

Removal of Metronidazole Using Ozone Activated Persulfate from Aqua Solutions in Presence of Ultrasound

Abdolmotaleb Seidmohammadi¹,

Ghorban Asgari¹,

Leyla Torabi²

¹ Associate Professor, Social Determinants of Health Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

² MSc in Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

(Received April 20, 2015 ; Accepted August 10, 2016)

Abstract

Background and purpose: Metronidazole is a serious environmental pollutant due to high consumption and persistence in biological degradation. This study aimed at removal of metronidazole using ozone (O₃) activated persulfate (PS) in presence of ultrasound (US).

Materials and methods: A laboratory scale study was carried out in batch reactor using US irradiation and O₃ generator apparatuses. The effects of operating parameters such as pH of the solution, different initial concentrations of persulfate, initial metronidazole concentration, different ion strength, and radical scavenger were evaluated. Metronidazole concentration was determined using DR-5000 Spectrophotometer in 320 nm wavelength.

Results: The results showed that removal of metronidazole decreased by increasing the pH of solution from 3 to 11. The removal rate of metronidazole was dependent on initial PS dosages and the highest rate of removal was found in 500 mg/l (94.7%), but in higher concentrations the removal rate decreased. Also, the metronidazole removal rate decreased by increase in initial concentration of metronidazole. The COD removal rate in optimum condition was 56%.

Conclusion: Activation of PS by US/O₃ process could serve as a novel treatment for removal of metronidazole in aqueous solution.

Keywords: ultrasound, ozonation, persulfate activation, metronidazole

J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 26(143): 160-173 (Persian).

حذف مترونیدازول با استفاده از پرسولفات فعال شده با ازن در حضور امواج فراصوت در محیط های آبی

عبدالمطلب صیدمحمدی^۱

قربان عسگری^۱

لیلا ترابی^۲

چکیده

سابقه و هدف: مترونیدازول از جمله فراورده های دارویی است که به دلیل گستردگی مصرف و مقاومت در برابر تجزیه بیولوژیکی از آلاینده های مهم در محیط به شمار می رود. لذا این مطالعه به منظور بررسی امکان حذف این ماده آلی با استفاده از فرایند فعال سازی پرسولفات با استفاده از ازن در حضور امواج فراصوت مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش ها: این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی و در سیستم ناپیوسته با استفاده از راکتور حاوی مولد امواج فراصوت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و سیستم تولید ازن به میزان ۰/۵ گرم در لیتر انجام شد. تاثیر پارامترهای بهره برداری نظیر pH محلول (۱۱-۳)، غلظت پرسولفات (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر)، غلظت اولیه مترونیدازول (۵ تا ۳۰ میلی گرم در لیتر)، تغییرات شدت یونی (۱/۱۳ تا ۱/۰۳ گرم در لیتر) و تاثیر ترت بوتانل در عملکرد فرایند مورد بررسی قرار گرفت. هم چنین میزان معدنی سازی از طریق اندازه گیری COD تعیین شد. غلظت مترونیدازول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۳۲۰ نانومتر اندازه گیری شد.

یافته ها: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با افزایش pH محلول از ۳ تا ۱۱ کارایی، حذف ماده آلی کاهش یافت، به نحوی که بیشترین حذف مترونیدازول در pH های ۳ و ۵ به ترتیب برابر با ۹۲ و ۹۰ درصد در زمان تماس ۶۰ دقیقه به دست آمد. کارایی حذف مترونیدازول به غلظت اولیه پرسولفات بستگی داشته و بیشترین حذف ماده آلی در غلظت های اولیه ۵۰۰ و ۷۵۰ میلی گرم بر لیتر به ترتیب به میزان ۹۴/۷ و ۹۵ درصد حاصل و در مقادیر بیش از آن راندمان حذف کاهش یافت. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش غلظت اولیه مترونیدازول، میزان حذف کاهش یافت. هم چنین تغییرات شدت یونی بر عملکرد فرایند، تاثیر نداشت. بر اساس دیگر نتایج این مطالعه، بیشترین رادیکال فعال در این فرایند، رادیکال پرسولفات بود. میزان حذف COD در شرایط بهینه بهره برداری، ۵۶ درصد بود.

استنتاج: استفاده از فرایند فعال سازی پرسولفات با استفاده از ازن در حضور امواج فراصوت به میزان قابل توجهی می تواند مترونیدازول را حذف و به عنوان یک روش کارآمد به تنهایی یا به عنوان پیش تصفیه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: امواج فراصوت، ازن، فعال سازی پرسولفات، مترونیدازول

مقدمه

در دهه های اخیر، حضور آلاینده های با منشاء آلی در منابع آبی تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامتی انسان محسوب می شوند. ترکیبات دارویی یکی از انواع این آلاینده ها به شمار می روند که به طور

E-mail: torabiliela@yahoo.com

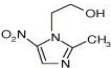
مؤلف مسئول: لیلا ترابی - همدان: دانشگاه علوم پزشکی همدان، دانشکده بهداشت

۱. دانشیار، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

۲. کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۱ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۵/۲/۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۵/۲۰

جدول شماره ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مترونیدازول (۵، ۱)

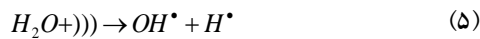
۱۷۱/۲	وزن مولکولی (g mol ⁻¹)
۹/۵	حلالیت در آب (gr/l)
۲/۵۵	pKa
	ساختار مولکولی

تأثیر نامطلوب این ماده شیمیایی بر محیط و سلامت انسان لزوم حذف این ماده را از منابع آبی، بیش از پیش مورد توجه قرار داده است. استفاده از پرتو گاما، جذب سطحی، تجزیه نوری و بیولوژیکی، سیستم‌هایی غشایی، کوآگولاسیون، اکسیداسیون شیمیایی توسط امواج فراصوت (US - Ultra Sound)، فنتون، O₃/O₃ (۱۱)، O₃/US در حضور کاتالیست‌های مختلف، O₃ در حضور نانوذرات مختلف (۱۴-۶) و ... با مزایا و معایب خاص خود از روش‌های متداولی هستند که در حذف آنتی‌بیوتیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته از جمله روش‌های نوین حذف آلاینده‌ها از محیط آبی به شمار می‌آیند که طی چند دهه اخیر با استقبال فراوانی از سوی محققین به عنوان فناوری‌های نوید بخش و جایگزین برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی ترکیبات آلی خصوصاً آلاینده‌های آلی مقاوم مورد استفاده قرار گرفته است (۱۸-۱۴). از مهم‌ترین ویژگی‌های این فناوری، کارایی بالا، کم بودن هزینه‌های راه‌اندازی و بهره‌برداری و تنوع در روش‌های مورد استفاده است. امروزه استفاده از عوامل اکسید کننده نظیر پراکسید هیدروژن، پرسولفات، پریودات و ... به منظور افزایش کارکرد فرایندهای اکسیداسیون با هدف حذف بیش تر آلاینده‌های آلی مورد توجه محققین قرار گرفته است (۱۷، ۱۹). آنیون پرسولفات با فرمول شیمیایی S₂O₈²⁻ به عنوان یک عامل اکسیدان با پتانسیل اکسیداسیون - احیای ۲/۰۱ ولت در فرایندهای حذف شیمیایی ترکیبات مقاوم مورد استفاده قرار گرفته است. پرسولفات به عنوان یک آنیون غیرانتخابی، محلول و پایدار دارای ویژگی‌های خاص و منحصر به فرد از جمله بالا بودن سرعت سینتیک،

