

بهینه‌سازی تصفیه فنل آبی با پرسولفات در حضور یون آهن

سمیه شاهسون^۱، مهربان صادقی^۲، عبدالمجید فدایی^۳، مرتضی سدهی^۴، طاهره رضوی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد ۲- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد

(نویسنده مسئول) ۳۳۳۰۲۹۹ (۰۳۸۱) sadeghilir@yahoo.com

۳- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد

۴- استادیار گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد

(دریافت ۹۳/۵/۱ پذیرش ۹۳/۹/۲۰)

چکیده

ترکیبات فنلی در بین آلاینده‌های دارای تقدم قرار می‌گیرند و اثرات سوء بر سلامت انسان و موجودات زنده دارند. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به لحاظ بازده بسیار بالا، جنبه‌های بهداشتی و محیط زیستی مطلوب، از چشم‌انداز مطلوبی در حذف آلاینده‌ها در آب و فاضلاب برخوردار هستند. پرسولفات از نظر اکسیدکنندگی، نسبت به بسیاری از اکسیدکننده‌ها قوی‌تر است، به‌ویژه وقتی همراه با آهن به‌کار رود باعث تولید رادیکال‌های سولفات می‌شود که پتانسیل اکسیداسیون بالاتری را ایجاد خواهد کرد. در این پژوهش سعی شد با فعال‌سازی پرسولفات با یون آهن بهترین شرایط برای حذف فنل از محیط‌های آبی به‌دست آید. طرح آزمایش‌ها بر اساس روش آماری تاگوچی و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ انجام شد. چهار عامل و هر کدام با پنج سطح برای تعیین شرایط بهینه حذف فنل در نظر گرفته شد. زمان تماس ۱۲۰ دقیقه، نسبت مولار پرسولفات به آهن ۵:۴ و pH برابر ۳، شرایط بهینه تصفیه فنل با اکسیداسیون پرسولفات/یون آهن بود. میزان حذف فنل در شرایط بهینه برای غلظت‌های ۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌گرم در لیتر فنل به ترتیب ۷۰۸/۷۰±۰/۹۴/۹۳ و ۶۷۵/۲۱±۰/۵۸/۲۱ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در بین پارامترهای مؤثر بر این فرایند، pH محیط با ۵۴/۸۰ درصد بیشترین و غلظت پرسولفات با ۱۱/۰۵ درصد کمترین عامل مؤثر بودند. با کاربرد این فرایند می‌توان میزان فنل با غلظت‌هایی که در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شود را بین ۵۹ تا ۹۵ درصد حذف کرد.

واژه‌های کلیدی: فرایند پرسولفات/آهن، رادیکال‌های آزاد، محیط‌های آبی، فنل، مواد آلی

۱- مقدمه

آلاینده‌های دارای تقدم است [۳، ۴ و ۵]. سمیت حاد ناشی از فنل باعث ایجاد اختلال جدی در سیستم گوارش، آسیب رساندن به کلیه‌ها، کبد، نقص در عملکرد دستگاه گردش خون و تشنج می‌شود [۲].

سازمان بهداشت جهانی^۲ غلظت ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر در آب آشامیدنی را به‌عنوان حداکثر غلظت مجاز فنل در نظر گرفته است [۶]. فنل و مشتقات آن در محدوده غلظت‌های مختلف در فاضلاب صنایع مختلف از قبیل پالایشگاه‌های نفت، کوره‌های زغال سنگ، کک‌سازی، کارخانه پتروشیمی و غیره موجود است و از طریق تخلیه فاضلاب‌های این صنایع وارد محیط می‌شود [۲ و ۷]. روش‌های مختلفی از جمله فرایندهای جذبی، اکسیداسیون پیشرفته، روش‌های بیولوژیکی و روش‌های الکتروشیمیایی، برای حذف فنل از محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته است [۸-۱۲]. یکی از

تولیدات صنعتی روز به روز رو به گسترش است و افزایش تولیدات به منزله افزایش مصرف مواد اولیه در کشورها و افزایش آلاینده‌هایی است که توسط این واحدهای صنعتی، منابع محیط‌زیستی را به شدت آلوده می‌سازد. هر واحد صنعتی با توجه به فرایند تولید، آلاینده‌های خاصی را به محیط تخلیه می‌نماید [۱]. از جمله این آلاینده‌ها فنل است که به‌دلیل اثرات سمی و خاصیت سرطانزای خود توجه بسیاری از متخصصان محیط زیست را به خود جلب کرده است [۲]. فنل یا هیدروکسی بنزن (C₆H₆O) یک هیدروکربن حلقوی جامد، بی‌رنگ و یا سفید رنگ است [۳].

