



بررسی کارایی امواج اولتراسونیک در حذف فنل از فاضلاب سنتتیک

علی فاتحی زاده^۱، انسیه طاهری^۱، سمیرا اکبرپور منجرمویی^۲، شکوفه کریمیان^۳، نیلوفر فرقدانی^۴، سمیرا طاهرخانی^۳، مهسا خواجه^{۴*}

۱- استادیار- دکتری تخصصی مهندسی بهداشت محیط- گروه مهندسی بهداشت محیط- دانشکده بهداشت- دانشگاه علوم پزشکی اصفهان- اصفهان- ایران.

۲- کارشناسی مهندسی بهداشت محیط- گروه مهندسی بهداشت محیط- دانشکده بهداشت- دانشگاه علوم پزشکی اصفهان- اصفهان- ایران.

۳- کارشناس ارشد شیمی- گروه شیمی- دانشکده علوم- دانشگاه زنجان- زنجان- ایران.

۴- کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط- کمیته تحقیقات دانشجویی و گروه مهندسی بهداشت محیط- دانشکده بهداشت- دانشگاه علوم پزشکی اصفهان- اصفهان- ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

چکیده

مقدمه: فنل یکی از مواد سمی و خطرناک برای سلامت انسان و محیط زیست است که پس از تولید در منبع می‌تواند هم به صورت مصنوعی و هم به طور طبیعی وارد محیط زیست و بالاخص منابع آبی شده و صدمات جبران‌ناپذیری را ایجاد کند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی کارایی امواج اولتراسونیک در حذف فنل از فاضلاب سنتتیک می‌باشد.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر، یک مطالعه تجربی است که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. پایلوت مورد استفاده در این مطالعه، یک راکتور تماس امواج با فاضلاب سنتتیک و دستگاه مولد امواج اولتراسونیک بود. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای pH اولیه محلول، زمان تماس، غلظت اولیه فنل و توان امواج اولتراسونیک مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با افزایش pH محلول از ۴ تا ۸، راندمان حذف فنل کاهش یافت و افزایش pH اولیه محلول به بیش از ۸ منجر به بهبود راندمان حذف فنل شد. همچنین، با افزایش زمان تماس با امواج اولتراسونیک و شدت امواج، راندمان حذف فنل افزایش یافت. براساس نتایج حاصله، مقادیر بهینه pH محلول، زمان تماس، غلظت اولیه فنل و توان امواج اولتراسونیک به ترتیب برابر ۹، ۲۵ دقیقه، ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر و ۱۵۰ وات به دست آمد. **نتیجه‌گیری:** امواج اولتراسونیک به عنوان یک روش نوین و نسبتاً کارا برای حذف آلاینده‌های سخت تجزیه‌پذیر و مقاوم مانند فنل از محلول‌های آبی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فنل، محلول آبی، امواج اولتراسونیک، فاضلاب سنتتیک.

*نویسنده مسئول: اصفهان، خیابان هزارگریب، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط، تلفن: ۰۹۱۳۵۴۲۵۱۷۹، نمابر: ۰۳۱-۳۶۶۹۵۸۴۹.

Email: khajeh.mahsa22@gmail.com

ارجاع: فاتحی زاده علی، طاهری انسیه، اکبرپور منجرمویی سمیرا، کریمیان شکوفه، فرقدانی نیلوفر، طاهرخانی سمیرا، خواجه مهسا. بررسی کارایی امواج اولتراسونیک در حذف فنل از فاضلاب سنتتیک. مجله دانش و تندرستی در علوم پایه پزشکی ۱۳۹۸؛ ۱۴(۳): ۸-۱۵.

مقدمه

آلودگی منابع آب با انواع آلاینده‌های آلی و غیر آلی، مهم‌ترین مسأله و عامل نگرانی مسئولین امور تصفیه آب می‌باشد (۱). در بین آلاینده‌های آلی، فنل و مشتقات آن متداول‌ترین آلاینده‌هایی بوده که وجود آن‌ها در غلظت‌های کم باعث غیرقابل استفاده شدن منابع آبی می‌شود (۲). فنل با فرمول شیمیایی C_6H_6O و وزن مولکولی ۹۴/۱۱ گرم بر مول، یک هیدروکربن آروماتیک از مشتقات بنزن است که سالیانه حدود ۶ میلیون تن از آن در سراسر جهان تولید می‌شود (۳). این ترکیب سمی حلالیت بالایی در آب داشته و از طریق پساب صنایعی نظیر رزین‌سازی، پتروشیمی، پالایشگاه‌های نفت، پلاستیک، چرم‌سازی، داروسازی، صنعت فولاد و آفت‌کش‌ها وارد محیط می‌شود (۴ و ۵). فنل به‌صورت مصنوعی از حرارت دادن سولفات بنزن سدیمی با سود آبدار در فشار بالا و به‌صورت طبیعی از تقطیر بنزین و قطران زغال‌سنگ تولید می‌شود (۶). اثرات بهداشتی در اثر مواجهه با این ماده بستگی به مدت‌زمان تماس و دوز جذب‌شده دارد و شامل تحریک، سوزش، سوختگی‌های پوستی، مسمومیت‌های سیستماتیک همراه با کاهش فشارخون، افزایش ضربان قلب و کما می‌باشد (۷). همچنین فنل موجود در منابع آبی می‌تواند موجب تشکیل ترکیبات جانبی فرایندهای گندزایی و اکسیداسیون شود (۳). فنل و ترکیبات آن به علت سمیت بالا و تجزیه‌پذیری بیولوژیکی کم، در بدن انسان می‌تواند باعث تخریب پروتئین بافت‌ها، از کارافتادگی سیستم اعصاب مرکزی، آسیب به کلیه‌ها، کبد و پانکراس شود (۸ و ۹). آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا حد مجاز تخلیه پساب‌های حاوی فنل را یک میلی‌گرم در لیتر توصیه کرده است (۱۰). سازمان جهانی بهداشت نیز حد مجاز فنل در آب آشامیدنی را ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر تعیین کرده است (۱۱). بنابراین به‌منظور حفظ و کنترل سلامت انسان و محیط در مقابل اثرات مضر فنل، لازم است فاضلاب‌های حاوی این ترکیبات قبل از تخلیه به محیط، تصفیه شوند (۱۲).