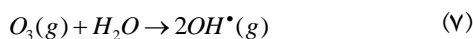
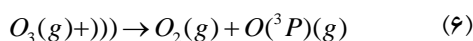
عمده از طریق تخلیه فاضلاب و پساب‌های شهری و صنعتی وارد منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شوند. حضور مواد دارویی در محیط، به دلیل پایداری بالا، نه تنها باعث اختلال در فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب در سیستم‌های تصفیه می‌شوند، بلکه اثرات سمی بر انسان و دیگر موجودات زنده داشته و به همین دلیل حذف آن‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است (۲۱). از میان طیف گسترده آلاینده‌های دارویی، آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل اثرات ضد میکروبی، به‌طور گسترده در پزشکی و دامپزشکی مورد استفاده قرار گرفته و به همین دلیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این ترکیبات آلی نه تنها از طریق پساب خروجی از صنایع داروسازی بلکه به دلیل ناقص بودن مکانیسم متابولیسم در طی دوره درمان، به محیط وارد می‌شوند (۳). عمده‌ترین تأثیر ترکیبات دارویی، سمیت برای میکروارگانیسم‌های موجود در محیط و بر هم زدن تعادل اکولوژی و مقاومت میکروارگانیسم‌ها در برابر اثرات ضد میکروبی ترکیبات دارویی می‌باشد (۳-۱). نتایج تحقیقات نشان داده است که بیش از ۸۰ نوع مختلف مواد دارویی فعال در محیط زیست در غلظت‌های تا چندین میلی‌گرم در خروجی واحدهای تصفیه فاضلاب به آب‌های سطحی، زیر زمینی و آب شرب شناسایی شده است (۴). غلظت برخی از این آلاینده‌ها در پساب کارخانه‌های دارویی به ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز می‌رسد (۵).

ترونیدازول با فرمول شیمیایی C₆H₉N₃O₃ یکی از پرکاربردترین آنتی‌بیوتیک‌ها در جهان با خاصیت آنتی‌باکتریال و ضد التهابی از دسته نیتروایمیدازول بوده و برای درمان عفونت‌های ناشی از باکتری‌های بی‌هوازی و پروتوزوئرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده شیمیایی تنها داروی گروه نیتروایمیدازول است که سازمان بهداشت جهانی آن را در لیست داروهای اساسی قرار داده است (۵، ۶). جدول شماره ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مترونیدازول را بیان نموده است.

دلیل سهولت استفاده و عدم تولید محصولات جانبی سمی در ترکیب با سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در حین استفاده از امواج فراصوت در فعالسازی پرسولفات به دلیل عملیات تجزیه حرارتی پرسولفات، رادیکال‌های متعدد مطابق روابط ۱ تا ۵ از جمله H^* ، O^{2-} و SO_4^* تولید می‌شود که قابلیت واکنش پذیری بالایی دارند (۲۷).

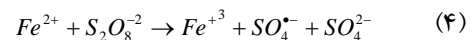
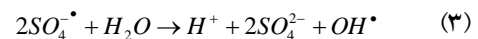
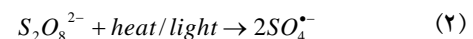
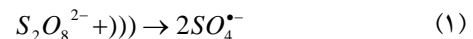


با این حال و با عنایت به نتایج مطالعات Wang و همکاران که طی زمان ۱۲۰ دقیقه و با استفاده از فرایند فعالسازی پرسولفات با امواج فراصوت، تنها ۴۳/۸۸ درصد کاربامازپین حذف شده بود (۲۷)، استفاده از عوامل تحریک کننده نظیر ازن و فلزات دو ظرفیتی در فرایند فعالسازی پرسولفات با هدف تسریع در فرایند اکسیداسیون، مورد توجه محققین قرار گرفته است (۳۲-۲۸). ازن با پتانسیل اکسیداسیون احیای ۲/۰۷ ولت، یکی از اکسیدان‌های مطرح در حذف ترکیبات آلی در محیط است که به علت عدم اثر بخشی به صورت مجزا عمدتاً به صورت توأم با پراکسید نیترورژن (۳۳)، امواج فرا صوت (۲۹)، پرسولفات (۳۲) و ... به منظور حذف مواد آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس مطالعه Wang و همکاران (۱۲)، در حین استفاده توأم از ازن و امواج فراصوت، عملیات تجزیه ازن در حباب‌های کاویتاسون اتفاق افتاده و نهایتاً منجر به تولید رادیکال هیدروکسیل پر قدرت بر اساس روابط ۶ و ۷ می‌شود.



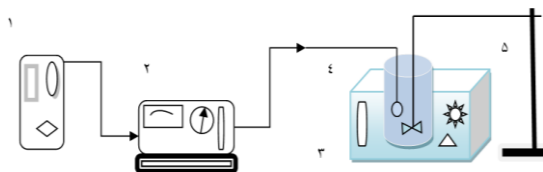
نتایج ارائه شده توسط Hou و همکاران هر چند بیانگر اثر بخشی فرایند توأم فراصوت-ازن در حذف تتراسیکلین در مقایسه با استفاده از هر یک از آن‌ها به تنهایی بوده است، اما کارایی چندانی در حذف کامل ماده آلی گزارش نشده است (۱۳). هم‌چنین نتایج مطالعه Salem و همکاران با هدف فعالسازی پرسولفات با استفاده از ازن در حذف ماده آلی، حاکی از اثر بخشی

پایداری بیش‌تر در دمای محیط و وابستگی کم‌تر به نوع ماده آلی می‌باشد. نتایج مطالعات متعدد بیانگر پایداری این ماده در محیط و عدم اثر بخشی آن به تنهایی در حذف مواد آلی و لزوم فعالسازی آن با هدف افزایش کارکرد فرایند در حذف مواد آلی است (۲۴-۲۰). امواج فرابنفش، امواج فراصوت، گرما و فلزات دو ظرفیتی از جمله مهم‌ترین عوامل فعالساز پرسولفات به شمار می‌روند که نهایتاً پرسولفات را به رادیکال‌های آزاد سولفات (SO_4^*) و هیدروکسیل (OH) با پتانسیل اکسیداسیوم و احیا ۲/۵۶ و ۲/۷۱ ولت که قابلیت حمله و اکسیداسیون ترکیبات آلی را بر اساس روابط ۱ تا ۴ دارند، تبدیل می‌کند (۲۲).



