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

علیرضا رحمانی[1]، جمال مهر علی پور[2]، صبا مجیدی[3*]

[1] دکتری بهداشت محیط، استاد دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران

[2] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران

[3] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان،ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲٤ ؛ 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 محیط‌زیست واردشده است. ازجمله روش‌های مؤثر در حذف این آلاینده روش‌های اکسیداسیون پیشرفته مانند ازن زنی همراه با کاتالیزور می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش بررسی کار آیی فرایند ازن زنی توأم با کاربرد پر سولفات در حذف فورفورال از محیط‌های آبی بوده است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه تجربی، در رآکتور نیمه‌پیوسته به حجم یک لیتر انجام پذیرفت و تأثیر متغیرهای غلظت فورفورال (۳۰- ٥ میلی‌گرم در لیتر)، دوز پر سولفات (۱٥-٤میلی مولار)، pH (۱۱-۳)، زمان واکنش (۳٥-۰ دقیقه) در دوز ازن ۱گرم در دقیقه موردبررسی قرار گرفت. همچنین به‌منظور اطمینان از کارایی فرآیند از شرایط بهینه غلظت COD مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که در pH= ۳، دوز پر سولفات برابر ۱۲ میلی مولار، دوز ازن برابر ۱ گرم در دقیقه و غلظت اولیه فورفورال برابر ٥ میلی‌گرم در لیتر، کار آیی حذف فورفورال و COD به ترتیب ۹۳/۳٤درصد و ۷۰درصد 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 ازجمله 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:** ۰۹۱۹-۳۸۱٥٥۹۲

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

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 متلاشی‌شده‌اند. ازجمله 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) [۲] مایع بی‌رنگ و روغنی با بویی شبیه بادام تلخ می‌باشد. [۱،۲،۳] ورود این ترکیبات به محیط‌زیست از طریق فاضلاب صنایعی مانند پتروشیمی، کاغذ و خمیر، داروسازی، صنایع غذایی بوده است. [۴] این ترکیب همچنین به‌عنوان حلال آروماتیک در تولید روغن‌های روان کننده در پالایشگاه نفت و تصفیه روغن [۵] ماده شیمیایی واسط، از بین برنده علف هرز، قارچ کش و یک طعم‌دهنده کاربرد داشته است. [۶،۷] میزان فورفورال در پساب حدوداً ۰/۰۵ درصد تخمین زده‌شده است. در صورت تخلیه فاضلاب حاوی فورفورال به محیط‌زیست اثرات شدیدی را در این زمینه به دنبال خواهد داشت. [۸] ازجمله اثرات می‌توان به آسیب به ریه‌ها، کبد، کلیه‌ها و طحال و نیز برای پوست، چشم‌ها و غشاهای مخاطی محرک می‌باشد. [۹] با توجه به طیف گسترده این ترکیب در محیط و اثرات ذکرشده لازم به حذف این ترکیب از فاضلاب می‌باشد. در راستای حذف فورفورال روش‌های متنوعی ازجمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی، فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی مورداستفاده قرارگرفته است. [۱۰،۱۱،۴،۱۲] ازجمله 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. [۱۳] از طرفی تصفیه بیولوژیکی شامل فرایند هوازی و بی‌هوازی که توسط بسیاری از محققان انجام اما این فرایند زمان‌بر، پرهزینه و برای مقیاس کوچک مورداستفاده 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 موردتوجه خاص قرارگرفته است. در بسیاری از موارد به‌کارگیری ازن به تنهائی برای حذف ترکیبات آلی مقاوم و تجزیه‌ناپذیر با توجه به مطالعات صورت گرفته قبلی دارای راندمان نسبتاً پایینی است. [۱۴،۱۵،۱۶] بنابراین طی چندین سال اخیر، از فرایندهای ترکیبی مانند استفاده توأم از ازن و هیدروژن پراکساید[۱۷]، ازن و اشعه فرابنفش فرایند ازن زنی توأم با فرایند فنتون و فرایند ازن زنی کاتالیزوری[۱۸] استفاده شده است. اکسیدکننده‌هایی نظیر H_2O_2, $KMnO_4$, O_3 به همراه ازن مورداستفاده قرارگرفته است. هریک از کاتالیزورهای ذکرشده 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 ونقل به علت جامد بودن و به‌علاوه بی‌خطر بودن محصولات جانبی، پر سولفات را به‌عنوان یک اکسنده امیدبخش در فرایندهای اکسایش پیشرفته می‌باشد. [۱۸،۱۹] 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 استفاده‌شده است که تلفیق این روش‌ها باعث تجزیه یون‌های پر سولفات به یون‌های رادیکال سولفات (روابط ۱و۲) که تسریع فرایند اکسایش را به همراه دارد. [۱۹]

