

# تعیین کار آبی فرآیند ازن زنی توأم با کاربرد پر سولفات در حذف فورفورال از محیط‌های آبی

علیرضا رحمانی<sup>۱</sup>، جمال مهر علی پور<sup>۲</sup>، صبا مجیدی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دکتری بهداشت محیط، استاد دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی،

دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

## چکیده

**مقدمه:** فورفورال یک ترکیب آلی آروماتیک حلقوی بوده که از طریق صنایعی هم چون پتروشیمی، خمیر سازی، داروسازی، غذایی و غیره تولید و به محیط زیست وارد شده است. از جمله روش‌های مؤثر در حذف این آلاینده روش‌های اکسیداسیون پیشرفته مانند ازن زنی همراه با کاتالیزور می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش بررسی کار آبی فرایند ازن زنی توأم با کاربرد پر سولفات در حذف فورفورال از محیط‌های آبی بوده است.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه تجربی، در رآکتور نیمه پیوسته به حجم یک لیتر انجام پذیرفت و تأثیر متغیرهای غلظت فورفورال (۳۰-۵ میلی‌گرم در لیتر)، دوز پر سولفات (۱۵-۴ میلی مولار)، pH (۱۱-۳)، زمان واکنش (۳۵-۰ دقیقه) در دوز ازن ۱ گرم در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور اطمینان از کارایی فرآیند از شرایط بهینه غلظت COD مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که در  $\text{pH} = 3$ ، دوز پر سولفات برابر ۱۲ میلی مولار، دوز ازن برابر ۱ گرم در دقیقه و غلظت اولیه فورفورال برابر ۵ میلی‌گرم در لیتر، کار آبی حذف فورفورال و COD به ترتیب ۹۲/۳۴ درصد و ۷۰ درصد بوده است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد، فرآیند ازن/پر سولفات، می‌تواند یک فرآیند مناسب در راستای حذف ترکیبات آلی آروماتیک و حلقوی از جمله آلاینده موردنظر می‌باشد.

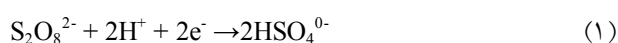
**کلمات کلیدی:** فورفورال، ازن زنی، پر سولفات، محیط آبی.

\* نویسنده مسئول: گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران  
ایمیل: saba.majidi44@yahoo.com - شماره تماس: ۰۹۱۹-۳۸۱۵۵۹۲

## مقدمه

بسیاری از موادی که از صنایع وارد محیط‌زیست شده‌اند غیرقابل تجزیه بوده یا به عنوان یک عامل بازدارنده برای دستگاه‌های بیولوژیکی عمل می‌کنند. این ترکیبات در محیط‌های طبیعی طول عمر بالایی داشته و به‌کندی تجزیه و متلاشی شده‌اند. از جمله این ترکیبات در محیط می‌توان به ترکیبات آلی آروماتیک و حلقوی مانند فورفورال اشاره کرد. فورفورال با فرمول شیمیایی حلقوی  $C_5H_4O_2$ ، (شکل ۱) <sup>۲</sup> مایع بی‌رنگ و روغنی با بویی شبیه بادام تلخ می‌باشد. <sup>۳،۴</sup> ورود این ترکیبات به محیط‌زیست از طریق فاضلاب‌های صنعتی مانند پتروشیمی، کاغذ و خمیر، داروسازی، صنایع غذایی بوده است. <sup>۵</sup> این ترکیب همچنین به‌عنوان حلال آروماتیک در تولید روغن‌های روان کننده در پالایشگاه نفت و تصفیه روغن <sup>۶</sup> ماده شیمیایی واسط، از بین برنده علف هرز، قارچ کش و یک طعم‌دهنده کاربرد داشته است. <sup>۷</sup> میزان فورفورال در پساب حدوداً ۰/۰۵ درصد تخمین زده شده است. در صورت تخلیه فاضلاب حاوی فورفورال به محیط‌زیست اثرات شدیدی را در این زمینه به دنبال خواهد داشت. <sup>۸</sup> از جمله اثرات می‌توان به آسیب به ریه‌ها، کبد، کلیه‌ها و طحال و نیز برای پوست، چشم‌ها و غشاهای مخاطی محرک می‌باشد. <sup>۹</sup> با توجه به طیف گسترده این ترکیب در محیط و اثرات ذکر شده لازم به حذف این ترکیب از فاضلاب می‌باشد. در راستای حذف فورفورال روش‌های متنوعی از جمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی، فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است. <sup>۱۰</sup> <sup>۱۱، ۱۲</sup> از جمله این روش‌ها فرایند جذب توسط کربن فعال پودری می‌باشد که به دلیل عدم امکان استفاده در صنایع کوچک و تولید لجن و نیز در کربن فعال گرانوله مسئله احیاء جاذب و عدم امکان حذف در غلظت‌های خیلی بالا کاربرد آن‌ها کمتر بوده است. <sup>۱۳</sup> از طرفی تصفیه بیولوژیکی شامل فرایند هوازی و بی‌هوازی که توسط بسیاری از محققان انجام

