

مروری بر استفاده از امواج فراصوت در تصفیه پساب‌های کشاورزی

امیرحسین تقی‌پور کامیار موقرنژاد* مهسا نریمانی
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی استاد، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و دانشکده
 دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل صنعتی نوشیروانی بابل مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
 a.taghipour88@yahoo.com movagharnejad@yahoo.com narimany_mahsa@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲

چکیده

هدف اصلی این مطالعه مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد امواج فراصوت در زمینه حذف سموم از پساب‌های کشاورزی است. در سال‌های اخیر و به‌طور خاص در دهه اخیر امواج فراصوت در زمینه‌های مختلفی به‌کار رفته است و همچنان کاربردهای جدیدی برای پدیده حباب‌زایی فراصوتی در حال کشف است. دما و فشار ایجاد شده پس از ترکیدن حباب‌های ایجاد شده توسط امواج فراصوت به حدی برای دانشمندان جذاب و حتی عجیب بوده است که کاربردهای آن از نظر حوزه حد و مرزی نمی‌شناسد و در علوم مختلف به‌کار می‌رود. در ابتدای این مطالعه به‌طور خلاصه به مرور برخی از کاربردهای امواج فراصوت در تصفیه آب پرداخته شده است و در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه حذف سموم به کمک این امواج به‌طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. آبکافت مولکول‌های آب به یون‌های هیدروژن و هیدروکسید، توسط امواج فراصوت زمینه را برای واکنش‌های بعدی آماده می‌کند. استفاده از اکسیدکننده‌های مختلف نظیر هیدروژن پراکسید و فنتون^۱ به منظور حذف مولکول‌های سموم کشاورزی از آب بارها مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات مرور شده در این تحقیق به وضوح نشان دادند که استفاده از امواج فراصوت نه تنها باعث سرعت بخشیدن به فرایند حذف سموم می‌شود، بلکه از سوی دیگر مقدار اکسیدکننده را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: حباب‌زایی فراصوتی، سموم کشاورزی، آبکافت، اکسیدکننده.

۱. مقدمه

محصولات به محیط زیست نفوذ می‌کنند [۳]. برای مثال دیازینون^۲ یکی از مشهورترین سموم ارگانوسولفات^۳ است که در واحدهای تصفیه پساب‌ها به وفور دیده می‌شود [۵،۴]. استفاده بیش از حد از این سموم اثرات زیان‌باری بر بخش‌های مختلف بدن انسان دارد و باعث بروز بیماری‌های مرگ‌آوری مانند سرطان و فلج دستگاه تنفس می‌شود. به

آلودگی منابع آب به واسطه فعالیت‌های کشاورزی مانند استفاده از سموم و کودهای شیمیایی مشکلات محیط زیستی جبران ناپذیری را در پی خواهد داشت [۲،۱]. سموم کشاورزی به عنوان عضو جدایی‌ناپذیری از کشاورزی مدرن از طرق مختلف و به منظور نابودی آفات و یا افزایش میزان

همین دلیل در سال ۲۰۰۴ آژانس محافظت از منابع طبیعی آمریکا^۴ استفاده از بعضی سموم کشاورزی مانند دیازینون را در آمریکا ممنوع اعلام کرد. اما متأسفانه استفاده از این سموم در بسیاری از کشورهای در حال توسعه مانند ایران در ابعاد وسیعی ادامه دارد. به همین دلیل در سال‌های اخیر دفع این سموم از پساب‌های کشاورزی مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است [۷۶].

در زمینه حذف سموم از پساب‌های کشاورزی تا کنون رویکردهای مختلفی مانند اکسیداسیون بیولوژیکی و شیمیایی، لخته‌سازی، ازن‌زنی، تخریب فوتوکاتالیستی و جذب ارائه شده است [۸]. هر کدام از این روش‌ها در عین اثربخش بودن معایبی نیز دارند، برای مثال در روش لخته‌سازی حجم زیادی از لجن تولید می‌شود، در روش اکسیداسیون شیمیایی هزینه واکنش دهنده‌ها زیاد است و در روش جذب به حجم بالایی از جاذب نیاز داریم.

پدیده حباب‌زایی فراصوتی به عنوان یک فرایند اکسیداسیون نوظهور محسوب می‌شود که می‌توان از آن به منظور تخریب مؤثر بسیاری از آلاینده‌های آلی استفاده کرد [۹].

فرایند حباب‌زایی فراصوتی از سه مرحله اصلی شامل هسته‌زایی، رشد سریع حباب‌ها در طول سیکل‌های انبساطی و انقباضی و انفجار حباب‌ها در هنگام رسیدن به ابعاد بحرانی، تشکیل می‌شود. انفجار این حباب‌ها انرژی مورد نیاز برای شکست مولکول‌ها را فراهم می‌کند و در آب باعث آزاد شدن یون‌های هیدروژن و هیدروکسیل می‌شود که می‌توان از آن در فرایندهای اکسیداسیون استفاده کرد [۱۰، ۱۱]. با این وجود استفاده از این فرایند به تنهایی توجه زیادی را جلب نکرده است و بیشتر با سایر فرایندها ترکیب می‌شود و به عنوان یک عامل کمک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹].

فرایندهایی که استفاده از مواد شیمیایی مانند اکسیدکننده‌ها را با امواج فراصوت ترکیب می‌کنند به عنوان فرایندها سونوشیمیایی شناخته می‌شوند و تا کنون برای حذف بسیاری از ترکیبات مضر که در برابر تخریب مقاومت می‌کنند مورد

استفاده قرار گرفته‌اند [۱۲]. برای مثال در فرایند سونو-فنتون امواج فراصوت با معرف فنتون ترکیب شده و به عنوان روشی مؤثر در حذف انواع مختلفی از آلودگی‌ها شناخته شده است [۱۳].

در مطالعه ارائه شده ابتدا به تشریح فرایند حباب‌زایی فراصوتی پرداخته شده و سپس به‌طور خلاصه مثال‌هایی از کاربردهای آن در حذف آلاینده‌ها از پساب‌ها ذکر شده است. در ادامه به‌طور خاص به موضوع حذف سموم از پساب‌های کشاورزی به کمک امواج فراصوت پرداخته شده و روش‌های ارائه شده در این زمینه تشریح می‌شود.

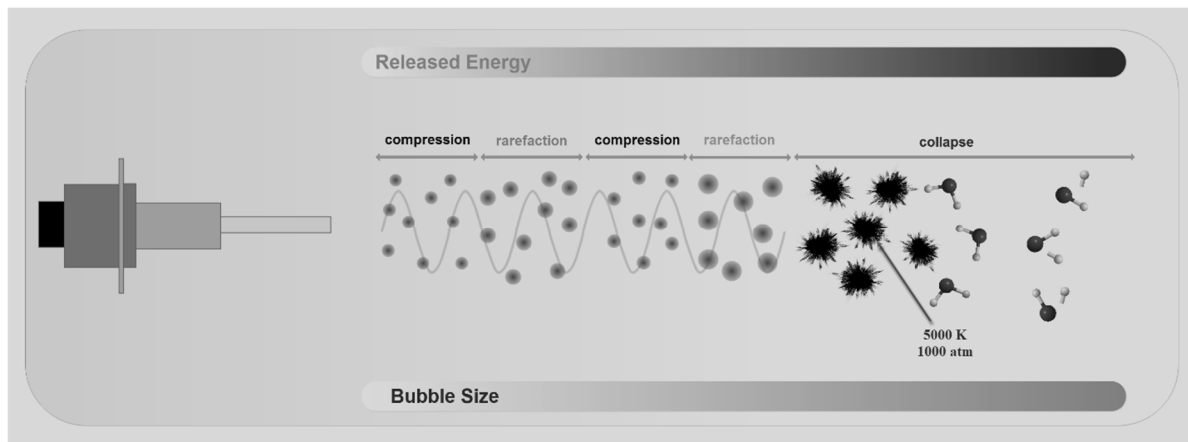
۲. پدیده حباب‌زایی فراصوتی

به‌طور کلی امواج صوتی جزو امواج مکانیکی به شمار می‌روند و زمانی تشکیل می‌شوند که یک یا گروهی از جابه‌جایی‌های مولکولی در یک محیط با قابلیت انتشار صوت اتفاق بیافتد. تعداد تغییرات فاز فشار (فشار پایین و فشار بالا) در واحد زمان به عنوان فرکانس امواج صوتی شناخته می‌شود. فرکانس‌های صوتی بالاتر از ۱۸ کیلوهرتز معمولاً به عنوان فراصوت شناخته می‌شوند که بیشتر از قابلیت شنیداری انسان است [۱۴]. با توجه به مکانیزم و محیط قابل انتشار، می‌توان امواج فراصوت را نیز مانند امواج صوتی در نظر گرفت. انتشار امواج فراصوت در یک محیط کشسان^۵ مانند مایع موجب شروع تناوبی از محیط‌های انبساطی و انقباضی می‌شود که پشت سر هم و به صورت آدیاباتیک تکرار می‌شوند [۱۵].

