مطالعه بر روی تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از تکنولوژی التراسوند

بهنام حسینقلی‌لو[۱]، احمد بناکار[۲*]، مصطفی مصطفایی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه رازی کرمانشاه

* ایمیل نویسنده مسئول: ah_banakar@yahoo.com

چکیده

استفاده از امواج التراسونیک یکی از روش‌های جدید برای بهبود بخشیدن به فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا است. روش‌های سنتی تصفیه آب برای از بین بردن میکروآلاینده‌ها مثل مواد آلی مضر، تاثیر گذار نیستند و نمی‌توانند تقاضا برای آب آشامیدنی با کیفیت بالا را برآورده کنند. در مقایسه با فناوری نمک‌زدایی حرارتی، تکنولوژی التراسوند دارای مزایای خاصی در کاهش تاثیر غلظت آب دریا بر فرایند نمک زدایی می‌باشد. همچنین با تقویت فرایند تقطیر و بهبود بازده تبخیر، باعث کاهش انرژی مصرفی مورد نیاز و در نتیجه امکان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم می‌شود. بنابرین تکنولوژی التراسوند شیوه‌ی مهمی برای کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی می‌باشد. پارامترهای مختلفی مثل چگالی توان، فرکانس و زمان تابش می‌توانند برروی بازده روش التراسوند تاثیر بگذارند. بنابرین برای مقرون به صرفه بودن این روش، لازم است که مقدار بهینه‌ی این پارامترها به دست آورده شوند. در این مطالعه، کاربردهای مختلف تکنولوژی التراسوند در فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا مورد بررسی قرار گرفت. بیشتر آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفته‌اند. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند سازگاری فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا با محیط زیست را بهبود ببخشد. پیشنهاد می‌شود که روش التراسوند، می‌تواند برای تصفیه دیگر آلاینده‌های هوا و محیط زیست نیز تعمیم داده شود.

واژه‌های کلیدی: امواج التراسونیک ، بهینه، تکنولوژی التراسوند، تصفیه آب، نمک‌زدایی آب دریا.

مقدمه

انسان‌ها برای حفظ حیات و سلامت بدن، روزانه مقداری آب مصرف می‌کنند. بنابرین کیفیت آب مصرفی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برای انسان برخوردار است. آلودگی منابع سطحی و زیرزمینی آب توسط میکروآلاینده‌ها به دلیل افزایش فعالیت انسانی در صنعت، محصولات مصرف‌کننده و کشاورزی به یک مشکل جهانی تبدیل شده است (Lu *et al*., 2009). کمیاب بودن منابع آب شیرین روی زمین از یک سو و تقاضا برای آب آشامیدنی سالم و پاک به دلیل تغییر شرایط و استانداردهای زندگی مردم به علت افزایش متعدد نوآوری‌های تکنولوژی از سوی دیگر، عاملی شده‌اند که منابع آب شیرین موجود نتوانند نیاز جامعه و اقتصاد را تامین کنند و درنتیجه توسعه پایدار جامعه و اقتصاد را محدود میکنند. پس با مشکل تولید آب پاک و سالم و همچنین جستجوی منابع جدید آب شیرین روبرو هستیم (Zhang *et al*., 2011; Lu *et al*., 2009). تمامی منابع آب روی زمین برای آشامیدن مناسب نیستند. پس انسان‌ها مجبور هستند از فرایندهای تصفیه آب و یا نمک‌زدایی آب دریا (به عنوان منبع جدید آب شیرین)، به منظور تامین آب آشامیدنی مورد نیاز در حد کیفیت استاندارد آشامیدن استفاده کنند.

روش‌های ابتدایی و سنتی برای تصفیه آب شامل پیش‌تصفیه، تصفیه بیولوژیکی، فیلتراسیون شنی، جذب سطحی با کربن فعال، اشعه‌ی ماوراء بنفش و ضدعفونی کلرینه می‌باشند. این روش‌ها دارای محدودیت‌ها و مشکلات کاربردی مثل هزینه بالا، بی‌تاثیر بودن در دفع میکروآلاینده‌ها، عامل تغییر شکل آب، باعث تولید آلاینده‌های ثانویه‌ی سمی که عامل ایجاد سرطان هستند و تولید مواد شیمیایی مضر مربوط به کلر در ضدعفونی کلرینه، می‌باشند (Sameraiy, 2012; Gaya and Abdullah, 2008). با استفاده از روش‌های جدیدی مثل کاتالیست‌های نیمه هادی، اسمز رو به جلو، فرایند اکسیداسیون پیشرفته و تصفیه مغناطیسی، چنین محدودیت‌هایی را می‌توان از بین برد (Chong *et al*., 2010; Ambashta and Sillanpa, 2010). یکی از روش‌های جدید که در تقویت فرایند تصفیه آب استفاده می‌شود، استفاده از امواج التراسونیک می‌باشد (Doosti *et al*., 2012; Hiratsuka and Raj-Pathak, 2013).

چندین روش نمک‌زدایی وجود دارد که از بین آن‌ها روش‌های حرارتی و غشایی تجاری شده و استفاده از آن‌ها گسترش یافته است (Congjie and Guohua, 2004). جدا کردن نمک از آب یک فرایند غیر خودبخودی است که نیاز به صرف انرژی زیادی دارد. مصرف انرژی زیاد باعث عدم توسعه و گسترش آب‌شیرین‌کن‌ها شده است. ترکیب جدید برای کاهش انرژی مصرفی در فرایند نمک‌زدایی، ترکیب آب‌شیرین‌کن با التراسوند می‌باشد (Zhang *et al*., 2011).