اما این فرایند زمان‌بر، پرهزینه و برای مقیاس کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته در چند سال اخیر به دلیل تولید رادیکال‌های اکسیدکننده با پتانسیل اکسیداسیون و احیای بالا روبه افزایش بوده می‌باشند. یکی از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته ازن زنی است. فرایند ازن زنی به خاطر قدرت اکسیداسیون و خاصیت گندزدائی بالا در تکنولوژی آب و فاضلاب به‌عنوان یک اکسیدکننده برای حذف ترکیبات آلی طبیعی و سخت تجزیه شونده مورد توجه خاص قرار گرفته است. در بسیاری از موارد به کارگیری ازن به تنهایی برای حذف ترکیبات آلی مقاوم و تجزیه‌ناپذیر با توجه به مطالعات صورت گرفته قبلی دارای راندمان نسبتاً پایینی است. <sup>۱۴، ۱۵، ۱۶</sup> بنابراین طی چندین سال اخیر، از فرایندهای ترکیبی مانند استفاده توأم از ازن و هیدروژن پراکساید <sup>۱۷</sup>، ازن و اشعه فرابنفش فرایند ازن زنی توأم با فرایند فتون و فرایند ازن زنی کاتالیزوری <sup>۱۸</sup> استفاده شده است. اکسیدکننده‌هایی نظیر  $H_2O_2$ ،  $KMnO_4$ ،  $O_3$  به همراه ازن مورد استفاده قرار گرفته است. هریک از کاتالیزورهای ذکر شده دارای ویژگی خاص و محدودیت‌هایی می‌باشند. اما کاتالیزور پر سولفات به دلیل ویژگی‌هایی نظیر قدرت اکسندگی بالا (V)، واکنش‌پذیری غیر گزینشی، پایداری، حلالیت بالا، ارزانی، سهولت در حمل و نقل به علت جامد بودن و به علاوه بی‌خطر بودن محصولات جانبی، پر سولفات را به‌عنوان یک اکسنده امیدبخش در فرایندهای اکسایش پیشرفته می‌باشد. <sup>۱۸، ۱۹</sup> واکنش‌های پر سولفات در دمای معمولی عموماً آرام است لذا تحریک توسط نور یا حرارت، یون‌های فلزی خاصی به‌عنوان کاتالیزور و یا به همراه فرایند ازن زنی استفاده شده است که تلفیق این روش‌ها باعث تجزیه یون‌های پر سولفات به یون‌های رادیکال سولفات (روابط ۱ و ۲) که تسریع فرایند اکسایش را به همراه دارد. <sup>۱۹</sup>



مختلف از فورفورال در محدوده ی ۵-۳۰ میلی گرم در لیتر، pH در محدوده ی ۳ تا ۱۱، پر سولفات در محدوده ی غلظت ۱۵-۰ میلی مولار بر لیتر و در زمان های مختلف تا ثابت شدن کار آبی فرایند نمونه برداری شده است. در این مطالعه تنظیم pH محیط با استفاده از اسیدسولفوریک ۱ مولار و سدیم هیدروکسید ۱ نرمال صورت گرفت سپس توسط راکتور طراحی شده؛ فرایند تصفیه صورت پذیرفت. در هر مرحله از تحقیق و در زمان های تعیین شده، ۵ میلی لیتر نمونه برداری شده و پس از ۵ دقیقه سانتریفوژ غلظت فورفورال با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۷۷ نانومتر<sup>۲</sup> مورد اندازه گیری قرار گرفت و در انتهای هر مرحله و با استفاده از رابطه ۳ کارایی حذف فورفورال محاسبه گردید:

$$RE(\%) = (C_i - C_f / C_i) \times 100 \quad (3)$$

Removal Efficiency: کار آبی حذف فورفورال

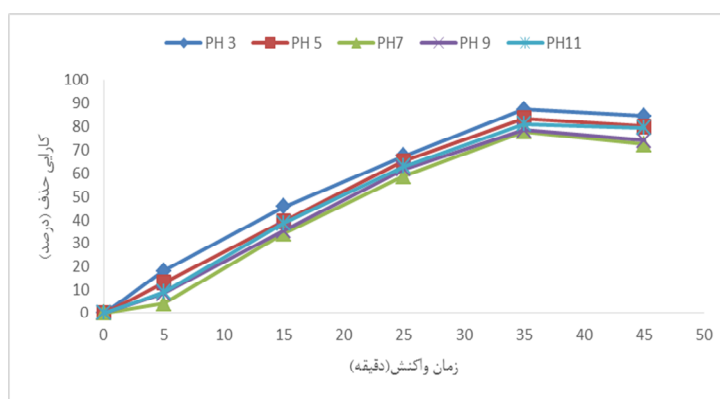
C<sub>i</sub>: غلظت اولیه فورفورال

C<sub>f</sub>: غلظت باقی مانده فورفورال

## نتایج

### اثر pH

تأثیر pH اولیه بر انجام واکنش در محدوده ی ۳ تا ۱۱ در نمودار (۱) نشان داده شده است.



**نمودار ۱:** تأثیر pH محیط بر کار آبی فرایند ازن/پرسولفات (غلظت اولیه فورفورال ۵ میلی گرم در لیتر؛ دوز پر سولفات ۴ میلی مولار؛ دوز ازن ۱ گرم در دقیقه)

هدف از این مطالعه بررسی فرایند بررسی حذف فورفورال از محیط های آبی با استفاده از فرایند ازن زنی کاتالیزوری با استفاده از پرسولفات بوده است.

