

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی شیمی
گرایش طراحی فرآیندها

عنوان پایان نامه

**مدل سازی CFD و ساخت سونو راکتور لوله ای برای بررسی اثرات امواج
اولتراسونیک بر اختلاط میکرو**

استاد راهنما :

دکتر مسعود رحیمی

نگارش:

ندا عظیمی

آذر ۱۳۹۱



دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی شیمی گرایش طراحی فرآیندها

نام دانشجو:
ندا عظیمی

تحت عنوان

مدل سازی CFD و ساخت سونوراكتور لوله ای برای بررسی اثرات امواج اولتراسونیک بر اختلاط میکرو

در تاریخ ۱۳۹۱/۰۹/۲۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنما	دکتر مسعود رحیمی	با مرتبه ی علمی استاد	امضاء
۲- استاد داور داخل گروه	دکتر ارسلان پرواره	با مرتبه ی علمی استادیار	امضاء
۳- استاد داور خارج گروه	دکتر نگین قائمی	با مرتبه ی علمی استادیار	امضاء

سپاس خدای را که چراغ دانش بر مسیر پر غفلت و جهل انسان برافروخت و بر من توفیق گام نهادن بر پلکان علم
و آگاهی عنایت نمود.

به رسم ارادت بر خود لازم می دانم از استاد فرزانه و بزرگوارم جناب آقای پروفیسور مسعود رحیمی به پاس زحمات
بی شائبه برای این پایان نامه کمال سپاس و قدردانی را داشته باشم، از خداوند منان برای ایشان سربلندی، سلامتی و
پیروزی روانفزون را خواستارم.

هم چنین از همکاری و راهنمایی های ارزشمند دوست عزیزم خانم دکتر فیمه پرویزیان و مهدلی و همراهی برادر عزیزم
پدرام عظیمی شکر می نمایم.

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم

تقدیم می نمایم.