التراسوند

التراسوند به امواج صوتی با فرکانس بالای ۲۰ کیلوهرتز می‌گویند که فرکانسی بیشتر از محدوده‌ی شنوایی انسان می‌باشد (Wong, 2002). در امواج التراسوند انرژی به وسیله‌ی ارتعاش مولکول‌ها در محیطی که امواج در آن محیط منتشر شده‌اند، منتقل می‌شود (Bello *et al*., 2005). التراسوند توسط دو روش تولید می‌شود؛ روش اول مگنتواستریکتیو می‌باشد که انرژی توسط سیم‌پیچ

مغناطیسی متصل به یک قطعه ارتعاشی (مثل نیکل)، به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. شدت امواج تولید شده در این روش کم است و بیشتر کاربرد آزمایشگاهی دارد. روش دوم، پیزوالکتریک است که در این روش انرژی الکتریکی توسط کریستال پیزوالکتریک متصل به یک قطعه ارتعاشی (مثل پروب)، به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود (Pilli *et al*, 2011).

کاویتاسیون

کاویتاسیون پدیده‌ی شکل‌گیری، رشد و فروپاشی میکروحباب‌ها یا حفره‌ها در مدت زمان بسیار کم (میلی ثانیه)، در یک مایع است (Shah *et al*., 1999). کاویتاسیون اگر در اثر عبور امواج التراسونیک ایجاد شود، کاویتاسیون آکوستیک و اگر ناشی از تغییرات فشار در مایع باشد، کاویتاسیون هیدرودینامیکی می‌گویند. با فروپاشی حفره‌ها، انرژی بسیار زیادی تولید می‌شود که با توجه به تئوری Hot spot، در این موقع فشار می‌تواند به ۵۰۰– ۱۰۰۰۰ اتمسفر و دما به ۳۰۰۰– ۵۰۰۰ درجه کلوین برسد (Patil *et al*., 2007; Gogate *et al*, 2003). در این مقاله، کاربردهای تکنولوژی التراسوند به عنوان یکی از روش‌های نوین و دوست‌دار محیط زیست، طی فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا، مورد بررسی قرار گرفته است.

کاربردهای مختلف التراسوند بر تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا

در این قسمت به صورت جداگانه به بررسی تاثیرات تکنولوژی التراسوند بر فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا پرداخته شده است. ابتدا کاربردهای مختلف تکنولوژی التراسوند در فرایند تصفیه آب و سپس در قسمت دوم، کاربردهای این تکنولوژی در فرایند نمک‌زدایی آب دریا بررسی شده‌اند.

کاربردهای التراسوند در فرایندهای تصفیه آب :

کاربرد التراسوند برای کاهش کدورت و مواد جامد معلق کل (TSS) آب

کدورت یکی از ویژگی‌های فیزیکی آب می‌باشد که توسط مواد معلق یا مواد محلول در آب مثل رس، سیلت، ماده آلی و معدنی ریز، ترکیبات آلی رنگی، پلانکتون‌ها و سایر میگروارگانیسم‌ها ایجاد می‌شود (EPA, 1999). روش‌های سنتی و ابتدایی برای کاهش کدورت و مواد جامد معلق کل (TSS) در فرایند تصفیه آب شامل فیلتراسیون آهسته و سریع، میکروفیلتراسیون، الترافیلتراسیون و انعقاد می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری درباره‌ی استفاده از التراسوند برای کاهش کدورت و TSS آب انجام شده است. تاثیر امواج التراسونیک بر کاهش کدورت و TSS آب طی آزمایشی که در آن چهار شرایط برای فرکانس و توان امواج التراسونیک به صورت ۲۰ کیلوهرتز و ۲۵ وات، ۲۸ کیلوهرتز و ۳۰ وات، ۴۵ کیلوهرتز و ۴۰ وات، ۲۰۰ کیلوهرتز و ۱۰۰ وات و مدت زمان تابش امواج ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ساعت بود، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، بیشترین فرکانس موثر، ۲۸ کیلوهرتز در توان ۴۰ وات، بازده ۷۵ درصد دارد. در حالی که بیشترین توان موثر، ۶۰ وات در فرکانس ۲۸ کیلوهرتز با بازده ۷۶ درصد می‌باشد. همچنین کاهش کدورت در ۲۸ کیلوهرتز با ۱ ساعت تابش امواج، با توان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین بازده امواج التراسوتد ۷۶ درصد در فرکانس ۲۸ کیلوهرتز و توان ۶۰ وات بود (Mutiarani *et al*., 2009). مطالعه‌ی دیگری به منظور بررسی اثر التراسوند

با چگالی‌های توان و مدت زمان تابش امواج مختلف بر روی کاهش مواد جامد معلق کل (TSS) در آب انجام گرفت. نتایج نشان داد که برای تمامی چگالی‌های توان، کاهش درصد TSS به طور قابل توجهی در ۳۰ دقیقه اول تابش افزایش یافت، اما از ۶۰ تا ۱۲۰ دقیقه زمان تابش، این روند پایدار نمانده و مقداری کاهش یافت. بیشترین درصد کاهش مواد جامد معلق کل ۸۴ درصد در توان ۰/۰۲۴ وات بر سانتی‌متر مکعب با ۱۲۰ دقیقه تابش امواج و کمترین درصد کاهش TSS، ۶۰ درصد در توان ۰/۰۶ وات بر سانتی‌متر مکعب با ۶۰ دقیقه تابش امواج بود (Wang *et al*., 2008). در آزمایش دیگری عامل تولید امواج التراسونیک با فرکانس ۲۷/۲ کیلوهرتز در ۳۰ ثانیه تابش امواج، برای کاهش کدورت در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد کدورت آب ۴ برابر نسبت به کدورت اولیه کاهش یافته است. مدت زمان تابش نیز بر میزان کاهش کدورت تاثیر دارد بطوریکه در ۵ ثانیه‌ی اول تابش، کدورت ۷–۵ بار کاهش یافت (Stefan and Balan, 2011).

