

# کارایی فرایند اکسیداسیون فنتون در حذف فنل از محلولهای آبی

محمد ملکوتیان<sup>۱</sup> مهدی اسدی<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۸/۱۱/۱۳ پذیرش ۸۹/۱۰/۷)

## چکیده

از ترکیبات مختلف آلاینده آب که عمدتاً از طریق فاضلابهای خام و پسابها به منابع آب راه می‌یابند، فنل دارای اهمیت ویژه‌ای است. این ماده ترکیب فراگیری است که از طریق طبیعی نیز وارد منابع آب می‌شود. از آنجایی که فنل ماده‌ای سمی است و حذف آن به‌روشن بیولوژیک مشکل است، استفاده از فرایند اکسیداسیون فنتون به‌دلیل سهولت اجرا، امکان به‌کارگیری آن در مقیاسهای مختلف و ملاحظات اقتصادی، مناسب به‌نظر می‌رسد. در این مطالعه میزان کارایی فرایند اکسیداسیون فنتون در حذف فنل از محلول آبی مورد بررسی قرار گرفت. این مقاله حاصل یک مطالعه تجربی است که در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفت. محلول مورد آزمایش به‌طور سنتتیک از غلظتهای مختلف فنل تهیه شد و تأثیر فرایند اکسیداسیون فنتون در حذف آن از محلول سنتتیک با توجه به متغیرهای pH، زمان اختلاط، و غلظت ماده اکسیدان مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیری غلظت فنل با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-vis طبق روشهای موجود در کتاب آزمایش‌های شیمیایی استاندارد آب و فاضلاب انجام گردید. حذف ۹۶ درصد فنل در غلظتهای بهینه  $H_2O_2$  ۰/۵ مولار، سولفات آهن ۰/۰۳ مولار، pH بهینه فرایند ۴-۳ و زمان مناسب اختلاط ۳۰ دقیقه به‌دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فرایند اکسیداسیون فنتون بازده بالایی در حذف فنل از محلولهای آبی دارد. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات مشابهی که حذف فنل از فاضلاب روغن زیتون و همچنین حذف پنتا کلرو فنل به‌کمک این فرایند را بررسی کرده‌اند، همخوانی داشت.

**واژه‌های کلیدی:** فرایند اکسیداسیون فنتون، فنل، اکسیداسیون پیشرفته، غلظت، زمان واکنش، پراکسید هیدروژن

## Efficiency of Fenton Oxidation Process in Removal of Phenol in Aqueous Solutions

Mohammad Malakootian<sup>1</sup> Mehdi Asadi<sup>2</sup>

(Received Feb. 1, 2010 Accepted Dec. 28, 2010)

### Abstract

Among the different compounds of water pollutants which generally discharge into water resources through raw wastewater and effluent, phenol is particularly important. This substance is an abundant compound which also enters into water resources naturally. Since phenol is a toxic substance and eliminating it through a biological method is difficult, using the process of Fenton Oxidation seems appropriate because of the facility and the possibility of application in different scales and also economic considerations. In this study, the efficiency of Fenton oxidation process in the removal of phenol from aqueous solutions is examined. Method: This is an experimental study which is carried out in laboratory scale. The solution under study is prepared synthetically from different phenol concentrations. The optimized parameters in Fenton process including pH, reaction time and dosage of  $H_2O_2$  and  $Fe^{2+}$  were considered. Phenol concentration is measured using a spectrophotometer (UV-Vis) according to procedure of the standard method book. In the Fenton process, maximum phenol

1. Prof. of Environmental Health Eng., School of Public Health and Environmental Health Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman (Corresponding Author) (+98 341) 3205074 m.malakootian@yahoo.com

2. M.Sc. Student, School of Public Health, Kerman University of Medical Science, Kerman

۱- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، و مرکز تحقیقات بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان (نویسنده مسئول) ۳۲۰۵۰۷۴ (۰۳۴۱)

m.malakootian@yahoo.com  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان

removal was found 96 % at following conditions pH=3-4, reaction time =30 min, 0.5 molar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and 0.03 molar ferric sulfate. The results of this study showed that Fenton Oxidation process has a high efficiency in the removal of phenol from aqueous solutions.