ترکیبات فنلی به‌دلیل ویژگی‌های خاص نظیر سمیت، اثر بر طعم و بو و اثر سوء بر سلامت انسان و موجودات زنده بر اساس طبقه‌بندی آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا^۱ در دسته

² World Health Organization (WHO)

¹ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش یک مطالعه تجربی از نوع مداخله‌ای است. تمامی ترکیبات شیمیایی استفاده شده در این مطالعه با درصد خلوص بالای ۹۷ درصد از شرکت مرک^۱ تهیه شد. اندازه‌گیری pH به وسیله pH متر مدل متروهم^۲ صورت گرفت و برای تنظیم میزان آن از محلول‌های هیدروکسید سدیم و اسید کلریدیک یک نرمال استفاده شد. غلظت فنل با استفاده از روش رنگ‌سنجی موجود در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب (چاپ بیستم، بخش D ۵۵۳۰) تعیین شد [۲۰]. در این روش از فنل به‌عنوان استاندارد ترکیبات فنلی استفاده شد و نتایج به‌صورت غلظت فنل گزارش شد. فنل موجود در نمونه به واسطه واکنش ۴-آمینو آنتی پیرن در حضور فروسیانید پتاسیم به‌عنوان سوبسترای تولید کننده رنگ تعیین شد و مقادیر جذب در طول موج ۵۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. تولید رنگ در این طول موج مستقیماً با غلظت ترکیبات فنلی در محلول تناسب دارد. برای تهیه منحنی استاندارد غلظت-جذب، ۱۶ غلظت در محدوده غلظت‌های ۵۰، ۵۰۰، ۲۵۰ و ۷۵۰ انتخاب و به هر کدام از آنها مقدار مشخصی از معرف ۴-آمینو آنتی پیرن اضافه شد و توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مقدار جذب هر کدام اندازه‌گیری شد. منحنی غلظت-جذب رسم شد و پس از اندازه‌گیری جذب نمونه‌های آزمایش، بر طبق منحنی استاندارد، مقدار غلظت باقیمانده هر آزمایش مشخص شد. با توجه به اینکه فنل یک ترکیب فرار است، بنابراین برای حذف خطاهای ناشی از آن، محلول مورد نیاز برای هر بار آزمایش به‌صورت روزانه آماده شد [۲۰].

طرح آزمایش‌ها بر اساس روش آماری تاگوچی انجام شد که بر اساس آن، عوامل مؤثر در آزمایش‌ها به دو دسته کنترل پذیر (عوامل سیگنال، S) و غیر قابل کنترل (عوامل اختشاش یا نویز) تقسیم می‌شوند. در این روش از تحلیل نسبت سیگنال به نویز برای تعیین بهترین اجرای آزمایش یا بهترین ترکیب بندی سطوح عوامل مختلف برای دستیابی به پاسخ بهینه استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این نسبت بسته به این که هدف، چه نوع بهینه‌سازی باشد، متفاوت است. از آنجا که در این تحقیق پاسخ در نظر گرفته شده، درصد حذف فنل بود، بنابراین از طریق بهینه‌سازی پاسخ، هدف و نسبت S/N با استفاده از رابطه ۲ تعیین شد

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{(1/y_1^2 + 1/y_1^2 + \dots + 1/y_1^2)}{n} \quad (2)$$

¹ Merck

² Metrohm

روش‌های مؤثر حذف آلاینده‌ها اکسیداسیون پیشرفته است که بر پایه تولید رادیکال‌های آزاد با قدرت اکسیداسیون بالا بوده و بسیاری از ترکیبات شیمیایی آلی را به مواد معدنی تبدیل می‌کند [۱۳ و ۱۴]. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته با مزایایی از قبیل جنبه‌های بهداشتی و محیط زیستی مطلوب و بازده بسیار بالا نسبت به دیگر روش‌ها، چشم‌انداز مطلوبی در حذف فنل و سایر آلاینده‌های مشابه در آب و فاضلاب دارد [۱۵].