کاربرد التراسوند برای از بین بردن جلبک‌های موجود در آب

رشد جلبک مشکل شایع در تصفیه آب گیاهان و مخازن آب است. جلبک‌ها موجودات آبزی هستند که می‌توانند تا ۶۵ متر رشد طولی داشته باشند. عوامل موثر بر رشد جلبک، دما و نور است (Sayadi *et al*., 2011). وجود جلبک با غلظت بالا، مشکلاتی مثل افزایش کدورت آب، کاهش قابل ملاحظه‌ی اکسیژن در آب، تغییر طعم و بوی آب، مسدود کردن فیلترها و انتشار مواد سمی در داخل آب، را ایجاد می‌کند (Henderson *et al*., 2008). روش‌های مختلفی برای کنترل رشد و حذف جلبک‌ها از آب مثل شناور هوایی داخل آب، پوشش مخازن و فیلترگزاری، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، گندزدایی توسط ازن، انعقاد توسط سولفات مس و پرمنگنات پتاسیم، تزریق حباب، هوادهی، استفاده از کلر قبل از اکسیداسیون، فرایندهای کاتالیستی و... امتحان شده است (Kommineni *et al*., 2009). یکی از فرایندهای جدید برای کنترل رشد و حذف جلبک، استفاده از تابش امواج التراسونیک می‌باشد که به طور معمول، سلول جلبک تحت تاثیر نواسانات امواج التراسونیک و کاویتاسیون حاصل از آن امواج، یکپارچگی خود را از دست داده و متلاشی می‌شود. مکانیزم کنترل رشد و حذف جلبک توسط این تکنولوژی معمولا شامل تولید رادیکال‌های آزاد، پاره کردن وزیکول گازی داخل سلول جلبک و جلوگیری از انجام فتوسنتز می‌باشد (Le *et al*., 2002). مطالعه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی به وسیله‌ی التراسوند با فرکانس ۴۲ کیلوهرتز در زمان‌های تابش امواج ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه بر روی حذف جلبک‌ها انجام گرفت که نتایج نشان داد به ترتیب زمان تابش، مقدار ۸/۵۵، ۳۵/۲۲، ۶۷/۲۲، ۹۰/۶۷ و ۱۰۰ درصد از آلایندگی جلبک‌ها حذف می‌شود (Mahvi and Dehghani, 2005). در پژوهش دیگری، اثر تابش امواج التراسونیک با توان و فرکانس کم بر روی جلبک‌های حاصل از یک نوع آب شیرین، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که امواج التراسونیک با فرکانس ۶۰ کیلوهرتز و توان ۰/۲۴ وات بر سانتی‌متر مربع با ۱ دقیقه تابش امواج، تاثیر قابل توجه و معناداری بر روی جلوگیری از رشد جلبک گذاشت. همچنین ثابت کردند که با زیاد شدن توان از ۰/۲۴ وات بر سانتی‌متر مربع، دیگر تاثیری بر رشد جلبک ندارد و ثابت می‌ماند (Jiang *et al*., 2012). در آزمایشی، سه نوع محلول حاوی جلبک سمی میکروسیستیس تحت تاثیر امواج التراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان‌های مختلف ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ وات با مدت زمان تابش امواج ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه قرار گرفتند. با توجه به نتایج حاصل مشخص شد که بیشترین مقدار

نابودی جلبک در توان ۹۰ وات بعد از ۲۰ دقیقه تابش امواج صورت گرفت. همچنین کارایی نابودی جلبک با این روش برای محلول‌های یکسان با توان التراسوند ۳۰ وات و فرکانس‌های مختلف ۲۰، ۱۵۰، ۴۱۰ کیلوهرتز و ۱/۷ مگاهرتز با مدت زمان تابش امواج ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت که مشخص شد بیشترین میزان نابودی جلبک در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز با ۲۰ دقیقه تابش امواج می‌باشد (Bozhi *et al*., 2005). بیشترین مطالعات در زمینه استفاده از تکنولوژی التراسوند بر روی نابودی گونه‌های جلبک سیانوباکتریال و میکروسیستیس‌ها متمرکز شده‌اند. نتایج به این شکل بوده که در بسیاری مواقع، تا میزان ۹۰ درصد از جلبک‌های مذکور داخل آب، توسط امواج التراسونیک در محدوده‌ی فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تا ۱/۷ مگاهرتز، نابود شده‌اند (Tango *et al*., 2003; Hao *et al*., 2004).

