

کارایی فرایند اکسیداسیون فنتون در حذف رنگ رودآمین B از محلول سنتتیک

سید علیرضا موسوی^۱ پرویز محمدی^۲ سید محمد پرستار^۳
مهدی غائبزاده^۴ فریده کماری^۵

(دریافت ۹۱/۱۲/۴ پذیرش ۹۲/۷/۵)

چکیده

خطرات بهداشتی و محیط زیستی از جمله مشکلات ناشی از دفع فاضلاب‌های حاوی مواد رنگزا است که به صورت خام یا با تصفیه نامناسب به محیط زیست و به ویژه آب‌های پذیرنده وارد می‌شوند. روش‌های تصفیه متداول، کارایی مناسبی را برای حذف این ترکیبات ندارند. لذا محققان روش‌هایی که توانایی تجزیه این ترکیبات سمی و یا سخت تجزیه پذیر را دارند، تحت عنوان فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته از جمله فرایند فنتون، برای این نوع فاضلاب‌ها پیشنهاد نموده‌اند. در این پژوهش، به صورت تجربی - مداخله‌ای در مقیاس آزمایشگاهی، کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ و COD مورد بررسی قرار گرفت. بررسی عوامل مؤثر در این فرایند (غلظت پراکسید هیدروژن، غلظت نمک آهن و زمان واکنش) در راکتورهای یک لیتری صورت گرفت. نتایج آزمایش نشان داد فرایند تحت شرایط: غلظت اولیه رود آمین B برابر ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، COD برابر ۲۷۰ میلی‌گرم در لیتر، pH برابر ۳، غلظت آهن برابر ۴۰ میلی‌گرم در لیتر و H_2O_2 برابر ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و زمان واکنش ۶۰ دقیقه، بهترین کارایی را در حذف رنگ و COD به ترتیب به میزان ۵۸ درصد و ۴۸ درصد از محلول آبی رودآمین B دارد.

واژه‌های کلیدی: اکسیداسیون پیشرفته، فرایند فنتون، پراکسید هیدروژن، فاضلاب نساجی، رود آمین B

Efficiency of Fenton Oxidation in Rodamine B Removal from Synthetic Solutions

S. A. Mousavi¹ P. Mohammadi² S.M. Parastar³
M. Ghaebzadeh⁴ F. Kamari⁵

(Received Feb. 22, 2013 Accepted Sep. 27, 2013)

Abstract

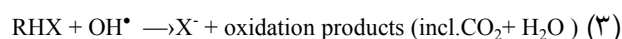
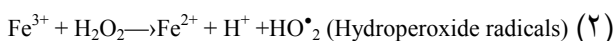
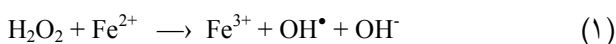
Environmental and health hazards are regarded among the problems associated with the disposal of raw or undertreated wastewaters containing reactive dyes discharged into the environment, and especially into receiving waters. Conventional treatment methods lack the desirable efficiency in removing these compounds. For this type of wastewater, researchers, therefore, recommend methods, collectively called "advanced oxidation processes" such as the Fenton process, that are capable of removing toxic and non-biodegradable compounds. This experimental-intervention study was carried out on the laboratory scale to investigate the Rodamine B and COD removal efficiency of the Fenton oxidation process. The effects of such parameters as H_2O_2 , Fe^{2+} , and reaction time were investigated using a 1-L batch reactor. The results revealed that the process achieved a decolorization efficiency of 58% and a COD removal of 48% after 60 min of reaction time when the initial concentrations of Rodamine B, COD, Fe^{2+} , and H_2O_2 in the influent were 100 mg/L, 270 mg/L, 40 mg/L, and 200 mg/L, respectively, at a constant pH level of 3.

Keywords: Advanced Oxidation, Fenton Process, Hydrogen Peroxide, Textile Wastewater, Rodamine B.

1. PhD. of Environmental Eng., Faculty of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah (Corresponding Author) (+98 831) 4299003 seyedarm@yahoo.com
2. PhD. of Environmental Eng., Applied Science and Tech. University, Kermanshah
3. MSc Student of Water and Wastewater Eng., Applied Science and Tech. University, Kermanshah
4. MSc Student of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah
5. Grad. MSc of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah

- ۱- دکترای مهندسی محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه (نویسنده مسئول) ۴۲۹۹۰۰۳ (۰۸۳۱) seyedarm@yahoo.com
- ۲- دکترای مهندسی محیط زیست، مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی صنعت آب و برق، مجتمع عالی آموزشی، کرمانشاه
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و فاضلاب، مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی صنعت آب و برق، مجتمع عالی آموزشی، کرمانشاه
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه
- ۵- دانش‌آموخته کارشناسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه

اکسیداسیون پیشرفته^۱ است. مکانیسم اصلی عملکرد فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، تولید رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر است. رادیکال‌های هیدروکسیل (OH^\bullet) به‌علت تمایل شدید در پذیرفتن الکترون، به‌طور مؤثری موجب تخریب ترکیبات شیمیایی می‌شوند. فرایند فنتون ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) یکی از روش‌های اکسیداسیون پیشرفته است که در سال‌های اخیر برای حذف و افزایش تجزیه‌پذیری آلاینده‌های سمی و دیر تجزیه‌پذیر کاربرد چشمگیری داشته است. همچنین این فرایند به‌دلیل سهولت اجرا، امکان به‌کارگیری در مقیاس‌های مختلف و ملاحظات اقتصادی، برای تصفیه آلاینده‌ها مناسب شناخته شده است [۹ و ۱۰]. واکنش‌های فرایند فنتون برای حذف مواد آلاینده از طریق تولید رادیکال هیدروکسیل با حضور پراکسید هیدروژن به‌عنوان اکسیدان و یون آهن به‌عنوان کاتالیست در یک محیط اسیدی مطابق رابطه ۱ تا ۳ رخ می‌دهد [۹]



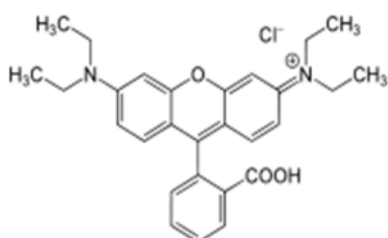
کارایی فرایند فنتون تحت تأثیر پارامترهای محیطی و فرایندی مختلف از جمله دما، pH، زمان واکنش، غلظت آهن، نوع آهن و غلظت H_2O_2 است [۱۱]. که در این میان پراکسید هیدروژن به‌عنوان یک عامل اصلی و تأثیرگذار در فرایند فنتون مطرح است که تولید رادیکال هیدروکسیل در نتیجه حضور آن است. رادیکال‌های هیدروکسیل، طبیعت نامشخصی در اکسیداسیون مواد آلی دارند، بنابراین تعیین میزان غلظت H_2O_2 و به دست آوردن نسبت بهینه پراکسید هیدروژن به ماده آلی ضروری است [۱۲ و ۱۳]. در مطالعات مختلف، کارایی فرایند در حذف آلاینده‌ها با تأکید بر بهینه‌سازی فرایند از نظر پارامترهای مختلف ذکر شده مد نظر بوده است و تحقیقات بسیاری در مورد کارایی اکسیداسیون پیشرفته در حذف یا افزایش تصفیه‌پذیری فاضلاب‌های مختلف انجام شده است. چن و چو در سال ۲۰۰۷ فرایند فنتون را برای حذف آترازین به‌کار بردند. در سال ۲۰۰۰، بلترن و همکاران از تصفیه تلفیقی از نزن و لجن فعال برای تصفیه مشترک فاضلاب خانگی و صنایع کشاورزی استفاده کردند [۱۴ و ۱۵]. ملکو تیان و اسدی در سال ۱۳۸۹ برای حذف فنل از محلول‌های آبی، از فرایند

فاضلاب صنایع نساجی حاوی انواع مختلفی از آلاینده‌ها از جمله مواد رنگی، COD، BOD و دیگر ترکیبات مقاوم و سمی است که تخلیه آنها به محیط به‌ویژه آب‌های پذیرنده، همراه با مخاطرات بهداشتی و محیط زیستی غیر قابل جبران است. وجود رنگ در آب‌های پذیرنده، از نفوذ نور جلوگیری می‌کند و باعث وقوع پدیده اتریفیکاسیون می‌شود که فعالیت فتوسنتتیکی را مختل می‌کند و مانع رشد موجودات زنده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که رنگ‌های به‌کار رفته در این صنایع دارای اثرات بهداشتی مختلفی از جمله سرطان‌زایی، جهش‌زایی و آلرژی‌زایی هستند. از سوی دیگر به‌علت بالا بودن مقدار COD پساب‌های حاوی رنگ، تخلیه آنها به آب‌های پذیرنده همراه با افت اکسیژن محلول و به‌خطر افتادن حیات موجودات آبزی است [۱، ۲ و ۳]. لذا تصفیه و کاهش مخاطرات ناشی از دفع غیر بهداشتی این نوع فاضلاب‌ها از دهه‌های گذشته، همواره مورد توجه محققان و مهندسان محیط زیست بوده است.

هرچند پیشرفت‌های اخیر صنعت نساجی، به‌دلیل به‌کارگیری مواد رنگزایی که دارای ساختار پایدارتری هستند، محصولات با کیفیت بهتر و ماندگارتری را تولید نموده است، اما مواد رنگزای جدید در پساب این صنایع به‌سهولت توسط روش‌های متداول تصفیه، (فیزیکی، بیولوژیکی و حتی تجزیه شیمیایی) قابل حذف نیستند و یا این روش‌ها، کارایی مناسبی را برای دستیابی به استانداردهای تخلیه این‌گونه پساب‌ها به محیط نشان نداده‌اند [۱، ۴، ۵ و ۶]. انتخاب روش تصفیه برای این نوع فاضلاب‌ها به‌عوامل مختلفی از جمله عوامل محیطی، ترکیب آلاینده موجود، کیفیت تصفیه مورد نیاز و تا حدود زیادی جنبه اقتصادی فرایند بستگی دارد [۲ و ۷]. هر چند سیستم‌های بیولوژیکی در تصفیه و حذف مواد آلی بسیار مؤثراند ولی در رنگ‌زدایی کاربرد محدودی دارند، به‌ویژه برای فاضلاب‌های حاوی رنگ‌های غیرقابل تجزیه بیولوژیکی که به‌دلیل ارزان بودن و پایداری بیشتر، امروزه مصرف چشمگیری دارند. همچنین باید اشاره نمود که سیستم‌های فیزیکی و شیمیایی مانند جذب سطحی و دیگر روش‌ها به‌دلیل تولید حجم زیادی از پسماند و ضایعات برای کاربردهای صنعتی مناسب نیستند [۸]. این شرایط، محققان را برای به‌کارگیری روش‌های پیشرفته و کارا در حذف مواد رنگزا ترغیب نموده است. لذا در سال‌های اخیر، محققان روش‌های مختلفی را برای تجزیه مولکول‌های پیچیده و مقاوم به مولکول‌های ساده‌تر مورد بررسی قرار داده‌اند که یکی از نتایج این مطالعات، معرفی روش‌های جدید تحت عنوان فرایندهای