یکی از اکسیدکننده‌هایی که در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است، پرسولفات است که با فعال‌سازی آن می‌توان رادیکال‌های آزاد سولفات تولید کرد. پرسولفات یکی از قوی‌ترین اکسیدکننده‌هاست و پتانسیل اکسیداسیون بالاتری [E0 = 2.01 V] نسبت به بسیاری از اکسیدکننده‌ها دارد. همچنین ویژگی‌هایی از قبیل واکنش سریع‌تر، پایداری بیشتر و در نتیجه تخریب بیشتر، نگهداری آسان، حمل و نقل بهتر، حلالیت بالا و ارزان‌تر بودن نسبت به دیگر اکسیدانت‌ها باعث برتری پرسولفات شده است. با وجود تمام مزیت‌ها، واکنش پرسولفات با آلاینده‌ها کند است و برای تسریع این واکنش‌ها نیاز به کاتالیزور است. یکی از کاتالیزورهای مؤثر برای فعال‌سازی پرسولفات، یون آهن است که موجب تحریک پرسولفات شده و تولید رادیکال‌های سولفات می‌کند که نسبت به پرسولفات، پتانسیل اکسیداسیون [E0 = 2.5-] 3.1 V بالاتری دارد و موجب تجزیه آلاینده‌ها می‌شود [۱۶ و ۱۷]. اصول کلی فرایند اکسیداسیون پیشرفته پرسولفات/آهن را می‌توان در رابطه ۱ خلاصه کرد



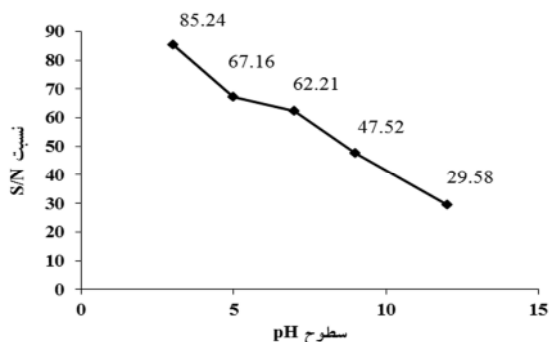
بر خلاف رادیکال‌های هیدروکسیل که به‌طور غیر انتخابی عمل می‌کنند، رادیکال‌های سولفات به‌عنوان یک اکسید کننده انتخابی عمل کرده و با ترکیبات آلی معین به‌ویژه مشتقات بنزن دارای گروه‌های فعال کننده، واکنش می‌دهد [۱۸]. به علاوه $SO_4^{\cdot -}$ تقریباً خنثی بوده و از لحاظ آلودگی مورد توجه نیست به‌طوری که از طرف آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا در رده دوم استانداردهای آب تا حداکثر غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر در آب‌های آشامیدنی قرار گرفته است [۱۹].

در این پژوهش سعی شد نحوه فعال‌سازی پرسولفات با یون آهن و میزان تأثیر آن در تصفیه محیط‌های آبی حاوی غلظت‌های مختلفی از فنل در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد. یافتن شرایط بهینه برای بیشترین میزان حذف فنل از جمله مهم‌ترین استراتژی‌های مطالعه حاضر بود.

جدول ۱ - عوامل و سطوح در نظر گرفته شده در طراحی آزمایش‌ها

| عامل | واحد | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ | سطح ۴ | سطح ۵ |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH اولیه محلول | - | ۳ | ۵ | ۷ | ۹ | ۱۲ |
| غلظت یون آهن | میلی مولار | ۲ | ۴ | ۶ | ۸ | ۱۰ |
| غلظت یون پرسولفات | میلی مولار | ۴ | ۸ | ۱۰ | ۱۲ | ۱۴ |
| زمان | دقیقه | ۱۰ | ۲۰ | ۴۰ | ۸۰ | ۱۲۰ |