## مواد و روش ها

این مطالعه، یک مطالعه تجربی با رویکرد کاربردی بود که در یک راکتور نیمه پیوسته ازن زنی به حجم مفید ۱ لیتر در آزمایشگاه تحقیقات شیمی محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام شده است. مواد شیمیایی مورد مصرف شامل فورفورال (با درجه خلوص ۹۹/۸ درصد) و سایر مواد مانند پر سولفات با درجه خلوص ۹۸ درصد، اسیدسولفوریک، سدیم هیدروکسید از شرکت های مرک و سیگما آلدریج تهیه گردید. در این مطالعه از دستگاه اکسیژن ساز مدل p۳۳۰، ساخت شرکت ایران نوین؛ دستگاه تولیدکننده ازن (HACH)، pH متر مدل (HACH) Sensoal، دستگاه سانتریفوژ (Sigma) و دستگاه اسپکتروفتومتر مدل DR5000 (HACH) مورد استفاده قرار گرفت.

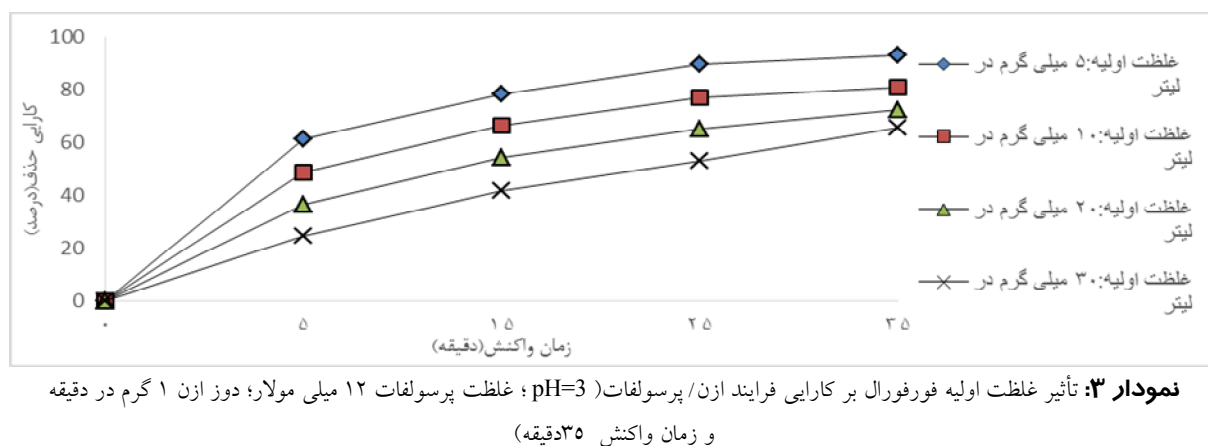
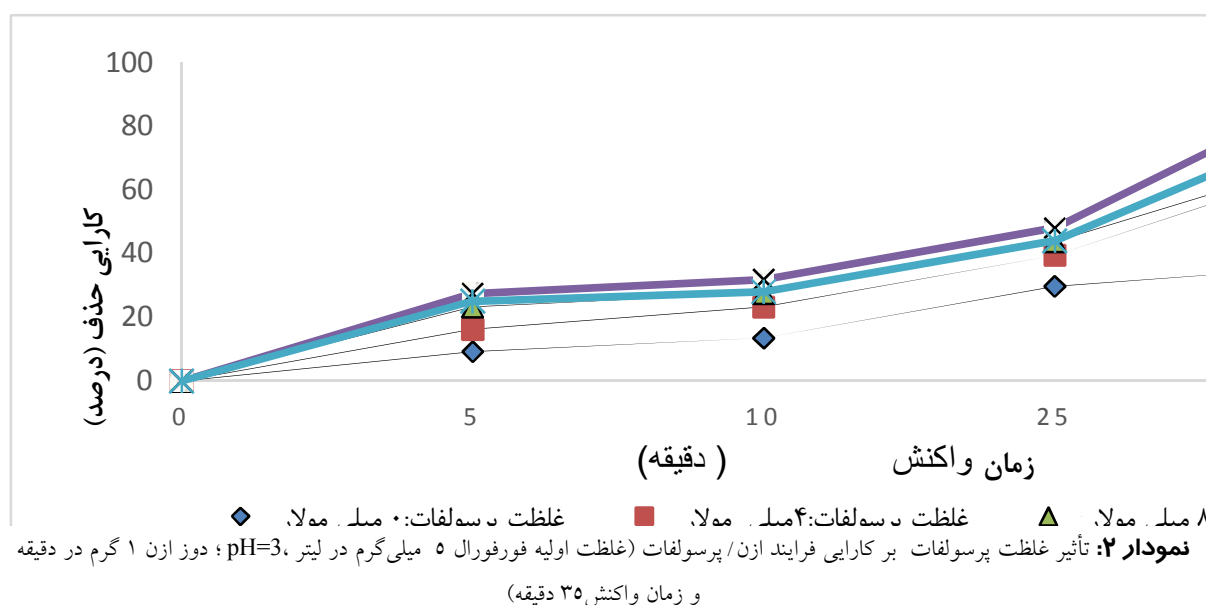
## روش کار