کاربرد التراسوند در ضدعفونی کردن آب

اساس ضدعفونی کردن آب، حذف میکروارگانیسم‌های موجود در آب می‌باشد که توسط روش‌های مختلفی مثل استفاده از اشعه‌ی ماورای بنفش و استفاده از مواد شیمیایی مثل کلر، هیپوکلریت‌ها، کلرامین‌ها، دی‌اکسید کلر، برم و ازن می‌توان به این هدف رسید (Jiang *et al*., 2012). درفرایند تصفیه و ضدعفونی آب، گرایش به سوی توسعه‌ی استفاده از تکنولوژی‌های دوست‌دار محیط زیست است که تاثیر گذاری مواد شیمیایی در آب را کاهش داده و مانع از تولید محصولات مضر واکنش‌ها مثل اسید هالو استیک و تری‌هالو متان‌ها شوند، بنابرین امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی التراسوند مورد بررسی محققان قرار گرفت (Gomez-Lopez *et al*., 2009). امواج التراسونیک توسط چند مکانیزم که پایه و اساس آن‌ها کاویتاسیون آکوستیک است، می‌توانند میکروارگانیسم‌ها را غیر فعال کنند. اولین مکانیزم می‌تواند حمله شیمیایی رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده توسط التراسوند باشد، دومی فشار و دمای بالایی است که توسط فروپاشی حفره‌ها طی پدیده‌ی کاویتاسیون ایجاد شده و باعث تخریب و نابودی سلول‌ها می‌شود. مکانیزم دیگر، نیروهای برشی ناشی از امواج التراسوند که باعث آسیب رساندن به سلول‌های باکتریایی می‌شوند (Joyce *et al*., 2003). تکنولوژی التراسوند در بسیاری از مطالعات در شرایط مختلفی مثل فرایند ضدعفونی به تنهایی، به عنوان پیش‌تصفیه و یا در ترکیب با دیگر روش‌های ضدعفونی مثل اشعه‌ی ماورای بنفش، کلر و ازن، مورد بررسی قرار گرفته است (Hulsmans *et al*., 2010). کاربرد امواج التراسوند با فرکانس ۲۰ و ۸۵۰ کیلوهرتز به عنوان پیش‌تصفیه برای تقویت بازده فرایند ضدعفونی آب از باکتری ای‌کولای (E-coli) در مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تاثیر معنادار این روش در فرکانس ۸۵۰ کیلوهرتز با مدت زمان تابش امواج ۱ دقیقه را بر روی غیر فعال کردن این باکتری نشان دادند (Duckhouse *et al*., 2004). در آزمایش دیگری نیز تاثیر التراسوند به عنوان پیش تصفیه در ترکیب با روش ضدعفونی با دی‌اکسید کلر برای غیر فعال کردن دو باکتری ای‌کولای (E-coli)و تی سی (TC)، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از امواج التراسونیک، میزان میکروارگانیسم غیر فعال شده‌ی بیشتری حاصل می‌شود (Ayyildiz *et al*., 2011). عملکرد تکنولوژی التراسوند در فرکانس ۳۶ کیلوهرتز و توان ۲۰۰ وات برای غیرفعال کردن باکتری لژیونلا در غیاب و حضور مقدار ۱ گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که بدون

TiO_2، فقط ۱۸ درصد از سلول‌های زنده‌ی باکتری لژیونلا غیر فعال گردید، در حالی که در حضور TiO_2، مقدار ۹۷ درصد از سلول‌های باکتری مذکور در ۳۰ دقیقه تابش امواج التراسونیک غیر فعال گردید (Shimizua *et al*., 2010).

کاربرد التراسوند در فرایند نرم کردن آب

سختی آب به دلیل وجود کاتیون‌های دو و سه ظرفیتی مانند کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، آلومنیوم (Al^{2+}, Al^{3+}) و آهن (Fe^{2+}, Fe^{3+}) در آب می‌باشد که از بین این کاتیونها، کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) فاکتورهای مهم سختی آب هستند (Kabay *et al*.,2002; Ildiz *et al*., 2003). آب سخت مشکلاتی مثل ایجاد خوردگی در لوله‌ها و وسایل خنک کننده، گرفتگی غشا، جلوگیری از خوب کف کردن صابون و کاهش ظرفیت حرارتی آب را ایجاد می‌کند (Ghizellaoni *et al*., 2004). روش‌های مرسوم برای حذف سختی آب استفاده از آب آهک یا آهک– سودا (Lim- Soda)، تبادل یونی، فرایند الکتروکواگولاسیون، فرایند الکترو دیالیز و نانو فیلتراسیون می‌باشند. آزمایشی با ترکیب تکنولوژی التراسوند در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز با فرایند تبادل یونی برای حذف سختی آب انجام گرفت. در این آزمایش از یک کوپلیمر استایرن divinylbenzene با گروه سولفوریک اسید به عنوان یک رزین کاتیون اسید بسیار قوی استفاده کرده و تاثیر پارامترهای مختلف مثل زمان تماس، مقدار جذب، دما و غلظت یون را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که ظرفیت جذب و سرعت حذف در حضور امواج التراسونیک بیشتر از روش عادی (بدون امواج التراسونیک) بوده که این تاثیر معنادار به کاویتاسیون حاصل از امواج التراسونیک مربوط می‌شود (Entezari and tahmasbi, 2009).

کاربرد التراسوند برای حذف دیگر آلاینده‌های آب

DDT (دی‌کلرو دی‌فنیل تری‌کلرو اتان) یک آلاینده‌ی سمی می‌باشد که در سمپاشی‌های کشاورزی به عنوان سم برای نابودی علف‌های هرز در مزرعه استفاده می‌شود. این آلاینده به دلیل گستردگی مصرف در زمینه‌ی سمپاشی، به راحتی وارد منابع آب شده و آن‌ها را آلوده می‌کند. در پژوهشی برای حذف DDT با غلظت اولیه ۸ میلی‌گرم بر لیتر در آب، از تکنولوژی التراسوند با فرکانس ۱/۶ مگاهرتز و توان ۱۵۰ وات بر لیتر استفاده شد. بعد از ۴۰ دقیقه تابش امواج به آب، غلظت DDT به ۱/۲ میلی‌گرم بر لیتر و بعد از تابش ۹۰ دقیقه امواج به آب، غلظت DDT به ۱ میلی‌گرم بر لیتر در آب، کاهش پیدا کرد (Thangavadivel *et al*., 2009). برای حذف ماده‌ی سمی کلرو پریدین از آب، آزمایشی با ترکیب فرایند اشعه‌ی ماورای بنفش و امواج التراسونیک با فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز و توان متغیر تا ۲۵۰ وات، انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از التراسوند بعد از ۳۰۰ دقیقه تابش امواج، ۹۰ درصد از مقدار کلرو پریدین موجود در آب دفع شد (Stapleton *et al*., 2005). تحقیقات دیگری نیز به منظور حذف هالو متان‌ها از آب (Guo *et al*., 2006)، برای حذف پروپائونیک اسیدها از آب (Mendez-Arriaga *et al*., 2008) و برای حذف دو نوع از آلدهیدها، بنزالدهید و فرمالدهید از آب (Sekiguchi *et al*., 2011)، به وسیله امواج التراسونیک انجام گرفته است که در همه‌ی این تحقیقات نقش معنادار و قابل توجه تکنولوژی التراسوند برای از بین بردن و یا کم کردن غلظت آلاینده‌های مذکور در آب، گزارش شده است.