واریانس در طراحی تاگوچی بین pH و درصد حذف رابطه معنی‌داری وجود داشت ($P < 0.05$). در pH های قلیایی به دلیل افزایش هیدروکسید محیط و نیز تبدیل شدن Fe^{+2} به Fe^{+3} در طول فرایند، آهن به شکل هیدرواکسید فریک $Fe(OH)_3$ رسوب شده و به این ترتیب از چرخه کاتالیستی خارج می‌شود [۲۲]. در مطالعه‌ای که توسط ملکو تیان و همکاران در سال ۲۰۱۰ بر روی حذف فنل به روش فنتون انجام شد، pH برابر ۳ به‌عنوان میزان بهینه معرفی شده است [۲۳]. در مطالعه دیگر که توسط سابرامانیا واسودن در سال ۲۰۱۴ به‌عنوان حذف فنل از آب به‌وسیله روش پروکسی الکتروکاتالیز انجام شد، هر چه محیط اسیدی‌تر می‌شد، راندمان حذف فنل نیز افزایش می‌یافت [۲۴]. همچنین مطالعه‌ای که توسط ملکی و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر روی حذف فنل به روش اکسیداسیون پیشرفته انجام گرفت نشان داد که سرعت تجزیه فنل با کاهش pH افزایش می‌یابد و شرایط اسیدی شرایط مناسب‌تری برای حذف فنل است [۲۵].



شکل ۱ - تأثیر pH محیط بر میزان حذف فنل به وسیله فرایند تلفیقی پرسولفات/آهن، شرایط بهینه $pH=3$ و S/N برابر ۸۵/۲۴

۳-۲- تأثیر غلظت یون آهن

غلظت آهن یکی از فاکتورهای مهم در این فرایند است. یون‌های آهن در ۵ غلظت ۲، ۴، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی مولار مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده بین غلظت آهن و درصد حذف رابطه معنی‌داری وجود دارد ($P < 0.05$). شکل ۲ میزان تأثیر غلظت‌های متفاوت آهن در حذف فنل را نشان می‌دهد. نتایج

که در این رابطه

Ya مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش و n تکرار هر آزمایش است. در این تحقیق هر چه مقدار S/N بیشتر باشد، راندمان حذف آلاینده نیز بهتر است و اطمینان به وجود می‌آید که اثر عوامل اختشاش در مقایسه با اثر عوامل اصلی حداقل است و پاسخ نهایی کمترین حساسیت را نسبت به عوامل غیر قابل کنترل دارد [۲۱]. چهار عامل و هر کدام با پنج سطح برای تعیین شرایط بهینه حذف فنل در نظر گرفته شد (جدول ۱).

به‌منظور طراحی آزمایش‌ها از نرم افزار مینیبی تب ۱۶ استفاده شد. حاصل طراحی آزمایش‌ها، یک جدول با ۲۵ آزمایش بود که این ۲۵ آزمایش برای هر یک از غلظت‌های ۵۰، ۵۰۰، ۵۰ و ۷۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌طور جداگانه با دو بار تکرار انجام شد و تعداد ۲۰۰ آزمایش به انجام رسید. پس از تعیین شرایط بهینه با بهترین وضعیت هر عامل آزمایشی با سه تکرار بر روی هر یک از غلظت‌ها انجام شد تا درصد حذف فنل در هر غلظت مشخص شود، بنابراین ۲۱۲ آزمایش برای این پژوهش به انجام رسید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر pH

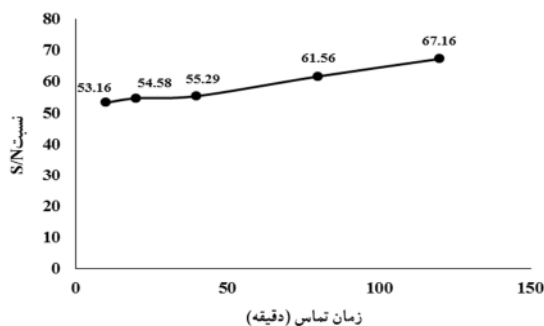
برای بررسی تأثیر pH محیط واکنش بر روی کارایی فرایند پرسولفات/آهن، pH در پنج محدوده ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۲ میلی مولار تنظیم شد و حذف فنل به‌طور جداگانه تحت تجربیات آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج نشان داد که pH اولیه یکی از عوامل مؤثر بر حذف فنل است. با توجه به شکل ۱ با افزایش pH از ۳ تا ۱۲ نرخ پاسخ S/N به شدت کاهش می‌یابد و هر چه محیط قلیایی‌تر می‌شود، S/N کاهش و در نتیجه درصد حذف هم کم می‌شود. علاوه بر این از شکل ۱ می‌توان استنباط نمود که روند کاهش می‌تواند جذف با افزایش pH در محدوده خنثی کاهش یافته است (شیب منحنی در این ناحیه کمتر است). بنابراین تغییرات pH بین ۵ تا ۷ که غالباً در بیشتر فاضلاب‌ها قابل مشاهده است، کمترین تأثیر را بر کاهش راندمان حذف خواهد داشت. همچنین بر اساس آنالیز