ابتدا غلظت ۱ گرم در لیتر از فورفورال به عنوان محلول مادر سپس غلظت های ۱ تا ۱۰ میلی گرم در لیتر جهت رسم منحنی کالیبراسیون تهیه شد. در ادامه ی آزمایشات، غلظت های

### اثر غلظت اولیه پر سولفات

در مرحله نخست پس از بررسی تأثیر pH محیط و تعیین pH بهینه و زمان واکنش بهینه در گام بعد تأثیر حضور پر سولفات در محیط مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله از مطالعه که نتایج آن در نمودار (۲) ارائه شده است نشان داد که بالاترین کارایی حذف فورفورال توسط فرایند مورد استفاده هنگامی رخ می دهد که دوز پرسولفات ۱۲ میلی مولار است که ۹۳/۳۴ درصد از فورفورال اولیه را حذف نموده است.

همان‌طور که در نمودار ۱ مشخص است pH تأثیر چشمگیر در کارایی فرآیند دارد. بعد از ۳۵ دقیقه از فرآیند و در pH برابر ۳؛ حداکثر کارایی حذف ۸۷/۲ درصد مشاهده شد. با افزایش pH کارایی به صورت نزولی کاهش یافته است، اما در pH برابر ۱۱ و بعد از ۳۵ دقیقه از فرآیند بازهم افزایش کارایی دیده می‌شود؛ به طوری که حداکثر کارایی به ۸۱/۱ درصد افزایش داشته است. همچنین اندازه‌گیری pH نهایی مشخص نمود که در پایان فرایند افزایش داشته و حالت قلیایی بوده است.



غلظت اولیه فورفورال برابر ۵ میلی گرم در لیتر؛ pH برابر ۳؛ دوز پر سولفات برابر ۱۲ میلی مولار و زمان واکنش ۳۵ دقیقه کارایی فرایند در حالت حداکثری است و برابر ۹۳/۳۴ درصد است. هنگامی که ازن زنی ساده صورت می گیرد ۵۹/۹۴ درصد از فورفورال حذف شد. درحالی که ترت بوتانول در محیط حضور دارد میزان تجزیه فورفورال در فرایند ازن/ پرسولفات و فرایند ازن زنی ساده به ترتیب ۸۴/۱۳ و ۳۶/۴ درصد است. زمانی که اکسیژن زنی به همراه پر سولفات صورت گرفت ۲۰/۰۵ درصد کارایی حذف مشاهده شد و پر سولفات به تنهایی توانست ۳/۰۴ درصد از کل فورفورال موجود در محیط را حذف نماید.

### سینتیک واکنش

در تمامی فرایندها جهت پی بردن به نحوه انجام واکنش حذف آلاینده؛ مطالعه سینتیک واکنش انجام می شود. این بخش از مطالعه به مدل سازی و اجرای بهتر فرایند در مقیاس کاربردی کمک خواهد نمود. با توجه به اطلاعات به دست آمده در جدول سینتیک واکنش در فرایند مورد مطالعه از سینتیک درجه دو تبعیت می کند.

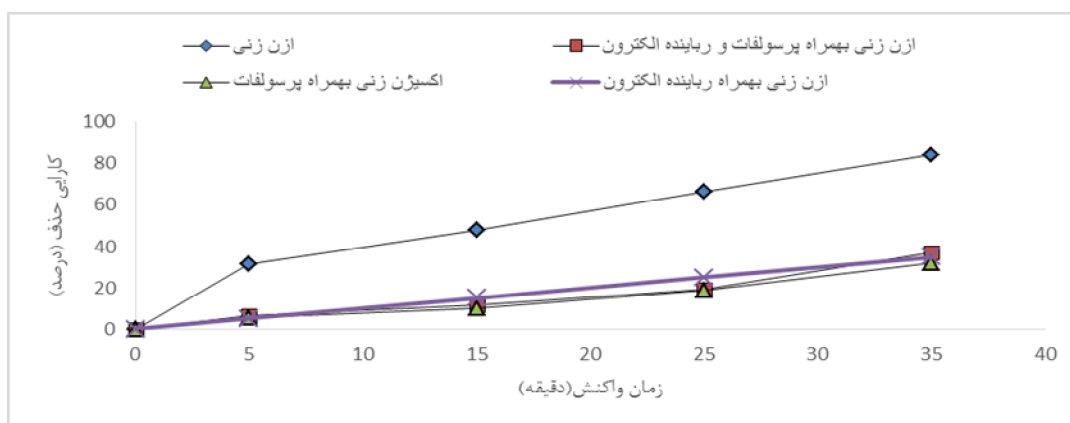
از طرفی بالا رفتن دوز پر سولفات بیش از حد بهینه باعث کاهش راندمان به ۸۲/۸ شده است. نتایج نشان دهنده تأثیرگذار بودن حضور پرسولفات و همچنین تأثیرگذار بودن میزان دوز پر سولفات در کارایی حذف فورفورال است.