$$S_2O_8^{2-} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2HSO_4^{0-} \quad (1)$$

$$SO_4^{2-} + HO^0 \rightarrow SO_4^{0-} + OH^- \quad (2)$$

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

هدف از این مطالعه بررسی فرآیند بررسی حذف فورفورال از محیط‌های آبی با استفاده از فرآیند ازن زنی کاتالیزوری با استفاده از پرسولفات بوده است.

مواد و روش‌ها

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 انجام‌شده است. مواد شیمیایی مورد مصرف شامل فورفورال (با درجه خلوص ۹۹/۸ درصد) و سایر مواد مانند پر سولفات با درجه خلوص۹۸درصد، اسیدسولفوریک، سدیم هیدروکسید از شرکت‌های مرک و سیگما آلدریچ تهیه گردید. در این مطالعه از دستگاه اکسیژن ساز مدل p۳۳۰، ساخت شرکت ایران نوین؛ دستگاه تولیدکننده ازن (HACH)، pH متر مدل Sensoal (HACH)، دستگاه سانتریفوژ(Sigma) و دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR5000 (HACH) مورداستفاده قرار گرفت.

روش کار

ابتدا غلظت ۱ گرم در لیتر از فورفورال به عنوان محلول مادر سپس غلظت‌های ۱تا ۱۰میلی‌گرم در لیتر جهت رسم منحنی کالیبراسیون تهیه شد. در ادامه‌ی آزمایشات، غلظت‌های مختلف از فورفورال در محدوده‌ی ۵-۳۰ میلی گرم در لیتر، pH در محدوده‌ی ۳ تا ۱۱، پر سولفات در محدوده‌ی غلظت ۱۵-۰ میلی مولار بر لیتر و در زمان‌های مختلف تا ثابت شدن کار آیی فرایند نمونه‌برداری شده است. در این مطالعه تنظیم pH محیط با استفاده از اسیدسولفوریک ۱ مولار و سدیم هیدروکسید ۱ نرمال صورت گرفت سپس توسط راکتور طراحی‌شده؛ فرایند تصفیه صورت پذیرفت. در هر مرحله از تحقیق و در زمان‌های تعیین‌شده ، ۵ میلی‌لیتر نمونه‌برداری شده و پس از ۵ دقیقه سانتریفوژ غلظت فورفورال با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۲۷۷نانومتر[۲] مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و در انتهای هر مرحله و با استفاده از رابطه ۳ کارایی حذف فورفورال محاسبه گردید:

$$RE(\%) = (C_i - C_f / C_i) \times 100 \quad (۳)$$

Removal Efficiency: کار آیی حذف فورفورال

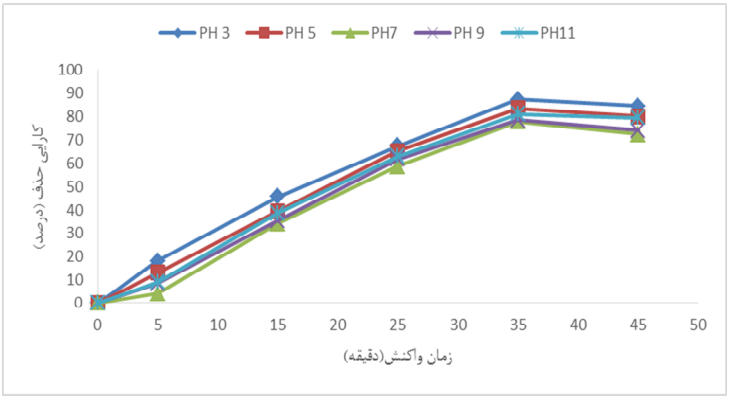
Ci: غلظت اولیه فورفورال

C_f : غلظت باقی‌مانده فورفورال

نتایج

اثر pH

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



نمودار۱: تأثیر pH محیط بر کار آیی فرایند ازن/پرسولفات (غلظت اولیه فورفورال ۵ میلی‌گرم در لیتر؛ دوز پر سولفات ٤ میلی مولار؛ دوز ازن ۱ گرم در دقیقه)