فرایندهایی که برای حذف فنل و مشتقات آن بیشترین کاربرد را دارند شامل فرایندهای الکتروشیمیایی، اکسیداسیون شیمیایی، تصفیه بیولوژیکی، غشایی، پلیمریزاسیون، جذب، استفاده از فناوری نانو و غیره است. از معایب این روش‌ها می‌توان به هزینه بالا و خواص تجدیدناپذیر جاذب‌ها اشاره کرد (۱۳). در این میان، فرآیند اولتراسونیک به دلیل مزیت‌هایی که نسبت به روش‌های دیگر دارد، به‌عنوان یکی از روش‌های نوین در تصفیه آب انتخاب شده است. از مزیت‌های روش اولتراسونیک، تجزیه ترکیبات آلی فرار و نیمه فرار و آلاینده‌های سمی و مقاوم از محلول‌های آبی است (۱۴). این امر به علت تولید رادیکال‌های آزاد خیلی فعال با قدرت اکسیدکنندگی بالا مثل HO^{\cdot} , OH^{\cdot} , H^{\cdot} است که در طی انتشار امواج مافوق صوت بر اثر کواکسیسیون ایجاد می‌شوند. تولید حرارت موضعی شدید تا ۵۰۰۰ درجه کلونین

و فشار هیدرودینامیکی بالا تا حدود ۱۸۰ مگا پاسکال، باعث حذف و تجزیه ترکیبات آلی می‌شود (۱۵). همچنین به‌دلیل اینکه این روش یک فرآیند فیزیکوشیمیایی است و از امواج مافوق صوت استفاده می‌شود و در طی آن هیچ‌گونه ماده شیمیایی اضافه نمی‌شود، مشکل تولید ترکیبات جانبی را ندارد و یکی از سالم‌ترین روش‌های حذف در مقایسه با دیگر روش‌های شیمیایی از نظر بهداشتی است (۱۶ و ۱۷).

خورده دان و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی حذف تری‌هالومتان‌ها از آب شرب بندرعباس توسط امواج اولتراسونیک نشان دادند که امواج مافوق صوت، قابلیت حذف تری‌هالومتان‌ها را از محیط‌های آبی دارد، به‌طوری‌که بعد از زمان ۸ دقیقه تقریباً ۷۰ درصد از کلروفورم حذف شد (۱۸). کیدا و همکاران، حذف آفت‌کش‌های ارگانوکلره از محلول‌های آبی توسط هیدروژن پراکسید و امواج اولتراسونیک و ترکیب هردو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بعد از گذشت ۶۰ دقیقه امواج اولتراسونیک به همراه هیدروژن پراکسید بهترین راندمان را داشت ولی در ابتدای اکسیداسیون، راندمان فرآیند ترکیبی کمتر از امواج اولتراسونیک به‌تنهایی بود، در نتیجه آن‌ها زمان واکنش را یک عامل اثرگذار بر نتایج بیان کردند (۱۹). با توجه به اثرات مخرب فنل بر محیط‌زیست و سلامت انسان از یک‌سو و همچنین کارایی نامناسب سیستم‌های تصفیه موجود و مشکلات زیست‌محیطی حاصل از عدم کارایی این سیستم‌ها و مباحث اقتصادی فرایندهای مورد استفاده از سوی دیگر، مطالعه حاضر به‌منظور بررسی راندمان حذف فنل از فاضلاب سنتتیک به کمک امواج اولتراسونیک انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی است که به‌منظور بررسی کارایی امواج اولتراسونیک در حذف فنل از فاضلاب سنتتیک انجام شد. به‌منظور ساخت محلول فنل مادر، مقدار ۱ گرم از بلورهای فنل با دقت توزین شد و در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر حل شد. به علت حلالیت کند فنل در آب، کمی به محلول حرارت داده شد تا از انحلال کامل آن اطمینان حاصل شود. پس از خنک شدن محلول فوق و رسیدن به دمای محیط، با آب مقطر به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. با رقیق‌سازی محلول مادر، سایر غلظت‌های فنل تهیه شد. به‌منظور تنظیم pH محلول از سود و اسید کلریدریک با غلظت ۰/۱ M استفاده شد. تمام مواد شیمیایی مورد استفاده دارای درجه خلوص آزمایشگاهی بوده که از شرکت مرک (Merck Co. Germany) خریداری شد.

شمایی از پابلوت اولتراسونیک که در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۱ آورده شده است.