چکیده

امواج صوتی با فرکانس بالاتر از حد شنوایی انسان (۲۰kHz) امواج اولتراسونیک نامیده می شود. ورود انرژی اولتراسونیک به درون مایع منجر به پدیده هایی مانند کاویتاسیون صوتی، تشکیل میکروجت و میکروجریان در آن شده و در نتیجه باعث افزایش درهمی و نرخ انتقال جرم می گردد. اولتراسونیک کاربردهای گسترده ای در بسیاری از صنایع شیمیایی و فیزیکی دارد. از مهم ترین تاثیرات اولتراسونیک، ایجاد اختلاط میکرو در سیالات است. بازده و عملکرد بسیاری از فرایندهای صنعتی به نحوه اختلاط مواد بستگی دارد. از نقطه نظر مهندسی، اختلاط پدیده ای است که در بسیاری از فرایندها نقش داشته و کیفیت نهایی محصولات را تحت تاثیر قرار می دهد. بازده اختلاط میکرو در بسیاری از صنایع شیمیایی مختلف از اهمیت ویژه ای برخوردار است. همواره توسعه و ساخت تجهیزاتی که بتواند اختلاط میکرو را کارآمدی را بوجود آورد، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در این تحقیق، یک سونوراكتور لوله ای مجهز به چهار مبدل پیزوالکتریک فرکانس بالای ۱/۷MHz به منظور بررسی اثر این امواج بر کیفیت و بازدهی اختلاط در مقیاس ماکرو و میکرو مورد مطالعه قرار گرفته است. RTD سونوراكتور به منظور تعیین تاثیر امواج اولتراسونیک بر کیفیت اختلاط ماکرو در آن مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تعیین کیفیت اختلاط در مقیاس میکرو، یک واکنش موازی-رقابتی مورد آزمایش قرار گرفته و فعال بودن پیزوالکتریک ها در وضعیت پایین، ورودی و خروجی سونوراكتور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مطالعه کالریمتری به منظور به دست آوردن بازده انرژی و توان صوتی جذب شده در بالک سیال در طول انتقال انرژی امواج به درون سونوراكتور انجام شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش تعداد پیزوالکتریک های فعال در سیستم مقدار شاخص جدایش و همچنین زمان اختلاط به شدت کاهش می یابد. تاثیر ویسکوزیته سیال بر بازده سونوراكتور بررسی شد و ملاحظه گردید که با افزایش ویسکوزیته مایع به دلیل افزایش نیروهای ویسکوز و در نتیجه کاهش شکل گیری گردابه های بزرگ تر، اختلاط میکرو بازده پایین تری دارد. همچنین، اثر وجود میکروذرات پلیمری درون سونوراكتور، پراکندگی و حرکت این ذرات به وسیله میکروجریان های ناشی از امواج اولتراسونیک فرکانس بالا بر اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، جزء حجمی، اندازه میکروذرات و ویسکوزیته مایع متغیر بوده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که حرکت و پراکندگی میکروذرات توسط امواج اولتراسونیک اختلاط میکرو را بهبود می بخشد و اندازه و جزء حجمی میکروذرات، بازده آن را تحت تاثیر قرار می دهد. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که این سونوراكتور قادر به ایجاد اختلاط در ابعاد میکرو است که به طور قابل ملاحظه ای مدت زمان فرایند را کاهش می دهد. در پایان، به منظور فهم بهتر عملکرد سونوراكتور و بررسی الگوی جریان های ایجاد شده توسط امواج اولتراسونیک، مدل سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی سونوراكتور نیز انجام شده است که نتایج آن تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه و تئوری اولتراسونیک
۲	۱-۱- مقدمه.....
۴	۲-۱- تاریخچه امواج اولتراسونیک.....
۵	۳-۱- اصول انتشار و تولید امواج اولتراسونیک.....
۵	۱-۳-۱- تعریف امواج صوتی.....
۷	۲-۳-۱- نحوه تولید و انتشار امواج اولتراسونیک.....
۷	۱-۳-۲-۱- روش مکانیکی-الکتریکی.....
۸	۲-۳-۲-۱- روش مغناطیسی.....
۹	۳-۳-۲-۱- نحوه انتشار امواج التراسونیک.....
۱۱	۳-۳-۱- پدیده کاویتاسیون.....
۱۳	۴-۳-۱- اثرات سونوشیمیایی کاویتاسیون.....
۱۳	۱-۴-۳-۱- دما و فشار حاصل از متلاشی شدن حباب.....
۱۵	۲-۴-۳-۱- سونوشیمی مایعات خالص.....
۱۶	۳-۴-۳-۱- سونوشیمی سیستم‌های مایع-مایع.....
۱۷	۴-۴-۳-۱- سونوشیمی سیستم‌های جامد-مایع.....
۱۸	۵-۳-۱- کاویتاسیون گذرا.....
۱۹	۶-۳-۱- کاویتاسیون پایدار.....
۱۹	۷-۳-۱- اندازه حباب‌های کاویتاسیون.....
۲۰	۸-۳-۱- جریان‌های صوتی.....
۲۱	۹-۳-۱- فاکتورهای موثر بر کاویتاسیون.....
۲۳	۴-۱- کاربرد امواج التراسونیک.....
۲۳	۱-۴-۱- کاربرد امواج التراسونیک در صنعت نفت.....
۲۴	۲-۴-۱- کاربرد امواج التراسونیک در صنایع غذایی.....
۲۴	۳-۴-۱- شستشو به کمک امواج اولتراسونیک.....
	فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق
۲۷	۱-۲- اهمیت اختلاط.....
۲۸	۲-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد اولتراسونیک در اختلاط.....
۳۱	۳-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل سازی اولتراسونیک.....
۳۹	۴-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از پرکن‌ها و میکروذرات برای بهبود اختلاط.....
۴۰	۵-۲- نتیجه گیری کلی از مطالعات صورت گرفته.....
	فصل سوم: بررسی اثر اولتراسونیک بر اختلاط در سونوراكتور لوله ای
۴۶	۱-۳- توصیف اختلاط میکرو.....
۴۹	۲-۳- ساخت سونوراكتور و توصیف تجهیزات آزمایشگاهی.....
۵۳	۳-۳- بررسی آزمایشگاهی سونوراكتور و انجام آزمایشات.....

۵۵	..... ۱-۳-۳ محاسبه زمان اختلاط میکرو
۵۶	..... ۲-۳-۳ توصیف اختلاط ماکرو
۵۷	..... ۳-۳-۳ مطالعه کالریمتریک
۵۸	..... ۴-۳-۳ روش آماده سازی محلول و نحوه انجام آزمایشات
۵۹	..... ۴-۳-۴ بررسی نتایج آزمایشگاهی
۵۹	..... ۱-۴-۳ عملکرد اختلاط میکرو
۶۵	..... ۲-۴-۳ عملکرد اختلاط ماکرو
۷۲	..... ۳-۴-۳ نتایج مطالعه کالریمتریک

فصل چهارم: بررسی اثر حضور امواج اولتراسونیک و میکروذرات بر اختلاط میکرو

۷۴	..... ۱-۴ اثر میکرو ذرات بر اختلاط میکرو
۷۴	..... ۲-۴ بررسی آزمایشگاهی اثر میکرو ذرات بر کارایی اختلاط میکرو در سونوراكتور
۷۶	..... ۳-۴ نتایج مربوط به سونوراكتور لوله‌ای با جریان پیوسته باحضور میکرو ذرات
۸۴	..... ۴-۴ نتایج مربوط به سونوراكتور لوله‌ای با حضور میکرو ذرات در محیط ویسکوز