¹ Advance Oxidation Processes (AOP)

است که با غلظت ماده رنگزا در فاضلاب‌های واقعی نیز مطابقت دارد. به‌منظور تهیه این غلظت، توزین ماده رنگی و دیگر مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش، با ترازوی دیجیتالی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۱ گرم مدل FG-H با ظرفیت ۲۰۰ گرم انجام شد. در این پژوهش برای تهیه نمونه‌های سنتتیک، از رودآمین B با فرمول شیمیایی $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$ و درجه خلوص ۹۹ درصد محصول شرکت مرک^۱ آلمان، که یک رنگ سنتزی و از دسته رنگ‌های زانتن با فرمول گسترده مطابق شکل ۱ است، استفاده شد.



شکل ۱- ساختار شیمیایی رنگ رودآمین B

همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شد، بهترین pH برای انجام این فرایند، محدوده اسیدی است، لذا در این پژوهش، pH نمونه‌ها با استفاده از یک pH متر دیجیتالی مدل pH-462 برای تمام آزمایش‌ها بر روی ۳ تنظیم شد. نتایج مطالعه دامنه‌یابی بر روی محلول رنگی، با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز دامنه مناسبی از غلظت‌های پراکسید هیدروژن و سولفات آهن با فرمول شیمیایی $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ را برای انجام این پژوهش فراهم نمود که هم از نظر بعد زمانی و هم کاهش مصرف مواد شیمیایی، اجرای پروژه را هموارتر می‌نمود. در این پژوهش درصد خلوص پراکسید هیدروژن محصول شرکت مرک آلمان ۳۵ درصد، چگالی برابر ۱/۱۳، جرم مولکولی برابر ۳۴/۰۱ و درصد خلوص سولفات آهن محصول شرکت مرک آلمان ۹۹/۵ درصد و جرم مولکولی برابر ۲۷۸/۰۲ بود. با توجه به تعداد غلظت اکسیدان (۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰، $250 \text{ mg/L } H_2O_2$)، کاتالیست ($10, 20, 40, 80 \text{ mg/L } Fe^{2+}$) و زمان واکنش (۲۰، ۶۰، ۸۰ دقیقه)، در کل ۴۸ نمونه و با توجه به سه بار تکرار آزمایش‌ها، ۱۴۴ نمونه برداشت شد و برای تعیین مقدار COD و رنگ، مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها به‌صورت سنتتیک با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر که COD اولیه آنها تعیین مقدار شد، تهیه و در چهار بشر یک لیتری ریخته شدند. سپس بشرها بر روی همزن مغناطیسی محصول شرکت پارس آزما‌ی ایران با مدل T-1 با دور rpm ۱۱۰ قرار گرفتند و با اضافه کردن اسید

اکسیداسیون فنتون استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که حذف ۹۶ درصد فنل در غلظت‌های بهینه H_2O_2 برابر ۰/۵ مولار، سولفات آهن برابر ۰/۰۳ مولار و pH بین ۳ تا ۴ در زمان مناسب واکنش ۳۰ دقیقه به‌دست آمد [۱۶]. نتایج پژوهش بلانکو و همکاران در سال ۲۰۱۲ با فرایند فنتون و فرایند تلفیقی (بیولوژیکی - فنتون) برای تصفیه فاضلاب نساجی به‌منظور استفاده مجدد نشان داد که هر دو روش، پس‌آبی با کیفیت مناسب برای استفاده مجدد بر طبق استاندارد RD 1620/2007 اسپانیا به دست می‌دهند [۱۷]. پژوهش پنیزا و سری سولا در سال ۲۰۰۹ برای حذف الیزارین قرمز با غلظت ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر توسط فرایند الکتروفنتون نشان داد که این فرایند در شرایط بهینه یون فرو، pH، شدت جریان، دما و زمان واکنش، راندمانی بیش از ۹۰ درصد برای حذف COD دارد [۱۸]. نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های پرکوسکی و کیوس در سال ۲۰۰۲ بر روی کاربرد معرف فنتون در تصفیه فاضلاب نساجی رنگرزی نشان داد که فرایند، علاوه بر کاهش چشمگیر در COD (۷۶ درصد) و مواد رنگی (۷۱ درصد)، قابلیت تجزیه بیولوژیکی را در فاضلاب این صنعت افزایش می‌دهد [۱۹].