امواج فرا صوت به هر موج صوتی با فرکانس بیش‌تر از حد توانایی شنیداری انسان (۲۰ تا ۴۰ کیلوهرتز) اطلاق می‌شود که به دلیل مزیت هائی از جمله کارایی بالا و عدم ایجاد آلودگی ثانویه در محیط زیست به عنوان یک عامل ضد میکروبی و حذف کننده آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (۲۵، ۲۶). مکانیسم اصلی این فرایند در اکسیداسیون آلاینده‌ها، ایجاد حفره یا میکرو حباب‌های حاصل از پدیده کاویتاسیون صوتی در آب است که منجر به ایجاد حفره‌هایی در آب می‌شود که حاصل آن، تولید فشار در حدود ۱۰۰۰ اتمسفر و دمای ۵۰۰۰ کلوین است که در نهایت منجر به تشکیل رادیکال هیدروکسیل خواهد شد. علی‌رغم محاسن فراوان امواج US، نتایج مطالعات متعدد در چند سال اخیر نشان داده است که کاربرد امواج US به صورت مجزا به دلیل کارایی کم، نیاز به زمان طولانی و انرژی محدود، قابلیت استفاده در مقیاس‌های بزرگ را ندارد (۲۷-۲۹). به همین دلیل برای افزایش راندمان و غلبه بر معایب اشاره شده، کاربرد توأم امواج فراصوت به

منحنی کالیبراسیون رسم گردید. در تمام مراحل آزمایش و به منظور بررسی پارامترهای بهره‌برداری در حذف مترونیدازول در توالی زمانی ۱۵ دقیقه تا مدت زمان ۶۰ دقیقه، نمونه‌برداری انجام و میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر DR5000 تعیین گردید. در ادامه مراحل انجام آزمایش به شرح زیر است:



تصویر شماره ۱: طرح شماتیک پایلوت دستگاه مورد استفاده در پژوهش (۱- اکسیژن ساز، ۲- ژنراتور ازن، ۳- محفظه التراسوند، ۴- محفظه واکنش، ۵- همزن)

تاثیر تغییرات pH در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

بدین منظور نمونه‌های سینتیک را با افزودن هیدروکسید سدیم و اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال در دامنه pH برابر ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ تنظیم نموده و با افزودن مترونیدازول و پرسولفات، به ترتیب به مقدار ۲۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر در مدت زمان ۹۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت و مقدار ازن ۰/۵ گرم در ساعت قرار داده و پس از نمونه‌برداری، غلظت مترونیدازول تعیین شد.

تاثیر تغییرات غلظت پرسولفات در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

در این مرحله از انجام آزمایشات، تاثیر مقادیر متفاوت پرسولفات در محدوده ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در pH بهینه، غلظت اولیه ۲۰ mg/l از مترونیدازول و ازن به مقدار ۰/۵ گرم در ساعت، تحت تاثیر امواج اولتراسوند قرار گرفته و نمونه‌برداری در زمان تماس ۶۰ دقیقه انجام گرفت.

تاثیر تغییرات غلظت مترونیدازول در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

به منظور تعیین تاثیر تغییرات غلظت مترونیدازول

فرایند توام ازن/پرسولفات در مقایسه با هر یک از آنها به تنهایی بوده است (۳۴). بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص تاثیر فرایند توام امواج فراصوت/ازن/پرسولفات به منظور حذف ترکیبات آلی از جمله آنتی‌بیوتیک‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این مطالعه، تاثیر فرایند فعال‌سازی پرسولفات با استفاده از امواج التراسوند و ازن در حذف مترونیدازول و تاثیر پارامترهای بهره‌برداری در محلول‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته است.

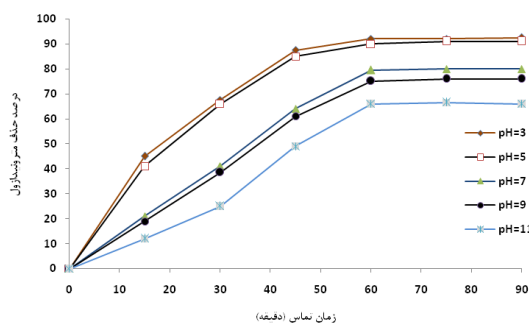
مواد و روش‌ها

مترونیدازول، هیدروکسید سدیم، اسید کلریدریک، پرسولفات سدیم، تری‌بوتانل و کلرید کلسیم از شرکت مرک آلمان تهیه شد. در این پژوهش از یک دستگاه مولد امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز مدل Luc-405 ساخت کشور کره و دستگاه مولد ازن مدل COD-OM نوع IA با ظرفیت حداکثری ۰/۵ گرم در ساعت ساخت شرکت HATCH مجهز به منبع تامین‌کننده اکسیژن استفاده شد.

مشخصات پایلوت و روش کار

مطالعه حاضر یک مطالعه تجربی است که در آزمایشگاه تحقیقاتی آب و فاضلاب دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام گرفت. بدین منظور یک راکتور جریان منقطع به حجم یک لیتر در داخل حمام مولد امواج فراصوت با توانایی تولید فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و تحت تاثیر ازن با دبی ۰/۵ گرم در ساعت قرار گرفت. شماتیک راکتور مورد استفاده در این پژوهش در تصویر شماره ۱ نشان داده شده است. در ابتدا با حل کردن مقدار مشخصی از پودر مترونیدازول، محلولی با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان محلول مادر تهیه شد. سپس غلظت‌های ۰/۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر از آنتی‌بیوتیک برای رسم منحنی کالیبراسیون توسط دستگاه اسپکتروفتومتری در pH برابر ۷ تهیه شده و

امواج فراصوت قرار می گیرد، بخار آب موجود در حباب های ناشی از کایتاسیون، می تواند به اشکال H^+ یا OH^- در آید که ناشی از pH محیط است (۳۱). نتایج تاثیر مقادیر متفاوت pH محیط در دامنه ۳ تا ۱۱ در حضور پرسولفات برابر با ۲۵۰ میلی گرم در لیتر، ازن ۰/۵ گرم در ساعت و غلظت اولیه مترونیدازول برابر با ۲۰ میلی گرم در لیتر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نمودار شماره ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار شماره ۱، در pH اسیدی نسبت به شرایط قلیایی و خنثی در فرایند توأم پرسولفات/ازن/التراسوند، میزان حذف ماده آلی بیش تر بوده است. بر این اساس بعد از مدت زمان ۶۰ دقیقه از انجام واکنش در pH برابر ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ به ترتیب ۹۲، ۹۰، ۷۹، ۷۵ و ۶۶ درصد از مترونیدازول حذف شد که با توجه به اختلاف ۲ درصدی بین کارایی حذف مترونیدازول در pH برابر ۳ و ۵، به منظور کاهش هزینه های حاصل از استفاده از اسید برای پایین آوردن pH جهت افزایش راندمان و هم چنین استفاده از مواد قلیایی برای افزایش مجدد pH در پایان واکنش، pH برابر ۵ به عنوان بهترین گزینه گردید. همان گونه که بیان شد مهم ترین علت تاثیر تغییرات pH محیط بر تجزیه ترکیبات آلی در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، نوع و میزان رادیکال تولیدی در این فرایند است (۲۰). انتخاب نوع رادیکال تولید شده در فرایند فعال سازی پرسولفات به pH محلول



نمودار شماره ۱: تاثیر pH های مختلف در حذف مترونیدازول در فرایند ازن/امواج فراصوت/پرسولفات (غلظت مترونیدازول ۲۰ mg/l، ازن ۰/۵ گرم در ساعت و پرسولفات ۲۵۰ mg/l)

در محدوده ۵ تا ۳۰ میلی گرم در لیتر، نمونه هایی با مقادیر بهینه پرسولفات در معرض امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و ازن با دبی ۰/۵ گرم در ساعت در pH برابر ۵ قرار داده شد. پس از ۶۰ دقیقه، نمونه برداری صورت گرفته و میزان حذف مترونیدازول تعیین شد.