فصل پنجم: مدل سازی سونوراكتور به روش دینامیک سیالات محاسباتی

۸۸	..... ۱-۵ مدل سازی اثر امواج اولتراسونیک
۸۸	..... ۲-۵ ایجاد شکل هندسی
۸۹	..... ۱-۲-۵ ایجاد صفحه مشبک در Gambit
۹۵	..... ۳-۵ محاسبات در نرم افزار Fluent
۹۹	..... ۱-۳-۵ مدل سازی سیستم بدون حضور امواج اولتراسونیک
۹۹	..... ۲-۳-۵ مدل سازی سیستم در حضور امواج اولتراسونیک
۱۰۱	..... ۳-۳-۵ مدل سازی سیستم در حضور همزمان امواج اولتراسونیک و میکروذرات
۱۰۳	..... ۴-۵ بررسی نتایج مدل سازی سونوراكتور لوله ای

فصل ششم: نتیجه گیری کلی و پیشنهادات

۱۱۵	..... ۱-۶ جمع بندی مطالب و نتیجه گیری
۱۱۷	..... ۲-۶ ارائه پیشنهادات

۱۱۸	منابع و ماخذ
-----	--------------

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۶	شکل (۱-۱) کاربردهای امواج التراسونیک طبق فرکانس و توان.....
۸	شکل (۲-۱) چند نمونه از مبدل های پیزوالکتریک.....
۹	شکل (۳-۱) یک نوع مبدل مگنتوستریکشن.....
۱۰	شکل (۴-۱) الف) موج طولی ب) موج عرضی ج) ورودی سینوس وار.....
۱۱	شکل (۵-۱) چگونگی انتشار امواج اولتراسونیک درون ماده.....
۱۲	شکل (۶-۱) مراحل رشد و فروپاشی حباب ها در کاویتاسیون صوتی.....
۱۲	شکل (۷-۱) منحنی شعاع- زمان حباب های کاویتاسیون.....
۱۴	شکل (۸-۱) مراحل تولید نقاط داغ در پدیده کاویتاسیون.....
۱۷	شکل (۹-۱) کاویتاسیون در فصل مشترک دو مایع.....
۱۸	شکل (۱-۳) سونوراکتور لوله‌ای جریان پیوسته (الف) تصویری از سونوراکتور لوله ای (ب) جزئیات راکتور طراحی شده
۵۰	شکل (۲-۳) الف) تصویر پیزوالکتریک، گلند و واشر ب) نحوه قرارگیری پیزوالکتریک.....
۵۲	شکل (۳-۴) سیستم دیجیتالی و مخزن مجهز به پمپ برای تزریق اسید.....
۵۲	شکل (۳-۵) نمایی از سیستم آزمایشگاهی: (۱) سونوراکتور (۲) فعال کننده مبدل پیزوالکتریک (۳) جریان سنج (۴) شیر (۵) پمپ (۶) اسپکتروفتومتر (۷) مخزن اسید سولفوریک (۸) مخزن محلول پایه (۹) مخزن محصول
۵۴	شکل (۳-۶) منحنی کالیبراسیون غلظت I_3^-
۵۸	شکل (۳-۷) دستگاه ثبت کننده دما مدل BMT-4208 SD.....
۶۱	شکل (۳-۸) اثر شدت جریان خوراک بر ضریب جدایش با و بدون پراکندگی التراسونیک.....
۶۲	شکل (۳-۹) اثر نسبت دبی بر X_s/X_{s0} ($P= ۱۰۱/۳$ kPa, $T= ۲۵$ C, $f= ۱/۷$ MHz)
۶۴	شکل (۳-۱۰) کارایی اختلاط میکرو در سیال هایی با ویسکوزیته های مختلف..... ($P= ۱۰۱/۳$ kPa, $T= ۲۵$ C, $f= ۱/۷$ MHz)
۶۵	شکل (۳-۱۱) اثر ویسکوزیته بر زمان اختلاط میکرو..... ($P= ۱۰۱/۳$ kPa, $T= ۲۵$ C, $f= ۱/۷$ MHz)
۶۶	شکل (۳-۱۲) پراکندگی ماده رنگی در سونوراکتور بدون فعال بودن و با فعال بودن پیزوها.....
۷۰	شکل (۳-۱۳) نمونه هایی از نمودارهای توزیع زمان اقامت..... ($Q_{out}=۱۳۰$ ml/min , $P= ۱۰۱/۳$ kPa, $T= ۲۵$ C, $f= ۱/۷$ MHz)
۷۱	شکل (۳-۱۴) اثر شدت جریان خوراک بر زمان اقامت متوسط..... ($P= ۱۰۱/۳$ kPa, $T= ۲۵$ C, $f= ۱/۷$ MHz)
۷۲	شکل (۳-۱۵) رابطه بین توان پراکنده شده اولتراسونیک و توان الکتریکی ورودی.....
۷۵	شکل (۴-۱) نمایی از سونوراکتور و جزئیات آن.....
۷۵	شکل (۴-۲) میکرو ذرات پلیمری.....
۷۶	شکل (۴-۳) تصویری از پراکندگی میکرو ذرات توسط پیزوالکتریک ها.....