مرور پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که روش‌های مختلف اکسیداسیون پیشرفته برای تصفیه فاضلاب‌های رنگی از کارایی مناسبی برخوردار است. اما باید تأکید نمود که فرایند فنتون به‌عنوان یک روش کارا با هزینه پایین‌تر، جایگاه ویژه‌ای را برای تصفیه این گونه فاضلاب‌ها دارد. هرچند مطالعات متعددی در خصوص بررسی کارایی اکسیداسیون پیشرفته در حذف و یا افزایش تصفیه پذیری انواع فاضلاب‌ها انجام گرفته است، اما کارایی فرایند از جنبه‌های مختلف هنوز تحت بررسی است. لذا در این پژوهش کارایی فرایند فنتون با تأکید بر تأثیر غلظت‌های مختلف اکسیدان در زمان‌های مختلف بر روی نمونه‌های سنتتیک در حذف رنگ و COD از محلول آبی رودآمین B مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

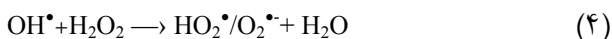
این مطالعه با هدف بررسی کارایی فرایند فنتون در حذف محلول رنگی رودآمین B به روش تجربی در مقیاس آزمایشگاهی در آزمایشگاه شیمی گروه مهندسی آب و فاضلاب مؤسسه آموزش عالی علمی- کاربردی صنعت آب و برق غرب، در دو مرحله انجام شد. ابتدا با مرور مطالعات گذشته و همچنین انجام یک مطالعه دامنه‌یابی، غلظت محلول رنگی، غلظت معرف فنتون، زمان مناسب واکنش و دیگر پارامترهای تأثیرگذار در کارایی فرایند تعیین شد. نتایج این مرحله نشان داد غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر این ماده رنگی در اکثر پژوهش‌ها، مبنای ساخت محلول‌های سنتتیک بوده

^۱ Merck

یون فرو بیشتر به صورت محلول بوده و در نتیجه قدرت اکسیدکنندگی رادیکال هیدروکسیل بیشتر می شود. در واقع اسیدها تا حدودی باعث پایداری پراکسید هیدروژن می شوند [۲۳]. لذا در این پژوهش تنها تأثیر سه پارامتر اصلی زمان واکنش، غلظت پراکسید هیدروژن و یون فرو در کارایی فرایند با هدف تعیین بهینه غلظت اکسیدان و زمان واکنش مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- اثر غلظت های مختلف H_2O_2

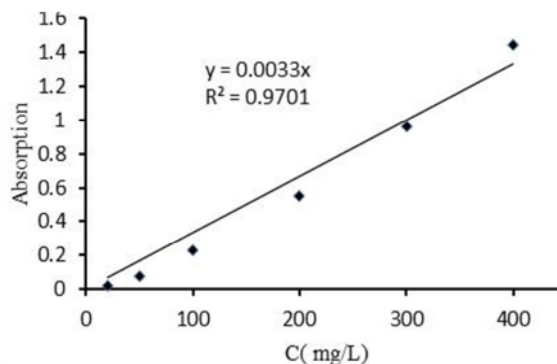
نتایج مطابق شکل های ۳ و ۴ نشان می دهند که با افزایش غلظت اکسیدان، پتانسیل اکسیداسیون فرایند افزایش می یابد که نتیجه آن، افزایش حذف رنگ و COD است. این نتایج موافق با نتایج به دست آمده از به کارگیری فرایند فنتون برای حذف دیگر آلاینده ها است [۱۰، ۲۲ و ۲۴]. شکل های ۳ و ۴ نشان می دهند که کارایی حذف و تجزیه رنگ و COD، در بالاترین غلظت یون آهن ۸۰ میلی گرم در لیتر، و زمان واکنش ۸۰ دقیقه، در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر پراکسید هیدروژن، به ترتیب ۴۸ و ۴۷ درصد است. هر چند پژوهش های دیگر، زمان ماند کمتر و غلظت های کمتری از پراکسید هیدروژن را برای حذف آلاینده ها مصرف نموده اند، اما همگی بر این نکته تأکید دارند که افزایش غلظت پراکسید هیدروژن یک عامل تأثیرگذار در پیشرفت فرایند و افزایش حذف آلاینده ها است. به طوری که هاو و همکاران در سال ۲۰۱۱ از غلظت پراکسید هیدروژن به عنوان یک پارامتر کلیدی در فرایند فنتون و شبه فنتون یاد نموده اند [۲۵]. زو و همکاران در سال ۲۰۰۹ اکسیداسیون شبه فنتون رودآمین B در حضور دو نوع آهن (II) و (III) را، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فرایند اکسیداسیون مستقیم به غلظت پراکسید هیدروژن وابسته است، به طوری که با افزایش غلظت آن، درصد حذف رنگ تا یک حداکثر افزایش یافت و سپس افزایش غلظت اکسیدان باعث کاهش درصد حذف رنگ شد که دلیل آن را تخریب رادیکال های هیدروکسیل به وسیله پراکسید هیدروژن مازاد اعلام نمودند [۲۶]. این نتایج موافق با یافته های پژوهش وه و همکاران در سال ۲۰۰۶ بود. وه گزارش نمود که رادیکال OH^\bullet ممکن است با پراکسید هیدروژن واکنش داده و تولید سوپر اکسید رادیکال هیدروپروکسی مطابق رابطه ۴ نماید [۲۷]