سیکل‌های انقباضی موجب افزایش فشار و کاهش فاصله مولکولی می‌شوند، درحالی‌که در سیکل‌های انبساطی فاصله مولکول‌ها از هم زیاد می‌شود [۱۶]. زمانی که دامنه فشار بیشتر از میزان کشش سطحی بین مولکول‌ها شود حباب‌های مملو از بخار که به حباب‌های کاویتاسیونی معروف هستند ایجاد می‌شوند [۱۷]. سپس این حباب‌های میکروسکوپی یک دوره انبساط و انقباض پی در پی را آغاز می‌کنند [۱۸]. در یک اندازه خاص قطر حباب تولید شده به قطر بحرانی

خود می‌رسد و انقباض بعدی موجب انفجار ناگهانی حباب می‌شود، این پدیده در شکل ۱ نشان داده شده است. پدیده تشکیل و انفجار حباب‌ها در حین انتشار امواج فراصوت در

یک محیط کشسان حباب‌زایی فراصوتی^۶ نامیده می‌شود [۱۹].



شکل ۱. پدیده حباب‌زایی فراصوتی، نحوه شکل‌گیری، رشد و انفجار حباب‌ها

۲-۱. اثرات انرژی پدیده حباب‌زایی فراصوتی

در طول فرایند کاویتاسیون زمانی که یک حباب به سرعت رشد می‌کند و نمی‌تواند بیش از آن به‌طور مؤثر انرژی جذب کند مایع اطراف به داخل حباب نفوذ کرده و حباب از داخل منفجر می‌شود [۲۰]. انفجار حباب‌ها موجب انتشار میزان زیادی انرژی در یک بازه زمانی بسیار کوتاه می‌شود که می‌تواند پدیده‌هایی از قبیل انتشار نور (سونولومینسنس^۷ [۲۱])، موج‌های شک‌دهنده^۸، دما و فشار نقطه‌ای بسیار بالا به ترتیب تا حد ۵۰۰۰ درجه کلین و ۱۰۰۰ اتمسفر و نرخ خنک شدن بالا تا حد ۱۰۹ کلین بر ثانیه به همراه داشته باشد [۲۰، ۱۷]. انرژی آزاد شده به اندازه کافی زیاد است که بتواند مولکول آب را متلاشی کند و باعث تولید یون‌های هیدروژن (H^+) و هیدروکسیل (OH^-) شود [۲۲]. علاوه بر آن احتمال وقوع پدیده‌های ثانویه از قبیل لخته شدن نیز وجود دارد [۲۳]. تولید حباب می‌تواند منجر به شکل‌گیری دو نوع کاویتاسیون پایدار و ناپایدار^۹ شود. کاویتاسیون پایدار معمولاً در توان‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد و در این حالت رشد حباب‌ها آهسته است و حباب پیش از انفجار دوره‌های

انبساطی و انقباضی زیادی را طی می‌کند [۲۴]. با افزایش توان توزیع‌کننده امواج فراصوت سرعت رشد حباب‌ها افزایش می‌یابد که سبب می‌شود انفجار حباب‌ها زودتر اتفاق بیافتد که به کاویتاسیون ناپایدار معروف است.

۲-۲. پارامترهای مؤثر در پدیده حباب‌زایی فراصوتی

پارامترهای زیادی وجود دارند که پدیده کاویتاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به‌طور کلی می‌توان این پارامترها را به دو گروه آکوستیکال^{۱۰} و عملیاتی تقسیم کرد. فرکانس و توان توزیع‌کننده امواج پارامترهای آکوستیکی و مواردی همچون فشار، دما و اسیدیته از جمله مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی محسوب می‌شوند. افزایش فرکانس باعث کاهش سیکل‌های انبساطی و انقباضی شده که سبب کاهش طول عمر و به نسبت اندازه حباب‌ها پیش از انفجار می‌شود و در نهایت اثر امواج فراصوت را کاهش می‌دهد. بر خلاف فرکانس افزایش شدت انتشار امواج باعث کاهش دامنه امواج شده اثر پدیده کاویتاسیون را شدت می‌بخشد [۲۵].

فشار خارجی و به طبع فشار بخار محیط انتشار امواج بر روی پدیده کاویتاسیون تأثیر زیادی می‌گذارد. تعداد حباب‌های تشکیل شده با افزایش فشار بخار (یا کاهش فشار خارجی) افزایش می‌یابد، این درحالی است که این حباب‌ها با شدت کمتری منفجر می‌شوند چراکه بخار بیشتری به داخل حباب‌ها نفوذ می‌کند [۲۶]. حضور گازهای محلول پدیده هسته‌زایی حباب‌ها را تسریع می‌کند و موجب افزایش تعداد حباب‌ها می‌شود ولی از سوی دیگر نفوذ میزان بیشتری از مولکول‌های گاز به داخل حباب باعث انفجار خفیف‌تر حباب‌ها می‌شود [۱۶].

۲-۳. تئوری نقطه داغ

ارائه یک تئوری به منظور توجیه منطقی پدیده کاویتاسیون راه ساده‌ای به‌نظر نمی‌رسد. از بین تئوری‌های موجود در خصوص اثرات سونوشیمیایی^{۱۱}، تئوری نقطه داغ بیشترین اعتبار را دریافت کرده است چراکه با داده‌های آزمایشگاهی متعددی همخوانی دارد [۲۷].

بر اساس این تئوری، هر یک از حباب‌های میکروسکوپی به عنوان یک راکتور میکروسکوپی محسوب می‌شود که نواحی واکنشی مختلفی را در حین انفجارشان ایجاد می‌کنند [۱۶]. ساسلیک^{۱۲} و همکارانش جزو نخستین دانشمندی بودند که توانستند با موفقیت دمای ناحیه انفجار حباب‌ها را اندازه‌گیری کنند [۲۸]. در روش ارائه شده (دماسنجی شیمیایی با نرخ مقایسه‌ای^{۱۳}) دو ناحیه واکنش سونوشیمیایی کشف شد که شامل فاز گاز داخلی حباب و فاز مایع اولیه است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که دمای مؤثر نقطه داغ تشکیل شده در این پدیده در اطراف فاز گاز (ناحیه اول) تا ۵۲۰۰ درجه کلون بالا می‌رود و این دما در اطراف ناحیه مایع اولیه (ناحیه دوم) حدود ۱۹۰۰ درجه کلون است [۲۸].

نتایج مطالعه انجام شده توسط شارما^{۱۴} و همکارانش [۲۷] نشان داد که در هنگام انفجار یک حباب سه ناحیه ایجاد می‌شود، مرکز ترمولیتیک^{۱۵} (۵۰۰۰ درجه کلون، ۵۰۰

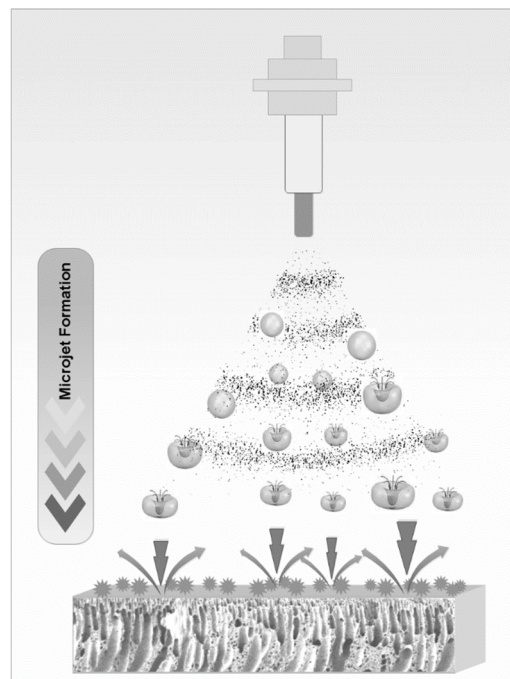
اتمسفِر)، ناحیه بین سطحی^{۱۶} (۲۰۰۰ درجه کلون، ۱ اتمسفِر) و ناحیه توده‌ای^{۱۷} (۳۰۰ درجه کلون، ۱ اتمسفِر). انرژی آزاد شده در مرکز ترمولیتیک به اندازه‌ای زیاد است که می‌تواند باعث پیرولیز^{۱۸} مولکول‌های مایع شود. با وجود فشار کمتر در ناحیه بین سطحی انرژی آزاد شده می‌تواند باعث پیرولیز مولکول‌های آب شود و با باز ترکیب کردن مولکول‌های OH^- باعث تشکیل مولکول H_2O_2 شود. دما و فشار در ناحیه توده‌ای تا زمانی که فرایند به شکل آدیاباتیک پیش برود ثابت باقی می‌ماند. علاوه بر این، واکنش بین رادیکال‌های هیدرولیز شده و مولکول‌های توده در این ناحیه اتفاق می‌افتد.