راکتور از جنس پلکسی گلاس با ابعاد $10 \times 10 \times 20$ سانتی‌متر با حجم کاری ۱ لیتر مورد استفاده قرار گرفت. برای القای امواج اولتراسونیک از

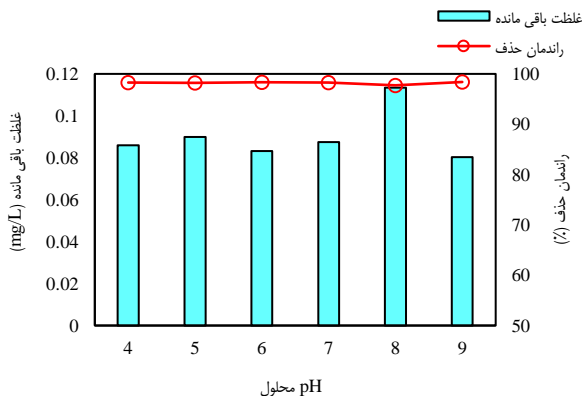
آزمایش‌ها، به منظور اندازه‌گیری غلظت فنل از دستگاه اسکتروفوتومتر نور مرئی (Milton Roy 20D Spectrophotometer, US) در طول موج برابر ۵۰۰ نانومتر استفاده شده و همچنین برای تنظیم و اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر پیش کالیبره شده دارای پروب شیشه‌ای (CG 824 SCHOTT, GmbH, Germany) استفاده شد.

جدول ۲- متغیرهای مورد بررسی در حذف فنل

مرحله	pH اولیه محلول	غلظت اولیه فنل (mg/L)	زمان تماس (min)	توان امواج اولتراسونیک (W)
pH اولیه محلول	۴ تا ۹	۵	۲۰	۱۰۰
زمان تماس	۹	۵	۵ تا ۶۰	۱۰۰
غلظت اولیه فنل	۹	۱۰ تا ۱۰	۲۵	۱۰۰
توان امواج اولتراسونیک	۹	۵	۲۵	۱۵۰ تا ۵۰

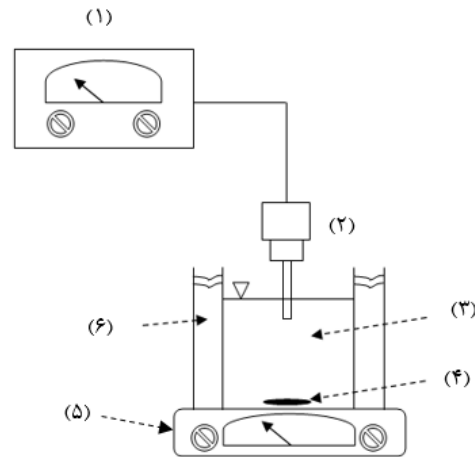
نتایج

به منظور بررسی تأثیر pH اولیه محلول در حذف فنل به وسیله امواج اولتراسونیک، دامنه pH اولیه در محدوده ۴ تا ۹ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی تأثیر pH اولیه محلول در حذف فنل به وسیله امواج اولتراسونیک در نمودار ۱ نشان داده شده است. بر این اساس با افزایش pH محلول از ۴ به ۸، راندمان حذف فنل از ۹۸٪ به ۹۷٪ کاهش یافت و افزایش pH اولیه به بیش از این مقدار مجدداً منجر به افزایش راندمان حذف فنل گردید. بر اساس نتایج حاصله، pH بهینه برای حذف فنل با استفاده از امواج اولتراسونیک برابر ۹ بوده که بیشترین راندمان حذف فنل برابر ۹۸٪ به دست آمد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود بیشترین غلظت باقی مانده فنل در pH محلول برابر با ۸ سنتجش شد که برابر با ۰/۱۱ میلی‌گرم در لیتر بود.



نمودار ۱- تأثیر pH اولیه محلول بر راندمان حذف فنل (زمان تماس: ۲۰ دقیقه، توان امواج اولتراسونیک: ۱۰۰ وات، غلظت اولیه فنل: ۵ میلی‌گرم در لیتر) نتایج حاصل از بررسی زمان تماس امواج اولتراسونیک بر حذف فنل در نمودار ۲ نشان داده شده است. بر این اساس به‌طور کلی، با افزایش زمان تماس، راندمان حذف فنل از فاضلاب سنتتیک دارای روند افزایشی می‌باشد.

دستگاه مولد اولتراسونیک (Bandelin Co.) استفاده و نوک منتقل‌کننده، ۳ سانتی‌متر زیر سطح آب قرار داده شد. مشخصات دستگاه اولتراسونیک مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به منظور اطمینان از اختلاط کامل محتویات در درون راکتور تماس و همچنین حفظ دمای راکتور به محدوده دمای آزمایشگاه، از همزن مغناطیسی و حمام آب سرد استفاده شده است.