در پژوهش هاو و همکاران، اثر پراکسید هیدروژن در غلظت ۱ گرم در لیتر از آهن صفر ظرفیتی در زمان های واکنش مختلف در pH برابر ۴ برای حذف ۰/۱ میلی مول رود آمین B، مورد بررسی

سولفوریک یک نرمال، pH آن در محدوده ۳ تنظیم شد. در هر یک از این بشرها، غلظت های معینی از پراکسید هیدروژن و یون فرو اضافه و با توجه به زمان مورد نیاز واکنش، فرایند آغاز شد. در پایان زمان مورد نظر، همزن خاموش شد و برای جلوگیری از ادامه اکسیداسیون و نیز رسوب آهن، به تمام نمونه ها ماده قلیایی (سود یک نرمال) اضافه و مقدار pH در محدوده بالاتر از ۸/۵ تنظیم شد [۱۰ و ۲۰]. بعد از یک ساعت زمان ماند به منظور حذف و جلوگیری از تداخل H_2O_2 در اندازه گیری میزان واقعی COD، مقداری از این نمونه داخل آون ساخت محصول شرکت پارس طب در دمای ۴۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت قرار گرفت [۱۰]. سپس ظرف از آون بیرون آورده شد و از لایه رویی برای اندازه گیری میزان رنگ با استفاده از اسپکتروفوتومتر مدل Spectronic 21D و اندازه گیری COD به روش رفلکس بسته مطابق کتاب روش های استاندارد، نمونه به مقدار کافی برداشت شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۲۱].

برای تعیین غلظت ماده رنگی رود آمین B، مقدار λ_{max} از طریق دستگاه اسپکتروفوتومتر تعیین شد و طول موج غالب برای این ماده که ۶۰۰ نانومتر است، در تهیه و رسم منحنی کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت. منحنی کالیبراسیون مطابق شکل ۲ با تهیه نمونه هایی از محلول استاندارد با غلظت های ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در لیتر و اندازه گیری جذب آنها در طول موج ۶۰۰ نانومتر رسم شد. سپس به منظور تجزیه و تحلیل آماری نتایج به دست آمده، از نرم افزار اکسل استفاده شد.



شکل ۲- منحنی کالیبراسیون برای اندازه گیری غلظت محلول رنگی رود آمین B در طول موج غالب ۶۰۰ نانومتر

۳- نتایج و بحث

هر چند pH به عنوان یک پارامتر مؤثر در فرایند فنتون مطرح است، اما در پژوهش حاضر، تأثیر آن مورد بررسی قرار نگرفت و بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش های گذشته که بهترین مقدار را برای این پارامتر، محدوده اسیدی (pH برابر ۳) عنوان نموده اند، در این پژوهش نیز این مقدار مبنای قرار گرفت [۲۲]. در این شرایط،

که با افزایش غلظت آهن به ۸۰ میلی‌گرم در لیتر در تکرارهای مختلف، سیستم کارایی کمتری را از خود نشان داده است. این نتیجه با نتایج به دست آمده از پژوهش گن و همکاران مشابه است. در این پژوهش، نتایج حذف رنگ با سیستم اکسیداسیون شبه فنتون نشان داد که افزایش غلظت کاتالیست از 0.5 g/dcm^3 به 2 g/dcm^3 ، کاهش چشمگیری در میزان رنگ را در پی دارد. اما در شرایطی که غلظت اولیه رنگ ۵ میلی‌گرم در لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن برابر 0.98 میلی مول و pH برابر ۵ باشد، بهینه غلظت کاتالیست برابر 1 g/dcm^3 است و کارایی سیستم در حذف رنگ برابر غلظت‌های بالاتر کاتالیست است. این در حالی است که نتایج دیگر پژوهش‌ها، نقش کلیدی را برای غلظت آهن در فرایند حذف رنگ نشان نداده‌اند [۲۸]. هاو و همکاران در سال ۲۰۱۱ اثر غلظت آهن صفر ظرفیتی را در فرایند فنتون برای حذف رنگ رود آمین B مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این پارامتر تأثیر کلیدی ایفا نمی‌کند. به طوری که با افزایش غلظت آهن صفر ظرفیتی از 0.25 به 1.5 گرم در لیتر، درصد افزایش حذف رنگ بسیار اندک بود [۲۵].