۲-۴. اثرات فیزیکی

پرتوهای فراصوت نه تنها با سرعت بخشی به گونه‌های متعددی از واکنش‌ها به تشکیل سونوشیمیایی انواع مختلفی از نانو مواد کمک می‌کند، بلکه اثرات فیزیکی مهمی را به همراه دارد. در شکل ۲ می‌توان دید که جریان‌های آکوستیک ایجاد شده توسط پرتوهای فراصوت به همراه پدیده‌های ثانویه مانند میکروجریان^{۱۹}، میکروجت^{۲۰} و غیره، سبب ایجاد جریان آشفته سیال شده و به طبع، گردان، سرعت قابل توجهی (در ابعاد میکرو) در اطراف حباب‌ها ایجاد می‌شود [۲۹]. همچنین امواج فراصوت می‌توانند فلزات با نقطه ذوب پایین مانند روی و قلع را به سرعت ذوب کنند [۳۱، ۳۰].

حرکت سیال به واسطه امواج فراصوت باعث افزایش نرخ انتقال جرم در ناحیه بین سطحی توده گاز و جامد می‌شود. در نتیجه اثرات سونوفیزیکی ایجاد شده می‌تواند فرایندهایی از قبیل اختلاط، دفع فیزیکی، استخراج و پاکسازی بهتر انجام شوند. به‌طور کلی خصوصیات امواج صوتی انتشار یافته توسط فرکانس و توان آن مشخص می‌شوند. مشاهدات نشان داده است که اثرات فیزیکی حباب‌زایی فراصوتی با کاهش فرکانس امواج بیشتر می‌شود و به‌طور کلی در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۲]. در هر صورت وابستگی

فرکانسی اثرات فیزیکی تا کنون به شکل واضحی از نظر آزمایشگاهی روشن نشده است و نیاز به مطالعات بیشتر دارد [۳۳].



شکل ۲. نحوه شکل گیری تأثیرگذاری میکروجت‌ها

۲-۵. کاربردها

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در طول پدیده حباب‌زایی فراصوتی میزان زیادی انرژی در کمتر از یک میکرو ثانیه آزاد می‌شود [۱۶]. انتشار چنین میزان زیادی از انرژی در حجم بسیار کم می‌تواند برای پیشرفت بسیاری از واکنش‌ها (به خصوص واکنش‌های گرمازا) و فرایندهای شیمیایی مفید باشد. سولفورزدایی اکسایشی ($ODS^{(1)}$) [۳۴]، استخراج مایع-مایع [۳۵]، استخراج مایع-جامد [۳۶] و خشک کردن [۳۷] مثال‌هایی از فرایندهایی است که توسط امواج فراصوت بهبود می‌یابند. علاوه بر آن پاکسازی فراصوتی به عنوان یکی از اولین کاربردهای این پدیده محسوب می‌شود و امروزه

کاربردهای زیادی در صنایع مختلف مانند صنایع غذایی دارد.

۳. استفاده از امواج فراصوت به منظور حذف آلاینده‌های آب

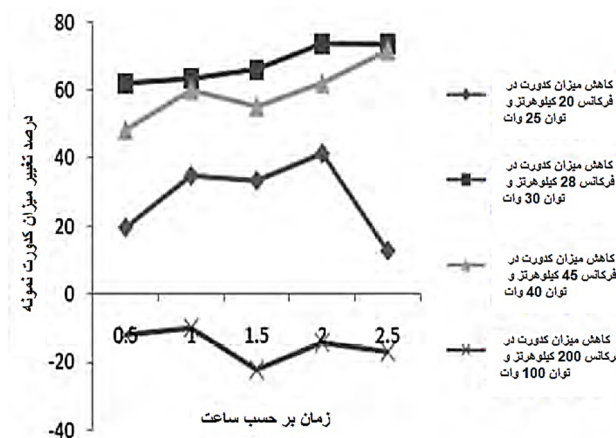
۳-۱. افزایش شفافیت و کاهش ذرات معلق

شفافیت یکی از مشخصات مهم آب است که همواره باید به آن توجه شود. مهم‌ترین دلایل کدورت آب ذرات معلق یا نامحلول موجود در آن است. گل و لای، خاک رس، مواد آلی و معدنی، ترکیبات آلی رنگی انحلال‌پذیر در آب، پلانکتون‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها از جمله این مواد هستند.

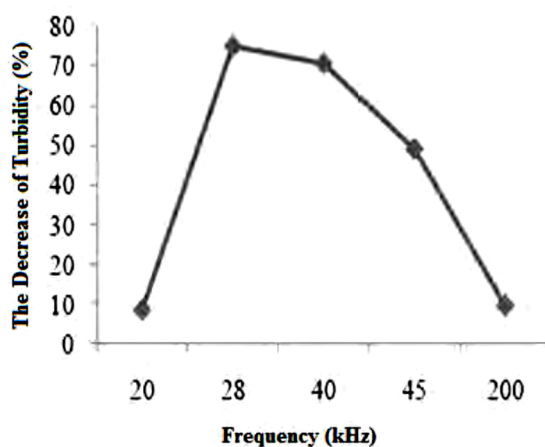
از روش‌های سنتی کاهش کدورت و ذرات معلق آب می‌توان به فیلتراسیون، میکروفیلتراسیون، الترافیلتراسیون و انعقاد یا لخته شدن اشاره کرد. در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی استفاده از امواج فراصوت برای کاهش کدورت و ذرات معلق آب انجام شده است. در این آزمایشات اثر پارامترهای مختلفی مانند توان امواج انتشار یافته، فرکانس امواج و زمان پرتودهی و همچنین پارامترهای مربوط به سیال مانند pH، رسانایی الکتریکی، دما و غلظت اولیه آلاینده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در آزمایش انجام شده توسط موتیارانی^{۳۲} و همکارانش [۳۸] اثر پارامترهایی از قبیل فرکانس (۲۰۰-۴۵۰-۲۸۰ وات) و زمان پرتودهی (۱-۱/۵-۲ ساعت) مورد ارزیابی قرار گرفت.

همان‌طور که در شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، فرکانس ۲۸ کیلوهرتز در توان ۴۰ وات بیشترین بازدهی را از نظر فرکانس اعمال شده در بر داشته است، این درحالی است که اعمال توان ۶۰ وات در فرکانس ۲۸ کیلوهرتز بیشترین بازدهی را از نظر توان اعمال شده داراست.

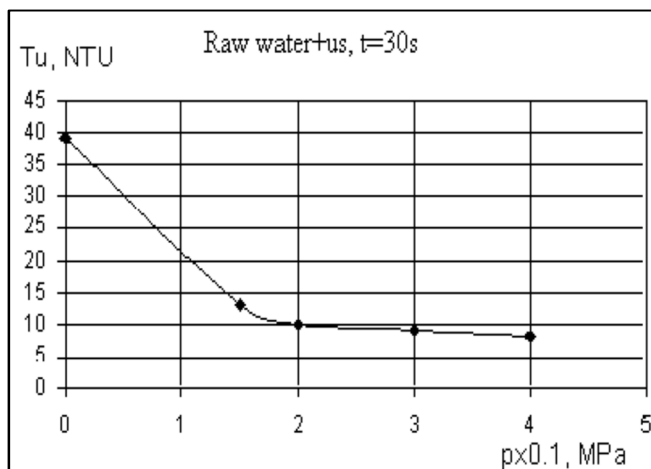


شکل ۳. تغییر کدورت آب با تغییر فرکانس و توان امواج فراصوت اعمال شده [۳۸]



شکل ۴. کاهش کدورت در توان ۴۰ وات پس از گذشت ۱ ساعت در فرکانس‌های مختلف [۳۸]

همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، علاوه بر
آزمایشات انجام شده توسط استفان و بالان^{۳۳} [۳۹] اعمال
امواج فراصوت در فرکانس ۲۷/۲ کیلوهرتز و فشارهای
مختلف می‌تواند در کسری از دقیقه کدورت آب را ۵ تا ۷
برابر کاهش دهد.



شکل ۵. تغییرات کدورت نمونه نسبت به فشار تغذیه تولیدکننده امواج فراصوت [۳۹]

در مطالعه‌ای دیگر که بر روی کاهش ذرات معلق آب با استفاده از امواج فراصوت که در توان‌های مختلف انجام شد، مشخص شد که در تمام توان‌های اعمال شده طی زمان ۳۰ دقیقه میزان ذرات معلق کاهش یافت، اما این میزان در طی زمان‌های ۶۰ تا ۱۲۰ دقیقه با نواساناتی همراه بود [۴۰]. بیشترین میزان کاهش ذرات معلق به میزان ۸۴ درصد و در توان ۰/۰۲۴ وات بر سانتی‌متر مکعب در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه گزارش شد. این درحالی است که کمترین میزان طی شده، مدت ۶۰ دقیقه و در توان ۰/۰۶ وات بر سانتی‌متر مکعب به میزان ۶۰ درصد بود.