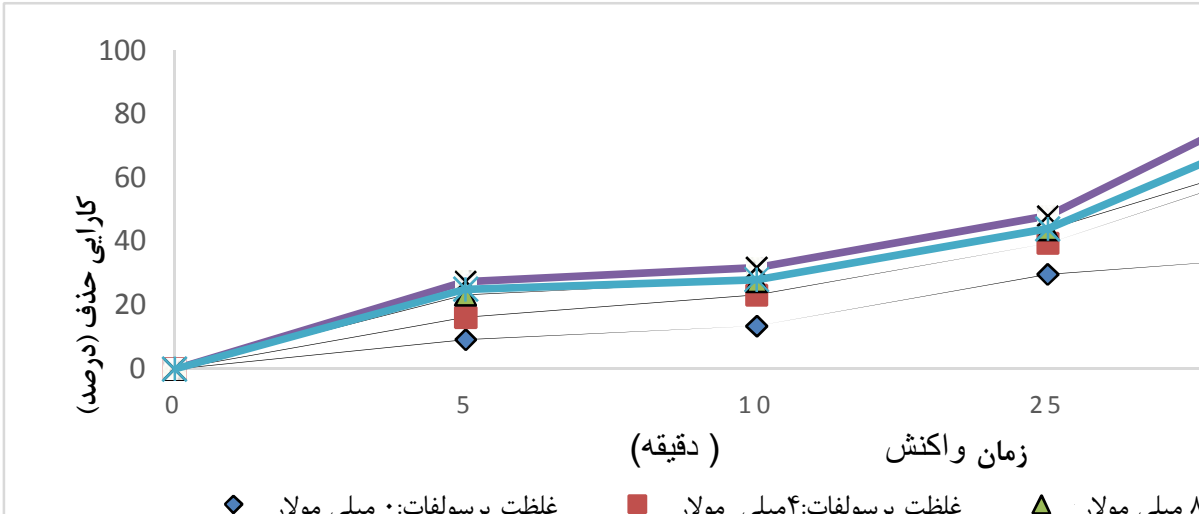
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

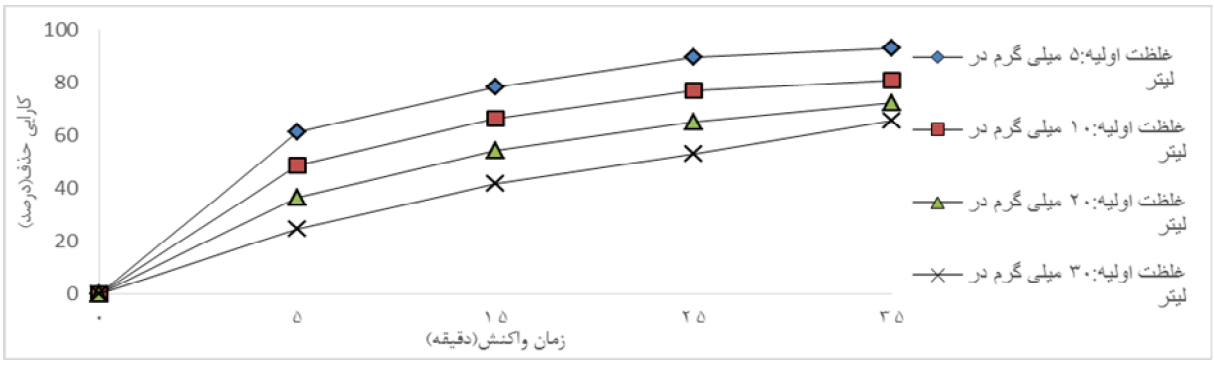
همان‌طور که در نمودار ۱ مشخص است pH تأثیر چشمگیر در کارایی فرآیند دارد. بعد از ۳۵ دقیقه از فرآیند و در pH برابر ۳؛ حداکثر کارایی حذف ۸۷/۲ درصد مشاهده شد. با افزایش pH کار آیی به‌صورت نزولی کاهش‌یافته است، اما در pH برابر ۱۱ و بعد از ۳۵ دقیقه از فرآیند بازهم افزایش کارایی دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که حداکثر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

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 موردبررسی قرار گرفت. در این مرحله از مطالعه که نتایج آن در نمودار (۲) ارائه‌شده است نشان داد که بالاترین کارایی حذف فورفورال توسط فرایند مورداستفاده هنگامی رخ می دهد که دوز پرسولفات ۱۲ میلی مولار است که ۹۳/۳٤ درصد از فورفورال اولیه را حذف نموده است.