شکل ۱- شماتیک پایلوت اولتراسونیک (۱) مولد اولتراسونیک، (۲) منتقل‌کننده امواج اولتراسونیک، (۳) راکتور تماسی محلول امواج، (۴) میله مگنت، (۵) همزن مغناطیسی و (۶) حمام آب سرد

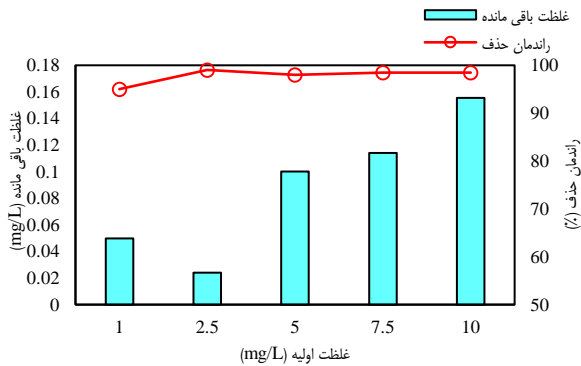
جدول ۱- مشخصات دستگاه اولتراسونیک مورد استفاده در این مطالعه

مشخصه	توضیحات
فرکانس دستگاه	۲۰ kHz
توان دستگاه	۵۰ - ۱۵۰ W
حجم نمونه به صورت ناپیوسته (Batch)	۰/۵ - ۱۰۰۰ mL
ولتاژ کاری	۲۳۰ V ($\pm 10\%$)

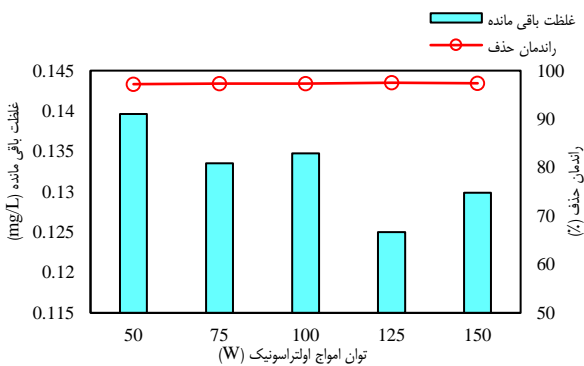
به منظور انجام آزمایش‌های حذف فنل، ابتدا نمونه حاوی غلظت مشخص از فنل تهیه شده به درون راکتور، تزریق و از طریق همزن مغناطیسی به هم زده شد. پس از القای امواج اولتراسونیک، در زمان‌های مشخص از محتویات درون راکتور نمونه لازم برداشت و غلظت باقی مانده فنل اندازه‌گیری شد. در این مطالعه متغیرهای مورد بررسی شامل pH اولیه محلول، زمان تماس، غلظت اولیه فنل و توان امواج اولتراسونیک بود. در جدول ۲ مراحل و متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه ارائه شده است.

اندازه‌گیری فنل بر اساس روش Direct Photometric 5530D Method از روش‌های مندرج در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب استفاده شد (۲۰). منحنی کالیبراسیون فنل نیز در محدوده غلظت ۰/۱۵ تا ۵ میلی‌گرم بر لیتر تهیه شد که در دامنه موردنظر منحنی به صورت خطی و با ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۹ بود. طی انجام

وات، راندمان حذف فنل از ۹۷/۲٪ به ۹۷/۵٪ افزایش یافت. از طرفی دیگر، غلظت باقی مانده فنل نیز با افزایش شدت امواج اولتراسونیک دارای روند کاهشی بوده است، به طوری که با افزایش شدت امواج اولتراسونیک از ۵۰ به ۱۵۰ وات، غلظت باقی مانده فنل از ۰/۱۴ میلی گرم در لیتر به ۰/۱۲ میلی گرم در لیتر کاهش یافت.



نمودار ۳-۱- کارایی امواج اولتراسونیک در حذف فنل در غلظت‌های اولیه مختلف (pH) محلول: ۹، توان امواج اولتراسونیک: ۱۰۰ وات و زمان تماس: ۲۵ دقیقه



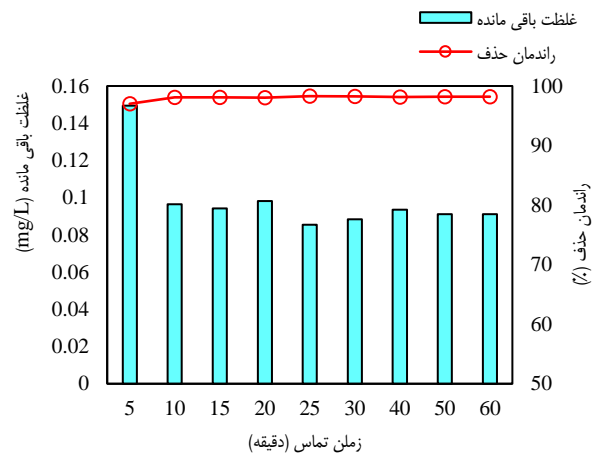
نمودار ۳-۲- بررسی اثر توان امواج اولتراسونیک بر راندمان حذف فنل (pH: ۹، زمان تماس: ۲۵ دقیقه، غلظت اولیه فنل: ۵ میلی گرم بر لیتر)

برای تشریح رفتار حذف مولکول‌های فنل در واحد زمان و همچنین بررسی متغیرهای مؤثر بر سرعت واکنش حذف، نیاز به بررسی سینتیک واکنش‌ها می‌باشد (۲۱). در این مطالعه، مدل‌های سینتیک درجه صفر، درجه یک و درجه دو بررسی شد که فرم کلی و فرم خطی معادلات در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱- معادلات سینتیک مورد بررسی در مطالعه حاضر

فرم کلی معادله	فرم خطی معادله	نوع سینتیک
$r_c = \frac{dC}{dt} = k_0$	$C - C_0 = -k_0 t$	سینتیک درجه صفر
$r_c = \frac{dC}{dt} = k_1 C$	$\ln \frac{C}{C_0} = -k_1 t$	سینتیک درجه یک
$r_c = \frac{dC}{dt} = k_2 C^2$	$\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} = k_2 t$	سینتیک درجه دو