تاثیر شدت یونی در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

به منظور تعیین تاثیر شدت یونی بر کارایی حذف در شرایط بهینه بهره برداری در فرایند فوق، مقادیر ۰/۱۳، ۰/۲۵ و ۱/۰۳ گرم در لیتر کلرید کلسیم ($CaCl_2$) به جریان ورودی اضافه شده و در مدت زمان ۶۰ دقیقه تحت فرایند توأم امواج فراصوت/ازن/پرسولفات قرار گرفته و میزان حذف مترونیدازول تعیین شد.

تاثیر ماده مداخله کننده در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

برای تعیین تاثیر ماده مداخله کننده، با افزودن تربوتانل در غلظت ۰/۰۲ نرمال در شرایط بهینه بهره برداری، نمونه سنتتیک در مدت زمان ۶۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت و مقدار ازن ۰/۵ گرم در ساعت قرار گرفته و پس از نمونه برداری، غلظت مترونیدازول تعیین شد.

اندازه گیری غلظت مترونیدازول

همان گونه که بیان شد، در فواصل زمانی معین، نمونه برداری انجام و غلظت مترونیدازول در طول موج ۳۲۰ نانومتر اندازه گیری شد (۳۵).

یافته ها

تاثیر تغییرات pH در حذف مترونیدازول در فرایند

$US/O_3/S_2O_8^{2-}$

سرعت واکنش های شیمیایی به pH محیط بستگی داشته و pH محلول به طور مستقیم و غیرمستقیم بر اکسیداسیون مواد شیمیایی تاثیر گذار است (۱۷). در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، تغییرات pH از طریق تولید رادیکال های متنوع بر میزان اکسیداسیون مواد آلی تاثیر گذار است. هنگامی که محلولی تحت تاثیر

بستگی دارد. در حین استفاده از پرسولفات به عنوان ماده اکسیدان و بر اساس روابط ۱ تا ۵ و در شرایط اسیدی، رادیکال پرسولفات تولید می‌شود که دارای پتانسیل اکسیداسیون - احیای ۲/۶۵-۳/۱ ولت است. در محیط قلیائی، رادیکال سولفات با یون‌های هیدروکسیل وارد واکنش شده و رادیکال هیدروکسیل تولید می‌کنند که دارای پتانسیل اکسیداسیون - احیای ۲/۸-۲/۷ ولت است (روابط ۸ و ۹). لذا رادیکال پرسولفات به دلیل استفاده از دو مکانیسم تهاجمی یعنی ربایش هیدروژن و انتقال الکترون و پایداری بیش‌تر در محیط، تاثیر گذاری بیش‌تری در اکسیداسیون ترکیبات آلی در مقایسه با رادیکال هیدروکسیل علاوه بر ظرفیت اکسیداسیون و احیاء بیش‌تر دارد (۲۰). هم‌چنین طبق رابطه ۱۰ و در محیط‌های قلیائی، رادیکال هیدروکسیل تولید شده به عنوان رباینده رادیکال عمل نموده و واکنش آن با رادیکال پرسولفات منجر به تشکیل آنیون سولفات می‌شود که می‌تواند با رادیکال‌های فعال در یک سیستم واکنش داده و از طریق از بین بردن آن‌ها باعث کاهش راندمان حذف آلاینده در سیستم مورد نظر شود (۲۰). هم‌چنین بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار شماره ۱ مشخص گردید که با افزایش زمان تماس از ۶۰ به ۹۰ دقیقه، کارایی حذف تغییر چندانی نداشته است که علت آن مصرف پرسولفات و تبدیل ازن به اکسیژن محلول بوده است که به همین دلیل در ادامه آزمایشات، زمان ۶۰ دقیقه جهت انجام واکنش انتخاب گردید. نتایج این مطالعه در خصوص تغییرات pH در حذف ماده آلی با مطالعه رحمانی و همکاران برای حذف آنتی‌بیوتیک سیروفلوکساسین با استفاده از فرایند ازن/ پرسولفات از پساب صنایع دارویی مطابقت دارد. نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط بهینه بهره‌برداری که شامل pH برابر ۳، دز ازن ۱ گرم در ساعت، غلظت آنتی‌بیوتیک برابر ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و غلظت پرسولفات ۱۰ میلی‌مولار بود، حداکثر به میزان ۹۶ درصد از آنتی‌بیوتیک سیروفلوکساسین حذف شد (۳۶). هم‌چنین در مطالعه‌ای که

توسط Lee و همکارانش با عنوان اکسیداسیون پرسولفات برای حذف اسید پرفلورواکتانیک انجام گرفت، نتایج نشان داد که حداکثر راندمان حذف در pH برابر ۲/۵ بوده است (۱۹). هم‌چنین در مطالعه صید محمدی و همکاران نیز بیش‌ترین مقدار حذف ماده آلی در فرایند فعالسازی پرسولفات در محیط اسیدی حاصل شده است (۱۷).

تاثیر تغییرات غلظت پرسولفات در حذف مترونیدازول

در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

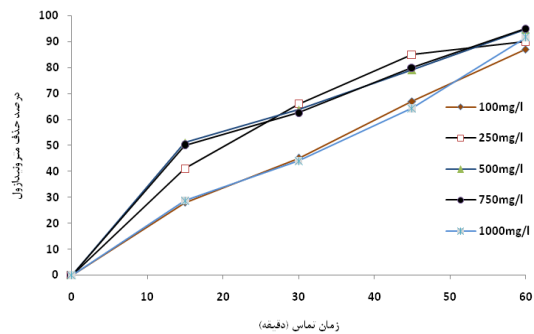
در فرایند اکسیداسیون پیشرفته، نوع و غلظت ماده اکسیدکننده یکی از فاکتورهای موثر در حذف ترکیبات آلی است. آنیون پرسولفات یکی از عوامل اکسیداسیون دو الکترونی است که در حضور فعال‌کننده‌ها، به رادیکال سولفات با قدرت اکسیداسیون و احیای بالا در مقایسه با ازن و رادیکال هیدروکسیل تبدیل می‌شود. رادیکال پرسولفات تولید شده، یکی از تاثیرگذارترین عوامل اکسیدکننده است که توانایی تجزیه ترکیبات آلی مقاوم به دی‌اکسیدکربن، آب و اسیدهای معدنی را دارد. این رادیکال نه تنها توانایی حمله به ترکیبات آلی به صورت مستقیم و تجزیه آن‌ها را دارد، بلکه قادر است به صورت غیر مستقیم، با آب و یون‌های هیدروکسیل وارد واکنش شده و رادیکال هیدروکسیل تولید نماید که خود عامل مهم در تجزیه مواد آلی به شمار می‌رود (۱۷، ۲۷، ۳۱).

