتدا یک محلول از آب مقطر و فنل با غلظت mg/l ۱۰۰۰ ساخته شده و سپس غلظت مورد نظر با رقیق کردن محلول اولیه ساخته شده است. روش کار نیز به این گونه بوده است که در آزمایش‌های جذب، پس از ساخت محلول فنل با غلظت مدنظر در آزمایش مقداری از آن را داخل یک بشر کوچک ریخته و میزان مورد نظر جاذب نیز پس از وزن کردن به محلول اضافه شده و pH محلول اندازه‌گیری شده و به کمک اسید کلریدریک رقیق شده و یا در صورت نیاز، مقدار بسیار کمی هیدروکسید سدیم رقیق شده، pH محلول تنظیم شده است (در حد pH بهینه). سپس نمونه بر روی دستگاه هم‌زن (Shaker) قرار گرفته و بلافاصله زمان، ثبت شده و پس از گذشت زمان مورد نظر، بخشی از نمونه برای جداسازی فاز جامد (جاذب) از فاز مایع (محلول فنل) برداشته شده و داخل «ویال» دستگاه سانتیفریوژ ریخته می‌شود. با استفاده از دستگاه سانتیفریوژ، محتویات ویال جداسازی شده و سپس بخشی از محلول صاف شده برداشت و به کمک کاغذ صافی مجدداً صاف شده و داخل سل دستگاه اسپکتروفوتومتر برای قرائت قرار داده می‌شود. دستگاه اسپکتروفوتومتر قابلیت اندازه‌گیری میزان فنل مطابق روش ارائه شده در استاندارد متد (5530 D. Directed Photometric Method) به کمک معرف



شکل ۱- منحنی کالیبراسیون قرائت فنل در دستگاه اسپکتروفوتومتر استفاده شده در تحقیق

۳- یافته‌ها

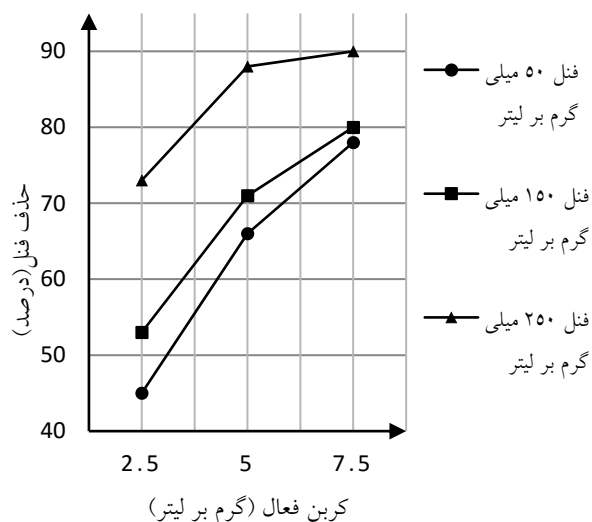
نتایج آزمایش‌های جذب توسط کربن فعال گرانوله برای حذف فنل در شرایط pH و Time بهینه (به ترتیب ۳ و ۹۰ دقیقه) و برای فنل با غلظت ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در مواجهه با کربن فعال با غلظت‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ گرم بر لیتر در شکل ۲ ارائه شده است.

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود راندمان حذف فنل در تمامی غلظت‌ها با افزایش میزان جاذب افزایش یافته است. به نحوی که برای فنل با غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان حذف در مواجهه با ۲/۵ و ۵ و ۷/۵ گرم کربن فعال گرانوله به ترتیب ۷۳ و ۸۸ و ۹۰ درصد بوده است. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد در مواجهه با یک غلظت ثابت جاذب، هرچه میزان غلظت فنل موجود در محلول بیشتر بوده، راندمان حذف نیز افزایش پیدا خواهد کرد. به‌عنوان مثال در مواجهه جاذب با غلظت ۷/۵ گرم بر لیتر و فنل با غلظت‌های ۵۰ و ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، درصد حذف به ترتیب برابر ۷۸ و ۸۰ و ۹۰ خواهد بود. علاوه بر آن یافته‌ها نشان می‌دهد از آنجا که آزمایش جذب طی یک فرآیند فیزیکی اتفاق می‌افتد

رنگی ۴- آمینو آنتی پیرین را دارد که در این تحقیق برای سنجش میزان فنل مطابق دستورالعمل مندرج در استاندارد متد - ویرایش ۲۰ از این روش استفاده شده است (Standard Methods, 1999).