در زمان‌های ابتدایی واکنش (زمان‌های ۵ تا ۱۰ دقیقه) راندمان حذف فنل بسیار چشمگیر بوده و بیشترین مقدار حذف فنل به میزان ۹۸/۱٪ در این زمان‌ها به دست آمد. با افزایش زمان تماس به بیش از ۱۰ دقیقه، راندمان حذف دارای روند افزایشی با شیب بسیار کند بود به طوری که بیشترین راندمان حذف فنل به میزان ۹۸/۳٪ در زمان تماس برابر با ۲۵ دقیقه به دست آمد و افزایش زمان به بیش از ۲۵ دقیقه تأثیر چشمگیری بر حذف فنل نداشت. بر این اساس، کمترین غلظت فنل باقی مانده در زمان تماس برابر با ۲۵ دقیقه مشاهده شد (به میزان ۰/۰۸۵ میلی گرم در لیتر).

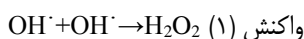


نمودار ۳-۳- راندمان حذف فنل به عنوان تابعی از زمان تماس (pH محلول: ۹، توان امواج اولتراسونیک: ۱۰۰ وات و غلظت اولیه فنل: ۵ میلی گرم در لیتر) به منظور بررسی تأثیر غلظت اولیه فنل بر کارایی امواج اولتراسونیک، محلول فنل با غلظت ۱، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی گرم در لیتر تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی تأثیر غلظت اولیه فنل بر کارایی امواج اولتراسونیک در نمودار ۳-۴ ارائه شده است. بر این اساس، با افزایش غلظت اولیه فنل از ۱ به ۲/۵ میلی گرم در لیتر، راندمان حذف فنل از ۹۵/۱٪ به ۹۹/۱٪ افزایش یافت. علاوه بر این، افزایش غلظت اولیه فنل به بیش از ۲/۵ میلی گرم در لیتر منجر به کاهش راندمان حذف فنل گردید، به طوری که راندمان حذف فنل از ۹۹/۱٪ (در غلظت اولیه ۲/۵ میلی گرم در لیتر) به ۹۸/۴٪ (در غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم در لیتر) کاهش یافت. همان‌طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود کمترین غلظت باقی مانده فنل نیز برابر با ۰/۰۲ میلی گرم در لیتر است که در غلظت اولیه ۲/۵ میلی گرم در لیتر به دست آمد. برای بررسی تأثیر شدت امواج اولتراسونیک بر کارایی حذف فنل، آزمایش حذف در دامنه شدت امواج برابر با ۵۰ تا ۱۵۰ وات انجام شد. نتایج حاصل از بررسی تأثیر شدت امواج اولتراسونیک بر حذف فنل از فاضلاب سنتتیک در نمودار ۴-۱ ارائه شده است. بر این اساس، با افزایش شدت امواج اولتراسونیک، حذف فنل از فاضلاب سنتتیک از یک روند افزایشی برخوردار بوده است، به طوری که با افزایش شدت امواج اولتراسونیک از ۵۰ به ۱۵۰

همان طور که در نمودار ۵ نشان داده شده است حذف فنل با استفاده از امواج اولتراسونیک بیشترین قرابت را با سینتیک درجه دو دارد. این امر نشان می‌دهد که سرعت واکنش‌های حذف فنل با استفاده از امواج اولتراسونیک، ارتباط مرتبه دوم با غلظت اولیه فنل دارد.

بحث

همان طور که مطالعات پیشین نشان داد pH اولیه محلول نقش مهمی در اکسیداسیون مواد آلی دارد و به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر آن تأثیرگذار است. تغییرات pH محلول منجر به تولید رادیکال‌های مختلف شده که تخریب و تجزیه مواد آلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۲) و (۲۳). نتایج مطالعه نشان داد که بیشترین راندمان (۹۸/۳۹٪) در pH محلول برابر با ۹ به دست آمد. می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در این pH وجود رادیکال‌های OH باعث تخریب و تجزیه فنل شد؛ همچنین در محل حباب‌های کایتاسیون تشکیل شده، در اثر تولید H₂O₂ (واکنش ۱) سرعت تخریب فنل بیشتر شد و راندمان نسبت به حالت اسیدی افزایش یافت (۲۴).