**Keywords:** Fenton Oxidation Process, Phenol, Advanced Oxidation, Concentration, Reaction Time, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

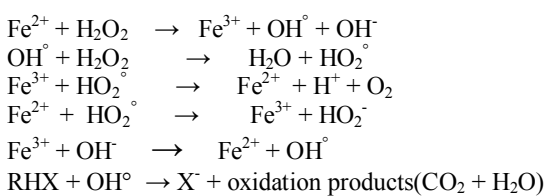
## ۱- مقدمه

از میان آلاینده‌های مختلفی که در بیشتر فاضلاب‌های خام صنعتی وجود دارد، فنل دارای اهمیت ویژه است. فنل از هیدروکربن‌هایی است که آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا آن را در دسته آلاینده‌های درجه اول<sup>۲</sup> قرار داده است [۱ و ۲]. این ماده و مشتقات آن در صنایع متعددی از جمله صنایع تولید رزین و پلاستیک، رنگ، سموم دفع آفات، داروسازی، پالایشگاه‌های نفت، صنایع پتروشیمی، معادن زغال سنگ، صنایع فولاد و آلومینیوم و سرب، شوینده‌ها، منسوجات مصنوعی و چرم‌سازی کاربرد دارد و لذا به‌عنوان یک آلاینده مهم در فاضلاب صنایع مذکور مطرح است [۳]. در مواد ضد عفونی‌کننده و پاک‌کننده، دود سیگار و دود آگزوز وسایل نقلیه نیز مقادیری از فنل یافت می‌شود [۴]. فنل به‌مدت طولانی در محیط باقی نمی‌ماند ولی اگر به‌طور مداوم در محیط رها شود، می‌تواند به‌عنوان یک تهدید زیست‌محیطی مطرح باشد [۵]. لذا به‌منظور کاهش اثرات مضر محیط‌زیستی آن، باید بر انجام تصفیه مناسب و یا جلوگیری از تخلیه فاضلاب‌های محتوی ترکیبات فنل بدون اعمال استانداردهای لازم تمرکز نمود.

سازمان جهانی بهداشت<sup>۳</sup> غلظت ۰/۰۰۱ میلی‌گرم در لیتر در آب آشامیدنی را به‌عنوان حداکثر غلظت مجاز در نظر گرفته است [۶]. همچنین استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران برای تخلیه مواد فنل‌دار به این شرح است: حداکثر غلظت مجاز تخلیه فنل به آب‌های سطحی، مصارف کشاورزی و آبیاری برابر ۱ میلی‌گرم در لیتر و برای تخلیه به چاه جذب ناچیز است [۷]. همچنین طبق استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا میزان مجاز فنل در منابع آب جوامع انسانی و آب مورد استفاده برای پرورش ماهی ۰/۳ و ۲/۶ میلی‌گرم در لیتر است [۸].

یکی از روش‌های اکسیداسیون شیمیایی که به‌منظور تبدیل مولکول‌های پیچیده و مقاوم به مولکول‌های ساده‌تر استفاده می‌شود، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته<sup>۴</sup> (AOPs) است. این فرایندها به‌منظور تصفیه پساب‌های صنعتی با موفقیت به‌کار گرفته شده‌اند. در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته که بر مبنای تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل (OH<sup>•</sup>) متمرکز است، از پراکسید هیدروژن

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>، ازن O<sub>3</sub> یا هوا به‌عنوان اکسیدکننده و از امواج فرا بنفش به‌عنوان انرژی خارجی استفاده می‌شود [۹]. فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته‌ای که در سال‌های اخیر در تصفیه آب و انواع فاضلاب‌ها استفاده شده‌اند شامل ازن و اشعه فرابنفش، ازن همراه UV، O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV، UV/O<sub>3</sub> و فرایند فنتون هستند. از میان فرایندهای متفاوت اکسیداسیون پیشرفته، استفاده از فرایند فنتون به‌دلیل سهولت اجرا، امکان به‌کارگیری آن در مقیاس‌های مختلف و ملاحظات اقتصادی، مناسب شناخته شده است [۱۰]. اصول کلی فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته که توسط معرف‌های فنتون (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>) انجام می‌پذیرند را می‌توان به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان کرد [۱۱]