لازم به توضیح است به منظور استنتاج میزان فنل باقیمانده در نمونه آزمایش از روی عدد قرائت شده دستگاه اسپکتروفوتومتر ابتدا منحنی کالیبراسیون مربوط به دستگاه اسپکتروفوتومتر (برای حذف فنل) از طریق اندازه‌گیری چند نمونه فنل با غلظت مشخص ترسیم شده و سپس به کمک این منحنی از اعداد قرائت شده بر روی دستگاه میزان فنل استنتاج شده است. در شکل ۱ منحنی کالیبراسیون مورد اشاره به همراه معادله منحنی و عدد رگرسیون این منحنی نشان داده شده است.

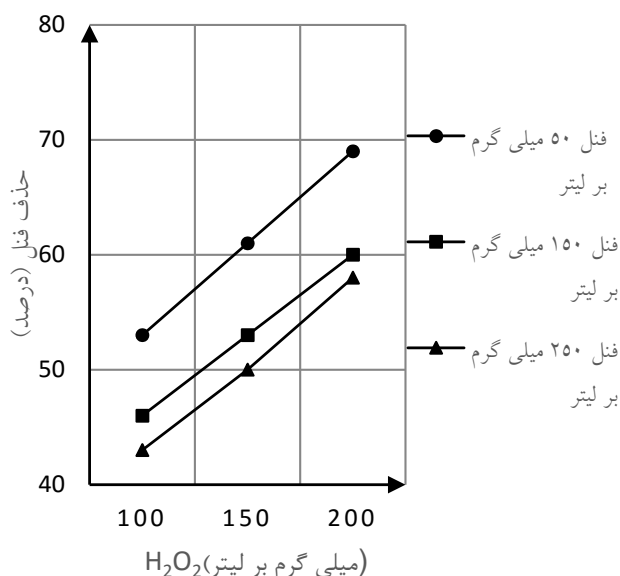
روش کار در آزمایش‌های فنتون نیز به این‌گونه بوده که پس از ساخت محلول فنل و آب مقطر با غلظت مدنظر، pH محلول اندازه‌گیری تنظیم شده و سپس محلول حاوی Fe و پس از آن محلول H_2O_2 به ظرف آزمایش اضافه شده است. حال در این مرحله ارلن بر روی دستگاه Shaker قرار داده شده و زمان ثبت می‌شود. پس از گذشت زمان مورد نظر، نمونه‌گیری برای سنجش توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر انجام شده است.



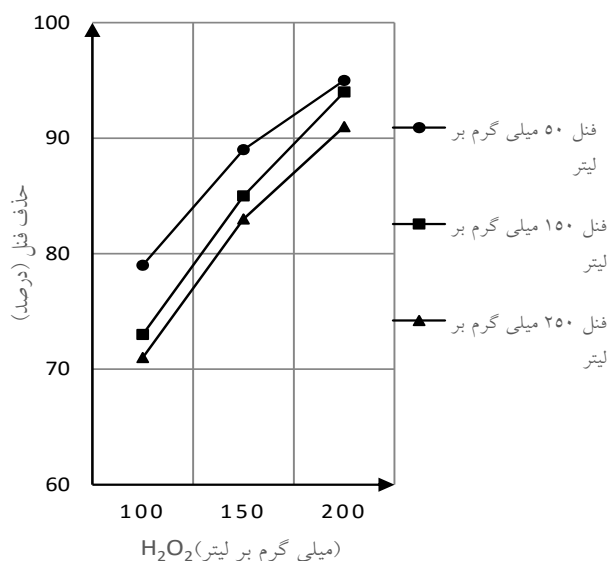
شکل ۲- راندمان حذف فنل به روش جذب توسط کربن فعال
Time=90 min, pH=3

بررسی شکل‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهد افزایش میزان پراکسید هیدروژن از ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در تمامی شرایط آزمایش منجر به افزایش راندمان حذف به صورت خطی شده است به نحوی که به عنوان مثال در شکل ۵ افزایش میزان پراکسید هیدروژن از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان حذف فنل را برای فنل با غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و در