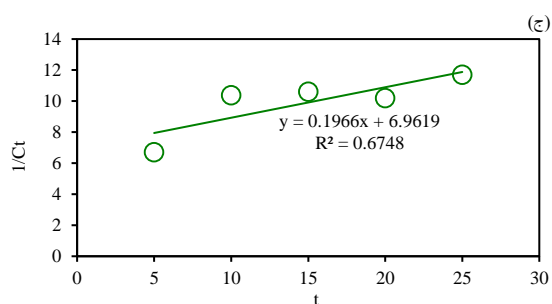
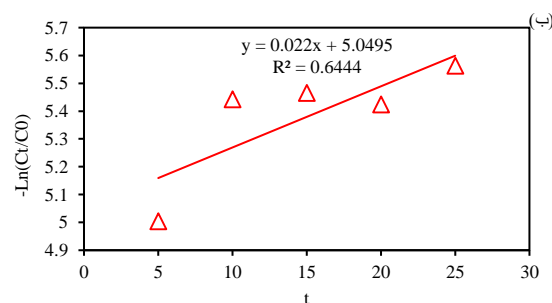
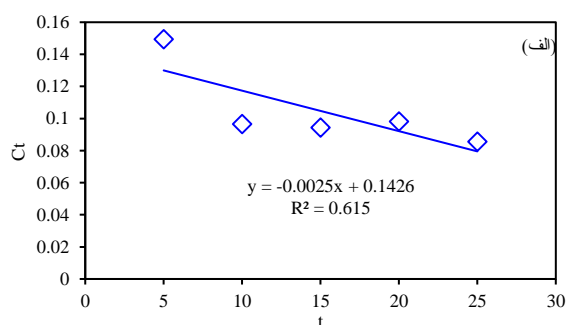
نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات مشابه همخوانی دارد. در مطالعه توپر و همکاران (۲۰۰۰)، حذف ۴- نیترو فنل از محلول‌های آبی با استفاده از امواج اولتراسونیک مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در pH برابر با ۱۰، تخریب کامل ۴- نیترو فنل صورت گرفت که ناشی از وجود رادیکال‌های OH بود (۲۴). همچنین، در سال ۲۰۱۳، رونگ چی و همکاران از فرآیند ترکیبی فتوکاتالیستی و سونولیز برای حذف فنل استفاده نمودند که نتایج نشان داد pH اسیدی (۴/۰۲) و pH کمی قلیایی (۱۰/۰۸) منجر به راندمان حذف فنل به ترتیب برابر با ۸۳٪ و ۸۰٪ شد (۲۵). نتایج مطالعه‌ای دیگر که توسط رضایی و همکاران (۱۳۹۶) تحت عنوان "اکسیداسیون الکتروشیمیایی فنل در محلول‌های آبی" انجام شد نیز نشان داد که حذف فنل در pH قلیایی بیشتر از pH اسیدی اتفاق افتاد (۲۶). نیکفر و همکاران (۲۰۱۶) نیز با استفاده از امواج اولتراسونیک به همراه هیدروژن پراکسید برای حذف بیس فنل A از محلول‌های آبی، سه دامنه مختلف pH (۳، ۷ و ۱۱) را مورد آزمایش قرار دادند که نتایج نشان داد در pH برابر با ۱۱ بیشترین راندمان حذف به دست آمد (۲۷).

در مطالعه حاضر پس از ۲۵ دقیقه تماس، بیشترین راندمان حذف فنل برابر با ۹۸/۳۹٪ حاصل شد. با افزایش زمان تماس به بیش از ۲۵ دقیقه، افزایش چشمگیری در راندمان حذف فنل مشاهده نشد. بنابراین زمان ۲۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه واکنش در نظر گرفته شد. زمان واکنش، یکی از عوامل اثرگذار بر سرعت واکنش‌های شیمیایی است. در واقع زمان تماس، فرصت وقوع فرآیند مورد نظر را فراهم می‌کند. در زمان‌های کوتاه‌تر از زمان بهینه، به دلیل عدم تشکیل حداکثری رادیکال‌های آزاد در اثر امواج اولتراسونیک، راندمان کمتر از حالت بهینه می‌باشد. در

به منظور بررسی سینتیک واکنش‌های حذف، تمامی متغیرها ثابت در نظر گرفته شد و تنها زمان تماس واکنش تغییر داده شد. ثابت‌های واکنش حذف فنل در مدل‌های سینتیک درجه صفر، درجه یک و درجه دو در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، در نمودار ۵، منحنی‌های برازش شده حذف فنل با استفاده از امواج اولتراسونیک نشان داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای ثابت سینتیک‌های واکنش حذف فنل

سینتیک	ثابت سینتیک	مقدار
سینتیک درجه صفر	k ₀ R ²	۰/۰۰۲۵ ۰/۶۲
سینتیک درجه یک	k ₁ R ²	۰/۰۲۲ ۰/۶۴
سینتیک درجه دو	k ₂ R ²	۰/۲ ۰/۶۸



نمودار ۵- منحنی‌های برازش سینتیک واکنش حذف فنل: (الف) سینتیک درجه صفر، (ب) سینتیک درجه یک، (ج) سینتیک درجه دو

بوده که در آزمایشگاه دانشکده بهداشت انجام شد و شناسه اخلاق IR.MUI.RESEARCH.REC.1397.240 می باشد.