تاکنون روش‌های متفاوتی برای تصفیه پساب‌های حاوی مواد آلی مقاوم از جمله فنل به‌کار برده شده که از جمله می‌توان به جذب بر روی کربن فعال و زغال چوب، اکسیداسیون نوری، جذب سطحی و تخریب فوتوکاتالیستی فنل، روش‌های حذف آنزیمی، تکنیک‌های مختلف اکسیداسیون شیمیایی و فتوشیمیایی پیشرفته و ترکیبی از روش‌های مذکور اشاره کرد [۳ و ۱۲-۱۶]. حذف سمیت فنل به‌وسیله هیدروژن پراکسید و پراکسیداز، حذف فنل از فاز آبی به‌وسیله گل قرمز<sup>۵</sup> و همچنین اکسیداسیون پنتاکلوروفنل به‌وسیله فرایند فنتون از دیگر مطالعات انجام گرفته بر روی فنل هستند [۱۷-۲۰]. هدف اصلی این تحقیق، مطالعه امکان حذف فنل با استفاده از فرایند اکسیداسیون فنتون و بررسی عوامل مؤثر در این فرایند بود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد و وسایل

برای انجام آزمایش‌ها از فنل با درجه خلوص ۹۹/۵ درصد، معرف‌های فروسیانید پتاسیم و ۴-آمینو آنتی پیرین ساخت شرکت

<sup>1</sup> US. Environmental Protection Agency (USEPA)

<sup>2</sup> Priority Pollutant

<sup>3</sup> World Health Organization (WHO)

<sup>4</sup> Advanced Oxidation Process (AOPs)

<sup>5</sup> Red Mud

مرک<sup>۱</sup> آلمان استفاده گردید. مقادیر جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis PU 8740 مدل فیلیپس<sup>۲</sup> اندازه‌گیری گردید و تنظیم pH نیز توسط دستگاه pH متر مدل متراهم<sup>۳</sup> انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

## ۲-۲- دامنه تغییرات متغیرها

در این مطالعه، یون‌های آهن در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ مولار، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در غلظت‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ مولار pH، در چهار محدوده ۱، ۲، ۳ و ۴، محلول فنل در پنج غلظت ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۱۰ و ۵ میلی‌گرم در لیتر و زمان اختلاط نیز در چهار حالت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه انتخاب گردید. دامنه تغییرات هر کدام از پارامترهای مورد آزمایش با توجه به مطالعات قبلی در مورد فرایند اکسیداسیون فنتون، تعیین گردید [۱۳، ۱۷، ۲۰ و ۲۱].

## ۲-۳- روش اندازه‌گیری غلظت فنل

غلظت فنل با استفاده از روش کالریتری موجود در کتاب روشهای استاندارد آزمایش‌های شیمیایی آب و فاضلاب چاپ بیستم، بخش D 5530 تعیین گردید [۲۲]. این روش تمام ترکیبات فنلی موجود در محیط را اندازه‌گیری نمی‌کند و خود فنل به‌عنوان استاندارد ترکیبات فنلی برای روشهای رنگ‌سنجی انتخاب و نتایج به‌صورت غلظت فنل گزارش می‌شود. فنل موجود در نمونه به‌واسطه واکنش ۴-آمینو آنتی پیرین در حضور فروسیانید پتاسیم به‌عنوان سوبسترای تولیدکننده رنگ تعیین شد و مقادیر جذب در طول موج ۵۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis اندازه‌گیری شد و غلظت فنل با استفاده از منحنی کالیبراسیون تعیین شد. تولید رنگ در این طول موج مستقیماً با غلظت ترکیبات فنلی در محلول تناسب دارد. برای تهیه منحنی استاندارد غلظت-جذب، غلظت‌های متفاوتی از محلول فنل تهیه گردید و به هر کدام از آنها مقدار مشخصی از معرف ۴-آمینو آنتی پیرین (AAP-4) اضافه شد و در انتها منحنی غلظت-جذب برای غلظت‌های مختلف فنل رسم گردید. به‌دلیل اینکه فنل ماده فرآری است، بنابراین محلول مورد نیاز برای هر بار آزمایش به‌صورت روزانه آماده می‌گردید [۲۲].