¹ Minitab 16

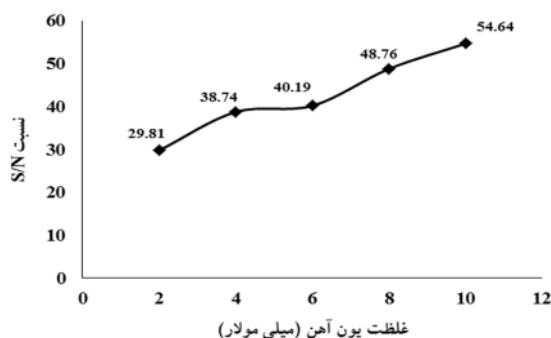
آزمایش نشان داد که غلظت ۱۰ میلی مولار به عنوان بهترین شرایط برای حذف فنل در این فرایند است.

با افزایش غلظت آهن در محیط، بازدهی حذف فنل افزایش یافت و این به دلیل آن است که آهن نقش مهمی را در تولید رادیکال‌های آزاد سولفات ایفا می‌کند و افزایش یون آهن باعث افزایش تولید $SO_4^{\bullet-}$ و در نتیجه بالا رفتن راندمان حذف می‌شود [۲۶]. چن و همکاران در سال ۲۰۰۹ در مطالعه‌ای بر روی حذف MTBE^۱ توسط فرایند پرسولفات / آهن دریافتند که با افزایش غلظت آهن، کارایی حذف MTBE نیز افزایش می‌یابد [۲۷]. زو و همکاران در سال ۲۰۱۰ مطالعه‌ای بر روی تجزیه رنگ نارنجی جی در محیط‌های آبی به وسیله پرسولفات و آهن انجام دادند که نتایج نشان داد هر چه غلظت آهن در محیط بیشتر باشد، حذف رنگ نارنجی جی نیز بیشتر است [۲۸]. همچنین مطالعه انجام شده توسط لیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ در رابطه با حذف تتراکلرو اتیلن^۲ به روش پرسولفات / آهن نشان داد که هر چه غلظت آهن بالاتر باشد، فرایند حذف نیز مطلوب‌تر خواهد بود [۲۹].

افزایش می‌یابد که منجر به تولید مقادیر بیشتری از رادیکال‌های آزاد می‌شود و بنابراین میزان حذف متناسب با آن افزایش می‌یابد [۲۹]. در مطالعه‌ای که توسط علیرضا رحمانی و همکاران در سال ۲۰۰۶ بر روی حذف فنل با روش اکسیداسیون پیشرفته UV/TiO₂ صورت گرفت، دریافتند که با افزایش زمان ماند، درصد حذف فنل افزایش می‌یابد [۳۱]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ در تحقیقی تحت عنوان تجزیه ۴ و ۲ دی نیترو تولوئن با استفاده از پرسولفات و آهن دریافتند که با افزایش زمان تماس، رادیکال آزاد سولفات تشکیل شده و در نتیجه حذف آلاینده افزایش می‌یابد [۳۲]. همچنین در تحقیقی که توسط لین و همکاران در سال ۲۰۱۱ با عنوان حذف فنل به روش پرسولفات فعال شده با اولتراسونیک انجام شد، دریافتند هر چه زمان تماس افزایش یابد غلظت آلاینده در فاضلاب کاهش پیدا می‌کند [۳۳].



شکل ۳- تأثیر زمان تماس پرسولفات / آهن با فنل بر میزان حذف آن در فرایند تلفیقی پرسولفات / آهن، شرایط بهینه ۱۲۰ دقیقه با S/N برابر ۶۷/۱۶



شکل ۲- تأثیر غلظت یون آهن بر حذف فنل بوسیله فرایند تلفیقی پرسولفات / آهن، شرایط بهینه غلظت آهن ۱۰ میلی مولار با نسبت S/N برابر ۵۴/۶۴

۳-۴- تأثیر غلظت پرسولفات

غلظت پرسولفات در این تحقیق بر روی مقادیر ۴، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی مولار تنظیم شد و میزان حذف فنل برای هر کدام از حالت‌های ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفت. بیشترین میزان حذف فنل وقتی اتفاق افتاد که غلظت پرسولفات محیط واکنش ۸ میلی مولار بود. شکل ۴ تغییرات نسبت S/N در مقابل غلظت‌های مختلفی از پرسولفات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است حذف فنل با افزایش غلظت پرسولفات رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد به گونه‌ای که نمی‌توان یک روند یکنواخت را برای این فرایند نسبت به افزایش یا کاهش پرسولفات محیط قائل شد. جدول ۲ شرایط بهینه به دست آمده برای حذف فنل را با استفاده از روش پرسولفات / آهن در سطوح مختلفی از pH، غلظت یون آهن و پرسولفات و همچنین زمان تماس نشان می‌دهد.