### اثر غلظت اولیه فورفورال

در این مرحله از مطالعه و در شرایط بهینه شامل pH محیط، غلظت پرسولفات و زمان واکنش غلظت های مختلف فورفورال را وارد محیط نموده و کارایی فرایند بررسی شد. نتایج ارائه شده در نمودار (۳) بیانگر این موضوع است که با افزایش غلظت فورفورال کارایی کاهش می یابد به طوری که در غلظت ۵ میلی گرم در لیتر فورفورال حداکثر کارایی حذف مشاهده شد که برابر ۹۳/۳۴ درصد و در غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر کارایی ۶۲/۴ درصد بوده است.

### اثرات هم افزایی

در این بخش از مطالعه تأثیر حضور ازن در محیط؛ تأثیر حضور پرسولفات؛ تأثیر حضور رایبند رادیکال (ترت بوتانول با غلظت ۰/۱ مولار در لیتر) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل در نمودار (۴) نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود. در شرایط بهینه آزمایش که عبارت است از



نمودار ۴: تعیین تأثیر پارامترهای مورد مطالعه بر کارایی حذف فورفورال از محیط

جدول ۱: نتایج مطالعات سینتیک

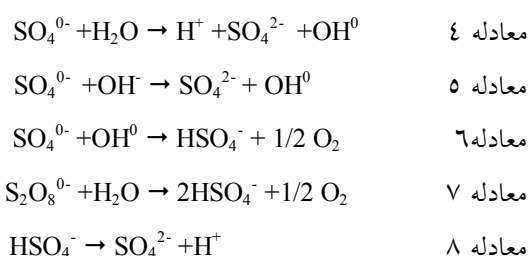
سنتیک درجه دو		سنتیک درجه یک		سنتیک درجه صفر		غلظت آلایند
R <sup>2</sup>	K <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>0</sub>	(میلی گرم در لیتر)
۰/۹۶	۰/۰۷۸	۰/۸۳	۰/۰۹۲۵	۰/۶۹	۰/۱۱	۵
۰/۹۸	۰/۰۱۲	۰/۷۳	۰/۰۶۳	۰/۷۴	۰/۱۹۲	۱۰
۰/۹۸	۰/۰۰۳۶	۰/۷۳	۰/۰۵۴	۰/۸۲	۰/۳۶	۲۰
۰/۹۶	۰/۰۰۱۸	۰/۷۴	۰/۰۴۷	۰/۹۲	۰/۵۱	۳۰

## بحث و نتیجه‌گیری

### اثر pH

به‌طور کلی می‌توان گفت در فرایندهای شیمیایی به‌ویژه اکسیداسیون پیشرفته از جمله فرآیند ازن زنی همراه با پرسولفات یکی از عوامل تأثیرگذار به‌طور مستقیم و غیرمستقیم pH محیط می‌باشد.<sup>۲۰</sup> در این مطالعه همان‌طور که اشاره شد pH در محدوده‌ی (۳-۱۱) مورد بررسی قرار گرفت. در فرآیند انجام‌شده pH محیط تعیین‌کننده میزان رادیکال‌های تولیدی هیدروکسیل و پر سولفات است. رادیکال پر سولفات تولیدشده حاصل واکنش با ازن در محیط اسیدی و بازی طبق روابط ۵-۴ واکنش داده و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌کند. در ادامه طبق روابط ۸-۶ رادیکال هیدروکسیل تولیدشده وارد واکنش با رادیکال پر سولفات شده و در انتها منجر به تولید SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> که باعث ادامه سیکل به‌طور متناوب شده است.<sup>۲۱</sup> رادیکال‌های هیدروکسیل و پر سولفات باعث تخریب ترکیبات آلی شده است؛ بنابراین طبق شرایط فوق انتظار می‌رود که در pH خیلی اسیدی و خیلی بازی راندمان فرآیند حداکثر مقدار خود باشد که نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این موضوع است. مطالعات پیشین سایر پژوهشگران نیز بیانگر این موضوع است که فرآیند ازن/پرسولفات در pH اسیدی و هم pH قلیایی دارای کارایی مناسبی است. لیلی و همکاران در سال ۱۳۹۱ طی مطالعه‌ای که بر روی مقایسه کارایی روش‌های ازن زنی تنها، ازن زنی

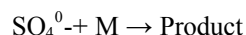
کاتالیزوری و جذب کربن فعال در حذف فورفورال از محلول‌های آبی انجام داده‌اند نتایج حاصل در مورد pH نشان داد که کارایی هر سه فرآیند در شرایط خیلی اسیدی و قلیایی نسبت به سایر pH ها کمی بیشتر است<sup>۲</sup> همچنین جی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بالاترین کارایی حذف رنگ اسید نارنجی ۷ توسط الکتروکود/آهن/پرسولفات را در pH برابر ۳ ۷۷/۱ درصد در مقابل pH ۹ برابر ۷۱/۸ درصد گزارش کردند.<sup>۲۱</sup>



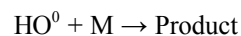
### اثر غلظت آنیون پرسولفات

استفاده بهینه از عوامل کاتالستی نقش مهمی در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته داشته است. همان‌طور که در نمودار ۲ نشان داده شد با افزایش غلظت کاتالست راندمان حذف فورفورال افزایش می‌یابد. طبق روابط ۹-۸ به دلیل این‌که رادیکال‌های هیدروکسیل و پرسولفات به میزان بیشتری تولید شده و در ادامه باعث تجزیه آلایند مورد نظر به دی‌اکسید کربن و آب و اسیدهای معدنی می‌شود.<sup>۱۴</sup>