۳-۲. استفاده از امواج فراصوت به منظور جلبک‌زدایی

رشد جلبک در خطوط انتقال آب در بسیاری از صنایع مانند واحدهای تولید آب صنعتی یک مشکل رایج محسوب می‌شود. جلبک‌ها از جمله ارگانیسم‌هایی هستند که در محیط‌های آبی رشد می‌کنند و می‌توانند تک یا چند سلولی باشند. دما و نور از جمله فاکتورهای اساسی در رشد و تکثیر جلبک‌ها محسوب می‌شوند [۴۱، ۴۲].

تا کنون روش‌های مختلفی برای کنترل و حذف جلبک‌ها معرفی شده است، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، اوزون‌زنی، لخته‌سازی به کمک سولفات مس و پرمنگنات پتاسیم، پرده‌های حبابی، اکسیداسیون به کمک کلر، فرایندهای کاتالیستی و غیره [۴۳، ۴۴]. بر اساس نتایج به‌دست آمده از میز ۷۶ واحد نیروگاهی در سال ۲۰۰۹ بهترین روش کنترل رشد جلبک روش کلرزنی، روش شوک‌دهی ماهیانه و اضافه کردن آلژینیک‌ها به داخل مخازن و ظروف بوده است [۴۴]. استفاده از امواج فراصوت یک روش جدید برای نابودی جلبک‌ها به شمار می‌رود. امواج فراصوت از طریق تولید حباب‌های میکروسکوپی در آب می‌تواند باعث نابودی جلبک‌ها شوند. مکانیزم‌های زیادی

همچون تولید رادیکال‌های آزاد، توزیع بسته‌های کوچک هوایی و مختل کردن فتوسنتز در این فرایند نقش دارند [۴۵]. مطالعه انجام شده توسط محوی و دهقانی [۴۶] که در ابعاد آزمایشگاهی بر روی تأثیر امواج فراصوت در کاهش رشد جلبک‌ها انجام شد، نشان داد که استفاده از امواج فراصوت تأثیر به‌سزایی بر روی کاهش رشد جلبک‌ها دارد. در این مطالعه از فرکانس ۴۲ کیلوهرتز در مدت زمان‌های بین ۳۰ تا ۱۵۰ ثانیه استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان پرتودهی میزان حذف جلبک‌ها از ۸/۵۵ درصد در مدت زمان ۳۰ ثانیه تا ۱۰۰ درصد در مدت زمان ۱۵۰ ثانیه افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری که توسط آقای تانگ^{۲۴} و همکارانش [۴۷] انجام شد حذف جلبک در فرکانس بین ۲۰ کیلوهرتز تا ۱/۷ مگاهرتز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که بیش از ۹۰ درصد از جلبک‌ها در نمونه مورد نظر در این محدوده فرکانسی از بین می‌رود. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان از تأثیر غیرقابل انکار امواج فراصوت در فرکانس‌ها و توان‌های مختلف بر حذف یا کنترل رشد جلبک‌ها داشته است. در برخی دیگر از مطالعات اثر کمک‌کننده امواج فراصوت بر حذف این نوع میکروارگانیسم‌ها به کمک عاملی دیگر مانند نور فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان از تأثیر قابل توجه امواج فراصوت داشته است [۴۸]. تحقیق صورت گرفته بر روی اثر پارامترهای فرکانس و توان در حذف جلبک‌ها نشان از مؤثرتر بودن فرکانس‌های پایین‌تر (فرکانس ۲۰ کیلوهرتز) و توان‌های بالاتر داشته است [۴۹].

۳-۳. استفاده از امواج فراصوت به منظور کاهش سختی آب

منشاء اصلی سختی آب کاتیون‌های دو و سه ظرفیتی مانند کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+}) و در مقادیر کمتر آلومینیوم (Al^{2+} , Al^{3+}) و آهن (Fe^{2+} , Fe^{3+}) هستند که از بین آنها کاتیون‌های کلسیم و منیزیم از عوامل اصلی سختی آب

محسوب می‌شوند [۵۱،۵۰]. سختی آب می‌تواند منجر به مشکلات زیادی شود که از آن میان می‌توان به تشکیل اسکیل در لوله‌ها و برج‌های خنک‌کننده، واکنش با مواد قلیایی و تشکیل فوم‌های بسیار سخت و کاهش ظرفیت انتقال حرارت و گرفتگی غشاء اشاره کرد [۵۲]. روش‌های قدیمی حذف سختی آب شامل سیستم آهک‌زنی، بسترهای تعویض یونی به کمک رزین، لخته‌سازی به کمک الکتریسیته، الکترودیالیز و نانوفیلتراسیون هستند.

در سال‌های اخیر استفاده از امواج فراصوت به منظور کاهش سختی آب مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. انتظاری و طهماسبی [۵۳] در سال ۲۰۰۹ از یک سیستم ترکیبی تعویض یونی و امواج فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز استفاده کردند. در این تحقیق اثر عوامل مختلف نظیر زمان تماس، میزان جاذب، دما و غلظت یون‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق نتایج نشان داد که استفاده از امواج فراصوت در این فرایند نقش مثبتی دارد.

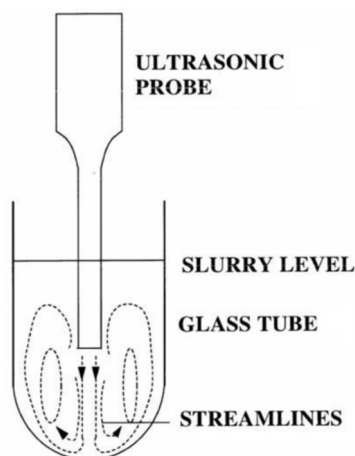
۴. استفاده از امواج فراصوت به منظور حذف سموم کشاورزی از آب

امروزه سموم کشاورزی با کاهش خطر آفت‌زدگی و به طبع افزایش میزان محصول نقش مهمی را در صنعت کشاورزی ایفا می‌کنند [۵۴]. گزارش سازمان غذا و کشاورزی ایالات متحده نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۵ استفاده از آفت‌کش‌ها در چین، کره، فرانسه و انگلستان به ترتیب ۱۳/۰۶، ۱۱/۶۰، ۳/۲۸ و ۳/۰۲ کیلوگرم در هر هکتار بوده است [۵۵]. به دلیل سهم قابل توجه میوه و سبزیجات تازه در رژیم غذایی انسان‌ها، احتمال مواجهه انسان با سموم کشاورزی از طریق این گیاهان بسیار بیشتر است. تا کنون از روش‌های مختلفی مانند اوزون‌زنی، اعمال فشار هیدرواستاتیک و انواع روش‌های شست و شو برای بهبود فرایند حذف این سموم استفاده شده است [۵۶-۵۸]. از سوی دیگر استفاده از سموم

کشاورزی در مقیاس بسیار زیاد باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرسطحی شده است و نیاز به ارائه روش‌های جدیدتر و بهینه‌تر به منظور حذف این آلاینده‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. اخیراً استفاده از امواج فراصوت به منظور تصفیه پساب‌های کشاورزی مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. در ادامه به مرور برخی از مطالعات انجام شده در این زمینه خواهیم پرداخت.

۴-۱. اثر انفرادی امواج فراصوت در حذف سموم از پساب‌های کشاورزی

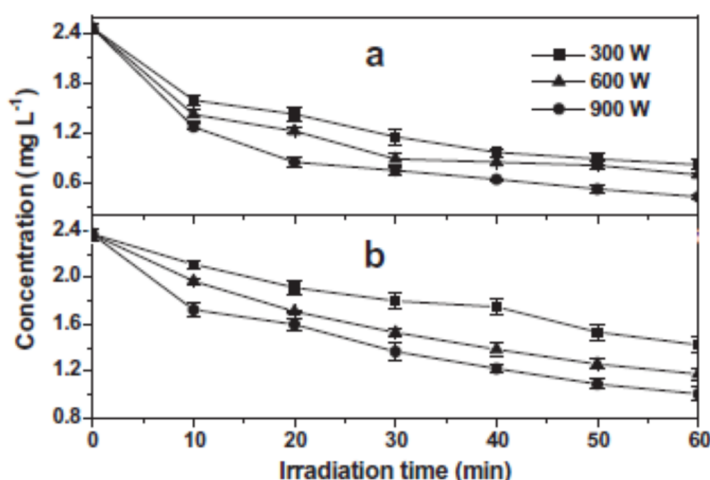
در برخی از مطالعات انجام شده در این زمینه اثر انفرادی امواج فراصوت در حذف سموم مورد بررسی قرار گرفته است، درحالی‌که در برخی دیگر، اثر این امواج یا به عبارت دیگر اثر پدیده حباب‌زایی فراصوتی به عنوان یک عامل کمک کننده به یک روش دیگر مورد مطالعه شده است. مطالعه انجام شده بر روی تأثیر امواج فراصوت در کاهش سموم کشاورزی در یک محلول دوغابی حاوی شن و آب که با انواع مختلفی از آفت‌کش‌ها آلوده شده بود نشان داد که استفاده از امواج فراصوت تأثیر به‌سزایی در نابودی این سموم داشته است [۵۹]. در این مطالعه از یک نازل امواج فراصوت به قطر ۱۲/۵ میلی‌متر با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۱۵۰ وات استفاده شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. لوله آزمایش حاوی نمونه تا مدت زمان ۳۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار گرفت و در مقاطع مختلف زمانی مورد آزمایش قرار گرفت تا میزان تأثیر این امواج مشخص شود. همچنین اثر درصد وزنی شن در نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که در درصد‌های کمتر (میزان شن کمتر در نمونه) میزان حذف سموم بیشتر است اما محققان این مطالعه اظهار داشتند که این پدیده به دلیل عدم اختلاط مناسب محلول دوغابی اتفاق افتاده است و با افزایش میزان اختلاط میزان حذف بیشتر خواهد شد.