متفاوت آهن با غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۸ مولار اضافه شد. تمام آزمایش‌های این مرحله در شرایط ثابت با مقدار H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (غلظت ۰/۵ مولار)، زمان تماس ۶۰ دقیقه و pH برابر ۳ انجام گرفت. برای تنظیم pH نمونه‌ها از اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال استفاده گردید. نمونه‌ها با همزن و با دور ۹۰ rpm هم زده شد و پس از طی مدت زمان اختلاط، به هر یک از نمونه‌ها مقدار مشخصی از هر دو معرف آزمایش اضافه گردید. برای اندازه‌گیری تأثیر پارامترهای دیگر شامل غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>، pH، زمان تماس و غلظت فنل آزمایش‌ها به همین صورت تکرار شد. در هر مرحله فقط یکی از پارامترها به‌صورت متغیر انتخاب و سایر پارامتر ثابت در نظر گرفته شد.

## ۲-۵- تعیین دز بهینه آهن و پراکسید هیدروژن

به‌منظور تعیین دز بهینه آهن و پراکسید هیدروژن، بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها به هر یک از آنها مقادیر متفاوتی از H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> با غلظت ۰/۵ مولار و سپس سولفات آهن با غلظت ۰/۰۳ مولار افزوده شد، به این صورت که در نمونه اول ۲ میلی‌لیتر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و ۰/۷ میلی‌گرم سولفات آهن و در نمونه دوم نیز ۴ میلی‌لیتر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و ۱/۴ میلی‌گرم سولفات آهن و به همین ترتیب در نمونه‌های سوم و چهارم نیز ۶ و ۸ میلی‌لیتر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و ۲ و ۲/۸ میلی‌گرم سولفات آهن اضافه شد و pH نیز روی ۳ تنظیم گردید و مراحل آزمایش انجام شد. دز مناسب برای سولفات آهن ۲ ml/l و برای پراکسید هیدروژن ۶ ml/L به‌دست آمد که در این حالت راندمان حذف ۹۶ درصد بود. در جدول ۱ دز بهینه ماده اکسیدان و درصد بهینه حذف فنل مشخص شده است.

جدول ۱- دز بهینه ماده اکسیدان

راندمان حذف (%)	دز FeSO <sub>4</sub> (ml/L)	دز H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)
۸۰	۰/۷	۲
۹۰	۱/۴	۴
۹۶	۲	۶
۹۴	۲/۸	۸

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تأثیر غلظت یون‌های آهن

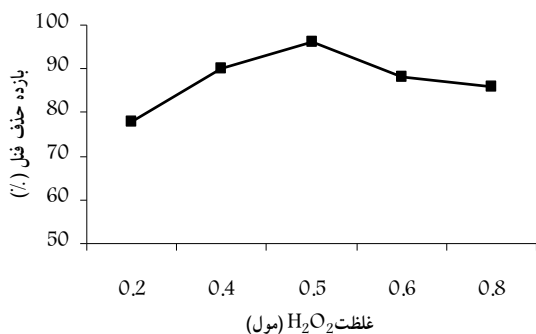
یون‌های آهن در پنج غلظت ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ مولار مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر، در غلظت‌های کمتر از ۰/۰۱ مولار یون‌های آهن، حذف فنل در سطح نسبتاً پایینی انجام گردید ولی با افزایش غلظت یون‌های آهن، بازدهی حذف فنل افزایش یافت. اما با

### ۲-۴- روش اندازه‌گیری تأثیر غلظت یون آهن

برای اندازه‌گیری تأثیر غلظت یون آهن ابتدا محلول فنل با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه شد. سپس به هر یک از نمونه‌ها مقادیر

<sup>1</sup> Merck  
<sup>2</sup> Philips  
<sup>3</sup> Metrohm 6971

۰/۶ و ۰/۸ مولار، در بازده حذف فنل تفاوت چشمگیری مشاهده نشد. در این مرحله بیشترین بازده فرایند مربوط به غلظت ۰/۵ مولار پراکسید هیدروژن با بازدهی حذف ۹۶ درصد بود. با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن، این ماده به اکسیژن و آب تجزیه شده و رادیکال‌های هیدروکسیل نیز با یکدیگر ترکیب می‌شوند. بنابراین حضور بیش از حد پراکسید هیدروژن نقش بازدارندگی از تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل را در پی دارد و موجب کاهش بازده فرایند می‌گردد [۱۶]. در مطالعه‌ای که رحمانی و همکاران بر روی فنل و به روش تخریب فتوکاتالیستی انجام دادند، غلظت بهینه پراکسید هیدروژن، ۰/۲۵ مولار به دست آمد [۲۱]. در حالی که در مطالعه‌ای که بر روی حذف سمیت فنل به وسیله پراکسید هیدروژن و همچنین اکسیداسیون فنل توسط پراکسیداز صورت پذیرفته است، غلظت بهینه پراکسید هیدروژن ۰/۶ و ۰/۶۸ مولار به دست آمده است. در این مطالعات به دلیل عدم استفاده از یون‌های آهن که نقش کاتالیزور در افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل را دارند، میزان مصرف پراکسید هیدروژن افزایش داشته است [۱۷، ۱۸].