نمودار ۲: تأثیر غلظت پرسولفات بر کارایی فرایند ازن/ پرسولفات (غلظت اولیه فورفورال ۵ میلی‌گرم در لیتر ،pH=3 ؛ دوز ازن ۱ گرم در دقیقه و زمان واکنش۳۵ دقیقه)



نمودار ۳: تأثیر غلظت اولیه فورفورال بر کارایی فرایند ازن/ پرسولفات(pH=3 ؛ غلظت پرسولفات ۱۲ میلی مولار؛ دوز ازن ۱ گرم در دقیقه و زمان واکنش ۳۵دقیقه)

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

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 کار آیی حذف فورفورال است.

اثر غلظت اولیه فورفورال

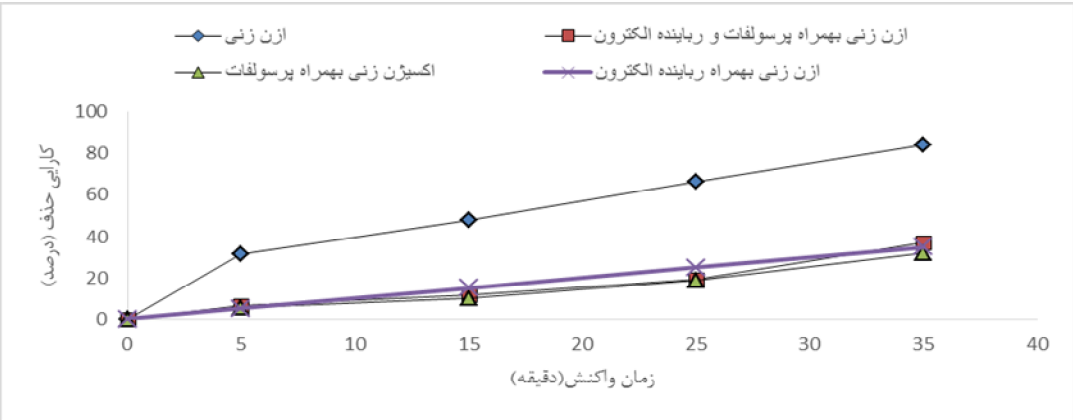
در این مرحله از مطالعه و در شرایط بهینه شامل pH محیط، غلظت پرسولفات و زمان واکنش غلظت‌های مختلف فورفورال را وارد محیط نموده و کارایی فرایند بررسی شد. نتایج ارائه‌شده در نمودار(۳) بیانگر این موضوع است که با افزایش غلظت فورفورال کارایی کاهش می یابد به‌طوری‌که در غلظت ۵ میلی گرم در لیتر فورفورال حداکثر کارایی حذف مشاهده شد که برابر ۹۳/۳٤ درصد و در غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر کارایی ٦۲/٤ درصد بوده است.

اثرات هم‌افزایی

در این بخش از مطالعه تأثیر حضور ازن در محیط ؛ تأثیر حضور پرسولفات؛ تأثیر حضور رباینده رادیکال (ترت بوتانول با غلظت ۰/۱ مولار درلیتر) موردمطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل در نمودار(٤) نمایش داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود. در شرایط بهینه آزمایش که عبارت است از غلظت اولیه فورفورال برابر ۵ میلی‌گرم در لیتر؛ pH برابر ۳ ؛ دوز پر سولفات برابر ۱۲میلی مولار و زمان واکنش ۳۵ دقیقه کارایی فرایند در حالت حداکثری است و برابر ۹۳/۳٤ درصد است. هنگامی‌که ازن زنی ساده صورت می‌گیرد ۵۹/۹٤ درصد از فورفورال حذف شد. درحالی‌که ترت بوتانول در محیط حضور دارد میزان تجزیه فورفورال در فرایند ازن/ پرسولفات و فرایند ازن زنی ساده به ترتیب ۸٤/۱۳ و ۳٦/٤ درصد است. زمانی که اکسیژن زنی به همراه پر سولفات صورت گرفت ۲۰/۰۵ درصد کارایی حذف مشاهده شد و پر سولفات به‌تنهایی توانست ۳/۰٤ درصد از کل فورفورال موجود در محیط را حذف نماید.