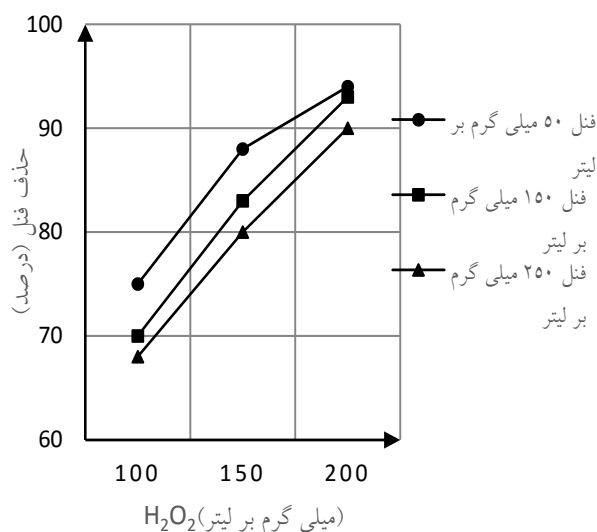
و حاصل برخورد مولکول‌های جاذب با ماده آلاینده واقع در محیط آزمایش است. از این رو افزایش میزان جاذب و یا افزایش میزان آلاینده در محیط آزمایش عملاً شانس برخورد فیزیکی بین این دو را افزایش داده و میزان جذب را بالاتر خواهد برد. در شکل‌های ۳ تا ۵ میزان حذف فنل به کمک اکسیداسیون فنتون در شرایط افزایش میزان H_2O_2 ارائه شده است.



شکل ۳- راندمان حذف فنل به روش اکسیداسیون فنتون - در شرایط Fe=5 میلی‌گرم در لیتر
Time=15 min, pH=3



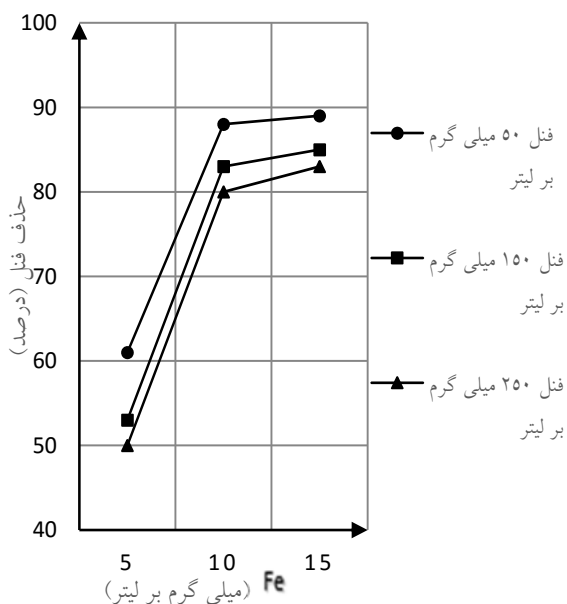
شکل ۵- راندمان حذف فنل به روش اکسیداسیون فنتون - در شرایط Fe=15 میلی گرم در لیتر
Time=15 min و pH=3



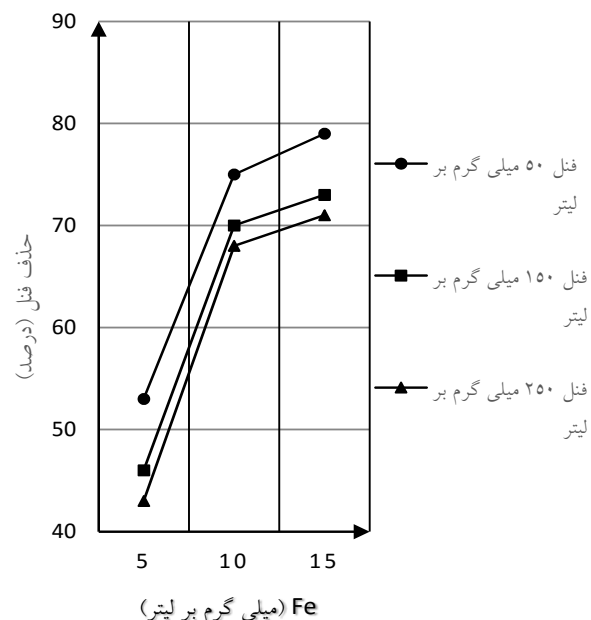
شکل ۴- راندمان حذف فنل به روش اکسیداسیون فنتون - در شرایط Fe=10 میلی گرم در لیتر
Time=15 min و pH=3