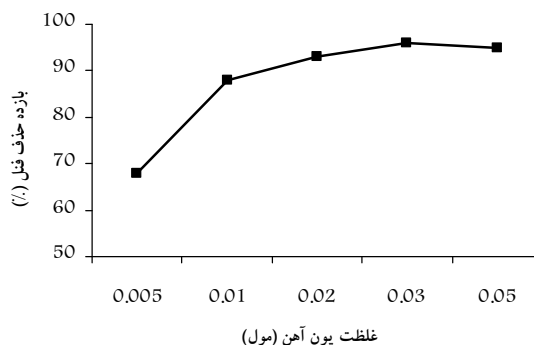
شکل ۲- تاثیر غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بر کارایی حذف فنل

### ۳-۳- تاثیر pH

برای بررسی تاثیر pH بر کارایی فرایند فنتون، pH در چهار محدوده ۱، ۲، ۳ و ۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد که pH بهینه برای فرایند اکسیداسیون فنتون در حذف فنل در محدوده ۲-۳ است که در این حالت راندمان حذف بین ۹۹/۵ تا ۹۸ درصد است و با افزایش آن، کارایی فرایند در حذف فنل کاهش می‌یابد (شکل ۳).

مقدار pH به‌طور مستقیم و غیر مستقیم در اکسیداسیون ترکیبات آلی و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل اثر می‌گذارد و کارایی اکسیداسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین پایین بودن pH پسابها در فرایند فنتون ضروری است. علت این است که رادیکال‌های هیدروکسیل و کمپلکس‌های هیدروکسوفریک به

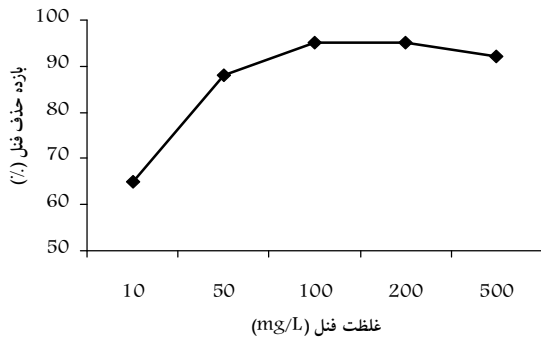
افزایش غلظت بیش از ۰/۳ مولار یون‌های آهن تغییر چشمگیری در بازدهی فرایند مشاهده نشد. در نتیجه غلظت ۰/۳ مولار یون آهن به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب گردید که بازدهی حذف آن برابر با ۹۶ درصد بود. شکل ۱ تاثیر غلظت متفاوت یون‌های آهن در بازدهی فرایند فنتون را نشان می‌دهد. در مطالعه احمدی و همکاران که حذف فنل از فاضلاب روغن زیتون به وسیله این فرایند بررسی شده است نیز با افزایش غلظت یون‌های آهن، کارایی فرایند افزایش یافته است [۷]. همچنین طی مطالعه‌ای که فرخی و همکاران بر روی حذف پنتاکلروفنل به وسیله معرف فنتون انجام داده‌اند نیز مشاهده شده است که افزایش غلظت یون‌های آهن تا ۰/۰۵ مولار موجب افزایش کارایی فرایند می‌شود اما در غلظتهای بالاتر از آن، کارایی فرایند کاهش می‌یابد [۲۰]. یون‌های آهن II تاثیر بسزایی در بازدهی فرایند اکسیداسیون فنتون دارند. بدون حضور یون‌های آهن، رادیکال‌های هیدروکسیل تشکیل نشده و کاهش در سطح غلظت فنل صورت نمی‌گیرد. با اضافه نمودن یون‌های آهن، حذف مواد فنلیک تا نقطه‌ای شتاب می‌گیرد. بعد از آن با افزایش بیشتر یون‌های آهن در بازدهی فرایند تأثیری حاصل نمی‌شود. افزایش مقدار یون‌های آهن، رنگ محلول را قهوه‌ای کرده و در این حالت این یون‌ها با رادیکال‌های هیدروکسیل (OH<sup>•</sup>) تشکیل کمپلکس می‌دهند که این امر موجب کاهش رادیکال‌های هیدروکسیل آزاد در محلول می‌گردد و نهایتاً کارایی فرایند کاهش می‌یابد [۱۶].