۳-۳- تأثیر زمان

زمان تماس پرسولفات / آهن با فنل در پنج حالت ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ دقیقه انتخاب شد و آزمایش‌های تعیین کننده میزان حذف فنل طی این زمان‌ها انجام شد. در زمان ۱۲۰ دقیقه نسبت S/N به بیشترین میزان یعنی ۶۷/۱۶ رسید که نشان دهنده حداکثر میزان حذف فنل در شرایط می‌باشد (شکل ۳). زمان مناسب واکنش یکی از عوامل مؤثر در انجام فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته است [۳۰]. با گذشت زمان شانس تماس بین یون آهن و پرسولفات

¹ Methyl Tert-Butyl Ether (MTBE)

² Tetrachloroethylene (TCE)

زیر بود: pH برابر ۵۴/۰۸ درصد، غلظت آهن برابر ۱۸/۰۲ درصد، زمان تماس برابر ۱۶/۱۳ درصد و غلظت پرسولفات برابر ۱۱/۰۵ درصد. جدول ۳ میانگین میزان حذف و انحراف معیار را برای غلظت‌های مختلفی از فنل اولیه نشان می‌دهد.

جدول ۳- درصد حذف و انحراف معیار حاصل از سه بار تکرار آزمایش‌ها در شرایط بهینه فرآیند پرسولفات/آهن

| غلظت (mg/L) | انحراف معیار ± میانگین درصد حذف |
|-------------|---------------------------------|
| ۵۰ | ۹۴/۹۳ ± ۷۰/۸ |
| ۲۵۰ | ۸۴/۱۴ ± ۱/۱۹۲ |
| ۵۰۰ | ۷۱/۴۶ ± ۹۶/۹ |
| ۷۵۰ | ۵۸/۲۱ ± ۶۷/۵ |

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه نتایج زیر را به دنبال داشت:

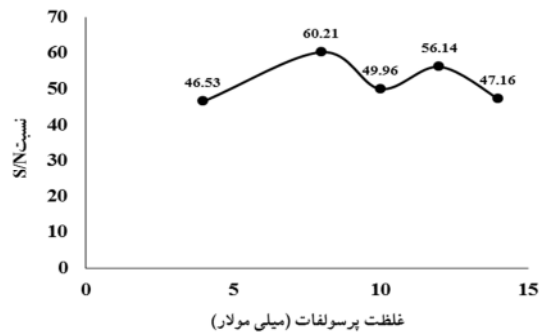
۱- در کاربرد روش تلفیقی پرسولفات/آهن برای حذف فنل در محیط‌های آبی چهار پارامتر غلظت آهن، زمان تماس، غلظت پرسولفات و pH مورد توجه هستند. در بین پارامترهای مؤثر بر فرایند، pH محیط با ۵۴/۸۰ درصد بیشترین عامل مؤثر و غلظت پرسولفات با ۱۱/۰۵ درصد کمترین عامل مؤثر است.

۲- شرایط بهینه تصفیه فنل با اکسیداسیون پرسولفات/یون آهن در pH برابر ۳، زمان تماس ۱۲۰ دقیقه و نسبت مولار پرسولفات به آهن ۵:۴، اتفاق افتاد.

۳- با کاربرد فرایند تلفیقی اکسیداسیون پیشرفته پرسولفات/آهن می‌توان میزان فنل با غلظت‌هایی که در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شود را بین ۵۹ تا ۹۵ درصد حذف کرد.

۶- قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت محترم فناوری و تحقیقات دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد و کارکنان محترم آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب این دانشگاه که تمام تلاش لازم برای انجام این پژوهش را به‌کار گرفتند، اعلام می‌دارند.