همان گونه که مشاهده می شود افزایش میزان Fe از ۵ تا ۱۰ میلی گرم بر لیتر در تمامی نمودارهای ارائه شده در شکل های ۶ تا ۸ باعث افزایش شدید راندمان حذف فنل شده، ولی شیب این افزایش راندمان حذف در بخش بعدی افزایش میزان Fe

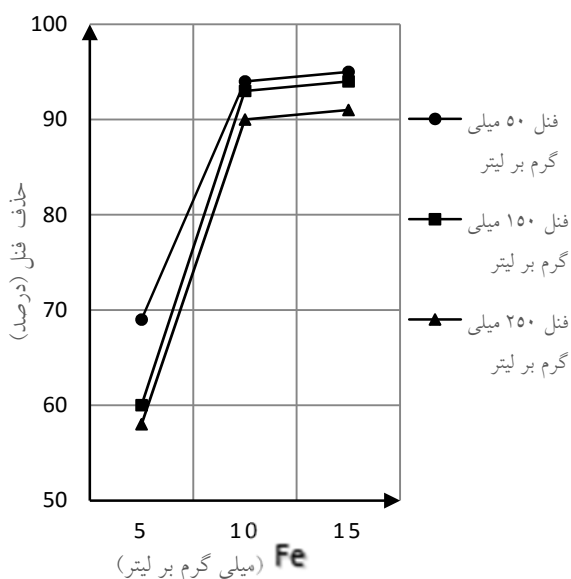
شرایط pH=3 و Time=15 min و Fe=15 mg/l و از ۷۱ درصد به ۹۱ درصد رسانده است. در شکل های ۶ تا ۸ میزان حذف فنل به کمک اکسیداسیون فنتون در شرایط افزایش میزان Fe ارائه شده است.



شکل ۷- راندمان حذف فنل به روش اکسیداسیون فنتون - در شرایط H₂O₂=150 میلی گرم در لیتر
Time=15 min و pH=3



شکل ۶- راندمان حذف فنل به روش اکسیداسیون فنتون - در شرایط H₂O₂=100 میلی گرم در لیتر
Time=15 min و pH=3

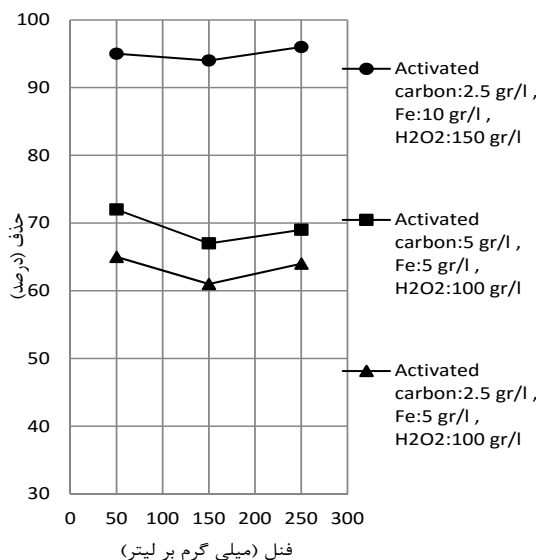


شکل ۸- راندمان حذف فنل به روش اکسیداسیون فنتون - در شرایط $H_2O_2=200$ میلی گرم در لیتر
Time=15 min و pH=3

در شکل ۹ میزان حذف فنل به کمک فرآیند ترکیبی جذب کربن فعال و اکسیداسیون فنتون ارائه شده است. لازم به ذکر است در روش ترکیبی، انتخاب جاذب و اکسیدکننده‌ها با رویکرد استفاده حداقلی از مواد (به دلیل صرفه اقتصادی) بوده است.