نتایج مربوط به تاثیر غلظت پرسولفات در دامنه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در pH برابر با ۵ و در حضور ازن و امواج فراصوت در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار شماره ۲، در غلظت اولیه پرسولفات ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۸۷، ۹۰، ۹۴/۷، ۹۵ و ۹۱/۵ درصد مترونیدازول حذف شده است. نتایج بیانگر آن بود که هر چه غلظت پرسولفات بیش‌تر باشد، به همان نسبت رادیکال‌های تولید شده بر اثر آن افزایش یافته و کارایی حذف افزایش می‌یابد. بنابراین و با عنایت به نتایج، از آنجائی که در غلظت‌های پرسولفات

ماده آلی به غلظت پرسولفات بستگی داشته است (۲۹) که مشابه مطالعه حاضر می‌باشد. هم‌چنین در مطالعه انجام گرفته به وسیله قانعیان و همکاران برای حذف رنگ توسط پرسولفات پتاسیم و نور خورشید، غلظت پرسولفات مورد استفاده ۲ تا ۵ میلی‌مول بوده و با افزایش غلظت، راندمان افزایش داشت. با توجه به این که اثر غلظت‌های ۲ تا ۵ میلی‌مول، اختلاف چندانی نداشت، برای بررسی از غلظت ۲ میلی‌مول استفاده شده است (۳۷).

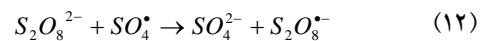
تاثیر تغییرات غلظت مترونیدازول در حذف مترونیدازول در فرایند $US/O_3/S_2O_8^{2-}$

فاضلاب صنایع داروسازی اغلب دارای غلظت‌های مختلفی از آنتی‌بیوتیک‌ها می‌باشد. از این رو بررسی راندمان حذف مترونیدازول به عنوان تابعی از غلظت اولیه آنتی‌بیوتیک بسیار مهم می‌باشد. نتایج تاثیر غلظت‌های اولیه مترونیدازول در دامنه ۵ تا ۳۰ میلی‌گرم در لیتر (۱) در شرایط بهینه بهره‌برداری (pH برابر ۵، غلظت پرسولفات برابر ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه) در نمودار شماره ۳ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن بود که در فرایند توام امواج فراصوت/ازن/پرسولفات، با افزایش غلظت مترونیدازول، کارایی حذف تدریجاً و به مقدار کم کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در مقادیر متفاوت مترونیدازول در غلظت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر، کارایی حذف مترونیدازول به ترتیب به ۹۹، ۹۷، ۹۶، ۹۴/۷ و ۸۲/۵ درصد رسیده است. افزایش غلظت اولیه آلاننده در شرایط بهینه بهره‌برداری به دو دلیل عملکرد فرایند را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نخست آن که در مقادیر ثابت رادیکال سولفات تولید شده، با افزایش غلظت آلاننده، میزان تماس و مواجه با رادیکال آزاد کاهش یافته و در نتیجه سرعت اکسیداسیون کاهش می‌یابد. دوم، افزایش غلظت آلاننده باعث تولید بیش‌تر محصولات جانبی ناشی از اکسیداسیون خواهد شد که این ترکیبات، مصرف‌کننده مقادیر بیش‌تری از رادیکال آزاد خواهند بود (۳۲). در این شرایط،



نمودار شماره ۴: تاثیر غلظت‌های مختلف پرسولفات در حذف مترونیدازول در فرایند ازن/امواج فراصوت/پرسولفات (pH برابر ۵، غلظت مترونیدازول ۲۰ mg/l و ازن ۰/۵ گرم در ساعت)

۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اختلافی در مقدار حذف مترونیدازول مشاهده نشد، لذا غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان مقدار بهینه پرسولفات انتخاب گردید. اما افزایش حضور آنیون پرسولفات تا حد خاصی به عنوان منبع تولید رادیکال سولفات عمل کرده و در مقادیر بیش از مقدار بهینه، مجدداً کارایی حذف فرایند کاهش یافته است. علت این اتفاق را این گونه می‌توان شرح داد که بر اساس روابط ۱۲ و ۱۳، با افزایش غلظت ماده اکسیدکننده به بیش از مقدار بهینه، از یک سو رادیکال سولفات به رادیکال پرسولفات تبدیل می‌شود که دارای پتانسیل اکسیداسیون احیا کم‌تری نسبت به رادیکال سولفات است و از سوی دیگر رادیکال سولفات به عنوان رادیکال اسکاونجر عمل کرده و به عاملی برای تبدیل رادیکال سولفات به پرسولفات عمل می‌نماید (۲۷).

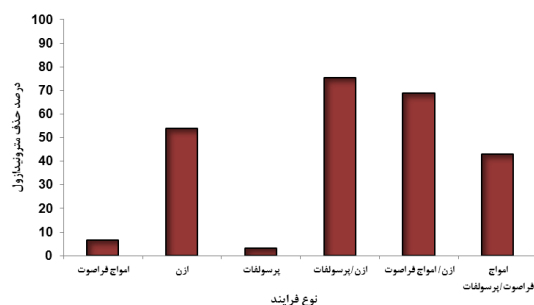


در مطالعه Hao و همکارانش برای حذف پرفلورواکتان از رپرسولفات استفاده کردند و نتایج حاکی از آن بود که با افزایش غلظت تا ۱۰۰ میلی‌مولار، راندمان حذف افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد و با افزایش غلظت پرسولفات تا ۲۰۰ میلی‌مولار، شیب افزایش راندمان کم‌تر می‌شود (۲۸). هم‌چنین در مطالعه‌ای که Zhang و همکارانش با عنوان حذف تری‌کلرواتان با فرایند الترا/پرسولفات فعال انجام دادند، راندمان حذف

افزایش زمان تماس و افزایش غلظت ماده اکسیدکننده از جمله راه‌های غلبه بر مشکل است. نتایج سایر مطالعات مانند مطالعه انجام گرفته توسط بهرامی و همکاران در حذف مترونیدازول و یا مطالعه Zhang و همکاران در حذف متیل اورنگک نیز این نکته را که افزایش غلظت اولیه ماده هدف، بر کارایی و سرعت واکنش تاثیر گذار است تایید می‌کند (۲۹،۱).

امواج فراصوت/ازن/پرسولفات<ازن/پرسولفات<ازن/فراصوت<ازن< امواج فراصوت<پرسولفات

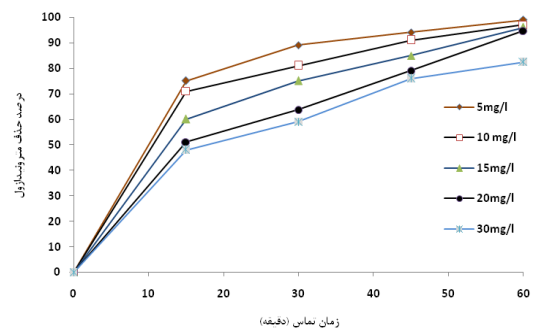
نتایج مطالعه حاضر با مطالعه‌ای که توسط Su و همکاران با عنوان حذف آموکسی‌سیلین با استفاده از رادیکال سولفات و التراسوند انجام گرفت، مشابه است. نتایج نشان داد که راندمان حذف COD در استفاده از ازن زنی ساده در مدت زمان ۶۰ دقیقه، ۲۰ درصد بوده و در ترکیب ازن با امواج فراصوت، راندمان حذف به ۶۰ درصد رسید (۲۶).