کاربردهای التراسوند در نمک‌زدایی آب دریا :

کاربرد التراسوند در فرایند نمک‌زدایی غشائی

در حال حاضر فناوری غشائی به دلیل ظرفیت حذف بالای مواد جامد و توانایی تولید آب با کیفیت بالا، برای جداسازی مواد جامد از مایع (به خصوص در نمک‌زدایی آب دریا) بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. میکرو فیلتراسیون، نانو فیلتراسیون، الترا فیلتراسیون، الکترو دیالیز و اسمز معکوس از رایج‌ترین فرایندهای مورد استفاده از فناوری غشائی می‌باشند (Lamminen, 2004). فناوری‌های غشائی علاوه برای مزایای زیادی که دارند، دارای مشکلاتی نیز مثل پلاریزه کردن (دوقطبی شدن) غلظت و رسوب می‌باشند که مشکل رسوب در فناوری‌های غشائی بیشتر به چشم می‌خورد. رسوب غشا فرایندی است که طی آن املاح و یا ذراتی مثل مواد آلی طبیعی، سیلیس، اکسید آهن، کربنات یا آهک و رس، بر روی سطح غشا و یا منافذ غشا می‌مانند و کارایی، عملکرد، عمر غشا و کیفیت آب تولیدی را کاهش می‌دهند (Seidel and Elimelech, 2002). چهار نوع مختلف رسوب وجود دارد که رسوب کلوئیدی (رس)، بیولوژیکی (باکتری و قارچ‌ها)، آلی (روغن و پلی‌الکترولیت) و پوسته پوسته شدن (رسوب شیمیایی) می‌باشند (Ashaghi *et al*., 2007). با استفاده از روش‌های فیزیکی (اسفنج‌ها، جت آب و جریان معکوس)، شیمیایی (اسیدها، بازها و آنزیم‌ها) و بیولوژیکی (استفاده از حشره‌کش‌ها برای نابودی تمامی میکرو ارگانیسم‌ها) رسوب غشا را می‌توان تمیز کرد (Zeman *et al*., 1996). در تمیز کردن غشا به روش شیمیایی مشکلاتی مثل هزینه‌ی بالا، تولید زباله‌های شیمیایی و آلایندگی ثانویه وجود دارد و همچنین در تمیز کردن فیزیکی جریان معکوس که غشا مجبور به تکرار چرخه می‌شود، شار بیشینه‌ی حاصل کاهش می‌یابد. همچنین برای استفاده از تمیز کننده‌های فیزیکی و شیمیایی، دستگاه غشائی باید خاموش شود که برای ادامه عملیات مطلوب نیست (Li *et al*., 2002; Chen *et al*., 2006). با توجه به مشکلات موجود، موثر بودن روش التراسوند بر روی فناوری‌های غشائی طی تحقیقاتی اثبات شده است و دارای مزیت‌هایی مثل عدم ایجاد آلایندگی ثانویه، افزایش عملکرد دستگاه غشایی به دلیل وجود هیدروژن پراکسید و رادیکال‌های هیدروکسیل آزاد تولید شده توسط امواج التراسونیک، حمل و نقل آسان و عملکرد همزمان با روشن بودن و کار کردن دستگاه غشائی (در طول زمان فیلتراسیون) می‌باشد. بیشتر دستگاه‌های دارای تکنولوژی التراسوند بر پایه‌ی پدیده‌ی کاویتاسیون کار می‌کنند که با وارد آوردن شوک به آب از رسوب ذرات روی غشا جلوگیری کرده و با توجه به افزایش انتقال جرم از مایع، باعث بیرون راندن ذرات عامل رسوب از سطح غشا و افزایش انحلال مواد می‌شود (Lee *et al*., 2002; Verraes *et al*., 2000). مطالعه‌ای با هدف کاربرد امواج التراسونیک با بیشینه فشار ۲/۷ مگاپاسکال و فرکانس ۶۷۱ کیلوهرتز در تمیز کردن غشا انجام گرفت. نتایج نشان دادند که قبل رسوب، میزان فیلتراسیون ۳/۴۷ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. بعد از تمیز کردن غشا با التراسوند، میزان فیلتراسیون به مقدار ۱/۶۷ میلی‌لیتر بر دقیقه افزایش یافت (Lu *et al*., 2009). آزمایش دیگری اثبات کرد که فرکانس التراسونیک در محدوده‌ی ۷۰ تا ۶۲۰ کیلوهرتز، بدون آسیب رساندن به غشاء سرامیکی، قادر به تمیز کردن آن می‌باشند. همچنین التراسوند با توان ۰ تا ۵ وات بر سانتی‌متر مربع می‌تواند میزان تقطیر غشائی را تا ۲۰۰ درصد افزایش دهد (Zhu and Liu, 2000). تحقیقات زیادی در مورد استفاده

از تکنولوژی التراسوند در فناوری غشائی صورت گرفته است اما تقریبا همه‌ی آن‌ها در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد. این تکنولوژی دارای مشکلاتی مثل بالا بودن هزینه انرژی مصرفی مورد نیاز، شکننده و گران بودن برخی مبدل‌های التراسوند مانند سرامیک تیتانات و زیرکونات سرب، می‌باشد (Lu *et al*., 2009).