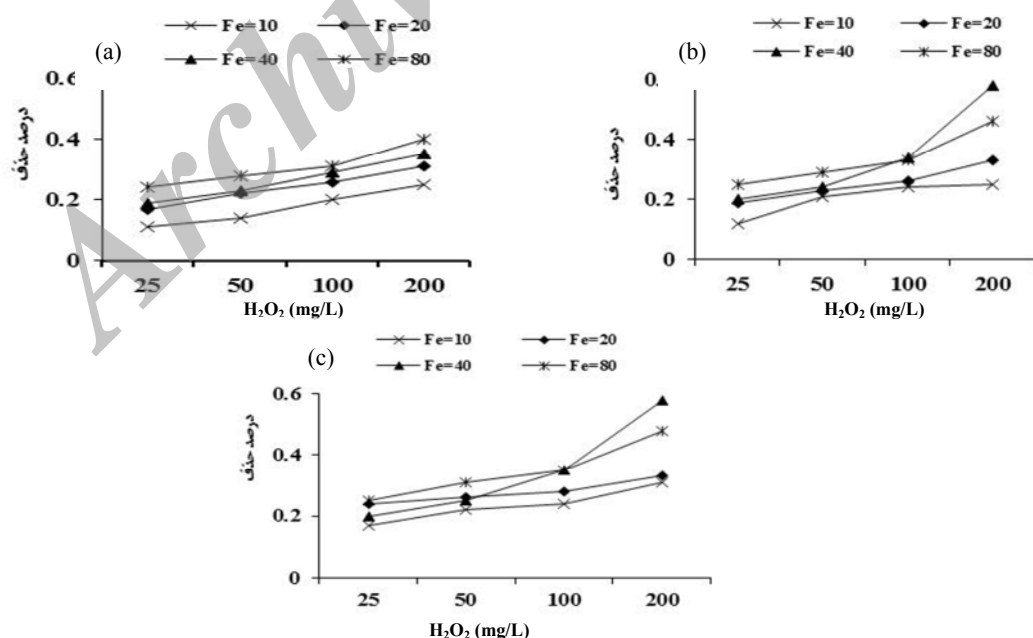
۳-۳- اثر زمان واکنش

نتایج مطابق شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد که با افزایش زمان واکنش از ۴۰ به ۸۰ دقیقه، روند حذف رنگ و COD افزایش داشته است. به طوری که در زمان ۴۰ دقیقه با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر

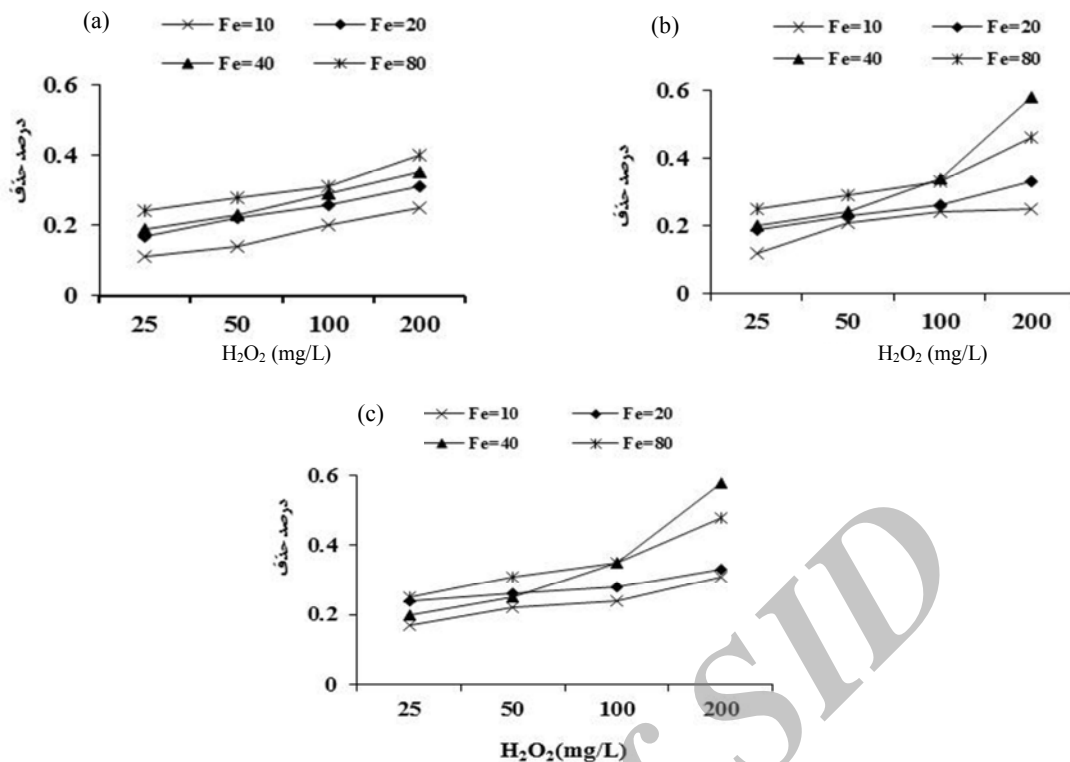
قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش غلظت H_2O_2 ، درصد حذف رنگ افزایش یافت به طوری که در غلظت 0.4 تا 0.6 میلی مول از H_2O_2 ، کارایی سیستم در حذف رنگ، ۱۰۰ درصد گزارش شد. اما افزایش غلظت H_2O_2 از ۶ میلی مول بیشتر به علت خاصیت تخریب کنندگی عامل OH^\bullet باعث کاهش کارایی سیستم شد. لذا غلظت ۲ میلی مول از پراکسید هیدروژن که ۷۳ درصد از TOC محلول در مدت زمان ۶۰ دقیقه را حذف می‌نمود، به عنوان غلظت مناسب و اقتصادی پیشنهاد شد [۲۵]. نتایج مطالعه گن و همکاران نیز بر کلیدی بودن اثر پراکسید هیدروژن در اکسیداسیون غلظت‌های مختلف رود آمین B تأکید دارد، به طوری که غلظت بهینه برای پراکسید هیدروژن در غلظت اولیه رنگ ۵ میلی‌گرم در لیتر، pH برابر ۵ و غلظت بهینه کاتالیست 1 g/dcm^3 ، 0.98 میلی مول گزارش شد. همچنین ایشان اعلام نمودند که بالاتر از این غلظت به علت خاصیت تخریبی آن از نظر کارایی سیستم و همچنین جنبه اقتصادی، مقرون به صرفه نیست [۲۸].