نمودار شماره ۴: مقایسه حذف مترونیدازول در شرایط بهینه بهره‌برداری در فرایندهای مختلف

تاثیر فرایند ازن/التراسوند/ پرسولفات در حذف COD

بر اساس نتایج حاصل از فرایند ازن/التراسوند/ پرسولفات در شرایط بهینه بهره‌برداری که در نمودار شماره ۵ نشان داده شده است، با افزایش زمان تماس به تدریج و ضمن کاهش غلظت ماده آلی، میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیائی (COD) کاهش یافت. بر این اساس و با اندازه‌گیری مقدار COD در توالی زمانی ۱۵ دقیقه از صفر تا ۶۰ دقیقه به ترتیب ۸، ۲۰، ۴۴ و ۵۶ درصد در زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه از انجام واکنش بوده است. این در حالی است که مقدار حذف مترونیدازول در زمان‌های فوق به ترتیب ۵۱، ۶۳/۷، ۷۹ و ۹۴/۷ درصد بود. این نتایج بیانگر آن است که با وجود حذف مترونیدازول به میزان بیش از ۹۵ درصد، عملیات معدنی‌سازی کامل آن انجام نشده و در خلال فرایند، محصولات حد واسط تولید شده‌اند که سبب عدم حذف کامل COD در خروجی از راکتور شدند. مطابق با نتایج

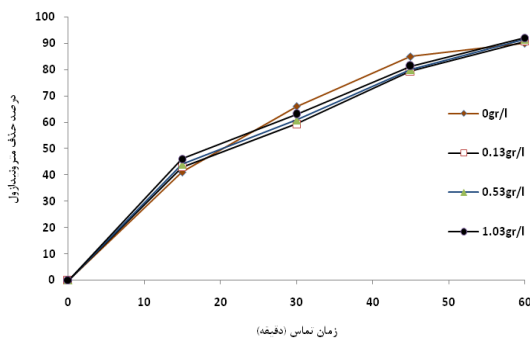


نمودار شماره ۳: تاثیر غلظت های مختلف مترونیدازول در حذف مترونیدازول در فرایند ازن/ امواج فراصوت/ پرسولفات (pH برابر ۵، غلظت پرسولفات ۲۰ mg/l و ازن ۰/۵ گرم در ساعت)

تاثیر فرایندهای ازن زنی، امواج فراصوت و پرسولفات به تنهایی بر حذف مترونیدازول

نتایج مقایسه تاثیر ازن، پرسولفات، امواج ماورای صوت و هم‌چنین فرایندهای ازن/پرسولفات، ازن/فراصوت و پرسولفات/فراصوت در شرایط بهینه بهره‌برداری در نمودار شماره ۴ نشان داده شده است. با گذشت زمان ۶۰ دقیقه از انجام واکنش به ترتیب ۳/۲، ۳/۶، ۳/۶، ۷۵/۶، ۶۹ و ۴۳ درصد از ماده آلی در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب توسط فرایندهای ازن، پرسولفات، امواج ماورای صوت، ازن/پرسولفات، ازن/فراصوت و پرسولفات/فراصوت حذف گردید. مقایسه این نتایج با فرایند توأم امواج فراصوت/ازن/پرسولفات بیانگر تاثیر بیش‌تر آن نسبت به سایر فرایندهای مورد مطالعه در این پژوهش بوده است، به نحوی که بر اساس میزان حذف می‌توان فرایندهای مورد استفاده را بر صورت زیر دسته‌بندی نمود:

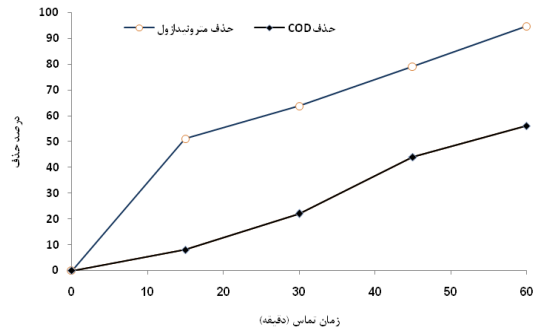
جزئی در کارائی سیستم است. افزایش جزئی کارائی سیستم در حذف ماده آلی را می توان به کاهش تمایل یون ها در نزدیک شدن به هم به دلیل افزایش شدت یونی نسبت داد. در حقیقت با افزایش قدرت یونی، تفکیک ترکیبات به یون های مربوطه افزایش می یابد که موجبات تجزیه ترکیبات آلی را به سایر محصولات فراهم می آورند. مطابق نتایج حاصل از این مطالعه، در نتایج پژوهش Hafedh و همکاران نیز در فرایند حذف مترونیدازول با الکتروشیمیایی، راندمان حذف به سرعت در حضور سدیم کلراید افزایش یافت (۳۸). در حالی که در مطالعات Waldemer و همکاران (۲۱) و ززولی و همکاران (۳۹) که به ترتیب برای اکسیداسیون اتن از پرسولفات فعال شده با حرارت و برای حذف نیترات از نانو ذرات آهن استفاده کرده بودند، میزان شدت یونی رابطه عکس با میزان حذف داشته است.



نمودار شماره ۷: تغییرات شدت یونی در حذف مترونیدازول در فرایند ازن/امواج فراصوت/پرسولفات (pH برابر ۵، ازن ۰/۵ گرم در ساعت و پرسولفات ۲۵۰ mg/l)

تعیین تاثیر رادیکال تری بوتائل در حذف مترونیدازول
آنیون پرسولفات بر اثر فرایندهای شیمیایی و حرارتی فعال شده و محصولات واسطه ای نظیر رادیکال پرسولفات تولید می کند که یک ماده بالقوه اکسیدان است. حضور رادیکال پرسولفات در محلول های آبی می تواند منجر به سلسله واکنش هایی شود که در نهایت می تواند منجر به تولید رادیکال هیدروکسیل شود. هر دو رادیکال تولید شده در این فرایند، توانایی تجزیه

این پژوهش، در مطالعه انجام گرفته توسط Hou و همکاران، برای حذف تتراسایکلین با فرایند ازن کاتالیست و التراسونیک، نتایج نشان داد که راندمان حذف COD بعد از ۲۰ دقیقه واکنش، ۴۱/۸ درصد بوده و با افزایش زمان ماند تا ۱۲۰ دقیقه، راندمان حذف به ۸۹/۱ درصد رسید (۱۳).



نمودار شماره ۵: مقایسه حذف COD و مترونیدازول در شرایط بهینه بهره برداری در فرایند ازن/امواج فراصوت/پرسولفات

در مطالعه دیگری که Salem و همکارانش برای حذف رنگ، COD و آمونیاک با استفاده از پرسولفات، ازن و فنتون انجام دادند، نتایج نشان داد که راندمان حذف این سه فاکتور در فرایند ازن/پرسولفات به ترتیب ۷۲، ۹۳ و ۵۵ درصد بعد از ۲۱۰ دقیقه واکنش بوده و در فرایند ازن/فنتون، راندمان حذف به ترتیب ۶۵، ۹۸ و ۲۲ درصد بعد از این مدت زمان حاصل شده است (۳۴).