معادله ۹

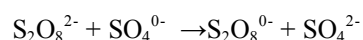


معادله ۱۰



همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید افزایش حضور آنیون پرسولفات تا میزان بهینه یعنی ۱۲ میلی مولار؛ به‌عنوان منبع تولید رادیکال سولفات به‌عنوان قوی‌ترین رادیکال اکسیدکننده در محیط باعث افزایش تولید این رادیکال شده و این رادیکال باعث تجزیه فورفورال می‌گردد. اما نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت بیش‌ازحد بهینه کاهش راندمان را به دنبال داریم. این رفتار پرسولفات را می‌توان با رابطه ۱۱ توصیف نمود.<sup>۲۱</sup>

معادله ۱۱



طبق رابطه ۱۱ افزایش غلظت پرسولفات بیش‌ازحد بهینه باعث تبدیل سولفات به پرسولفات شده است که در ادامه باعث از بین رفتن رادیکال سولفات شده است. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعه ی هوی ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی حذف بیسفنل آ با فرایند پرسولفات فعال‌شده به روش الکتریکی انجام داده‌اند همخوانی دارد در این مطالعه با افزایش غلظت پرسولفات از ۱ به ۱۰ میلی مولار راندمان حذف بیس فنل از ۵۷/۵ درصد به ۹۹/۲ درصد رسیده است ولی با افزایش غلظت پرسولفات از ۱۰ به ۲۰ میلی مولار راندمان ثابت مانده است.<sup>۲۲</sup> همچنین مطالعات دیگر از این پژوهشگر بر روی حذف رنگ اسید او رنج ۷ با فرایند مذکور با افزایش غلظت پرسولفات از ۲ به ۱۲ میلی مولار راندمان افزایش یافته است و در ادامه ثابت مانده است.<sup>۲۱</sup>

### اثر غلظت اولیه فورفورال

با توجه به مطالبی که در مقدمه بیان شده است بررسی غلظت‌های مختلف فورفورال در محیط برای انتخاب روشی مناسب جهت حذف آلاینده امری ضروری می‌باشد. در شرایط آزمایش با ثابت بودن پارامترهای تأثیرگذار از قبیل ازن ورودی، غلظت پرسولفات و زمان واکنش افزایش غلظت اولیه فورفورال

باعث افزایش راندمان نمی‌شود. در محیط مصرف بیشتر رادیکال سولفات، رادیکال هیدروکسیل و مولکول ازن دیده می‌شود. در نتیجه فرآیند تجزیه آلاینده به‌طورکلی انجام نمی‌شود و باعث تولید محصولات حد واسط می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه با نتایج مطالعه ی کنگ چون و همکارانش در سال ۲۰۰۹ بر روی حذف فورفورال توسط فرایند UV/O<sub>3</sub> مطابقت دارد در این مطالعات نیز بالاترین کارایی فرایندها در پایین‌ترین مقدار فورفورال مشاهده شد.<sup>۲۳</sup>

### تعیین تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی فرایند

#### ازن / پرسولفات در حذف فورفورال

در این مرحله از مطالعه به‌صورت جداگانه تأثیر پارامترهای مورد مطالعه در این فرایند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد در شرایط بهینه آزمایش بالاترین راندمان مربوط به تلفیق ازن زنی / پرسولفات سپس ازن زنی در حضور رابینده الکترون، کم‌ترین پرسولفات به‌تنهایی می‌باشد. بنابراین میزان هم‌افزایی راندمان مشخص شد. طی مطالعه‌ای که توسط هوی ژانر در حذف رنگ او رنج ۷ با استفاده از فرایند الکترو/آهن / پرسولفات انجام داده است تأثیرگذاری پارامترهای پرسولفات به‌تنهایی؛ یون آهن سه‌ظرفیتی و پرسولفات؛ جریان الکتریکی (EC)؛ جریان الکتریکی و یون آهن سه‌ظرفیتی؛ جریان الکتریکی و پرسولفات و پرسولفات و جریان الکتریکی و یون آهن سه‌ظرفیتی را مورد مطالعه قرار داده است و نتایج مطالعه‌ی وی نشان می‌دهد که بالاترین کارایی مربوط به استفاده از سه پارامتر پرسولفات؛ جریان الکتریکی و یون آهن سه‌ظرفیتی می‌باشد.<sup>۲۱</sup>