۲-۳- اثر غلظت های مختلف یون آهن (II)

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد آهن فرو در دزهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در حذف رنگ و COD مؤثر بوده است. مطابق شکل‌های ۳ و ۴، روند افزایش غلظت آهن تأثیر ثابتی را نشان نداده است؛ به طوری که از غلظت ۱۰ تا ۴۰ میلی‌گرم در لیتر از یون فرو، حذف رنگ و COD روند افزایشی داشته در صورتی



شکل ۳- کارایی فرایند فنتون در حذف رنگ رود آمین B (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در زمان‌های واکنش مختلف: (a) ۴۰ دقیقه، (b) ۶۰ دقیقه، (c) ۸۰ دقیقه



شکل ۴- کارایی فرایند فنتون در حذف COD با غلظت اولیه (۲۷۰ میلی گرم در لیتر) در زمان های واکنش مختلف: (a) ۴۰ دقیقه، (b) ۶۰ دقیقه، (c) ۸۰ دقیقه

رنگ و COD تحت تأثیر سه پارامتر اصلی از جمله غلظت پراکسید هیدروژن، غلظت آهن فرو و زمان واکنش است. به طوری که افزایش هر کدام از این پارامترها به نحوی در روند حذف رنگ و COD تأثیر گذار است. کارایی فرایند در زمان ۸۰ دقیقه در حذف رنگ و COD، اختلاف چندانی با زمان ۶۰ دقیقه نداشت. لذا اجرای فرایند در زمان ۶۰ دقیقه با غلظت ۴۰ میلی گرم در لیتر آهن به جهت صرفه اقتصادی پیشنهاد می شود. در نظر گرفتن زمان واکنش کمتر و همچنین غلظت پایین تر از کاتالیست، کاهش حجم راکتور و مقدار لجن تولیدی و در نهایت کاهش هزینه های تصفیه را به همراه خواهد داشت.

۵- قدردانی

از همکاری صمیمانه گروه مهندسی آب و فاضلاب مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی غرب که با در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی، امکان انجام این پژوهش را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می شود.

پراکسید هیدروژن، و بالاترین غلظت آهن برابر ۸۰ میلی گرم در لیتر، کارایی حذف رنگ و COD به ترتیب برابر ۴۰ و ۴۱ درصد است. در صورتی که در همین غلظت از پراکسید هیدروژن و زمان ۸۰ دقیقه، کارایی حذف، ۴۸ و ۴۷ درصد است که کمتر از کارایی به دست آمده در زمان ۶۰ دقیقه با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر پراکسید هیدروژن و ۴۰ میلی گرم در لیتر یون آهن است. همان طور که محققان اشاره کرده اند، زمان اکسیداسیون در فرایند فنتون بستگی به غلظت کاتالیزور، اکسیدان و آلاینده دارد. برای مثال اکسیداسیون فنل در غلظت های کمتر از ۲۵۰ میلی گرم در لیتر به ۳۰ تا ۶۰ دقیقه زمان نیاز دارد. برای بیشتر فاضلاب های بار آلی بالا، زمان اکسیداسیون ممکن است چندین ساعت باشد که در این صورت انجام فرایند در مراحل مختلف مناسب تر است [۸ و ۱۰].

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که کارایی حذف

۶- مراجع

1. Malik, R., Ramteke, D.S., and Waste, S.R. (2007). "Adsorption of malachite green on groundnut shell waste based powdered activated carbon." *J. Waste Management*, 27, 1129-1138.