تأثیر تغییرات شدت یونی در حذف مترونیدازول

نتایج تاثیر تغییرات شدت یونی با استفاده از کلرید کلسیم در فرایند التراسوند/ازن/پرسولفات که در نمودار شماره ۶ نشان داده شده است. در مدت زمان ۶۰ دقیقه از انجام واکنش در فرایند التراسوند/ازن/پرسولفات در حضور کلرید کلسیم در غلظت های ۰/۰۳ و ۰/۵۳، ۰/۱۳ گرم در لیتر و غلظت پرسولفات ۲۵۰ میلی گرم در لیتر، به ترتیب راندمان حذف ۹۰/۷۵، ۹۱/۴ و ۹۲ درصد بود که در مقایسه با کارائی حذف در شرایط بدون حضور عوامل افزایش دهنده شدت یونی (۹۰ درصد)، اختلاف چندانی را نشان نمی دهد، اما بیانگر افزایش

نتایج این بخش از پژوهش با مطالعه Hao و همکارانش با عنوان تجزیه سونوشیمیایی آمونیوم پرفلورواکتان با استفاده از اکسیدان پرسولفات، مطابقت دارد (۲۸).

در این مطالعه به بررسی کارایی حذف مترونیدازول با استفاده از پرسولفات فعال شده با ازن در حضور امواج فراصوت پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان حذف ماده آلی در فرایند امواج فراصوت/ازن/پرسولفات متاثر از شرایط بهره‌برداری از جمله pH محیط، غلظت پرسولفات، غلظت ماده آلی و زمان تماس می‌باشد. بیش‌ترین مقدار حذف ماده آلی در محیط با pH اسیدی، غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر پرسولفات و در حضور ازن و امواج فراصوت اتفاق افتاد. غلظت پرسولفات عامل تاثیرگذار در کارایی فرایند بود و با افزایش آن از مقدار بهینه، راندمان حذف کاهش یافت. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که در کاربرد هر یک از فرایندهای ازن، پرسولفات و امواج فراصوت به تنهایی امکان حذف کامل ماده آلی مقدور نبود. نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که تغییرات شدت یونی تأثیری در حذف آلاینده نداشت. هم‌چنین بررسی اثر ترت بوتانل نشان داد که عمده رادیکال تولیدی در این فرایند، رادیکال پرسولفات می‌باشد. نتایج عملیات معدنی‌سازی در فرایند امواج فراصوت/ازن/پرسولفات نیز بیانگر حذف ۵۶ درصدی COD در این فرایند بود.

سپاسگزاری

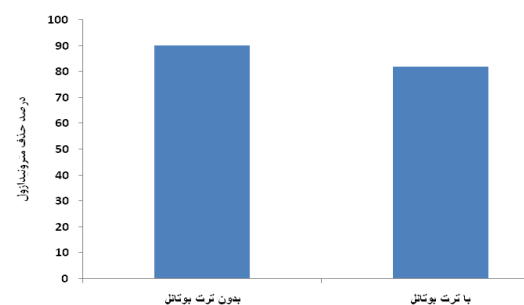
این پژوهش بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی بهداشت محیط است که با حمایت مادی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی همدان به شماره ۹۴۰۳۰۵۱۱۳۲ انجام شده است که بدین وسیله تقدیر و قدردانی می‌شود.

References

1. Bahramiasl F, Kermani M, Farzadkia M, Esrafil A, Salahshour Arian S, mokammel

ترکیبات آلی را دارند، هر چند کارایی رادیکال سولفات با توجه به پتانسیل اکسیداسیون و احیا بالای آن، بیش از رادیکال هیدروکسیل است (۴۰). به منظور تعیین نوع رادیکال غالب در فرایند، از ترت بوتیل الکل استفاده می‌شود که قادر است با رادیکال هیدروکسیل وارد واکنش شده و برای آن نقش ریباینده رادیکال را ایفا نماید. این در حالی است که این ماده امکان واکنش با رادیکال پرسولفات را ندارد.

نتایج حاصل از تأثیر ترت بوتانل بر کارایی حذف مترونیدازول در فرایند التراسوند/ازن/پرسولفات در نمودار شماره ۷ نشان داده شده است. براساس نتایج، پس از گذشت ۶۰ دقیقه از انجام واکنش در شرایط بهینه بهره‌برداری، کارایی حذف مترونیدازول از ۹۰ درصد به ۸۲ درصد رسید. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که رادیکال هیدروکسیل تا حدود ۸ درصد در کارایی حذف تأثیر داشته که با افزودن ترت بوتانل، راندمان حذف به همان مقدار کاهش یافته است. لذا با عنایت به آن که فرایند در محیط اسیدی انجام گرفته است و از طرفی در محیط اسیدی امکان غالب بودن رادیکال پرسولفات بیش‌تر است، لذا نتایج این مرحله از انجام آزمایشات مبین غالب بودن رادیکال پرسولفات در محیط اسیدی می‌باشد.



نمودار شماره ۷: تأثیر ماده مداخله کننده در حذف مترونیدازول در فرایند ازن/امواج فراصوت/پرسولفات (pH برابر ۵، ازن ۰/۵ گرم در ساعت و پرسولفات ۵۰۰ mg/l)

A, et al. Removal of metronidazole from aqueous solution using ozonation process. J

- Mazandaran Univ Med Sci 2015; 24(121): 131-140 (Persian).
2. Dong H, Yuan X, Wang W, Qiang Z. Occurrence and removal of antibiotics in ecological and conventional wastewater treatment processes: A field study. *J Environ Manage* 2016; 178: 11-19.
 3. Klavarioti M, Mantzavinos D, Kassinos D. Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *J Environ Manage* 2009; 35(2): 402-417.
 4. Hassani AH, Torabian A, Rahimi KH. Performance of Iron-Zero (nZVI) nanoparticles in removal of cephalexin from synthetic wastewater. *Journal Water & Wastewater* 2012; 25(2): 85-92 (Persian).
 5. Watkinson AJ, Murby EJ, Costanzo SD. Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: Implications for environmental discharge and wastewater recycling. *Water Res* 2007; 41(18): 4164-4176.
 6. Shemer H, Kunukcu YK, Linden KG. Degradation of the pharmaceutical metronidazole via UV, fenton and photo-fenton processes. *Chemosphere* 2006; 63(2): 269-276.
 7. Sanchez-Polo M, Rivera-Utrilla J, Prados-Joya G, Ferro-Garcia MA, Bautista-Toledo I. Removal of pharmaceutical compounds, nitromidazoles, from waters by using the ozone/ carbon system. *Water Res* 2008; 42(15): 4163-4171.
 8. Saitoh T, Shibayama T. Removal and degradation of B-lactam antibiotics in water using didodecylmethyl ammonium bromide modified montemorillonite organoclay. *J Hazard Mater* 2016; 317: 677-685.
 9. Rivera-Utrilla J, Parados-Joya G, Sanchez-Polo M, Ferro-Garcia MA, Bautista-Toledo I. Removal of nitromidazole antibiotics from aqueous solution adsorbition/ bioadsorbition on activated carbon. *J Hazard Mater* 2009; 170(1): 298-305.
 10. Sanchez-Polo M, Rivera-Utrilla J, Prados-Joya G, Ocampo-Perez R. Metronidazole photodegradation in aqueous solution by using photosensitizers and hydrogen peroxide. *J Chem Technol Biot* 2011; 87(8): 1202-1208.
 11. Homem V, Santos LC. Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices- A review. *J Environ Manage* 2011; 92(10): 2304-4237.
 12. Wang Y, Zhang H, Chen L, Wang Sh, Zhang D. Ozonation combined with ultrasound for the degradation of tetracycline in a rectangular air-lift reactor. *Sep Purif Tecnol* 2012; 84: 138-146.
 13. Hou L, Zhang H, Wang L, Chen L. Ultrasound- enhanced magnetitic catalytic ozonation of tetracycline in water. *Chem Eng J* 2013; 229: 577-584.
 14. Hou L, Zhang H, Wang L, Chen L, Xiong Y, Xue X. Removal of sulfamethoxazole aqueous solution by sono- ozonation in the presence of a magnetic catalyst. *Sep Purif Tecnol* 2013; 117: 46-52.
 15. Shams Khorramabadi G, Belghadr I, Godini H, Ale-NabiAmlashi S, Hatami S, Godariz A, et al. The study of advanced oxidation process (UV/H₂O₂) performance in removal of the cefterixone antibiotic from aqueous solution. *Yaphte* 2014; 16(1): 23-31 (Persian).
 16. Asgari G, Seidmohammadi A, Chavoshani A. Pentachlorophenol removal from aqueous solutions by microwave/persulfate and microwave/H₂O₂: A comparative kinetic study. *J Environ Health Sci Eng* . 2014; 12 (1): 8-17.
 17. Seid-Mohammadi A, Asgari G, Poormohammadi A, Ahmadian M, Rezaeivahidian H. Removal