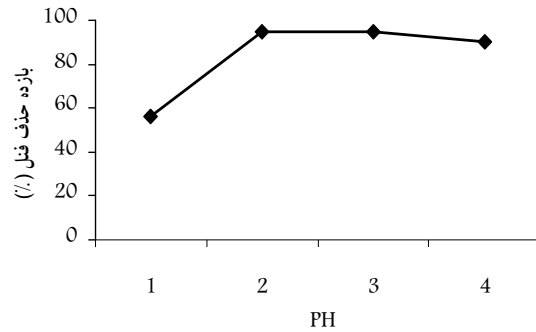
شکل ۱- تاثیر غلظت یون آهن در بازده حذف فنل

### ۳-۲- تاثیر غلظت پراکسید هیدروژن

پراکسید هیدروژن در پنج غلظت ۰/۲، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۱۰ مولار مورد آزمایش قرار گرفت. بر این اساس، همانطور که در شکل ۲ نیز مشخص گردیده است، با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن، راندمان حذف افزایش یافت. اما افزایش غلظت بیش از ۰/۵ مولار، میزان کارایی فرایند را کاهش داد و در غلظتهای

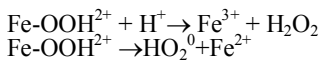


شکل ۴- تأثیر غلظت فنل بر کارایی فرایند



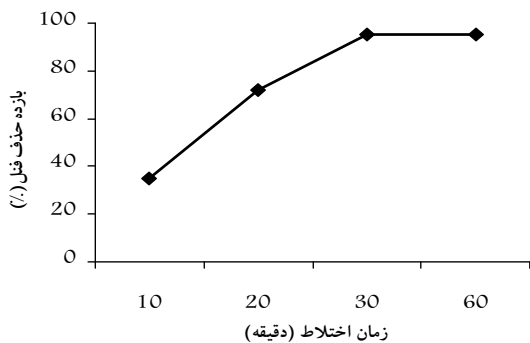
شکل ۳- تأثیر pH بر کارایی حذف فنل

اکسیدان و افزایش زمان انجام تصفیه کامل می‌شود. بنابراین با افزایش غلظت، راندمان فرایند به میزان جزئی کاهش می‌یابد. از طرفی پایین بودن غلظت ماده آلی در محیط نیز باعث کاهش بازده فرایند می‌گردد. در این حالت وجود مقدار بیشتر ماده اکسیدکننده در محیط، تأثیر منفی بر بازده فرایند دارد. به این صورت که هنگامی که غلظت یون‌های آهن در محیط نسبت به غلظت فنل افزایش یابد، با رادیکال‌های هیدروکسیل کمپلکس پایدار را تشکیل می‌دهد و بنابراین مقدار رادیکال‌های آزاد محیط کاهش یافته و در نتیجه بازده فرایند کاهش می‌یابد [۲۰].



#### ۳-۵- تأثیر زمان اختلاط

زمان اختلاط در چهار حالت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه انتخاب شد و آزمایش‌ها طی این زمان‌ها انجام گردید. در زمان اختلاط ۳۰ دقیقه، راندمان ۹۰ درصد حاصل شد و از آن به بعد افزایش زمان اختلاط، تأثیری بر روی راندمان حذف نداشت (شکل ۵). در مطالعات مختلفی که در آنها فرایند فنتون مورد بررسی قرار گرفته، مشاهده شده است که زمان‌های بهینه به دست آمده در همین محدوده قرار دارند.