شکل ۶. نحوه قرارگیری نازل فراصوت در ظرف نمونه و اختلاط محلول دوغابی [۵۹]

هیدرولیز، اکسیداسیون، هیدرواکسیلاسیون، دی‌هیدراسیون و دی‌کربوکسیلاسیون در تخریب این سموم از طریق امواج فراصوت نقش دارند. در نهایت مشخص شد که استفاده از امواج فراصوت نقش مؤثری در تخریب این سموم دارند. همان‌طور که در سایر مطالعات انجام شده در این زمینه مشخص شده بود، استفاده از توان بیشتر باعث افزایش تخریب این سموم شد که می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد.

در مطالعه‌ای دیگر ژانگ^{۲۵} و همکارانش [۶۰] به بررسی میزان تأثیر امواج فراصوت بر تخریب دیازینون و کلرپیریفوس در محلول‌های آبی پرداختند. در مطالعه انجام شده از یک نازل امواج فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۱/۲ تا ۱ کیلووات استفاده شد. اثر پارامترهای مختلف مانند توان امواج، دما و pH محلول مورد ارزیابی قرار گرفت. محققان این مطالعه بر این باورند که پدیده‌هایی از قبیل



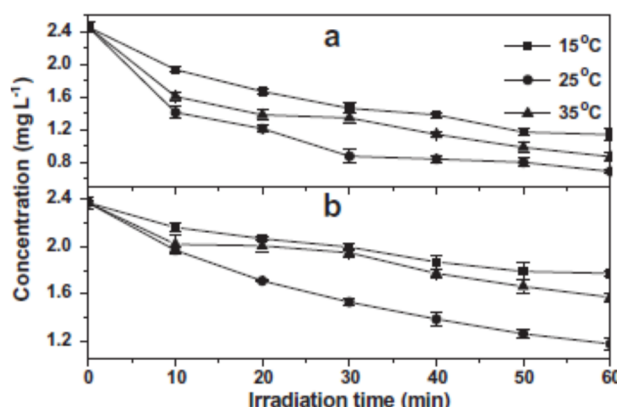
شکل ۷. تأثیر توان امواج فراصوت بر میزان حذف کلرپیریفوس (a)، و دیازینون (b) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و pH=5 [۶۰]

حباب‌زایی و اندازه حباب‌های تولید شده در فرایند حباب‌زایی فراصوتی را عاملی برای توجیح این رفتار دانست. علاوه بر آن با بررسی اثر میزان اسیدیته محلول در حذف این سموم مشخص شد که در pH=7 بیشترین میزان تخریب برای هر

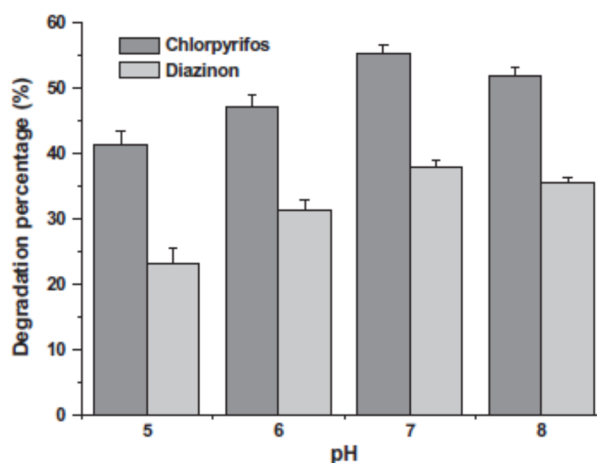
آزمایشات انجام شده در این مطالعه در سه دمای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتیگراد انجام شد و نتایج نشان داد که در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بیشترین میزان حذف صورت می‌گیرد که در شکل ۸ نیز نشان داده شده است. می‌توان اثر دما بر میزان

امواج فراصوت تأثیر به‌سزایی در کاهش سمیت آنها داشته است.

دو سم اتفاق می‌افتد. این مسأله را می‌توان در شکل ۹ مشاهده کرد. در نهایت با بررسی نمونه‌ها مشخص شد که



شکل ۸. تأثیر دمای نمونه بر میزان حذف کلرپیریفوس (a)، و دیازینون (b) در توان ۶۰۰ وات و pH=5 [۶۰]

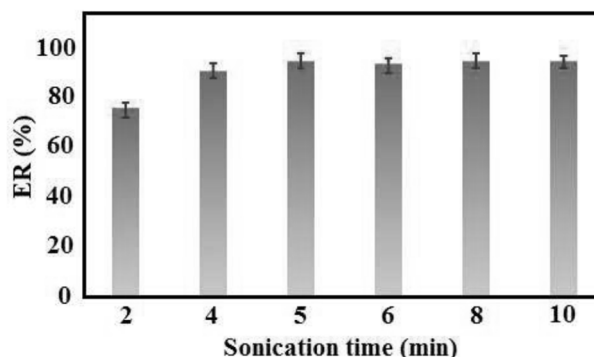


شکل ۹. تأثیر pH نمونه مورد آزمایش بر میزان حذف کلرپیریفوس (a)، و دیازینون (b) در توان ۶۰۰ وات و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بعد از ۴۰ دقیقه [۶۰]

دیازینون از نمونه‌های مختلف شامل آب رودخانه، شیر، اوره و پلاسما استفاده شد. تمامی آزمایشات تحت تابش امواج فراصوت انجام شد و تأثیر زمان پرتودهی بر روی میزان جذب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از امواج فراصوت تأثیر به‌سزایی در افزایش میزان جذب دیازینون دارد و همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان پرتودهی تا ۵ دقیقه روند افزایش به شدت زیاد می‌شود و پس از آن بدون تغییر باقی می‌ماند.

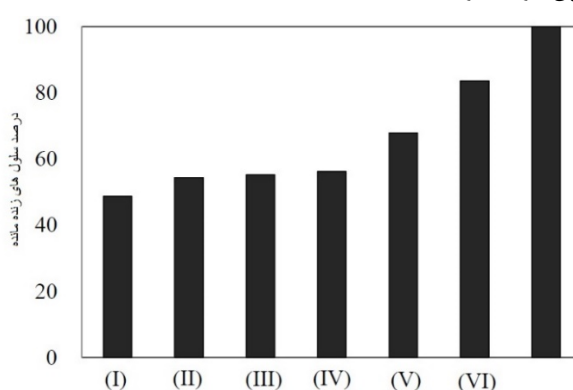
۴-۲. اثر هم‌افزایی^{۲۶} امواج فراصوت در حذف سموم از پساب‌های کشاورزی

در بسیاری از مطالعات انجام شده در زمینه حذف سموم کشاورزی از امواج فراصوت به عنوان یک عامل کمک‌کننده در پیش روی فرایند اصلی استفاده شده است. در تحقیق انجام شده توسط بهبهانی و همکارانش [۶۰] از نانو جاذب مغناطیسی دی‌اکسید تیتانیوم/گرافن به منظور جذب



شکل ۱۰. تأثیر زمان پرتودهی در حذف دیازینون (pH=7، ۵۰ میلی گرم جاذب) [۶۱]

شد. برای تعیین میزان حذف آفت کش دیازینون از یک روش خلاقانه استفاده شد. میزان دیازینون موجود در محلول با سمیت آن رابطه مستقیم دارد و هرچه سمیت محلول بیشتر باشد میزان زنده ماندن سلول ها در آن کمتر است. با توجه به این واقعیات محققان در این مطالعه از سلول های جگر موش به عنوان پارامتر تعیین کننده در میزان حذف دیازینون استفاده کردند. به این صورت که درصد سلول های زنده مانده پس از گذشت مدت زمان مشخص نشان دهنده میزان دیازینون باقیمانده در محلول است. شکل ۱۱ به طور واضح میزان سلول های زنده مانده در شرایط مختلف را نشان می دهد. با دقت در این شکل می توان به وضوح دید که اثر امواج فراصوت همواره مثبت بوده و باعث بهبود فرایند می شود.