- of phenol at high concentrations using UV/persulfate from saline wastewater. *Desalination and Water Treatment* 2016; 57(42): 19988-19995.
18. Miralles-Cuevas S, Audino F, Oller I, Sanchez-Moreno R, Sanchez Perez JA, Malato S. Pharmaceutical removal from natural water by nanofiltration combined with advanced tertiary treatment (solar photo-Fenton, photo-Fenton-like Fe(III)-EDDS complex and ozonation). *Sep Purif Tecnol* 2014; 122: 515-22.
19. Lee Y-Ch, Lo S-L, Kuo J, Lin Y-L. Persulfate oxidation of perfluorooctanoic acid under the temperature of 20-40°C. *Chem Eng J* 2012; 198-199: 27-32.
20. Li B, Li L, Lin K, Zhang W, Lu Sh, Luo Q. Removal of 1,1,1-trichloroethane from aqueous solution by a sono-activated persulfate process. *Ultrason Sonochem* 2013; 20(3): 855-863.
21. Waldemer RH, Tratnyek PG, Johnson RL, Nurmi JT. Oxidation of chlorinated ethenes by heat-activated persulfate: Kinetics and products. *Environ Sci Technol* 2006; 41(3): 1010-1015.
22. Hussain I, Zhang Y, Huang Sh, Du X. Degradation of *p*-chloroaniline by persulfate activated with zero-valent iron. *Chem Eng J* 2012; 234: 269-276.
23. Naim S, Ghauch A. Ranitidine abatement in chemically activated persulfate systems: Assessment of industrial iron waste for sustainable applications. *Chem Eng J* 2016; 288: 276-288.
24. Kang J, Duan X, Zhou L, Sun H, Tade MO, Wang Sh. Carbocatalytic activation of persulfate for removal of antibiotics in water solutions. *Chem Eng J* 2016; 288: 399-340.
25. Seid Mohammadi A, Movahedian Attar H. *p*-Chlorophenol oxidation in industrial effluent by Ultrasonic/Fenton technology. *Water and Wastewater* 2010; 4(80): 43-48 (Persian).
26. Su S, Guo W, Yi C, Leng Y, Ma Z. Degradation of amoxicillin in aqueous solution using sulfate radical under ultrasonic irradiation. *Ultrason Sonochem* 2012; 19(3): 469-474.
27. Wang S, Zhou N. Removal of carbamazepine from aqueous solution using sono-activated persulfate process. *Ultrason Sonochem* 2016; 29: 156-162.
28. Hao F, Guo W, Wang A, Leng Y, Li H. Intensification of sonochemical degradation of ammonium perfluorooctanoate by persulfate oxidant. *Ultrason Sonochem* 2014; 21(2): 554-558.
29. Zhang H, Duan L, Zhang D. Decolorization of methyl orange by ozonation in combination with ultrasonic irradiation. *J Hazard Mater* 2006; 138(1): 53-59.
30. Abu Amr SS, Aziz HA, Adlan MN. Optimazation of stabilized leachate treatment using ozone/persulfate in the advanced oxidation process. *Waste Manage* 2013; 33(6): 1434-1441.
31. Wang X, Wang L, Li J, Qiu J, Cia C, Zhang H. Degradation of Acid Orange 7 by persulfate activated with zero valent iron in the presence of ultrasonic irradiation. *Sep Purif Tecnol* 2014; 122: 41-46.
32. Akbari S, Ghanbari F. Bisphenol A degradation in aqueous solutions by electrogenerated ferrous ion activated ozone, hydrogen peroxide and persulfate: Applying low current density for oxidation mechanism. *Chem Eng J* 2016; 294: 298-307 (Persian).
33. Oha BT, Seoa YS, Sudhakara D, Choea JH, Leea SM, Parkb YJ, et al. Oxidative degradation of endotoxin by advanced oxidation process (O₃/H₂O₂& UV/H₂O₂). *J Hazard Mater* 2014; 279: 105-110.

34. Salem SAA, Hamidi AA, Mohd NA, Mohammed JKB. Pretreatment of stabilized leachate using ozone/persulfate oxidation process. *Chem Eng J* 2013; 221: 492-499.
35. Ocampo-Pérez R, Orellana-Garcia F, Rivera-Utrilla J, Velo-Gala I, Lopez-Ramon MV, Alvarez-Merino MA. Nitroimidazoles adsorption on activated carbon cloth from aqueous solution. *J Colloid Interface Sci* 2013; 401: 116-124.
36. Rahmani AR, Shabanlo A, Majidi S, Tarlaniazar M, Mehralipoor J. Efficiency of ciprofloxacin (CIP) removal from pharmaceutical effluent using the ozone/persulfate (O_3 /PS) process. *J Water & Wastewater* 2014; 1: 40-48 (Persian).
37. Rahmani AR, Shabanlo A, Majidi S, Tarlaniazar M, Mehralipoor J. Efficiency of ciprofloxacin (CIP) removal from pharmaceutical effluent using the ozone/persulfate (O_3 /PS) process. *J Water & Wastewater* 2014; 1: 40-48 (Persian).
38. Hafedh B, Mabrouk B, Ridha A, Youssef S. Green electrochemical process for metronidazole degradation at BDD anode in aqueous solutions via direct and indirect oxidation. *Sep Purif Technol* 2016; 157: 9-16.
39. Zazouli M A, Dianatitilaki R, Safarpour M. Nitrate Removal from Water by nano zero Valent Iron in the Presence and Absence of Ultraviolet Light. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2014; 24 (113): 151-161 (Persian).
40. Anipsitakis GP, Dionysiou DD. Degradation of chlorinated aromatics with sulfate radical generated by the conjunction of pyroxymonosulfate with cobalt. *Environ Sci Technol* 2003; 37(20): 4790-4797.