شکل ۵- تأثیر زمان اختلاط بر بازده حذف فنل

مقدار زیادی در محیط اسیدی تشکیل می‌شوند. در pHهای پایین‌تر از ۲/۵، تشکیل  $\text{Fe(OH)}^{2+}$  که با پراکسید هیدروژن به آرامی واکنش می‌دهد باعث کاهش مقدار رادیکال‌های هیدروکسیل شده و در نتیجه بازدهی فرایند کاهش می‌یابد. در pHهای قلیایی نیز  $\text{Fe}^{2+}$  به  $\text{Fe}^{3+}$  تبدیل شده و به صورت  $\text{Fe(OH)}_3$  رسوب نموده و از چرخه کاتالیستی خارج می‌شود [۱۷]. در اغلب فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، نتایج به دست آمده نمایانگر pH بهینه اسیدی است. در مطالعه‌ای که توسط علی‌آبادی و همکاران انجام شده و در آن از عملیات اسید کراکینگ و فرایند فنتون برای تصفیه پساب روغن زیتون استفاده شده است، pH بهینه فرایند برابر ۳ به دست آمده است. این در حالی است که در اکسیداسیون پیشرفته محلول‌های آلی به کمک نانوذرات آهن III، pH مناسب بالای ۵ به دست آمد [۱۱ و ۲۳].

#### ۳-۴- تأثیر غلظت فنل

محلول فنل در پنج غلظت ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که در غلظت‌های پایین فنل بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، بازده حذف نسبتاً پایین است. با افزایش غلظت تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف برابر ۹۵ درصد به دست آمد. اما با افزایش بیشتر غلظت فنل، بازده فرایند تغییر چندانی نمود. شکل ۴ گویای تأثیر غلظت فنل در کارایی فرایند است. نتایج مطالعه جمشیدی و همکاران بر روی حذف فنل از محلول‌های آبی با استفاده از فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته نیز مؤید این نکته است که در غلظت‌های پایین فنل، بازده حذف نسبتاً پایین است و با افزایش غلظت فنل تا میزان مشخصی بازده فرایند افزایش و بعد از آن نیز بازده کاهش می‌یابد [۱۶].

بالا بودن غلظت ماده آلی در محیط موجب مصرف بیشتر ماده

زمان مناسب واکنش یکی از عوامل مؤثر در انجام فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته است. با گذشت زمان، میزان محصولات حد واسط ناشی از تجزیه پراکسید هیدروژن بیشتر شده و از طرفی با ایجاد اختلاط در محیط آزمایش، شانس تماس یون‌های آهن با محصولات حد واسط تجزیه پراکسید هیدروژن افزایش می‌یابد و در نهایت تولید رادیکال هیدروکسیل در محیط بیشتر شده و بنابراین بازده فرایند افزایش می‌یابد [۷].

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فرایند اکسیداسیون فنتون یک روش مناسب برای حذف فنل از محلولهای آبی است. سرعت اکسیداسیون به عوامل زیادی از جمله مقدار pH محیط، غلظت پراکسید هیدروژن و یون‌های آهن اضافه شده و مدت زمان واکنش بستگی دارد. در این مطالعه بیشترین مقدار حذف فنل در pH بین

۲-۳، غلظت پراکسید هیدروژن برابر ۰/۵ مولار و دز ۶ ml/L، غلظت یون آهن برابر ۰/۰۳ مولار و دز ۲ ml/L و زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه به دست آمد. در این شرایط مقدار حذف فنل ۹۶ درصد بود و این روش در مقایسه با دیگر روشها، از راندمان بالاتری برخوردار بود. با توجه به این نتایج و با توجه به شرایط خاص محیطی و در مقایسه با راندمان سایر روشها، امکان کاربرد این روش برای فاضلابهای محتوی فنل قابل طرح است.

#### ۵- قدردانی

به این وسیله از کمیته تحقیقات بهداشت محیط که با تصویب این طرح راه را برای انجام این تحقیق هموار نمودند و همچنین تمامی کسانی که در اجرای این تحقیق همکاری نمودند تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