سینتیک واکنش

در تمامی فرایندها جهت پی بردن به نحوه‌ی انجام واکنش حذف آلاینده؛ مطالعه سینتیک واکنش انجام می‌شود. این بخش از مطالعه به مدل‌سازی و اجرای بهتر فرایند در مقیاس کاربردی کمک خواهد نمود. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده در جدول ۱سینتیک واکنش در فرایند موردمطالعه از سینتیک درجه‌دو تبعیت می‌کند.



نمودار٤: تعیین تأثیر پارامترهای مورد مطالعه بر کارایی حذف فورفورال از محیط

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

جدول۱: نتایج مطالعات سینتیک

غلظت آلاینده	سنتیک درجه صفر		سنتیک درجه‌یک		سنتیک درجه‌دو	
(میلی‌گرم درلیتر)	K_0	R^2	K_1	R^2	K_2	R^2
۵	۰/۱۱	۰/٦۹	۰/۰۹۲۵	۰/۸۳	۰/۰۷۸	۰/۹٦
۱۰	۰/۱۹۲	۰/۷٤	۰/۰٦۳	۰/۷۳	۰/۰۱۲	۰/۹۸
۲۰	۰/۳٦	۰/۸۲	۰/۰۵٤	۰/۷۳	۰/۰۰۳٦	۰/۹۸
۳۰	۰/۵۱	۰/۹۲	۰/۰٤۷	۰/۷٤	۰/۰۰۱۸	۰/۹٦

بحث و نتیجه‌گیری

اثر p H

به‌طورکلی می‌توان گفت در فرایندهای شیمیایی به‌ویژه اکسیداسیون پیشرفته ازجمله فرایند ازن زنی همراه با پرسولفات یکی از عوامل تأثیرگذار به‌طور مستقیم و غیرمستقیم pH محیط می‌باشد. [۲۰] در این مطالعه همان‌طور که اشاره شد pH در محدوده‌ی (۳-۱۱) مورد بررسی قرار گرفت. در فرایند 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 ۵-٤ واکنش داده و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌کند. در ادامه طبق روابط ۸-٦ رادیکال هیدروکسیل تولیدشده وارد واکنش با رادیکال پر سولفات شده و در انتها منجر به تولید SO_4^{2-} که باعث ادامه سیکل به‌طور متناوب شده است. [۲۱] رادیکال‌های هیدروکسیل و پر سولفات باعث تخریب ترکیبات آلی شده است ؛ بنابراین طبق شرایط فوق انتظار می‌رود که درpH خیلی اسیدی و خیلی بازی راندمان فرایند حداکثر مقدار خود باشد که نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این موضوع است. مطالعات پیشین سایر پژوهشگران نیز بیانگر این موضوع است که فرایند ازن/ پرسولفات در pH اسیدی و هم pH قلیایی دارای کار آیی مناسبی است. لیلی و همکاران در سال ۱۳۹۱ طی مطالعه‌ای که بر روی مقایسه کار آیی 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 [۲] همچنین جی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بالاترین کارایی حذف رنگ اسید نارنجی ۷ توسط الکترود/آهن/پرسولفات را در pH برابر ۳ ۷۷/۱ درصد در مقابل pH ۹ برابر ۷۱/۸ درصد گزارش کردند. [۲۱]

$$SO_4^{0-} + H_2O \rightarrow H^+ + SO_4^{2-} + OH^0 \quad \text{معادله ٤}$$

$$SO_4^{0-} + OH^- \rightarrow SO_4^{2-} + OH^0 \quad \text{معادله ۵}$$

$$SO_4^{0-} + OH^0 \rightarrow HSO_4^- + 1/2\ O_2 \quad \text{معادله٦}$$

$$S_2O_8^{0-} + H_2O \rightarrow 2HSO_4^- + 1/2\ O_2 \quad \text{معادله ۷}$$

$$HSO_4^- \rightarrow SO_4^{2-} + H^+ \quad \text{معادله ۸}$$

اثر غلظت آنیون پرسولفات

استفاده بهینه از عوامل کاتالیستی نقش مهمی در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته داشته است. همان‌طور که در نمودار۲ نشان داده شد با افزایش غلظت کاتالسیت راندمان حذف فورفورال افزایش می‌یابد. طبق روابط۹-۸ به دلیل این‌که رادیکال های هیدروکسیل و پرسولفات به میزان بیشتری تولید شده و در ادامه باعث تجزیه آلاینده مورد نظر به دی‌اکسید کربن و آب و اسیدهای معدنی می‌شود. [۱٤]