- ۸۰ شکل (۴-۴) اثر اندازه میکروذرات بر δ در شدت جریان‌های مختلف خوراک
- ۸۱ شکل (۵-۴) زمان اختلاط میکرو در شدت جریان‌های مختلف (کسر حجمی ذرات = ۱۵٪ و $R=7$)
- ۸۳ شکل (۶-۴) اثر کسر حجمی میکرو ذرات بر ضریب جدایش
- ۸۴ شکل (۷-۴) اثر التراسونیک و حضور میکروذرات بر X_S
 (مورد ۱: بدون التراسونیک؛ مورد ۲ با التراسونیک؛ مورد ۳: با التراسونیک و میکرو ذرات)
 $(Q_{Feed}=210 \text{ ml/min}; V_p\%=15\%; d_p=250 \mu\text{m})$
- ۸۵ شکل (۸-۴) اثر میکروذرات بر ضریب جدایش نسبی در محیط ویسکوز
 $(Q_{Feed}=70 \text{ ml/min}; R=7; V_p\%=15\%)$
- ۸۶ شکل (۹-۴) اثر میکروذرات بر زمان اختلاط میکرووی نسبی در ویسکوزیته‌های مختلف
 $(Q_{Feed}=70 \text{ ml/min}; R=7; V_p\%=15\%)$
- ۸۸ شکل (۱-۵) هندسه دو استوانه ساخته شده
- ۸۹ شکل (۲-۵) زانویی ایجاد شده
- ۹۰ شکل (۳-۵) نمایی از صفحات مشبک و ترسیم آن‌ها به روش net surface
- ۹۱ شکل (۴-۵) صفحه مشبک ایجاد شده (هر شبکه با ابعاد $1 \mu\text{m}$)
- ۹۱ شکل (۵-۵) ایجاد صفحه مشبک در انتهای زانویی
- ۹۲ شکل (۶-۵) هندسه بدنه اصلی راکتور
- ۹۳ شکل (۷-۵) شکل کلی راکتور
- ۹۴ شکل (۸-۵) نمایی از دامنه محاسباتی سونوراکتور لوله‌ای
- ۱۰۵ شکل (۹-۵) بردارهای سرعت در برش عمودی ($Z=0$) الف) قبل از ورود امواج اولتراسونیک
 ب) بعد از فعالیت دو پیزوی پایین ج) بعد از فعالیت چهار پیزو د) بعد از فعالیت پیزو و وجود میکروذرات
- ۱۰۸ شکل (۱۰-۵) کانتورهای سرعت در برش $Z=0$ الف) بدون پراکندگی اولتراسونیک
 ب) فعالیت دو پیزوی پایین ج) فعالیت چهار پیزو د) فعالیت دو پیزوی پایین و حضور میکروذرات
 ه) فعالیت چهار پیزو و حضور میکروذرات
- ۱۱۰ شکل (۱۱-۵) مقایسه بین مقادیر سرعت در ارتفاع‌های مختلف الف) در ارتفاع $Y=1/10D$
 ب) در ارتفاع $Y=1/4D$ ج) در ارتفاع $Y=1/2D$ د) در ارتفاع $Y=3/4D$
- ۱۱۱ شکل (۱۲-۵) جزء حجمی میکروذرات در زمان‌های مختلف
- ۱۱۳ شکل (۱۳-۵) کانتور کسر جرمی I_3^- الف) کسر جرمی I_3^- بدون اولتراسونیک
 ب) کسر جرمی I_3^- با فعالیت دو پیزوی پائین ج) کسر جرمی I_3^- با فعالیت دو پیزوی پائین و وجود میکروذرات