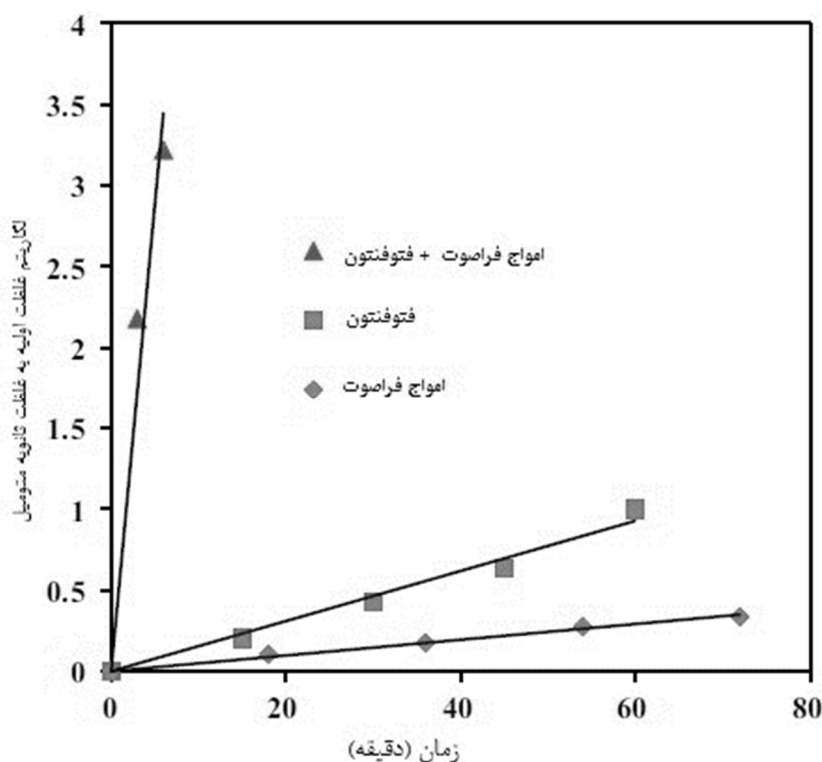


شکل ۱۱. پروفایل زنده ماندن سلول ها برای (I) محلول حاوی سلول و دیازینون در حالت پایه، نمونه بعد ۶۰ دقیقه در معرض (II) امواج فراصوت (III) امواج فراصوت / (IV) Fe^{2+} امواج فراصوت / (V) H_2O_2 فرایند فنتون (VI) فرایند فنتون و امواج فراصوت (VII) فرایند غشایی اسمز معکوس [۶۲]

در مطالعه صورت گرفته توسط وانگ^{۲۷} و همکارانش [۶۲]، تأثیر استفاده از امواج فراصوت به همراه اکسیدکننده فنتون و عوامل مشابه بر حذف آفت کش دیازینون مورد بررسی قرار داده شد. تأثیر پارامترهایی از قبیل نوع اکسیدکننده (یون های پرسولفات، $S_2O_8^{2-}$ و هیدروژن پراکسید (H_2O_2) ، فلزات واسطه (شامل Co^{2+} ، Ag^+ و Fe^{2+})، غلظت واکنش دهنده فنتون و دما بر روی حذف این آفت مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه از یک محلول دیازینون با غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر استفاده شد. بیشترین میزان حذف (۹۸٪) زمانی حاصل شد که از ترکیب امواج فراصوت به همراه ۲۰ میلی گرم بر لیتر Fe^{2+} ، ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر هیدروژن پراکسید در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد استفاده شد و pH محلول در مقدار ۳ نگه داشته

اکسیدکننده) منجر به حذف کامل آن می‌شود. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان امواج فراصوت و فرایند فتوفنتون سریع‌ترین روش در بین سایر روش‌ها به منظور حذف کامل متومیل است (حذف کامل در مدت ۹ دقیقه) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. علاوه بر آن تحقیقات انجام شده نشان از کاهش قابل توجه هزینه برق مصرف شده در حالت استفاده ترکیبی امواج فراصوت و اکسیدکننده‌های معرفی شده نسبت به حالت بدون اکسیدکننده داشت.

در مطالعه‌ای دیگر حذف متومیل با استفاده از امواج فراصوت به کمک هیدروژن پراکسید، فنتون و فرایند فوتوفنتون^{۲۸} مورد بررسی قرار گرفت [۶۳]. اثر پارمترهایی از قبیل pH محلول و توان امواج فراصوت نشان داد که بیشترین میزان حذف (به میزان ۲۸/۵۷٪) در pH برابر با ۲/۵ و توان امواج فراصوت ۰/۱۵۵ وات بر میلی‌لیتر اتفاق می‌افتد. این درحالی است که استفاده از اکسیدکننده‌های مذکور به همراه امواج فراصوت، علاوه بر سرعت بخشیدن به فرایند تخریب متومیل، طی مدت زمان کمتر از ۳۰ دقیقه (با توجه به نوع



شکل ۱۲. مقایسه نرخ تخریب متومیل به کمک امواج فراصوت، امواج فراصوت و فنتون، امواج فراصوت و فزاینده فتوفنتون [۶۲]

۵. مزایا و معایب

استفاده از امواج فراصوت در سال‌های اخیر توجهات بسیاری را به خود جلب کرده و کاربردهای جدیدی برای آن در زمینه‌های مختلف یافت شده است [۶۴]. استفاده از این امواج در شرایط عملیاتی مختلف در حوزه مهندسی شیمی، بایوتکنولوژی و صنایع غذایی به مراتب بیشتر مورد توجه قرار گرفته و مطالعات در این حوزه‌ها همچنان ادامه دارد [۶۵].

استفاده از امواج فراصوت به منظور پیش برنده و یا تسریع کننده واکنش نسبت به سایر روش‌ها مزایای بسیار زیادی دارد [۶۶، ۶۷]. از مزایای کلی آن می‌توان به عدم نیاز به استفاده از مواد شیمیایی و در نتیجه زیست سازگار بودن، بازدهی بالا، عدم نیاز به افزایش دمای محیط واکنش برای پیش برد آن و سادگی فرایند اشاره نمود [۶۸].

استفاده از این امواج از نظر محیط زیستی و فرایندی معایب چندانی ندارد و شاید بتوان تنها و بزرگ‌ترین عیب آن را هزینه اولیه و بهره‌برداری آن دانست. تکنولوژی استفاده از امواج فراصوت تقریباً یک روش جدید محسوب می‌شود و شاید به همین دلیل است که به یک روش نسبتاً گران و پرهزینه تبدیل شده است. معایب و مزایای این روش نسبت به دو روش رایج که به منظور حذف سموم کشاورزی استفاده می‌شوند به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه معایب و مزایای روش‌های مختلف به منظور حذف سموم از پساب‌های کشاورزی

معایب	مزایا	روش
✓ انرژی مصرفی بسیار زیاد [۵] ✓ تولید حجم بالای لجن [۶۹] ✓ نیاز به استفاده از الکتروود (در برخی موارد بسیار گران هستند) [۷]	✓ بازدهی بسیار بالا [۶۹] ✓ عدم نیاز به استفاده از مواد شیمیایی و اکسیدکننده	لخته‌سازی به کمک امواج الکتریکی
✓ انرژی مصرفی بسیار زیاد [۶۰] ✓ فناوری نسبتاً جدید و گران	✓ قابلیت کاربرد در شرایط عملیاتی مختلف [۷۱] ✓ عدم نیاز به واکنش‌دهنده‌های اضافی ✓ قابلیت استفاده در محیط‌هایی با اسیدیته مختلف ✓ بازدهی بالا ✓ عدم تولید لجن پس از واکنش ✓ عدم نیاز به کاتالیزور	استفاده از امواج فراصوت
✓ نیاز به استفاده از اکسیدکننده ✓ هزینه بالای استفاده از برخی اکسیدکننده‌ها ✓ تولید لجن	✓ بازدهی بسیار بالا در برخی موارد (نزدیک به ۱۰۰ درصد حذف) [۷۲] ✓ عدم نیاز به کاتالیزور	اکسیداسیون به کمک یک یا چند اکسیدکننده

۶. نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

این مقاله مروری است بر تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از امواج فراصوت در حذف پساب‌های صنعتی. با توجه به مقالات علمی ارائه شده در این زمینه مشخص شد که امواج فراصوت به تنهایی و یا همراه با روش‌های رایج حذف سموم می‌توانند در تصفیه پساب‌های کشاورزی از سموم شیمیایی مؤثر باشند. مشاهدات دقیق‌تر نشان داد که استفاده از امواج فراصوت و یا اکسیدکننده‌های رایج به تنهایی از نظر اثربخشی و هزینه نسبت به استفاده هم‌زمان از این دو روش بسیار ضعیف‌تر عمل می‌کنند. اثرات چشمگیر استفاده هم‌زمان از امواج فراصوت در کنار روش‌های قدیمی‌تر نشان از اثر هم‌افزایی آن بر روی فرایند دارد.