### سینتیک واکنش

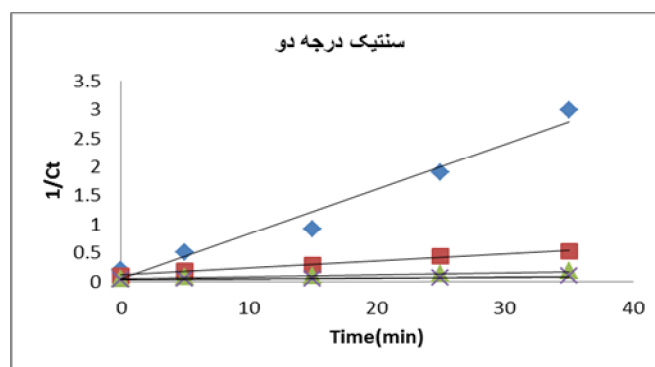
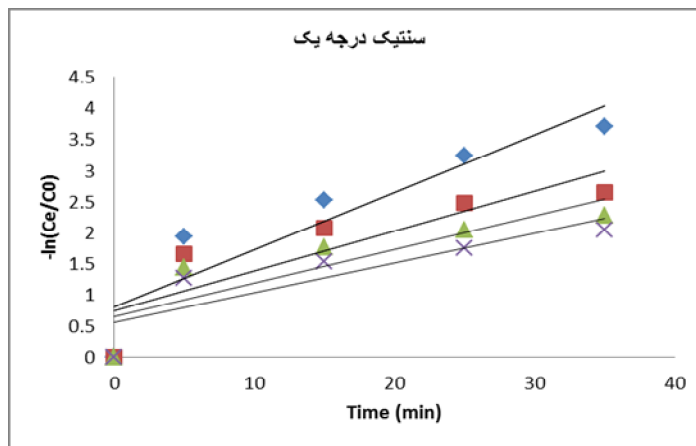
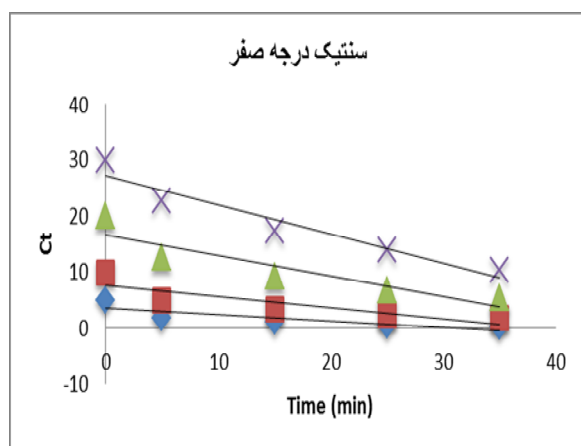
با توجه به معادلات ذکر شده در جدول شماره ۲ و رسم نمودار سینتیک درجه صفر، یک و دو می‌توان نتیجه گرفت

تعیین کارایی فرآیند ازن زنی توأم با کاربرد پر سولفات در حذف فورفورال از محیط‌های آبی

فرایند انجام شده از سینتیک درجه دو پیروی می‌کند.

جدول ۲: معادله سینتیک های درجه صفر، یک و دو

مدل سینتیک	معادله	شکل خطی
سینتیک درجه صفر	$r_c = dc / dt = K_0$	$C - C_0 = -K_0t$
سینتیک درجه یک	$r_c = dc / dt = K_1C$	$\ln C / C_0 = -K_1t$
سینتیک درجه دو	$r_c = dc / dt = K_2C^2$	$1/C - 1/C_0 = -K_2t$



نمودار ۵: سینتیک درجه صفر، یک، دو

مجدداً افزایش یافت. کارایی فرآیند با تغییرات افزایشی پرسولفات تا میزان بهینه (۱۲ میلی‌مولار) دارای رابطه مستقیم است. افزایش غلظت اولیه آلاینده کاهش کارایی فرآیند را به دنبال داشت. بیشترین میزان حذف فورفورال در پایین‌ترین غلظت و کمترین کارایی حذف در بالاترین غلظت انتخابی

به‌طور کلی می‌توان گفت نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد pH، غلظت پرسولفات و غلظت اولیه آلاینده تأثیر در کارایی فرآیند داشته است. بیشترین کارایی فرآیند در pH اسیدی (۳) مشاهده شد، با تغییر pH کارایی دچار تغییرات شد. به‌طوری‌که با افزایش pH تا محدوده ی قلیایی (۱۱) کاهش و



## تشکر و قدردانی

پژوهش اخیر با استفاده از منابع مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی همدان به انجام رسیده است که نویسندگان مقاله از همکاری آن معاونت کمال تشکر رادارند.

آلاینده صورت گرفت. همچنین آزمایش COD در شرایط بهینه مشخص نمود که تنها ۷۵ درصد از COD اولیه در مدت زمان ۳۵ دقیقه حذف شده است و برای حذف بالاتر COD به زمان واکنش بیشتری نیاز است.