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۶	جدول (۱-۱) رادیکال های تولید شده در آب تحت تابش اولتراسونیک.....
۵۸	جدول (۱-۳) غلظت اولیه مواد واکنش دهنده
۶۰	جدول (۲-۳) اثر محل پیژوالکتریک فعال بر کاهش X_S ($R=7$, $Q_{Feed}=70$ ml/min, $[H^+]=1$ M, $P= 10.1/3$ kPa, $T= 25$ C, $f= 1/7$ MHz)
۷۱	جدول (۳-۳) اثر مکان مبدل های پیژوالکتریک بر توزیع زمان اقامت..... ($Q_{out}=130$ ml/min, $P= 10.1/3$ kPa, $T= 25$ C, $f= 1/7$ MHz)
۷۷	جدول (۱-۴) اثر مقادیر میکروذرات و محل مبدل پیژوالکتریک بر X_S ($R=7$, $Q_{Feed}=70$ ml/min, $[H^+]=1$ M, $P= 10.1/3$ kPa, $f= 1/7$ MHz, $d_p= 950$ μ m)
۷۷	جدول (۲-۴) اثر مقادیر میکروذرات و محل مبدل پیژوالکتریک بر X_S ($R=7$, $Q_{Feed}=70$ ml/min, $[H^+]=1$ M, $P= 10.1/3$ kPa, $f= 1/7$ MHz, $d_p= 590$ μ m)
۷۸	جدول (۳-۴) اثر مقادیر میکروذرات و محل مبدل پیژوالکتریک بر X_S ($R=7$, $Q_{Feed}=70$ ml/min, $[H^+]=1$ M, $P= 10.1/3$ kPa, $f= 1/7$ MHz, $d_p= 250$ μ m)
۹۵	جدول (۱-۵) شرایط مرزی سونوراكتور لوله ای
۹۶	جدول (۲-۵) شرایط مرزی اعمال شده مدل سازی در سونوراكتور لوله ای
۹۶	جدول (۳-۵) شرایط اولیه مدل سازی واکنش در سونوراكتور لوله ای.....
۹۷	جدول (۴-۵) پارامترهای مختلف معادلات بقا

لیست نمادها

جذب نور	A
بیشترین جابجایی مبدل (m)	A_0
سرعت صوت (m/s)	c
غلظت (mol/l)	C_i
ظرفیت حرارتی (J/ kg.K)	c_p
ضریب نفوذ (m^2/s)	$D_{i,m}$
انرژی (J/kg)	E
فرکانس (Hz)	f
دبی مولی (mol/s)	F
شتاب ثقل (m/s^2)	g
آنتالپی (J/Kg)	h
ارتفاع (m)	H
شدت التراسونیک (W/m^2)	I_{US}
قدرت یونی (mol/ m)	I
شدت نفوذ ($mol/m^2.s$)	J
ثابت سرعت	k_i
طول سل کوارتز (m)	l
جرم (Kg)	m
فشار (Pa)	P
دامنه صوتی (Pa)	P_A
انتخاب پذیری	P_s
شدت جریان حجمی (m^3/s)	Q
سرعت واکنش ($mol/ m^3.s$)	r_i
ترم منبع	S_i
زمان (s)	t
عدد انتقال	t_i
زمان اختلاط میکرو (s)	t_m
دما (K)	T
حجم (m^3)	V
محور مختصات x (m)	x
کسر جرمی جزء i	X_i
ضریب جدایش	X_S
انتخاب پذیری یدید	Y
محور مختصات y (m)	y

انتخاب پذیری دید در زمان جدایش کامل
محور مختصات z (m)

Y_{TS}

z

نمادهای یونانی

ضریب جذب مولی	ε
ویسکوزیته دینامیک (Pa s)	μ
چگالی (Kg/ m)	ρ
زمان اقامت متوسط (s)	τ
ویسکوزیته سینماتیک (m^2/s)	ν
سرعت (m/s)	v
سرعت زاویه ای (1/s)	ω