امروزه استفاده از امواج فراصوت در زمینه‌های مختلف علمی راه خود را پیدا کرده است و توجه خاصی به آن می‌شود. تعداد مقالات چاپ شده در زمینه استفاده از این امواج و حتی ظهور نشریات علمی معتبر که منحصر به چاپ مقالات ارائه شده در زمینه فراصوت می‌پردازند، نشان از پیشرفت این حوزه در سال‌های اخیر دارد. بحث شدت‌بخشی به فرایندها به کمک امواج فراصوت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به یک زمینه علمی برای تحقیق در مقاطع بالاتر تبدیل شده است. آینده استفاده از این امواج تا حد زیادی به فناوری طراحی و ساخت محرک‌های فراصوت بستگی دارد و شاید بتوان گفت علم مواد و الکترونیک نقش مهمی در پیشرفت این فناوری دارند.

۷. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/370675/98 اعلام می‌دارند.

با توجه به سرعت پیشرفت این شاخه از علم و کاربردهای وسیع آن می‌توان انتظار داشت در سال‌های آینده شاهد حضور این فناوری در بسیاری از صنایع و فرایندها باشیم.

۸. مأخذ

- [1] Shannon, M.A., P.W. Bohn, M. Elimelech, J.G. Georgiadis, B.J. Marinas, and A.M. Mayes, "Science and technology for water purification in the coming decades". *Nature*, 2008, 452(7185), pp.301-311.
- [2] Ahmad A, Mohd-Setapar SH, Chuong CS, Khatoon A, Wani WA, Kumar R., Rafatullah M., "Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater". *RSC Advances*, 2015, Vol.5, no.39, pp.30801-18.
- [3] Wang C, Shih Y., "Degradation and detoxification of diazinon by sono-Fenton and sono-Fenton-like processes", *Separation and purification technology*, 2015, Vol.140, pp.6-12.
- [4] Bailey HC, Krassoi R, Elphick JR, Mulhall AM, Hunt P, Tedmanson L, Lovell A., "Whole effluent toxicity of sewage treatment plants in the hawkesbury-nepean watershed, New South Wales, Australia, to *Ceriodaphnia dubia* and *Selenastrum capricornutum*", *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 2000, Vol.19, no.1, pp.72-81.
- [5] Amooey AA, Ghasemi S, Mirsoleimani-azizi SM, Gholaminezhad Z, Chaichi MJ. "Removal of Diazinon from aqueous solution by electrocoagulation process using aluminum electrodes", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2014, Vol.31, no.6, pp.1016-20.
- [6] Matouq MA, Al-Anber ZA, Tagawa T, Aljbour S, Al-Shannag M., "Degradation of dissolved diazinon pesticide in water using the high frequency of ultrasound wave", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, Vol.15, no.5, pp.869-74.
- [7] Mirsoleimani-azizi SM, Amooey AA, Ghasemi S, Salkhordeh-panbechouleh S., "Modeling the removal of endosulfan from aqueous solution by electrocoagulation process using artificial neural network (ANN)", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, Vol.54, no.40, pp.9844-9.
- [8] Ahmad T, Rafatullah M, Ghazali A, Sulaiman O, Hashim R, Ahmad A., "Removal of pesticides from water and wastewater by different adsorbents: a review", *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 2010, Vol.28, no.4, pp.231-71.
- [9] Gogate PR., "Treatment of wastewater streams containing phenolic compounds using hybrid techniques based on cavitation: a review of the current status and the way forward", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, Vol.15. no.1, pp.1-5.
- [10] Pang YL, Abdullah AZ, Bhatia S., "Review on sonochemical methods in the presence of catalysts and chemical additives for treatment of organic pollutants in wastewater", *Desalination*. 2011, Vol.277, no.1-3, pp.1-4.
- [11] Villaroel E, Silva-Agreto J, Petrier C, Taborda G, Torres-Palma RA., "Ultrasonic degradation of acetaminophen in water: effect of sonochemical parameters and water matrix", *Ultrasonics sonochemistry*, 2014, Vol.21, no.5, pp.1763-9.
- [12] Joseph CG, Puma GL, Bono A, Taufiq-Yap YH, Krishnaiah D., "Operating parameters and synergistic effects of combining ultrasound and ultraviolet irradiation in the degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol", *Desalination*, 2011, Vol.276, no.1-3, pp.303-9.

- [13] Ma YS, Sung CF, Lin JG., "Degradation of carbofuran in aqueous solution by ultrasound and Fenton processes: effect of system parameters and kinetic study", *Journal of Hazardous Materials*, 2010, Vol.178, no.1-3, pp.320-5.
- [14] Dehghani MH, Mahvi AH, Jahed GR, Sheikhi R., "Investigation and evaluation of ultrasound reactor for reduction of fungi from sewage", *Journal of Zhejiang University Science B*, 2007, Vol.8, no.7, pp.493-7.
- [15] Veillet S, Tomao V, Chemat F., "Ultrasound assisted maceration: An original procedure for direct aromatisation of olive oil with basil" *Food Chemistry*, 2010, Vol.123, no.3, pp.905-11.
- [16] Vajnhandl S, Le Marechal AM., "Ultrasound in textile dyeing and the decolouration/mineralization of textile dyes", *Dyes and Pigments*, 2005, Vol.65, no.2, pp.89-101.
- [17] Crum LA., "Cavitation microjets as a contributory mechanism for renal calculi disintegration in ESWL", *The Journal of urology*, 1988, Vol.140, no.6, pp.1587-90.
- [18] Juang RS, Lin K.H., "Flux recovery in the ultrafiltration of suspended solutions with ultrasound", *Journal of Membrane Science*, 2004, Vol.243, no.1-2, 115-24.
- [19] Tarleton ES, Wakeman RJ., "Microfiltration enhancement by electrical and ultrasonic force fields", *Filtration & Separation*, 1990, Vol.27, no.3, pp.192-4.
- [20] Suslick KS, "Sonochemistry", *science*, 1990, Vol.247, no.4949, pp.1439-45.
- [21] Frenzel H, Schultes H., "Luminescenz im ultraschallbeschickten Wasser", *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1934, Vol.27, no.1, pp.421-4.
- [22] Lamminen MO, Walker HW, Weavers LK., "Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes", *Journal of membrane science*, 2004, Vol.237, no.1-2, pp.213-23.
- [23] Kyllönen H, Pirkonen P, Nyström M, Nuortila-Jokinen J, Grönroos A., "Experimental aspects of ultrasonically enhanced cross-flow membrane filtration of industrial wastewater", *Ultrasonics sonochemistry*, 2006, Vol.13, no.4, pp.295-302.
- [24] Thangavadivel, K., M. Mallavarapu, A. Mudhoo, and R. Naidu, "Degradation of Organic Pollutants Using Ultrasound", 2012, pp.447-474.
- [25] Adewuyi YG., "Sonochemistry: environmental science and engineering applications", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, Vol.40, no.22, pp.4681-715.
- [26] Peters D., "Ultrasound in materials chemistry", *Journal of materials chemistry*, 1996, Vol.6, no.10, pp.1605-18.
- [27] Dong Chen, Sanjay K. Sharma, Ackmez Mudhoo, "*Handbook on Applications of Ultrasound: Sonochemistry for Sustainability*", CRC Press, 2011, p. 105-122.
- [28] Suslick KS, Hammerton DA, Cline RE., "Sonochemical hot spot", *Journal of the American Chemical Society*, 1986, Vol.108, no.18, pp.5641-2.
- [29] Chen D, Weavers LK, Walker HW., "Ultrasonic control of ceramic membrane fouling: effect of particle characteristics", *Water research*, 2006, Vol.40, no.4, pp.840-50.
- [30] Doktycz SJ, Suslick KS., "Interparticle collisions driven by ultrasound" *Science*, 1990, Vol.247, no.4946, pp.1067-9.
- [31] Prozorov T, Prozorov R, Suslick KS., "High velocity interparticle collisions driven by ultrasound", *Journal of the American Chemical Society*, 2004, Vol.126, no.43, pp.13890-1.
- [32] Vilku K, Mawson R, Simons L, Bates D., "Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry—A review", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, Vol.9, no.2, pp.161-9.