کاربرد التراسوند در آب شیرین‌کن‌های حرارتی

پروژه‌های زیادی در زمینه نمک‌زدایی آب‌های شور انجام گرفته است که بیشتر بر پایه‌ی تبخیر و تقطیر آب می‌باشند و مشکل عمده و اساسی آن‌ها مصرف زیاد انرژی است. اکثر منابع انرژی مصرفی لازم، سوخت‌هایی با منشا فسیلی هستند که دارای مشکلاتی مثل آلودگی زیاد، هزینه بالا و محدودیت استفاده می‌باشند که در کل باعث افزایش هزینه نمک‌زدایی می‌شوند. برای رفع مشکلات ذکر شده، از منابع انرژی تجدیدپذیر مثل انرژی خورشیدی به عنوان منبع تامین کننده‌ی انرژی مصرفی آب شیرین‌کن‌ها استفاده می‌کنند. بازده کم و پایین بودن ظرفیت کاری دستگاه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی، عیب اصلی این دستگاه‌ها می‌باشد. تقویت بازده تبخیر آب شیرین‌کن‌های حرارتی، یک روش مهم برای کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی می‌باشد که تکنولوژی التراسوند با تقویت فرایند تبخیر و تقطیر به وسیله‌ی تقویت انتقال جرم و حرارت، باعث کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی آب دریا می‌شود. امواج التراسونیک مولکول‌های آب را به قطرات کوچک در حد میکرون تبدیل کرده و باعث افزایش سرعت و شتاب قطرات در سطح آب می‌شود که در نتیجه‌ی افزایش جنبش و حرکت مداوم مولکول‌های آب، کشش سطحی آب که عامل محدود کننده‌ی تبخیر آب هست، شکسته می‌شود و سرعت و شتاب تبخیر افزایش یافته و در نتیجه عملکرد آب شیرین‌کن تقویت می‌شود. بر اساس موارد ذکر شده، مطالعه‌ای در زمینه‌ی تاثیر امواج التراسونیک با فرکانس ۱/۷ مگاهرتز و در محدوده‌ی دمایی ۳۵ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد بر روی دستگاه آب شیرین‌کن حرارتی آب دریا با محدوده‌ی شوری آب ۱۵ تا ۳۵ قسمت در هزار، انجام گرفت. داده‌های تجربی به دست آمده نشان دادند که در مقایسه با تبخیر طبیعی، التراسوند تاثیر معنادار و قابل توجهی بر تقویت فرایند تبخیر گذاشته است. همچنین در حالت عادی با افزایش میزان شوری آب، تبخیر کمتر و محدودتر می‌شود، ولی با تکنولوژی التراسوند در میزان شوری ۱۵ تا ۳۵، تبخیر تفاوتی نکرده و میزان افزایش شوری در این محدوده، بر روی فرایند تبخیر بی‌تاثیر می‌باشد (Xiao, 2010).

کاربرد التراسوند در فرایند نمک‌زدایی به روش تبادل یونی

در حال حاضر فرایندهای تبادل یونی برای نمک‌زدایی آب دریا، نرم کردن آب، تصفیه فاضلاب و دیگر فناوری‌های جداسازی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهشی تاثیر امواج التراسونیک بر روی فرایند نمک‌زدایی آب دریا به روش تبادل یونی (فیبر تو خالی)، مورد بررسی قرار گرفت. برای یون‌های H^+ و Na^+، تبادل یونی با افزایش توان التراسوند، افزایش یافت. بطوریکه در توان ۶۱ وات امواج التراسونیک، تبادل یونی تا ۴۰ درصد افزایش یافت. همچنین در محدوده‌ی دمایی ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد محلول، تکنولوژی التراسوند باعث افزایش ۴۰ تا ۶۰ درصد تبادل یونی می‌شود (Band, 1997).

مطالعات دیگری در مورد کاربرد تکنولوژی التراسوند در فرایند نمک‌زدایی آب دریا

پژوهشی در مقیاس آزمایشگاهی به منظور بررسی تاثیر دما بر فرایند نمک‌زدایی آب دریا به کمک امواج التراسونیک با فرکانس ۱/۷ مگاهرتز در میزان شوری‌های مختلف آب دریا انجام گرفت. نتایج نشان داد که میزان تبخیر التراسونیک با افزایش دما، افزایش می‌یابد و همچنین دمای مناسب برای تبخیر با تکنولوژی التراسوند در محدوده‌ی شوری آب ۱۵ تا ۳۵ قسمت در هزار، ۵۰ تا ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به دست آمد (Zhang *et al*, 2011). مطالعه‌ای در زمینه‌ی تاثیر تکنولوژی التراسوند بر روی تشدید انتقال حرارت و جرم، در فرایندهای جداسازی با مبدل حرارتی و غشائی صورت گرفت. نتایج نشان داد که تکنولوژی التراسوند باعث افزایش شدید انتقال حرارت و جرم، و همچنین باعث کنترل و حذف رسوب (مشکل اساسی فناوری‌های غشائی و مبدل‌های حرارتی) در فرایندهای جداسازی با مبدل حرارتی و غشائی شده و بازده این فرایندها را افزایش می‌دهد (Gondrexon *et al*., 2015).