فصل اول

مقدمه و تئوری اولتراسونیک

اخیراً، استفاده از انرژی امواج اولتراسونیک^۱ به عنوان یک تکنولوژی جدید توجه بسیاری از محققین را در نتیجه کاربردهای گسترده آن به خود جلب کرده است [۱،۲]. انتقال انرژی اولتراسونیک به درون یک مایع منجر به پدیده های فیزیکی در مقیاس میکرو^۲ می گردد که ناشی از تولید جریان های صوتی^۳ و پدیده کاویتاسیون^۴ است [۳-۵]. پدیده کاویتاسیون در تجهیزات و فرآیندهای صنعتی (به ویژه پمپ ها و تجهیزات دوار) همواره به عنوان پدیده ای مخرب^۵ و غیر سودمند مطرح بوده است. در سال های اخیر، از این پدیده و انرژی حاصل از آن، در بهبود بازده بسیاری از فرایندها استفاده شده است. کاویتاسیون صوتی شامل تشکیل پیوسته، رشد و فروپاشی^۶ شدید تعداد زیادی حباب کوچک در مایع، در نتیجه شکل گیری سیکل های متناوب تراکم^۷ و انبساط^۸ ناشی از انتشار موج است [۶-۹]. کاویتاسیون صوتی و انفجار حباب ها منجر به افزایش نرخ انتقال جرم و حرارت و درهمی سیال می گردد. این پدیده ها در بسیاری از اهداف مانند اختلاط^۹ مایع در مقیاس مولکولی حائز اهمیت است. اختلاط به معنای مخلوط شدن مواد مختلف جهت به دست آوردن خواص فیزیکی یکسان در سیال جهت انجام فرآیند های بعدی می باشد. اختلاط در فرآیند های صنعتی و عملیات مربوط به آن ها نقش عمده ای دارد و همیشه برای دست یابی به یک مخلوط همگن^{۱۰} صورت می گیرد. عمل اختلاط می تواند توسط همزن های مکانیکی (پروانه) و یا جت های سیال صورت گیرد. در صنایع شیمیایی، نفت و پتروشیمی، اختلاط یک فرآیند بسیار مهم در خیلی از کارخانجات می باشد می تواند برای اهداف بسیاری مثل همگن سازی خواص فیزیکی و ترکیبات، جلوگیری از لایه لایه شدن و ته نشینی^{۱۱} ذرات معلق برای بهبود نرخ انتقال گرما، انتقال جرم، سرعت واکنش های شیمیایی و غیره به کار برده شود. هم زدن، یک برهم کنش پیچیده در جریان بالک سیال می باشد که نفوذ مولکولی و آشفستگی ایجاد می کند. از جمله مثال های عملیات اختلاط می توان به امتزاج دو مایع یا کمک به انحلال جامد در مایع، استخراج^{۱۲} جامد-مایع، جذب گاز، کریستالیزاسیون^{۱۳} و استخراج مایع-مایع اشاره کرد [۱۰].

¹ Ultrasonic
² Micro scale
³ Acoustic streaming
⁴ Cavitation
⁵ Destructive
⁶ Implosion
⁷ Compression
⁸ Expansion
⁹ Mixing
¹⁰ Homogenes
¹¹ Precipitation
¹² Extraction
¹³ Crystallization

اختلاط در مقیاس مولکولی (اختلاط میکرو^۱) روی تماس واکنش دهنده ها، انتخاب پذیری^۲، بازده و کیفیت محصول نهایی بسیاری از فرایندهای صنعتی مانند واکنش های سریع، احتراق، ته نشین سازی و پلیمریزاسیون^۳ تاثیرگذار است [۱۱،۱۲]. راکتورهای مختلفی به منظور ایجاد اختلاط میکرو مورد استفاده قرار گرفته اند. به عنوان مثال، راکتورهای مخزنی همزن دار [۱۳]، مخلوط کننده های ساکن^۴ [۱۴]، بسترهای پر شده دوار^۵ [۱۵] و مخلوط کننده های اولتراسونیک [۱۶]. به هر حال، بسیاری از این راکتورها مصرف انرژی بالایی دارند و از لحاظ عملیاتی پیچیده هستند.

در مقایسه با سایر تکنولوژی ها، مزایای چشمگیر امواج اولتراسونیک عبارتند از ذخیره و بهینه سازی مصرف انرژی، افزایش کیفیت محصول و کاهش زمان تولید در فرایند [۱۷]. بنابراین، با توجه به اهمیت اختلاط در مقیاس مولکولی در صنایع شیمیایی، استفاده از امواج اولتراسونیک به منظور بهبود اختلاط میکرو یک روش مناسب و بهینه به نظر می رسد. در فرکانس های پایین، بیش تر پدیده کاویتاسیون اهمیت دارد که انفجار حباب های ناشی از این پدیده باعث اختلاط می گردد. با این حال، اولتراسونیک فرکانس پایین که در شدت های بالا انتقال می یابد، یک سری معایب دارد که از مهم ترین آن ها صدمه زدن به ساختار مولکول ها در نتیجه کاویتاسیون صوتی است. فرکانس بالای این امواج، توانایی ایجاد میکروجریان^۶ و میکروجت ها^۷ در سیال و نیز جریان های گردشی^۸ در آن را دارد. همچنین امواج فرکانس بالا توان مصرفی کم تری دارند که از لحاظ ذخیره مصرف انرژی حائز اهمیت است. در این تحقیق فرض بر این است که تلاطم ایجاد شده ناشی از میکروجریان ها و میکروجت های اولتراسونیک فرکانس بالا می تواند اختلاط میکرو را بهبود بخشد. بنابراین، هدف این تحقیق، مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۹ و بررسی آزمایشگاهی اثرات اولتراسونیک فرکانس بالای ۱/۷ MHz بر اختلاط میکرو در یک سونوراکتور لوله ای^{۱۰} با جریان پیوسته^{۱۱} می باشد. دلیل انتخاب راکتور جریان پیوسته این است که در فرآیندهای صنعتی سیستم های پیوسته کاربرد بیش تری دارند و نیز استفاده از التراسونیک در سیستم های واکنشی ناپیوسته در حجم های بالا نیازمند صرف انرژی بیش تری می باشد. بنابراین طراحی یک