شکل ۴- تأثیر غلظت پرسولفات بر حذف فنل در فرایند پرسولفات/آهن، شرایط بهینه غلظت ۸ میلی مولار پرسولفات و نسبت S/N برابر ۶۰/۲۱

جدول ۲- سطوح بهینه عوامل مورد بررسی در آزمایش‌ها

| عامل | واحد | سطح بهینه | مقدار سطح بهینه |
|-------------------|------------|-----------|-----------------|
| pH اولیه محلول | - | ۱ | ۳ |
| غلظت یون آهن | میلی مولار | ۵ | ۱۰ |
| غلظت یون پرسولفات | میلی مولار | ۲ | ۸ |
| زمان | دقیقه | ۵ | ۱۲۰ |

همانطور که از داده‌های موجود در جدول مشخص است بیشترین میزان حذف در pH برابر ۳، نسبت مولار آهن به پرسولفات ۵/۴ و زمان تماس ۱۲۰ دقیقه دقیقه رخ داده است. آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش غلظت آلاینده (یعنی فنل) میزان حذف برای شرایط بهینه کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که میزان حذف فنل ۵۸ درصد برای غلظت فنل اولیه ۷۵۰ میلی‌گرم در لیتر، ۷۱ درصد برای غلظت فنل اولیه ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، ۸۴ درصد برای غلظت فنل اولیه ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر و ۹۵ درصد برای غلظت فنل اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. همچنین عامل pH بیشترین و عامل پرسولفات کمترین تأثیر را بر آزمایش‌ها داشتند و درصد تأثیر هر یک از عوامل بر فرایند پرسولفات/آهن به صورت

۷- مراجع

1. Masoudi Nejad, M.R., Yazdanbakhsh, A.R., and Mehrabi, Y.E. (2004). "Comparison removal efficiency of chrome nickel and cadmium from industrial sewages whit pH controllers." *J. Hakim Research*, 7(3), 52-58.
2. Busca, G., Berardinelli, S., Resini, C., and Arrighi, I. (2008). "Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments." *J. Hazardous Materials*, 160, 265-288.
3. Rappoport, Z. (2003). *The chemistry of phenols*, John Wiley and Sons, Ltd., NY.

4. Ersoz, D., Denizli, A., Sener, I., Atilir, A., Ditemiz, S., and Say, R. (2004). "Removal of phenolic compounds with nitro phenol imprinted polymer based on π - π and hydrogen bonding interactions." *J. Separation and Purification Technology*, 38, 173-179.
5. Kinsley, C., and Nicell, J.A. (2000). "Treatment of aqueous phenol with soybean peroxidase in the presence of polyethylene glycol." *J. Bioresource Technol.*, 22, 139-146.
6. U.S. Environmental Protection Agency. (1987). *Federal register*, Washington DC, US .EPA. 52, 25861 - 25962.
7. Moussavi, G., Mahmoud, M., and Barikbin, B. (2009). "Biological removal of phenol from strong wastewater using a novel MSBR." *J. Water Research*, 43(5), 1293-1302.
8. Tor, A., Cengeloglu, Y., Aydin, E.A., and Ersoz, M. (2006). "Removal of phenol from aqueous phase by using neutralized red mud." *J. Colloid Interf. Sci.*, 300, 498-503.
9. Roostaei, N., and Tezel, H. (2004). "Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption." *J. Environment Management*, 70, 157-164.
10. Hemati, B., Nasserli, S., Nabizadeh, R., Mahvi, A.H., and Javadi A.H. (2011). "Photo catalytic degradation of phenol in aqueous solution by Fe^{3+} -doped TiO_2 /UV process." *J. Health and Environment*, 3(4), 369-380.
11. Adar, S.S., Chen, M.Y., Lee, D.J., and Ren, N.Q. (2006). "Degradation of phenol by aerobic granules and isolated yeast *Candida tropicalis*." *J. Biotechnology Bioengineering*, 96, 844-852.
12. Abdelwahab, O., Amin, N.K., and Ashtoukhy, E.Z. (2004). "Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater." *J. Hazardous Materials*, 163, 711-716.
13. Azbar, N., Yonar, T., and Kestioglu, K. (2004). "Comparison of various advanced oxidation processes and Chemical treatment methods for COD and color removal from polyester and acetate fiber dyeing effluent." *J. Chemosphere*, 5, 35-43.
14. AL-Momeni, F., Touraud, E., Degorce-Dumas, J.R., Roussy, J., and Thomas, O. (2002). "Biodegradability enhancement of textile dyes and textile wastewater by UV photolysis." *J. Photochem.*, 135, 191-197.
15. Shokoohi, R., Ebrahimzadeh, L., Rahmani, A.R., and Ebrahimi, S.J.A.D. (2010). "Comparison of the advanced oxidation processes in phenol degradation in laboratory scale." *J. Water and Wastewater*, 20-4(72), 30-35. (In Persian)
16. Xu, X.R., Li, L., Hao, Q., Liu, J.L.L., Yu, Y.Y., and Li, H.B.L. (2012). "Activation of per sulfate and its environmental application." *J. Environment and Bioenergy*, 1(1), 60-81.
17. Block, P.A., Richard, A.B., and Robinson, D. (2004). "Novel activation technologies for sodium per sulfate in situ chemical oxidation." *Proc., Fourth International Conference on the Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compound*, Monterey, CA.
18. Huang, Y.F., and Huang, Y.H. (2009). "Identification of produced powerful radicals involved in the mineralization of bisphenol A using a novel UV- $Na_2S_2O_8/H_2O_2$ -Fe (II, III) two-stage oxidation process." *J. Hazardous Materials*, 162, 1211-1216.
19. Salari, D., Niaei, A., Aber, S., and Rasoulifard, M.H. (2009). "The photo oxidative destruction of C.I. Basic Yellow 2 using UV/ $S_2O_8^{2-}$ process in a rectangular continuous photo reactor." *J. Hazardous Materials*, 166, 61-66.
20. APHA. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 19th Ed., Washington D. C.
21. Roy, R.K. (2001). *Design of experiments using the taguchi approach*, John Wiley and Sons, NY.
22. Wagner, M., and Nicell, J. (2002). "Detoxification of phenolic solutions with horseradish peroxidase and hydrogen peroxide." *J. Water Research*, 36, 4041-4052.
23. Malakotian, M., and Asadi, M. (2010). "Efficiency of fenton oxidation process in removal of phenol in aqueous solution." *J. Water and Wastewater*, 22-2(78), 46-52. (In Persian)