نتیجه گیری

تکنولوژی التراسوند در تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا کارایی و عملکرد قابل قبولی دارا است. این عملکرد خوب، به دلیل پدیده‌ی کاویتاسیون ناشی از انتشار امواج التراسونیک می‌باشد که باعث ایجاد دما و فشار بالا در محل انتشار امواج و همچنین با تجزیه حرارتی آب و اکسیژن، باعث تولید انواع رادیکال‌های آزاد (OH, HO_2) می‌شود. امواج التراسونیک باعث سرعت بخشیدن به انجام واکنش‌ها و بهبود فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا می‌شود. هنگامی که این فرایندها به کمک تکنولوژی التراسوند انجام می‌گیرند، باعث تقویت بازده، کاهش انرژی کل مصرفی فرایندها و همچنین عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی می‌شود. تکنولوژی التراسوند خود به تنهایی مصرف انرژی بالایی دارد که با استفاده از منابع انرژی دیگر مثل زمین‌گرمایی یا انرژی خورشیدی می‌توان این مصرف انرژی را کاهش داد. در فرایندهای نمک‌زدایی آب دریا به دلیل مصرف انرژی زیادی که دارند، تکنولوژی التراسوند به دلیل تقویت فرایند تبخیر و تقطیر به وسیله‌ی تقویت انتقال جرم و حرارت، باعث سهولت استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی مصرفی فرایندهای نمک‌زدایی آب دریا شده و در نتیجه هزینه‌های آب شیرین‌کنی را کاهش می‌دهد. پارامترهای مختلفی مثل چگالی توان، فرکانس و زمان تابش امواج می‌توانند برروی کارایی و عملکرد روش التراسوند تاثیر بگزارند. بنابرین برای استفاده‌ی ویژه و مثمر ثمر واقع شدن این تکنولوژی باید با توجه به داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها، مقادیر بهینه این پارامترها محاسبه شود که در کل باعث مقرون به صرفه شدن استفاده از این تکنولوژی در فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا می‌شود. با توجه به مزیت‌های استفاده از تکنولوژی التراسوند می‌توان گفت که این فناوری سازگاری فرایندهای تصفیه آب و نمک‌زدایی آب دریا با محیط زیست را بهبود می‌بخشد. پیش‌بینی میشود که در آینده با انجام تغییراتی به منظور کاهش انرژی مصرفی این تکنولوژی، این فناوری به صورت گسترده در زمینه‌های تصفیه آب و آب شیرین‌کنی مورد استفاده قرار خواهد گرفت و پیشنهاد می‌شود که برای حذف دیگر آلاینده‌های محیط زیست و آب نیز می‌توان از تکنولوژی التراسوند بهره برد.

منابع

Ambashta, R. D., and Sillanpaa, M. 2010. Water purification using magnetic assistance: A review. Journal of Hazardous Materials, 180: 38-49.

Ashaghi, K. S., Ebrahimi, M., and Czermak, P. 2007. Ceramic ultra- and nanofiltration membranes for oilfield produced water treatment: A mini review. The Open Environmental Journal, 1: 1-8.

Ayyildiz, O., Sanik, S., and Ileri, B. 2011. Effect of ultrasonicpretreatment on chlorine dioxide disinfection efficiency Ultrasonics Sonochemistry, 18: 683-688.

Band, M. A., Gutman, V., Faerman, E., et al. 1997. Influence of specially modulated ultrasound on the water desalination process with ion-exchange hollowfibers. Elsevier Desalination109 (1997)303-313.

Bello, A. R. C., Angelis, D. F., and Domingos, R. N. 2005. Ultrasound Efficiency in Relation to Sodium Hypochlorite and Filtration Adsorption in Microbial Elimination in a Water Treatment Plant. Brazilian Archives of Biology and Technology, 48: 739-745.

Bozhi, M., Yifang, C., Hongwei, H., et al. 2005. Influence of ultrasonic field on microcystins produced by bloom-forming algae. Colloids and SurfacesB: Biointerfaces, 41: 197-201.

Chen, D., Weavers, L. K., and Walker, H. W. 2006. Ultrasonic control of ceramic membrane fouling: Effect of particle characteristics. Water Research, 40: 840-850.

Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. K., et al. 2010. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. Water Research, 44: 2997-3027.

Congjie, G., and Guohua, C. 2004. "Desalination Engineering and Technical Manual[M]," Beijing: Chemical Industry Press,2004.

Doosti, M. R., Kargar. R., and Sayadi, M. H. 2012. Water treatment using ultrasonic assistance: A review. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 2012, 2:96- 110.

Duckhouse, H., Mason, T. J., Phull, S.S/, et al. 2004. The effect of sonication on microbial disinfection using hypochlorite. Ultrasonics Sonochemistry, 11: 173-176.

Entezari, M. H., and Tahmasbi, M. 2009. Water softening by combination of ultrasound and ion exchange. Ultrasonics Sonochemistry, 16: 356-360.

EPA. 1999. Guidance Manual Turbidity Provisions.

Gaya, U. I., and Abdullah, A.H. 2008. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: a review of fundamentals, progress and problems. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 9: 1-12.

Ghizellaoui, S., Taha, S., Dorange, G., et al. 2004. Softening of Hamma drinking water by nanofiltration and by lime in the presence of heavy metals. Desalination, 171: 133-138.

Gogate, P. R., Wilhelm, A. M., and Pandit, A. B. 2003. Some aspects of the design ofsonochemical reactors. Ultrason. Sonochem, 10: 325-330.

Gondrexon, N., Cheze, L., and Jin, Y. 2014. Intensification of heat and mass transfer by ultrasound: Application to heat exchangers and membrane separation processes. 1350-4177/2014 Elsevier B.V.

Gomez-Lopez, M. D., Bayo, J., García-Cascales, M. S, et al. 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. Journal of Cleaner Production, 17(16): 1504-1511.

Guo, Z. H, Gu, C. H, Zheng, Z. H. et al. 2006. Sonodegradation of halomethane mixtures in chlorinated drinking water. Ultrasonics Sonochemistry, 13: 487-492.

Hao, H., Wu, M., Chen, Y., et al. 2004. Cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation at 20 kHz and 1.7 MHz. Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 39: 1435-1446.

Henderson, M., Chips, M., Cornwell, N., et al. 2008. Experiences of algae in UK waters: A treatment perspective Water and Environment Journal, 22: 184-192.

Hiratsuka, A., and Raj- Pathak, D. 2013. Application of Ultrasonic Waves for the Improvement of Water Treatment. Journal of Water Resource and Protection, 2013, 5, 604-610.

Hulsmans, A., Joris, K., Lambert, N., et al. 2010. Evaluation of process parameters ofultrasonic treatment of bacterial suspensions in a pilot scale water disinfection system. Ultrasonics Sonochemistry, 17: 1004-1009.

Ildiz, E., Nuhoglu, A., Keskinler, B., et al.2003. Water softening in a cross flow membrane reactor. Desalination 15: 139-152.

Jiang, D., Ni, G., Zhang, Y., and Su, Y. 2012. Algal Control by Low-Frequency, Low-Power Ultrasonic in Eutrophic Water bodies. Advanced Materials Research Vols. 433-440 (2012) pp 811-816.