¹Micromixing

²Selectivity

³Polymerization

⁴Static mixer

⁵Rotating packed bed

⁶Micro stream

⁷Microjet

⁸Circular flow

⁹Computational fluid dynamic

¹⁰Tubular sonoreactor

¹¹Continuous

راکتور پیوسته با حجم کم که در آن از امواج التراسونیک به عنوان عامل اختلاط استفاده شده باشد می تواند انرژی مورد نیاز را محدود کند.

در این فصل مقدمه ای بر تئوری و اصول انتشار امواج اولتراسونیک و کاربردهای آن در صنایع مختلف بیان گردیده است. در فصل دوم مروری بر مطالعات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته در زمینه استفاده از امواج اولتراسونیک بیان شده است. در واقع هدف از فصل دوم، تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از مطالعات سایر محققین و ارائه راهکار و افق های تازه در زمینه استفاده آزمایشگاهی و مدل سازی امواج اولتراسونیک و از همه مهم تر به دست آوردن یک روش مناسب برای مدل سازی اثرات این امواج می باشد. در فصل سوم، مطالعه آزمایشگاهی اثر اولتراسونیک بر اختلاط میکرو بررسی شده است. به این منظور، بازده یک واکنش موازی- رقابتی برای بررسی اختلاط میکرو در یک سونوراکتور لوله ای که مجهز به چهار مبدل پیزوالکتریک فرکانس بالای ۱/۷ MHz مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته است. از آنجایی که افزایش تماس سطحی میان سیالات باعث کاهش طول نفوذ بین آن ها گردیده و میزان اختلاط و انتقال جرم در سیال را افزایش می دهد و با توجه به این که امواج فرکانس بالا، میکرو جریان های شدید و جریان گردشی در سیال ایجاد می کنند، در فصل چهارم به بررسی آزمایشگاهی اثر حضور همزمان میکروذرات^۱ پلیمری و امواج اولتراسونیک بر اختلاط میکرو پرداخته پرداخته شده است. فرض بر این است که حرکت و پرتاب میکروذرات به دلیل وجود میکرو جریان های صوتی در سونوراکتور، می تواند اختلاط میکرو را بهبود ببخشد. مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی سونوراکتور، به منظور فهم بهتر عملکرد آن و بررسی الگوی جریان های ایجاد شده توسط امواج صوتی، در فصل پنجم بیان شده است که هدف بررسی تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی است. در پایان، در فصل ششم یک نتیجه گیری کلی از تحقیق و ارائه پیشنهادات موثر ذکر شده است.

۱-۲- تاریخچه امواج اولتراسونیک

ایده انتشار موج صوتی درون یک ماده و مشاهده انعکاس صدای آن، اولین بار در سال ۱۸۰۰ میلادی توسط Jean-Daniel Colladon بیان شد. این محقق از یک زنگ زیر آبی^۲ برای تعیین سرعت صوت درون آب استفاده استفاده کرد. در سال ۱۸۷۷ میلادی، اصول فیزیکی صوت، امواج و انتشار آن ها گسترش پیدا کرد و بعد از بیان تئوری صوت توسط Lord Rayleigh، بیش تر مورد توجه قرار گرفت. البته Rayleigh اولین کسی نبود که صدا را به عنوان یک موج توصیف کرد، در واقع Sir Isaac Newton اولین کسی بود که در سال ۱۶۸۷ امواج صوتی را با معادلات ریاضی توصیف و پایه مطالعات بعدی در زمینه صوت "مدرن" و فهم الگوی موج صوتی و

^۱Microparticles

^۲Underwater bell

انتشار آن‌ها را گذاشت. در سال‌های ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ میلادی مطالعات در زمینه صوت و انعکاس آغاز شد و به طور عمیق مورد بررسی قرار گرفت. توانایی تولید پالس‌های اولتراسونیک بر اساس فشارهای فیزیکی و مکانیکی توسط Pierre Curie و برادرش Jacques Curie در سال ۱۸۸۰ میلادی کشف شد. توانایی آن‌ها در به کار بردن پتانسیل الکتریکی در عبور از کریستال کوارتز و مشاهده موج فشاری مکانیکی پایه‌ای برای مطالعات بعدی در مورد امواج اولتراسونیک فرکانس بالا شده است. در سال ۱۹۰۰ میلادی، یک محقق فرانسوی به نام Paul Langevin استفاده از صوت برای کشف زیردریایی و کشتی رانی را پیشنهاد داد. تکنیک این محقق که بر اساس مطالعات پیزوالکتریک برادران Curie بود، شاید اولین استفاده از اولتراسونیک فرکانس پایین (۲۰ تا ۵۰۰ kHz) برای کشفیات زیرآبی بوده است [۱۸].