2. Dos Santos, A.B., Cervantes, F. J., and Vanlier, J.B. (2007). "Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology." *J. Bioresour. Technol.*, 98 (12), 2369-2385.
3. Ahmet, Z., and Gulbeyi, D. (2007). "Removal of methylene blue from aqueous solution by dehydrated wheat bran carbon." *J. Hazard. Mater.*, 146, 262-269.
4. Daneshvar, N., Khataee, A. R., Rasolifard, M.H., and SeyedDeraji, M.S. (2007). "Removal of organic dyes from industrial wastewaters using UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/Fe (II), UV/H₂O₂/Fe (III) processes." *J. Water and Wastewater*, 61, 34-42. (In Persian)
5. Movahedian Attar, H., and Rezaei, R. (2006), "Investigate the efficiency of photochemical advanced oxidation technology (AOP) in dye degradation process of poly Azo directly with UV/H₂O₂," *J. Water and Wastewater*, 59, 83-75. (In Persian)
6. Amina, A., and Badie, S. (2008). Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H₃PO₄ activation: Batch and column studies." *Dyes Pigm.*, 76, 282-289.
7. Kargozoglu, B., Tasdemir, M., and Demirbas, E. (2007). The adsorption of basic dye from aqueous solution onto sepiolite, fly ash and apricot shell activated carbon." *J. Hazard. Mater.*, 147, 297-306.
8. Alizadeh, R., and Borghei, S.M. (2006). "The use of granular activated carbon to remove organic matter and biological carbon in the process of textile dye wastewater." *J. of Chemistry and Chemical Engineering*, 25(3), 21-28.
9. Aliabadi, M., Fazel, Sh., and Vahabzadeh, F. (2009). "Application of acid cracking and fenton processes in treating olive oil wastewater." *J. Water and Wastewater*, 57, 30-36. (In Persian)
10. Mousavi, S.A.R., Mahvi, A.H., Mesdaghinia, A.R., Naseri, S., and Henry, H.R. (2009). "Fenton advanced oxidation process efficiency detergent to reduce pollution in the water." *J. of Water and Wastewater*, 4, 16-23. (In Persian)
11. Ali Abadi, M., Myrarefyn, S. M., and MogadamRezaei, M. (2006). "Application, advanced oxidation process fenton in decreasing emissions of industrial wastewater." *J. of Advanced Research*, 2, 49-53.
12. Marco, A. E., and Splugus, G. S. (1997). "How and why combined chemical and biological processes for waste watertreatment." *Wat. Sci. Tech.*, 35 (4), 321-327.
13. Ostra, M., Ubide, C., and Zuriarrain, J. (2007). "Interference modeling, experimental design and preconcentration steps in validation of the fentons reagent for pesticides determination." *J. Analytica Chimical*, 584, 228-235.
14. Chan, K.H., and Chu, W. (2007). "Modeling the reaction kinetics of fenton's process on the removal of atrazine." *J. Chemosphere*, 51 (4), 305-311.
15. Beltran, F.J., Garcia-Araya, J.F., and Alvarez, P.M. (2000). "Continuous flow integrated chemical (ozone) – activated sludge system treating combined agroindustrial- domestic wastewater." *J. Environmental Progress*, 19, 28-35.
16. Malakootian, M., and Assadi, M. (2010) "Efficiency of Fenton oxidation in removal phenol of aqueous solutions." *J. Water and Wastewater*, 79, 46-52. (In Persian)
17. Blanco, J., Torrades, F., De la Varga, M., and García-Montaño, J. (2012). "Fenton and biological-fenton coupled processes for textile wastewater treatment and reuse." *Desalination*, 286, 394-399.
18. Panizza, M., and Cerisola, G. (2009). "Electro-fenton degradation of synthetic dyes." *Water Research*, 43(2), 339-344.
19. Perkowski, J., and Kos, L. (2002). "Treatment of textile dyeing wastewater by hydrogen peroxide and ferrous ions." *J. Fibres and Textiles In Eastern Europe*, 2002, 78-81.

20. Bahmani, P., Maleki, A., Ghahremani, A., and Kohzadi, Sh. (2013). "Efficiency of fenton oxidation process in removal of remazol black-B from aqueous." *J. of Health*, 4(1), 57-67.
21. APHA, AWWA, WPCF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21th Ed., American Public Health Association/American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington DC, USA.
22. Ali Abadi, M., Fazel, Sh., and Vahabzadeh, F. (2006). "Practical application of acid cracking process. Fenton." *J. of Water and Wastewater*, 57, 30-36. (In Persian)
23. Kestioglu, K., Yonar, T., and Azbar, N. (2005). "Feasibility of physico-chemical treatment and advanced oxidation processes (AOPs) as a means of pretreatment of olive mill effluent." *J. Process Biochemistry*, 40(7), 2409-2416.
24. Deng, Y., and Englehardt, J. D. (2006). "Treatment of landfill leachate by the fenton processes." *Water Res.*, 40 (20) 3683-3694.
25. Mei-Fang Hou, Lin Liao, Wei-De Zhang, Xiao-Yan Tang, Hong-Fu Wan, and Guang-Cai Yin (2011). "Degradation of rhodamine B by Fe(0)-based Fenton process with H₂O₂." *Chemosphere*, 83, 1279-1283.
26. Xiaofei Xue, Khalil Hanna, and Nansheng Deng. (2009). "Fenton-like oxidation of Rhodamine B in the presence of two types of iron (II, III) oxide." *J. of Hazardous Materials*, 166, 407-414.
27. Wu, J.J., Muruganandham, M., Yang, J.S., and Lin, S.S. (2006). "Oxidation of DMSO on goethite catalyst in the presence of H₂O₂ at neutral pH." *Catal. Commun*, 7, 901-906.
28. Pei Pei Gan, and Sam Fong Yau Li. (2013). "Efficient removal of Rhodamine B using a rice hull-based silica supported iron catalyst by fenton-like process." *Chemical Engineering Journal*, 229, 351-363.