References

- Hameed BH, Rahman AA. Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from biomass material. *Journal of Hazardous Materials* 2008;160:576-81. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.028
- Suresh S, Srivastava VC, Mishra IM. Adsorptive removal of phenol from binary aqueous solution with aniline and 4-nitrophenol by granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 2011;171:997-1003. doi: 10.1016/j.cej.2011.04.050
- Lazo-Cannata JC, Nieto-Márquez A, Jacoby A, Paredes-Doig AL, Romero A, Sun-Kou MR, et al. Adsorption of phenol and nitrophenols by carbon nanospheres: Effect of pH and ionic strength. *Separation and Purification Technology* 2011;80:217-24. doi: 10.1016/j.seppur.2011.04.029
- Busca G, Berardinelli S, Resini C, Arrighi L. Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials* 2008;160:265-88. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.045
- Manojlovic D, Ostojic DR, Obradovic BM, Kuraica MM, Krsmanovic VD, Puric J. Removal of phenol and chlorophenols from water by new ozone generator. *Desalination* 2007;213:116-22. doi: 10.1016/j.desal.2006.05.059
- Ghaneian MT, Ghanizadeh G. Application of Enzymatic Polymerization Process for the Removal of Phenol from Synthetic Wastewater. *Iranian Journal of Health and Environment* 2009;2:46-55. doi: http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-169-en.html
- Veeresh GS, Kumar P, Mehrotra I. Treatment of phenol and cresols in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) process: a review. *Water Research* 2005;39:154-70. doi: 10.1016/j.watres.2004.07.028
- Fierro V, Torné-Fernández V, Montané D, Celzard A. Adsorption of phenol onto activated carbons having different textural and surface properties. *Microporous and Mesoporous Materials* 2008;111:276-84. doi: 10.1016/j.micromeso.2007.08.002
- Yousef RI, El-Eswed B, Al-Muhtaseb AaH. Adsorption characteristics of natural zeolites as solid adsorbents for phenol removal from aqueous solutions: Kinetics, mechanism, and thermodynamics studies. *Chemical Engineering Journal* 2011;171:1143-9. doi: 10.1016/j.cej.2011.05.012
- Balasubramanian A, Venkatesan S. Removal of phenolic compounds from aqueous solutions by emulsion liquid membrane containing Ionic Liquid [BMIM]+[PF6]- in Tributyl phosphate. *Desalination* 2012;289:27-34. doi: 10.1016/j.desal.2011.12.027
- Smonath M, Sunil K, Amal K, Maohong F. Removal of phenols from waters environmental by activated carbon, baggasse ash and wood charcoal. *J Chem Eng* 2006;2:22-7.
- Uddin M, Islam M, Abedin M. Adsorption of phenol from aqueous solution by water hyacinth ash. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 2007;2:11-7.
- Wu D, Chen Y, Zhang Z, Feng Y, Liu Y, Fan J, et al. Enhanced oxidation of chloramphenicol by GLDA-driven pyrite induced heterogeneous Fenton-like reactions at alkaline condition. *Chemical Engineering Journal* 2016;49:294-57. doi: 10.1016/j.cej.2016.02.097
- Tang WZ, Tassos S. Oxidation kinetics and mechanisms of trihalomethanes by Fenton's reagent. *Water Research* 1997;31:1117-25. doi: 10.1016/S0043-1354(96)00348-X
- Shemer H, Narkis N. Trihalomethanes aqueous solutions sono-oxidation. *Water Research* 2005;39:2704-10. doi: 10.1016/j.watres.2005.04.043

زمان‌های طولانی‌تر از زمان بهینه نیز به دلیل تشکیل ترکیبات حاصل از تجزیه فنل، اثرگذاری رادیکال‌های آزاد بر فنل کمتر شده و در نتیجه راندمان حذف فنل کاهش می‌یابد. نتایج این مطالعه با سایر مطالعات مشابه همخوانی دارد. نتایج مطالعه خورده دان و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد که امواج اولتراسونیک در همان دقیقه اول، ۴۵٪ از کلروفورم موجود در آب را حذف کرد و هرچه زمان بیشتر شد درصد حذف با شیب کندی افزایش یافت به طوری که در زمان ۸ دقیقه به بیشترین راندمان حذف (۷۰٪) به دست آمد (۱۸).

در این مطالعه، با افزایش غلظت اولیه فنل از ۱ به ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف فنل از ۹۵/۱٪ به ۹۹/۱٪ افزایش یافت. در غلظت‌های اندک فنل، به علت اینکه مولکول‌های فنل بین مولکول‌های آب پنهان می‌شوند تماس مناسبی بین مولکول‌های فنل و امواج اولتراسونیک اتفاق نمی‌افتد و باعث راندمان پایین حذف فنل می‌شود. در غلظت‌های بالای فنل (بیش از ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر)، راندمان حذف فنل دارای روند کاهشی بود. این کاهش راندمان حذف فنل می‌تواند به علت عدم وجود مقادیر کافی رادیکال آزاد برای واکنش با مولکول‌های فنل باشد. همچنین، محصولات میانی تشکیل شده در طی اکسیداسیون فنل با مولکول‌های فنل برای رادیکال‌های آزاد تولیدی طی القای امواج اولتراسونیک رقابت می‌نمایند و منجر به کاهش راندمان حذف فنل در غلظت‌های اولیه بالای فنل می‌شوند. در مطالعات مختلف اگرچه مقادیر راندمان باهم متفاوت است اما روند تغییرات در اغلب آن‌ها مشابه می‌باشد. در مطالعه رضایی و همکاران نیز مشاهده شد که غلظت اولیه فنل برابر با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر راندمان حذف بالاتری نسبت به غلظت اولیه ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر دارد (۲۶).

با افزایش توان امواج اولتراسونیک تغییر چشمگیری در راندمان حذف فنل مشاهده نشد بنابراین توان بهینه امواج اولتراسونیک در این تحقیق برابر با حداکثر توان یعنی ۱۵۰ وات در نظر گرفته شد. هرچه توان امواج اولتراسونیک افزایش یابد سرعت و میزان تشکیل رادیکال‌های آزاد نیز افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای مشابه توسط نیک فر و همکاران با عنوان حذف بیس فنل A از محلول‌های آبی توسط امواج اولتراسونیک و هیدروژن پراکسید نیز نتایج نشان می‌دهد که هرچه فرکانس دستگاه و توان امواج بیشتر شود راندمان حذف نیز افزایش می‌یابد. اما نتایج در همین تحقیق نشان می‌دهد که در فرکانس ۳۵ کیلوهرتز و توان ۳۰۰ و ۵۰۰ وات تفاوت خیلی زیادی در راندمان حذف وجود ندارد، لذا توان حداکثری، توان بهینه در نظر گرفته شده است (۲۷).