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

$SO_4^{0-} + M \rightarrow Product$ معادله ۹

$HO^0 + M \rightarrow Product$ معادله ۱۰

همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید افزایش حضور آنیون پرسولفات تا میزان بهینه یعنی ۱۲میلی مولار؛ به‌عنوان منبع تولید رادیکال سولفات به عنوان قوی ترین 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 رابطه۱۱ توصیف نمود.[۲۱]

$S_2O_8^{2-} + SO_4^{0-} \rightarrow S_2O_8^{0-} + SO_4^{2-}$ 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.[۲۲] 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.[۲۱]

اثر غلظت اولیه فورفورال

با توجه به مطالبی که در مقدمه بیان‌شده 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. درنتیجه فرآیند تجزیه آلاینده به‌طورکلی انجام نمی‌شود و باعث تولید محصولات حد واسط می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه با نتایج مطالعه‌ی کنگ چون و همکارانش در سال ۲۰۰۹ بر روی حذف فورفورال توسط فرایند UV/O_3 مطابقت دارد در این مطالعات نیز بالاترین کارایی فرایندها در پایین‌ترین مقدار فورفورال مشاهده شد.[۲۳]

تعیین تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی فرایند ازن /پرسولفات در حذف فورفورال

در این مرحله از مطالعه به‌صورت جداگانه تأثیر پارامترهای موردمطالعه در این فرایند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد در شرایط بهینه آزمایش بالاترین راندمان مربوط به تلفیق ازن زنی/پرسولفات سپس ازنی زنی در حضور ربایندە 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 موردمطالعه 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.[۲۱]

سینتیک واکنش

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

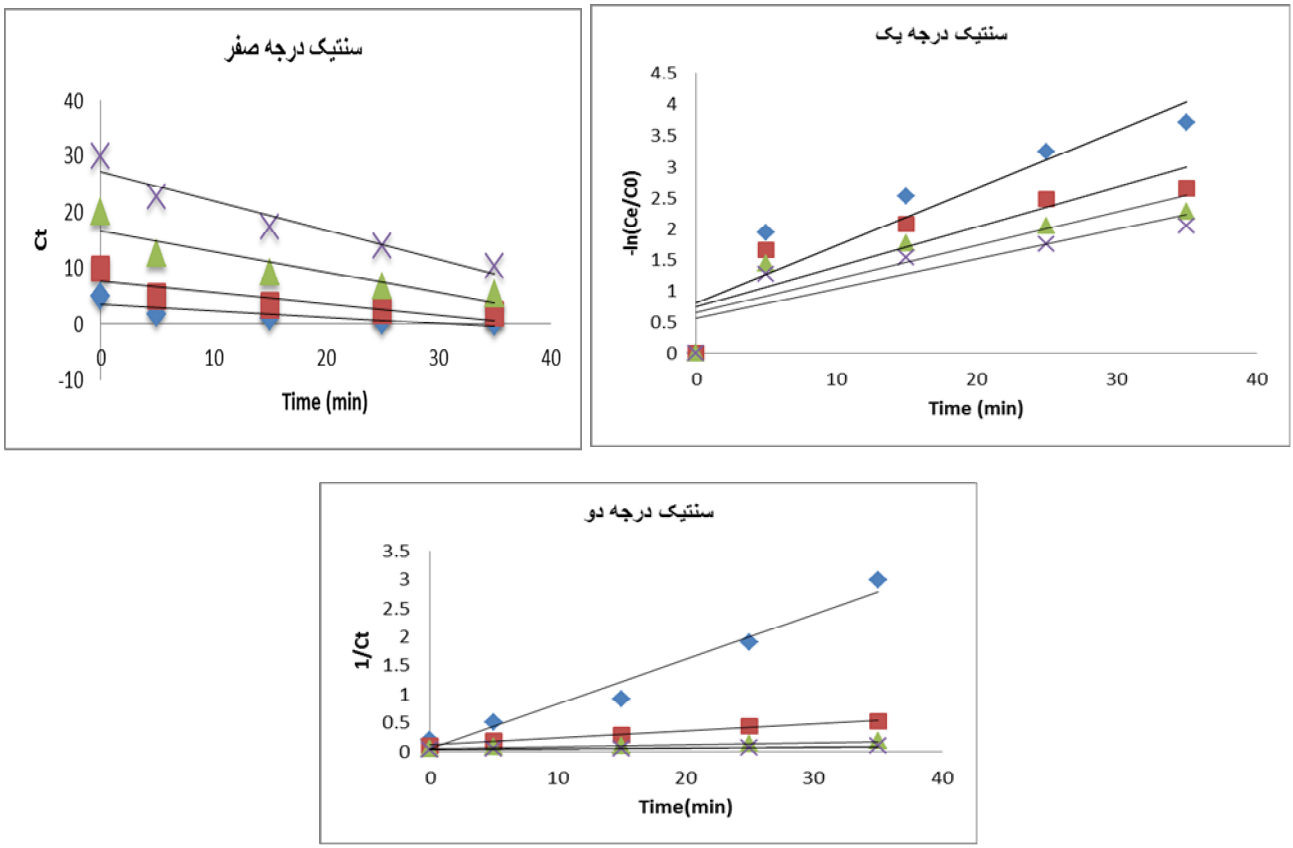
[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