- [33] Chen D, Sharma SK, Mudhoo A., "Handbook on applications of ultrasound: sonochemistry for sustainability", CRC press, 2011.
- [34] Carnaroglio D, Gaudino EC, Mantegna S, Moreira EM, Vicente de Castro A, Flores EM, Cravotto G., "Ultrasound-assisted oxidative desulfurization/denitrification of liquid fuels with solid oxidants", *Energy & Fuels*, 2014, Vol.28, no.3, pp.1854-9.
- [35] Saïen J, Daneshamoz S., "Experimental studies on the effect of ultrasonic waves on single drop liquid-liquid extraction", *Ultrasonics sonochemistry*, 2018, Vol.40, pp.11-6.
- [36] Oh JY, Choi SD, Kwon HO, Lee S.E., "Leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from industrial wastewater sludge by ultrasonic treatment", *Ultrasonics sonochemistry*, 2016, Vol.33, pp.61-6.
- [37] Peng C, Momen AM, Moghaddam S., "An energy-efficient method for direct-contact ultrasonic cloth drying", *Energy*, 2017, Vol.138, pp.133-8.
- [38] Mutiarani, I.M. and A. Trisnobudi, *Ultrasonic Irradiation in Decreasing Water Turbidity*. 2009.
- [39] Stefan AN, Balan GE., "The Chemistry of the Raw Water Treated By Air-Jet Ultrasound Generator", *Rev. Roum. Sci. Tech.-Mec.*, 2011, Vol.56, no.1, pp.85-92.
- [40] Chua SY., *Effect of Ultrasonic Irradiation on Landfill Leachate* (Doctoral dissertation, Universiti Putra Malaysia), 2011.
- [41] Allen MB, Arnon DI., "Studies on nitrogen-fixing blue-green algae. I. Growth and nitrogen fixation by *Anabaena cylindrica* Lemm.", *Plant Physiology*, 1955, Vol.30, no.4, p.366.
- [42] Sayadi MH, Ghatnekar SD, Kaviani MF., "Algae a promising alternative for biofuel", *Proceedings of the international academy of ecology and environmental sciences*, 2011, Vol.1, no.2, p.112.
- [43] Haerhoff J, Edzwald JK., "Dissolved air flotation modelling: insights and shortcomings", *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2004, Vol.53, no.3, pp.127-50.
- [44] Kommineni S, "Water Research Foundation", *Strategies for controlling and mitigating algal growth within water treatment plants*. Water Research Foundation, 2009.
- [45] Lee TJ, Nakano K, Matsumura M., "A novel strategy for cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation", *Water Science and Technology*, 2002, Vol.46, no.6-7, pp.207-15.
- [46] Mahvi AH, Dehghani MH., Evaluation of ultrasonic technology in removal of algae from surface waters", *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2005, Vol.8, no.10, pp.1457-9.
- [47] Tang J, Wu Q, Hao H, Chen Y, Wu M., "Growth inhibition of the cyanobacterium *Spirulina* (*Arthrospira*) platensis by 1.7 MHz ultrasonic irradiation", *Journal of applied phycology*. 2003, Vol.15, no.1, pp.37-43.
- [48] Yejing Q, Fei Y, Fei R, Hai L, Jiangping L, Wei W., "Degradation of Microcystins by UV in the Presence of Low Frequency and Power Ultrasonic Irradiation", In 2011 *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation 2011 Jan 6. IEEE*, Vol.1, pp. 831-834.
- [49] Ma B, Chen Y, Hao H, Wu M, Wang B, Lv H, Zhang G., "Influence of ultrasonic field on microcystins produced by bloom-forming algae", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2005, Vol.41, no.2-3, pp.197-201.
- [50] Kabay N, Demircioglu M, Ersöz E, Kurucaovali I., "Removal of calcium and magnesium hardness by electrodialysis", *Desalination*, 2002, Vol.149, no.1-3, pp.343-9.
- [51] Yildiz E, Nuhoglu A, Keskinler B, Akay G, Farizoglu B., "Water softening in a crossflow membrane reactor", *Desalination*, 2003, Vol.159, no.2, pp.139-52.
- [52] Park JS, Song JH, Yeon KH, Moon SH., "Removal of hardness ions from tap water using electromembrane processes", *Desalination*. 2007, Vol.202, no.1-3, pp.1-8.

- [53] Entezari, M.H. and M. Tahmasbi, *Water softening by combination of ultrasound and ion exchange*. Ultrasonics sonochemistry, 2009. **16**(3): p. 356-360.
- [54] Handford CE, Elliott CT, Campbell K., "A review of the global pesticide legislation and the scale of challenge in reaching the global harmonization of food safety standards", *Integrated environmental assessment and management*, 2015, Vol.11, no.4, pp.525-36.
- [55] FAO, d., *National food safety standard-Maximum residue limits for pesticides in food*, FAOSTAT, Editor. 2017: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EP>.
- [56] Chen JY, Lin YJ, Kuo WC., "Pesticide residue removal from vegetables by ozonation", *Journal of Food Engineering*, 2013, Vol.114, no.3, pp.404-11.
- [57] Iizuka T, Yahata M, Shimizu A., "Potential mechanism involved in removal of hydrophobic pesticides from vegetables by hydrostatic pressure", *Journal of food engineering*, 2013, Vol.119, no.1, pp.1-6.
- [58] Rasolonjatovo MA, Cemek M, Cengiz MF, Ortaç D, Konuk HB, Karaman E, Kocaman AT, Göneş S., "Reduction of methomyl and acetamiprid residues from tomatoes after various household washing solutions", *International journal of food properties*, 2017, Vol.20, no.11, pp.2748-59.
- [59] Collings AF, Gwan PB., "Ultrasonic destruction of pesticide contaminants in slurries", *Ultrasonics sonochemistry*, 2010, Vol.17, no.1, pp.1-3.
- [60] Zhang Y, Hou Y, Chen F, Xiao Z, Zhang J, Hu X., "The degradation of chlorpyrifos and diazinon in aqueous solution by ultrasonic irradiation: effect of parameters and degradation pathway", *Chemosphere*. 2011, Vol.82, no.8, pp.1109-15.
- [61] Behbahani M, Veisi A, Omid F, Badi MY, Noghrehabadi A, Esrafil A, Sobhi HR., "The conjunction of a new ultrasonic-assisted dispersive solid-phase extraction method with HPLC-DAD for the trace determination of diazinon in biological and water media", *New Journal of Chemistry*, 2018, Vol.42, no.6, pp.4289-96.
- [62] Wang CK, Shih YH., "Facilitated ultrasonic irradiation in the degradation of diazinon insecticide", *Sustainable Environment Research*, 2016, Vol.26, no.3, pp.110-6.
- [63] Raut-Jadhav S, Pinjari DV, Saini DR, Sonawane SH, Pandit AB., "Intensification of degradation of methomyl (carbamate group pesticide) by using the combination of ultrasonic cavitation and process intensifying additives", *Ultrasonics sonochemistry*, 2016, Vol.31, pp.135-42.
- [۶۴] سلطانی، س.، موقرنژاد، ک.، تقی پور، ا.ح.، "اندازه‌گیری و مدل‌سازی سرعت صوت در الکل‌های خالص"، *مجله صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۷، شماره ۱۴، دوره ۷، صص. ۱۷-۲۳.
- [۶۵] موقرنژاد، ک.، ا.ح. تقی‌پور.، "ارائه یک روش فرکانس پایین و دستگاه مربوطه به منظور اندازه‌گیری سرعت صوت در مایعات"، *مجله صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۷، شماره ۱۳، دوره ۷، صص. ۳۳-۳۸.
- [۶۶] تاج‌الدین، ب.، رفیعی، ز.، "استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن مواد غذایی (مطالعه موردی: تولید چیپس سیب)"، *مجله صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۷، شماره ۱۴، دوره ۷، صص ۹۰-۹۷.
- [۶۷] قربانی، م.، ابونجمی، م.، قربانی جاوید، م.، "امواج فراصوتی روشی نوین در استخراج ترکیب‌های گیاهی"، *مجله صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۴، شماره ۸، دوره ۴، صص ۸۵-۹۹.
- [68] Safaiee P, Taghipour A, Vahdatkhoram F, Movagharnejad K., "Extraction of phenolic compounds from *Mentha aquatica*: the effects of sonication time, temperature and drying method". *Chemical Papers*, 2019, pp.1-7.
- [69] Shadmehr J, Mirsoleimani-azizi SM, Zeinali S, Setoodeh P., "Electrocoagulation process for propiconazole elimination from wastewater: experimental design for correlative

modeling and optimization”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, Vol.16, no.10, pp.5409-20.

- [70] Mahamuni NN, Adewuyi YG., “Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: a review with emphasis on cost estimation”, *Ultrasonics sonochemistry*, 2010, Vol.17, no.6, pp.990-1003.
- [71] Vega LP, Soltan J, Peñuela GA., “Sonochemical degradation of triclosan in water in a multifrequency reactor”, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, Vol.26, no.5, pp.4450-61.
- [72] Ikehata K, El-Din MG., “Aqueous pesticide degradation by hydrogen peroxide/ultraviolet irradiation and Fenton-type advanced oxidation processes: a review”, *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2006, Vol.5, no.2, pp.81-135.

پی نوشت:

1. Fenton
2. Diazinon
3. Organ sulfate
4. US Environmental Protection Agency
5. Elastic medium
6. Ultrasonic cavitation
7. Sonoluminescence
8. Shock waves
9. Stable and transition cavitation
10. Acoustical
11. Sonochemical
12. Suslick
13. Comparative-rate chemical thermometry
14. Sharma
15. Thermolytic center
16. Interfacial region
17. Bulk region
18. Pyrolysis
19. Microstreaming
20. Microjet
21. Oxidative desulfurization
22. Mutiarani
23. Stefan and Balan
24. Tang
25. Zhang
26. Synergy effect
27. Wang
28. Photo-Fenton Process