24. Vasudevan, S. (2014). "An efficient removal of phenol from water by peroxi-electrocoagulation processes." *J. Process Engineering*, 2, 53-57.
25. Maleki, A., Mahvi, A.H, and Naddafi, K. (2007). "Bioassay of phenol and its intermediate products using daphnia magna." *J. Water and Wastewater*, 19-2 (66), 24-19. (In Persian)
26. Anotai, J., Masomboon, N., Chuang C. L., and Lu, M. C. (2011). "Per sulfate oxidation for the aniline degradation in aqueous systems." *J. Water Sci. Technol.*, 63, 1434-1440.
27. Chen, K. F., Kao, C.M., Wu, L.C., Surampalli, R.Y., and Liang, S. H. (2009). "Methyl tert-butyl ether (MTBE) degradation by ferrous ion-activated per sulfate oxidation: Feasibility and kinetics." *J. Water Environment Research*, 81, 687-694.
28. Xu, X. R., and Li, X. Z. (2010). "Degradation of azo dye orange G in aqueous solution by persulfate with ferrous ion." *J. Separation and Purification Technology*, 72, 105-111.
29. Liang, C.J., Bruell, C.J., Marley, M.C., and Sperry, K.L. (2004). "Persulfate oxidation for in situremediation of TCE. I. Activated by ferrous ion with and without a per sulfate-thiosulfate redox couple." *J. Chemosphere*, 55, 1213-1223.
30. Ahmadi, M., Vahabzade, F., Moffarrah, E., and Aliabadi, M. (2004). "Application of advanced oxidation of dephenolization of olive oil mill wastewater processing by fenton reagents." *Proc. 9th National Congress of Chem. Eng.*, Tehran University, Tehran, Iran, 23-25.
31. Rahmani, A., and Enayati Movafagh, A. (2006). "Investigation of photocatalytic pegradation of phenol through UV/TiO₂ process." *J. Water and Wastewater*, 17-2 (58), 32-36. (In Persian)
32. Young, S., Kang, S.G., Kim, D.W., and Chiu, P.C. (2011). "Degradation of 2,4-dinitrotoluene by persulfate activated with iron sulfides." *J. Chemical Engineer*, 172, 641-646.
33. Lin, T. Y., Liang, C., and Chen, H. J. (2011). "Feasibility study of ultraviolet activated persulfate oxidation of phenol." *J. Chemosphere*, 82, 1168 -1172.