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر حاصل طرح تحقیقاتی مصوب کمیته تحقیقات دانشجویی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان به شماره ۱۹۷۱۰۳

16. Kim I, Hong S, Hwang I, Kwon D, Kwon J, Huang CP. TOC and THMFp reduction by ultrasonic irradiation in wastewater effluent. *Desalination* 2007;202:9-15. doi: 10.1016/j.desal.2005.12.032
17. Pourzamani H, Majd AMS, Attar HM, Bina B. Natural organic matter degradation using combined process of ultrasonic and hydrogen peroxide treatment. *Anuario do Instituto de Geociencias* 2015;38. doi: 10.11137/2015_1_63_72
18. Khordehdan R. Determination of trihalomethanes (THMs) in drinking water of eastern part of Bandar Abbas City and feasibility of removing with ultrasonic irradiation. 2014.
19. Kida M, Ziembowicz S, Koszelnik P. Removal of organochlorine pesticides (OCPs) from aqueous solutions using hydrogen peroxide, ultrasonic waves, and a hybrid process. *Separation and Purification Technology* 2018;192:457-64. doi: 10.1016/j.seppur.2017.10.046
20. Baird RB, Eaton AD, Rice EW. Standard methods for the examination of water and wastewater: American Public Health Association Washington, DC;2012.
21. Tchobanoglous G, Tsuchihashi R, Burton FL, Stensel H. Wastewater engineering treatment and resource recovery. 5th edition M-HE, USA editor 2014.
22. 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;12:94. doi: 10.1186/2052-336X-12-94
23. Rahmani AR, Shabanloo A, Mehralipour J, Fazlzadeh M, Poureshgh Y. Degradation of phenol in aqueous solutions using electro-fenton process. *Research Journal of Environmental Sciences* 2015;9:332-42. doi: 10.3923/rjes.2015.332.341
24. Tauber A, Schuchmann H-P, von Sonntag C. Sonolysis of aqueous 4-nitrophenol at low and high pH. *Ultrasonics Sonochemistry* 2000;7:45-52. doi: 10.1016/S1350-4177(99)00018-8
25. Wang R-C, Yu C-W. Phenol degradation under visible light irradiation in the continuous system of photocatalysis and sonolysis. *Ultrasonics Sonochemistry* 2013;20:553-64. doi: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.014
26. Rezaei M, Zadehjalil N. Electrochemical oxidation of phenol in aquatic solutions. *Occupational and Environmental Health* 2017;3:28-37.
27. Nikfar E, Dehghani MH, Mahvi AH, Rastkari N, Asif M, Tyagi I, et al. Removal of Bisphenol A from aqueous solutions using ultrasonic waves and hydrogen peroxide. *Journal of Molecular Liquids* 2016;213:332-8. doi: 10.1016/j.molliq.2015.08.053



Survey on the Efficiency of Ultrasonic Waves in Phenol Removal from Synthetic Wastewater

Ali Fatehizadeh (Ph.D.)¹, Ensiyeh Taheri (Ph.D.)¹, Samira Akbarpour Monjermoyi (B.Sc.)², Shekoofeh Karimian (B.Sc.)², Niloofar Farghadani (B.Sc.)², Samira Taherkhani (M.Sc.)³, Mahsa Khajeh (M.Sc.)^{4*}

1- Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

2- Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

3- Dept. of Chemistry, School of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

4- Student Research Committee and Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

Received: 28 July 2019, Accepted: 11 November 2019

Abstract:

Introduction: Phenol is one of the toxic and dangerous substances for environmental and human health which is produced by natural and artificial sources. Phenol can enter to environment and specially water resources and causes irreparable damages. The aim of study was to evaluate the efficiency of ultrasonic waves in removal of phenol from synthetic wastewater.

Methods: The experimental study was conducted on a laboratory scale. The pilot used in this study was consist of contact reservoir of synthetic wastewater and also ultrasonic devise. In this study, the effect of parameters including solution pH, contact time, initial phenol concentration and ultrasonic wave power were investigated.

Results: The results showed that with increasing solution pH from 4 to 8, the phenol removal efficiency was decreased and higher solution pH than 8 lead to phenol removal efficiency improvement. Also, with increasing contact time and ultrasonic wave intensity, phenol removal efficiency has increased. Based on the results, the optimal solution pH, contact time, initial phenol concentration and ultrasonic power were 9, 25 min, 2.5 mg/L and 150 W, respectively.

Conclusion: The ultrasonic waves can be suggested as a relatively new and relatively efficient method for the removal of refractory and resistant compounds such as phenol from aqueous solutions.

Keywords: Phenol, Aqueous solution, Ultrasonic waves, Synthetic wastewater.

Conflict of Interest: No

*Corresponding author: M. Khajeh, Email: khajeh.mahsa22@gmail.com

Citation: Ali Fatehizadeh, Ensiyeh Taheri, Samira Akbarpour Monjermoyi, Shekoofeh Karimian, Niloofar Farghadani, Samira Taherkhani, Mahsa Khajeh. Survey on the efficiency of ultrasonic waves in phenol removal from synthetic wastewater. Journal of Knowledge & Health in Basic Medical Sciences 2019;14(3):8-15.