بررسی شکل ۹ نشان می‌دهد در آزمایش ترکیبی و با رویکرد استفاده حداقلی از مواد مصرفی، در صورتی که میزان جاذب کربن فعال گرانوله ۵/۲ گرم بر لیتر و میزان H_2O_2

۱۰ تا ۱۵ میلی گرم بر لیتر کاهش یافته است. به عنوان مثال، در شکل ۸ افزایش میزان Fe از ۵ به ۱۰ میلی گرم بر لیتر میزان حذف فنل را برای فنل با غلظت ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر و در شرایط pH=3 و Time=15 min و $H_2O_2=15$ mg/l از ۵۸ درصد به ۹۰ درصد رسانده است. در حالی که افزایش بیشتر میزان Fe در این آزمایش از ۱۰ به ۱۵ میلی گرم بر لیتر، راندمان حذف را تنها ۱ درصد افزایش داده و به ۹۱ درصد رسانده است.



شکل ۹- راندمان حذف فنل به روش ترکیبی جذب کربن فعال و اکسیداسیون فنتون
Time=15 min, pH=3

جذب با جاذب $5/2 \text{ g/l}$ معادل 73% درصد و در آزمایش تنه‌های فنتون ($\text{Fe} = 10 \text{ mg/l}$ و $\text{H}_2\text{O}_2 = 150 \text{ mg/l}$) برای فنلی با همین غلظت معادل 80% درصد بود که آزمایش ترکیبی در این غلظت راندمان سیستم حذف را تا 96% درصد افزایش داده است. در نتیجه فرآیند تلفیقی جذب و اکسیداسیون فنتون می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش آلاینده فنل از آب مورد استفاده قرار گیرد.

۶- مراجع

بذرافشان، ا.، حیدری نژاد، ف.، و کرد مصطفی پور، ف.، (۱۳۹۲)، "حذف فنل از محلول‌های آبی با استفاده از خاکستر پوسته پسته به‌عنوان یک جاذب ارزان قیمت"، *مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار*، ۲۰(۲)، ۱۴۱-۱۵۳.

جمشیدی، ن.، ترابیان، ع.، عظیمی، ع.، نبی بیدهدی، غ.، جعفرزاده، م.، (۱۳۸۸)، "اکسیداسیون فوتوشیمیایی پیشرفته برای حذف فنل از محیط‌های آبی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۴، ۲۴-۲۹.

دفتر حقوقی و امور مجلس، (۱۳۷۹)، *مجموعه قوانین و مقررات حفاظت محیط‌زیست*، انتشارات سازمان محیط زیست، جلد اول، فصل اول، بخش پنجم، تهران، ایران.

رخش خورشید، ع.، اکبری، ح.، بذرافشان، ا.، و حسین‌بر، م.، (۱۳۹۱)، "بررسی میزان حذف فنل با استفاده از خاکستر هسته خرما در محیط آبی"، *مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار*، ۲۰(۲)، ۳۳-۳۸.

شیخ محمدی، ا.، منشوری، م.، یزدانبخش، ا.، و سردار، م.، (۱۳۹۲)، "بررسی کارایی فرآیند شبه فنتون در حذف 4-Cl کلرو فنل از محیط‌های آبی"، *مجله طلوع بهداشت*، ۱۲(۱)، ۶۷-۷۷.

ملکوتیان، م.، و اسدی، م.، (۱۳۹۰)، "کارایی فرآیند اکسیداسیون فنتون در حذف فنل از محلول‌های آبی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۲(۳)، ۴۶-۵۲.

Abdelkreem, M., (2013), "Adsorption of Phenol from industrial wastewater using olive mill waste", Higher Technological Institute, 10th of Ramadan City, Egypt.

Adriana, S., Ricardo, G., Manuel, I., Maldonado, R., Joan, M., and Peralta, H., (2014), "Optimization of the operating parameters using RSM for the Fenton oxidation process and adsorption on vegetal carbon of MO solutions", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 848-857.