فرایند انجام‌شده از سینتیک درجه‌دو پیروی می‌کند.

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

مدل سینتیکی	معادله	شکل خطی
سینتیک درجه صفر	$r_c = dc / dt = K_0$	$C - C_0 = -K_0t$
سینتیک درجه‌یک	$r_c = dc / dt = K_1C$	$LnC / C_0 = -K_1t$
سینتیک درجه‌دو	$r_c = dc / dt = K_2C^2$	$1/C - 1/C_0 = -K_2t$



نمودار ۵: سینتیک درجه صفر، یک، دو

به‌طورکلی 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 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

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

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.

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.

منابع

1. Shu H-Y. Degradation of dyehouse effluent containing CI Direct Blue 199 by processes of ozonation, UV/H_2O_2/ and in sequence of ozonation with UV/H_2O_2/. J Hazard Mater. 2006;133(1):92-8.
2. 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]
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. McKetta Jr JJ. Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Volume 1-Abrasives to Acrylonitrile: CRC Press; 1976.
8. Wang R, Shi W. Production and application of furfural. Henan Chem Ind. 2008;25(5):14-5.
9. Anbia M, Mohammadi N. A nanoporous adsorbent for removal of furfural from aqueous solutions. Desalination. 2009; 249(1):150-3.
10. Borghei S, Hosseini S. Comparison of furfural degradation by different photooxidation methods. Chem Eng J. 2008;139(3):482-8.
11. 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.
12. 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.
13. Kruithof JC, Kamp PC, Martijn BJ. UV/H2O2 treatment: A practical solution for organic contaminant control and primary disinfection. Ozone: Sci Eng. 2007;29(4):273-80.
14. 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.
15. Beltrán FJ, Rivas FJ, Montero-de-Espinosa R. Catalytic ozonation of oxalic acid in an aqueous TiO_2 slurry reactor. Appl Catal B: Environ. 2002;39(3):221-31.
16. Li L, Zhu W, Zhang P, Lu P, Zhang Q, Zhang Z. UV/O3/-BAC process for removing organic pollutants in secondary effluents. Desalination. 2007;207(1):114-24.
17. Lucas MS, Peres JA, Puma GL. Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O-3, O-3/UV and O-3/UV/H2O2) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. Sep Purif Technol. 2010;72(3):235-41.
18. Nawrocki J, Kasprzyk-Hordern B. The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation. Appl Catal B: Environ. 2010;99(1):27-42.
19. Khataee A. Application of central composite design for the optimization of photo-destruction of a textile dye using UV/S2O82-process. Polish J Chem Technol. 2009;11(4):38-45.
20. 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.
21. Jie Wu HZ, Juanjuan Qiu. Degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by a novel electro/Fe2+/ peroxydisulfate process J Hazard Mater. 2012;215-216(4):138-45.
22. Lin H, Wu J, Zhang H. Degradation of bisphenol A in aqueous solution by a novel electro/Fe^{3+} peroxydisulfate

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

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.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]

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

Alireza. Rahmani[1], Jamal. Mehralipour[2], Saba. Majidi[3*]

[1.] Prof. of Environmental Health Eng, Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran
[2.] M.Sc. Student of Environmental Health Eng, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran
[3.] 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_3, Persulfate, Aqueous solutions.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.18869/acadpub.jehe.4.2.115]