Joyce, E., Phull, S. S., Lorimer, J. P., et al. 2003. The development and evaluation of ultrasound for the treatmentof bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured Bacillus species Ultrasonics Sonochemistry 10: 315- 318.

Kabay, N., Demircioglu, M., Ersoz, E., et al. 2002. Removal of calcium and magnesium hardness by electrodialysis, Desalination, 149:343-349.

Kommineni, S., Amante, K., Karnik, B. 2009. Strategies for Controlling and Mitigating Algal Growth within Water Treatment Plants. Water Research Foundation, Denver, Colorado, USA

Lamminen MO. 2004. Ultrasonic Cleaning Of Latex Particle Fouled Membranes. PhD Thesis. The Ohio State University, USA.

Lee TJ, NakanoK, Matsumura M. 2002. A novel strategy for cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation. Water Science and Technology, 46: 207-215.

Li, Y., and Guohou, J. 2001. "Prospect about the seawater desalination Status and application[J],"Water Conservancy Science and Technology and Economy, vol.7, no. 4, pp. 166-167, 2001.

Li, J., Sanderson, R. D., and Jacobs, E. P. 2002. Ultrasonic cleaning of nylon microfiltration membranes fouled by Kraft paper mill effluent. Journal of Membrane Science, 205: 247-257.

Lu, J. U., Du, X., and Lipscomb, G. 2009. Cleaning Membranes with Focused Ultrasound Beams for Drinking Water Treatment. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings.

Mahvi, A. H., and Dehghani, M. H. 2005. Evaluation of ultrasonic technology in removal of algae from surface waters Pakistan Journal of Biological Science, 8: 1457-1459.

Mendez-Arriaga, F., Torres-Palma, R. A., Petrier, C., et al. 2008. Ultrasonic treatment of water contaminated with ibuprofen. Water Research, 42: 4243-4248.

Mutiarani, M., Irsyad, M., Trisnobudi, A. 2009. Ultrasonic Irradiation in Decreasing Water Turbidity.http//www.ftsl.itb.ac.id/.../PE-EM3-MUTIARANI-15305035-EDIT.pdf.

Patil, M. N., and Pandit, A. B. 2007. Cavitation - a novel technique for making stable nanosuspensions. Ultrasonics Sonochemistry, 14: 519-530

Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., et al. 2011. Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. Ultrasonics Sonochemistry 18: 1-18.

Sameraiy, M. A. 2012. "A Novel Water Pretreatment Approach for Turbidity Removal Using Date Seeds and Pollen Sheath," Journal of Water Resource and Protection, Vol. 4, No. 3, 2012, pp. 79-92.

Sayadi, M. H., Ghatnekar, S. D., Kavian, M. F. 2011. Algae a promising alternative for biofuel. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 1(2): 112-124.

Seidel, A., and Elimelech, M. 2002. Cupling between chemicaland physical interactions in natural organic matter fouling nanofiltration membrain implication for fouling control. Journal of Membrain. 203: 245-25.

Shah, Y.T., Pandit, A. B., Moholkar, V. S. 1999. Cavitation Reaction Engineering. Plenum Publishers, USA .

Shimizua, N., Ninomiya, N., Ogino, C., et al. 2010. Potential uses of titanium dioxide in conjunction with ultrasound for improved disinfection. Biochemical Engineering Journal, 48: 416-423.

Stapleton, D. R., Emery, R.J., Smith, C., et al. 2005. Degradation of 2-chloropyridine in water by ultraviolet and ultrasound irradiation. International Journal of Environment and Pollution, 28: 87-98.

Stefan ,A., and Balan, G. 2011. The Chemistry of the Raw Water Treated By Air-Jet Ultrasound Generator. Roum. Sci. Tech.□Mec. Appl., 56(1): 85-92.

Sekiguchi, K., Sasaki, C., Sakamoto, K. 2011. Synergistic effects of high-frequency ultrasound onphotocatalytic degradation of aldehydes and their intermediates using TiO2suspension in water. Ultrasonics Sonochemistry, 18: 158-163.

Tango, J., Wu, Q., Hao, H., et al. 2003. Growth inhibition of the cyanobacterium Spirulina (arthrospira) platensis by 1.7 MHz ultrasonic irradiation. Journal of Applied Phycology, 15: 37-43.

Thangavadivel, K., Megharaj, M., Smart, R., et al. 2009. Application of high frequency ultrasound in the destruction of DDT in contaminated sand and water.Journal of Hazardous Materials, 168: 1380–1386.

Verraes, T., Lepoint-Mullie, F., Lepoint, T. 2000. Experimental study of the liquid flow near a single sonoluminescent bubble. The Journal of the Acoustical Society of America, 108: 117-125.

Wang. Li-ping, et al. 2008. Ultrasonic/modified clay process for removal of blue algae from artificial waters . China Water and Wastewater, 19: 44-46.

Wong, K. Y. K. 2002. Ultrasound as A Sole or Synergistic Disinfectant in DrinkingWater. Master Thesis. Worcester Polytechnic Institute, USA.

Xiao, W. 2010. Study on Ultrasound assisted solar energy seawater desalination system. Master's thesis. Qingdao technological University. China.

Zeman, L. J., and Zydney, A.L. 1996. Microfiltration and Ultrafiltration: Principles and Applications. Marcel Dekker, New York, USA.

Zhang, L., Dong, H., and Wang, X. 2011. Temperature Response in the Process of Ultrasonic Seawater Desalination. 978-1-4244-6255-1/11/$26.00 ©2011 IEEE.

Zhang, W. J., Jiang, F. B., Ou, J. F. 2011. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 1(2): 125-144.

Zhu, C., and Liu, G. 2000. Modeling of ultrasonic enhancement on membrane distillation. Journal of Membrane Science, 176: 31-41.