۱-۳- اصول انتشار و تولید امواج اولتراسونیک

۱-۳-۱- تعریف امواج صوتی

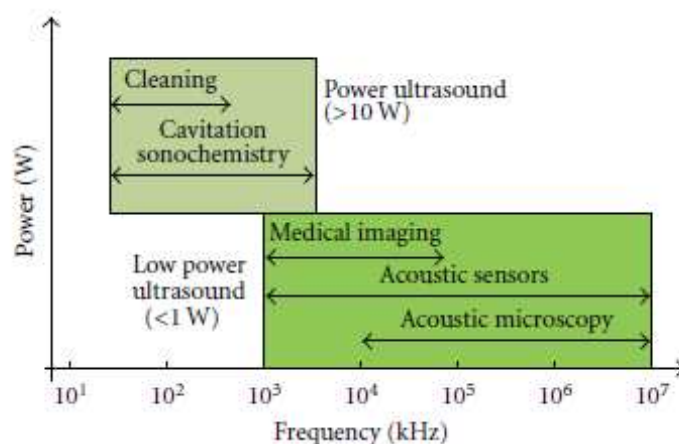
امواج صوتی با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان (۲۰ kHz) اولتراسونیک نامیده می‌شود. گوش انسان تنها قادر به شنیدن صداها در بازه بسامدی بین ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ Hz می‌باشد. نوسانات در ناحیه زیر ۲۰ Hz امواج مادون صوت^۱ (مانند زمین لرزه) و نوسانات با فرکانس بالاتر از ۱۰^{۱۰} Hz را فراصوت^۲ نام دارد. امواج اولتراسونیک اغلب بر طبق فرکانس یا توان دسته‌بندی می‌شوند. امواج با فرکانس ۲۰ تا ۱۰۰ kHz با عنوان "اولتراسونیک توانی"^۳ یا "اولتراسونیک فرکانس پایین" تعریف می‌شوند. این امواج معمولاً در سطح بالایی از توان (بالاتر از ۱۰ وات) انتقال می‌یابند. از جمله کاربردهای امواج اولتراسونیک فرکانس پایین، در پاک‌سازی (مانند رفع گرفتگی غشاء و تصفیه پساب) و صنایع شیمیایی است. امواج با فرکانس در محدوده ۱ MHz - ۱۰۰ kHz "اولتراسونیک فرکانس بالا"^۴ نامیده می‌شود. در این محدوده از فرکانس، توان مصرفی معمولاً کم‌تر از ۱۰ وات است. امواج فرکانس بالا معمولاً در صنایع پزشکی و آنالیزهای شیمیایی به کار برده می‌شود [۱۹]. شکل (۱-۱) محدوده فرکانس امواج صوتی و کاربردهای آن‌ها را نشان می‌دهد.

^۱Infrasound

^۲Hypersound

^۳Power ultrasonic

^۴High frequency ultrasonic



شکل (۱-۱) کاربردهای امواج اولتراسونیک طبق فرکانس و توان [۱۹]

امواج اولتراسونیک با توجه به کاربردی که دارند خود به دو گروه تقسیم می شوند، دسته ی اول امواج غیرمخرب^۱ هستند که محدوده فرکانس آن ها بین ۱ تا ۱۰MHz می باشد. این امواج معمولاً در صنعت داروسازی و پزشکی مورد استفاده قرار می گیرند. دسته ی دوم امواج مخرب^۲ با محدوده فرکانس ۲۰ تا ۹۰۰ kHz می باشد که از آن ها برای فرآیندهای سونوشیمی^۳ استفاده می شود. یکی از پارامترهای های موثر بر رفتار امواج، شدت موج اولتراسونیک است که تعریف آن به صورت زیر است:

- شدت^۴ امواج اولتراسونیک

وقتی که امواج صوتی از میان یک محیط عبور داده می شوند، انرژی این امواج در یک شدت خاص به محیط انتقال داده می شود، شدت انتقال انرژی به ازای واحد سطح را شدت موج می نامند. شدت امواج التراسونیک متناسب با بیش ترین فشار صوتی یا دامنه^۵ فشار صوتی در محیط است و از رابطه زیر بدست می آید:

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad (1-1)$$

¹Non-destructive waves

²Destructive waves

³Sonochemistry

⁴Intensity

⁵Amplitude