Hadjltaief, H.B., Da Costa, P., Beaunier, P., Gálvez,

به‌ترتیب 5% و 100% میلی‌گرم بر لیتر باشد، راندمان حذف فنل با غلظت‌های اولیه 50 ، 150 و 250 میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب برابر 65 ، 61 و 64% درصد بوده است و در شرایطی که میزان جاذب افزایش یافته و به مقدار 5 گرم بر لیتر رسیده است، راندمان حذف برای غلظت‌های مختلف فنل کمی افزایش یافته و به 72 ، 67 و 69% درصد خواهد رسید. لیکن در این آزمایش و در صورتی که در آزمایش ترکیبی میزان اکسیدکننده افزایش پیدا کرده و به $\text{Fe} = 10 \text{ mg/l}$ و $\text{H}_2\text{O}_2 = 150 \text{ mg/l}$ رسانده شود، راندمان حذف فنل به‌شدت افزایش یافته و برای غلظت‌های مختلف فنل به 95 ، 94 و 96% درصد خواهد رسید. در واقع آزمایش ترکیبی جذب و اکسیداسیون فنتون برای حذف فنل که به نوعی بهره‌گیری از آزمایش فیزیکی جذب و آزمایش شیمیایی اکسیداسیون بوده است، بیشتر تحت تاثیر میزان اکسیدکننده بوده و افزایش آن راندمان حذف را نیز افزایش داده است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده افزایش قابل ملاحظه در راندمان حذف فنل در روش ترکیبی با شرایط میزان بیان شده برای اکسیدکننده و جاذب را نشان می‌دهد، به‌نحوی که راندمان حذف در همه غلظت‌های فنل بیش از 94% درصد و به‌طور خاص برای غلظت 50 mg/l فنل برابر 95% درصد و برای غلظت 150 mg/l فنل برابر 94% درصد و برای غلظت 250 mg/l فنل برابر 96% درصد بود. در صورتی که مطابق نتایج ارائه شده در بخش‌های گذشته، میزان حذف برای فنلی با غلظت 50 mg/l در آزمایش تنه‌های جذب با جاذب $5/2 \text{ g/l}$ معادل 45% درصد و در آزمایش تنه‌های فنتون ($\text{Fe} = 10 \text{ mg/l}$ و $\text{H}_2\text{O}_2 = 150 \text{ mg/l}$) برای فنلی با همین غلظت معادل 88% درصد بوده است. در واقع آزمایش ترکیبی توانسته در این غلظت از فنل کارایی سیستم حذف را تا 95% درصد افزایش دهد.

این موضوع برای فنل با غلظت 150 mg/l نیز اتفاق افتاده به‌نحوی که در آزمایش تنه‌های جذب با جاذب $5/2 \text{ g/l}$ معادل 53% درصد و در آزمایش تنه‌های فنتون ($\text{Fe} = 10 \text{ mg/l}$ و $\text{H}_2\text{O}_2 = 150 \text{ mg/l}$) برای فنلی با همین غلظت، معادل 83% درصد بود. در واقع آزمایش ترکیبی در این غلظت نیز کارایی سیستم حذف را تا 94% درصد افزایش داد. در نهایت برای فنل با غلظت 250 mg/l نیز نتایج نشان داد که در آزمایش تنه‌های

- M.E., and Ben Zina, M., (2014), "Fe-clay-plate as a heterogeneous catalyst in photo-Fenton oxidation of phenol as probe molecule for water treatment", *Journal of Applied Clay Science*, 91-92, 46-54.
- Ferrarese, E., Andreottola, G., and Opera, I.A., (2007), "Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation", *Hazardous Materials*, 152, 128-139.
- Habib, I., (2013), "Removal of Phenol from industrial wastewater using sawdust", *International Journal of Engineering and Science*, 3, 25-31.
- Maekawa, J., Mae, K., and Nakagawa, H., (2014), "Fenton-Cu²⁺ system for Phenol mineralization", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1275-1280.
- Standard Methods, (1999), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th Edition, American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA) and the Water Environment Federation (WEF).
- Wang, L., Yao, Y., Zhang, Z., Sun, L., Lu, W., Chen, W., and Chen, H., (2014), "Activated carbon fibers as an excellent partner of Fenton catalyst for dyes decolonization by combination of adsorption and oxidation", *Chemical Engineering Journal*, 251, 348-354.
- Wen, S., Kuo, L., and Wu, N., (2009), "Fenton degradation of 4-chlorophenol contaminated water promoted by solar irradiation", *Solar Energy*, 84, 59-65.
- World Health Organization (WHO), (2003), "International standards for drinking water", Geneva.