## منابع

- Shu H-Y. Degradation of dyehouse effluent containing CI Direct Blue 199 by processes of ozonation, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ and in sequence of ozonation with UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ . J Hazard Mater. 2006;133(1):92-8.
- Leili M, Mousavi SR, Nadafl K, GHaffari M. The Investigation Of Single Ozonation Process, Catalytic Ozonation process and single adsorption of activated Carbon efficiencies for vremoval Of Furfural From Aqueous Solution. [in persian]
- Li C, Zhong S, Duan L, Song Y. Evaluation of petrochemical wastewater treatment technologies in Liaoning Province of China. Procedia Environ Sci. 2011;10:2798-802.
- Sahu AK, Mall ID, Srivastava VC. Studies on the adsorption of furfural from aqueous solution onto low-cost bagasse fly ash. Chem Eng C. 2007;195(3):316-35.
- Knight EV, Novick NJ, Kaplan DL, Meeks J. Biodegradation of 2-furaldehyde under nitrate-reducing and methanogenic conditions. Environ Toxicol Chem. 1990;9: 630-725.
- Arts JH, Muijser H, Appel MJ, Frieke Kuper C, Bessems JG, Woutersen RA. Subacute (28-day) toxicity of furfural in Fischer 344 rats: a comparison of the oral and inhalation route. Food Chem Toxicol. 2004;42(9):1389-99.
- McKetta Jr JJ. Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Volume 1-Abrasives to Acrylonitrile: CRC Press; 1976.
- Wang R, Shi W. Production and application of furfural. Henan Chem Ind. 2008;25(5):14-5.
- Anbia M, Mohammadi N. A nanoporous adsorbent for removal of furfural from aqueous solutions. Desalination. 2009; 249(1):150-3.
- Borghei S, Hosseini S. Comparison of furfural degradation by different photooxidation methods. Chem Eng J. 2008;139(3):482-8.
- Singh S, Srivastava VC, Mall ID. Fixed-bed study for adsorptive removal of furfural by activated carbon. Colloids and Surfaces A: Phys Chem Eng Aspects. 2009;332(1):50-6.
- Zhang Y, Han B, Ezeji TC. Biotransformation of furfural and 5-hydroxymethyl furfural (HMF) by Clostridium acetobutylicum ATCC 824 during butanol fermentation. New Biotechnol. 2012;29(3):345-51.
- Kruithof JC, Kamp PC, Martijn BJ. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment: A practical solution for organic contaminant control and primary disinfection. Ozone: Sci Eng. 2007;29(4):273-80.
- Busca G, Berardinelli S, Resini C, Arrighi L. Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. J Hazard Mater. 2008;160(2):265-88.
- Beltrán FJ, Rivas FJ, Montero-de-Espinosa R. Catalytic ozonation of oxalic acid in an aqueous TiO<sub>2</sub> slurry reactor. Appl Catal B: Environ. 2002;39(3):221-31.
- Li L, Zhu W, Zhang P, Lu P, Zhang Q, Zhang Z. UV/O<sub>3</sub>-BAC process for removing organic pollutants in secondary effluents. Desalination. 2007;207(1):114-24.
- Lucas MS, Peres JA, Puma GL. Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/UV and O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. Sep Purif Technol. 2010;72(3):235-41.
- Nawrocki J, Kasprzyk-Hordern B. The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation. Appl Catal B: Environ. 2010;99(1):27-42.
- Khataee A. Application of central composite design for the optimization of photo-destruction of a textile dye using UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>-process. Polish J Chem Technol. 2009;11(4):38-45.
- Rahim Pouran S, Abdul Raman AA, Wan Daud WMA. Review on the application of modified iron oxides as heterogeneous catalysts in Fenton reactions. J Cleaner Prod. 2014;64:24-35.
- Jie Wu HZ, Juanjuan Qiu. Degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by a novel electro/Fe<sup>2+</sup>/peroxydisulfate process J Hazard Mater. 2012;215-216(4):138-45.
- Lin H, Wu J, Zhang H. Degradation of bisphenol A in aqueous solution by a novel electro/Fe<sup>3+</sup> peroxydisulfate

تعیین کارایی فرآیند ازن زنی توأم با کاربرد پر سولفات در حذف فورفورال از محیط‌های آبی

process. Sep Purif Technol. 2013;117:18-23.

Chem Res Chines. 2009: 25:25-36.

23. Kang C-l, Tang X-j, Jiao X-q, Guo P, Quan F-m, Lin X-y.  
Degradation of Furfural by UV/O3 Technology.

## Performance Evaluation of Ozonation Combined with Persulfate Application for Removal of Furfural from Aqueous Solutions

Alireza. Rahmani<sup>1</sup>, Jamal. Mehralipour<sup>2</sup>, Saba. Majidi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Prof. of Environmental Health Eng, Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student of Environmental Health Eng, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

<sup>3</sup> M.Sc. Student of Environmental Health Eng, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

\* E-mail: saba.majidi44@yahoo.com

Received: 15 Dec 2016 ; Accepted: 1 Mar 2017

### ABSTRACT

**Background:** Furfural is an organic compound which derived from a variety industrial, including petrochemicals, pulping, pharmaceutical, food. Also is a main agent in many industries and aromatic organic compounds entrance in the environment. There are several methods of treating including physical, chemical, biological and physicochemical for remove this matter. Among advanced oxidation methods can be combined ozonation process with persulfate catalytic are noted. The purpose of this study was to evaluate the efficiency of ozonation process with the use of persulfate in removal furfural from aqueous solution.

**Materials and Methods:** In this study, the efficiency of the process with a concentration furfural 5 to 30 mg/L, concentration persulfate 4 to 15 mM, pH = 3-11 and reaction time of 35 minutes in the semi-continuous reactor with a capacity of one liter was obtained.

**Results:** The results of this study have been shown in conditions of operation optimal, pH = 3, persulfate dosage 12 mM, ozone dosage of 1 g/min and the initial concentration of furfural 5 mg/L, this process is capable remove of %93/34 percent Furfural and %70 of the initial COD.

**Conclusion:** The results of this study showed that the ozone/persulfate process can be a suitable process for the removal of organic aromatic compounds including pollutants of interest.

**Keywords:** Furfural, O<sub>3</sub>, Persulfate, Aqueous solutions.