#### ۶- مراجع

- 1- Bekkouche, S., Bouhelassa, M., Hadj Salah, N., and Meghlaoui, F.Z. (2004). "Study of adsorption of phenol on titanium oxide (TiO<sub>2</sub>)."*J. of Desalination*, 166, 355-362.
- 2- Christine, A., Murray, C.A., and Parson, S.A. (2006). "Preliminary laboratory investigation of disinfection by-product precursor removal using an advanced oxidation process." *J. Water and Environmental*, 20 (3), 123-129.
- 3- Singh, N., and Singh, J. (2002). "An enzymatic method for removal of phenol from industrial effluent." *Prep. Biochem. Biotechnol.*, 32 (2), 127-133.
- 4- Vimal, C.S., Mahadeva, M.S., Indra, D.M., and Basheswar, P.(2006). "Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics." *J. Colloids and Surfaces*, 272, 89-104.
- 5- Nadia, R., and Tezel, F.H. (2004). "Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption." *J. Environ. Manage.*, 70, 157-164.
- 6- Smonath, M., Sunil, K., Amal, K.M., and Maohong, F.(2006). "Removal of phenols from waters environmental by activated carbon, bagasse ash and wood charcoal." *J. Chem. Eng.*, 2, 22-27.
- 7- Ahmadi, M., Vahabzade, F., Moffarrah, E., and Aliabadi, M.(2004). "Application of advanced oxidation of dephenolization of olive oil mill wastewater processing by fentons reagent." *Proc. 9<sup>th</sup> National Congress of Chem. Eng.*, Tehran University, Tehran, Iran, 23-25. (In Persian)
- 8- Gogate, P.R., and Pandit, A.B.(2004). "A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions." *J. Advances in Environmental Research*, 8(3-4), 501-551.
- 9- Peres, J.A., Heredia, J.B.D., and Dominguez, J.R.(2004). "Integrated fenton's reagent coagulation/flocculation process for the treatment of crock processing wastewater." *J. of Hazardous Materials*, 107, 115-121.
- 10- Murray, C.A., and Parsons, S.A.(2004). "Advanced oxidation processes: Flosheet options for bulk natural organic matter removal." *J. Water Supply*, 4(4), 113-119.
- 11- Aliabadi, M., Fazel, Sh., and Vahabzadeh, F. (2006). "Application of acid cracking and fenton process in trating olive mill wastewater." *J. of Water and Wastewater*, 57, 30-33. (In Persian)

- 12- Dabrowski, A., Podkoscielny, P., Hubichi, Z., and Barczdak, M. (2005). "Adsorption of phenolic compounds by activated carbon-a critical review." *J. Chemosphere*, 58, 1049-1070.
- 13- Iliev, V., Mihaylova, A., and Bilyarska, L. (2002). "Photooxidation of phenols in aqueous solution." *J. Molecular Catalysis A: Chemical*, 184 (1-2), 121-130.
- 14- Akbal, F., and Nur Onar, A. (2003). "Photocatalytic degradation of phenol." *J. Environmental Monitoring and Assessment*, 83, 295-302.
- 15- Alemzadeh, I., and Mirzaei, F. (2008). "Phenol removal from industrial wastewater by HRP enzyme." *J. of Water and Wastewater*, 68, 2-8. (In Persian)
- 16- Jamshidi, N., Torabian, A., Azimi, A.K., Nabi Bidhendi, G. R., and Jafarzadeh, M.T. (2009). "Investigation of Phenol removal in aqueous solutions using advanced photochemical oxidation (APO)." *J. of Water and Wastewater*, 4, 24-29. (In Persian)
- 17- Wagner, M., and Nicell, J. (2002). "Detoxification of phenolic solutions with horseradish peroxidase and hydrogen peroxide." *J. of Water Research*, 36, 4041-4052.
- 18- Wilberg, K., Senhaimer, C.A., and Rubio, J. (2002). "Removal of aqueous phenol catalyzed by a low purity soybean peroxidase." *J. of Chem. Technol. Biotechnol.*, 77, 851-857.
- 19- Tor, A., Cengeloglu, Y., Aydin, M.E., and Ersoz, M. (2006). "Removal of phenol from aqueous phase by using neutralized red mud." *J. Colloid and Interface Science*, 300, 498-503.
- 20- Farrokhi, M., Mesdaghinia, A.R., and Nasser, S. (2003). "Oxidation of pentachlorophenol by fenton reagent." *J. Iranian Public Health*, 32, 6-11.
- 21- Rahmani, A., and Enayati Movafagh, A. (2006). "Investigation of photocatalytic degradation of phenol through UV/TiO<sub>2</sub> process." *J. of Water and Wastewater*, 58, 32-37. (In Persian)
- 22- APHA, AWWA, WPCF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater.*, 19<sup>th</sup> Ed., Washington D.C.
- 23- Zelmanov, G., and Semita, R. (2008). "Iron(III) oxide-based nanoparticles as catalysts in advanced organic aqueous oxidation." *J. of Water Research*, 49, 492-498.