



کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشگاه رازی

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

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

عنوان پایان نامه

بررسی اثر تلفیق فرکانس های بالا و پایین امواج التراسونیک

در فرایندهای شیمیایی

استاد راهنما :

دکتر مسعود رحیمی

نگارش:

سحر صفری

مهرماه ۱۳۹۲



دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی شیمی

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

نام دانشجو

سحر صفری

تحت عنوان

**بررسی اثر تلفیق فرکانس های بالا و پایین امواج
التراسونیک در فرایندهای شیمیایی**

در تاریخ ۱۳۹۲/۰۷/۲۹ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

امضاء	با مرتبه ی علمی استاد	دکتر مسعود رحیمی	۱- استاد راهنما
امضاء	با مرتبه ی علمی دانشیار	دکتر لاله رجبی	۲- استاد داور داخل گروه
امضاء	با مرتبه ی علمی استادیار	دکتر مهدی امیری نژاد	۳- استاد داور داخل گروه

سپاس خدایي که جان را فکرت آموخت، چراغ دل به نور دانش افروخت.

صمیمانه ترین مراتب قدردانی خود را به استاد فرزانه و بزرگوارم جناب آقای پروفیسور مسعود رحیمی به پاس زحمات بی شائبه و حمایت های گرم و بی دریغشان در مسیر انجام این پایان نامه تقدیم می کنم و از خداوند منان برای ایشان سربلندی، تندرستی و پیروزی روزافزون را خواستارم.

هم چنین از همکاری ها و راهنمایی های ارزشمند سرکار خانم محبوبه فریادی که در انجام این رساله به من یاری رساندند بسیار سپاسگزارم.

چکیده

التراسونیک به عنوان یک تکنولوژی جدید عبارت است از کاربرد امواج صوتی با فرکانسی بالاتر از حد شنوایی انسان. تابش همزمان امواج التراسونیک با فرکانس‌های یکسان و یا مختلف به یک سیستم به منظور حصول بازدهی و نتایج مطلوب‌تر، یکی از روش‌های استفاده از این تکنولوژی می‌باشد. از این رو در این تحقیق، تلفیق و استفاده‌ی همزمان امواج فرکانس پایین (۲۴ kHz) و فرکانس بالا (۱/۷ MHz) مورد مطالعه قرار گرفته است. به طوری که مبدل فرکانس پایین از بالا و مبدل فرکانس بالا از کف راکتور امواج را به درون سیستم می‌فرستند. به منظور بررسی کارایی‌های این سیستم پیشنهادی، فرایندهای مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. جهت بررسی قدرت این سیستم فرایند حذف آمونیاک به عنوان یک فرایند تصفیه مورد بررسی قرار گرفته است. بازدهی حالت تلفیقی امواج در حذف آمونیاک با حالتی که هر یک از مبدل‌ها به تنهایی در حال ارسال امواج هستند مقایسه گردیده است. در مرحله‌ی بعدی میزان کاویتاسیون ایجاد شده در این سیستم از طریق انجام واکنش ویزلر، که روشی متداول برای تعیین مقدار رادیکال‌های OH^\bullet موجود در محیط می‌باشد، مورد تحقیق قرار گرفته است. همچنین اثر مکان مبدل فرکانس بالا و فرکانس پایین در نتایج حاصله مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تلفیق امواج فرکانس بالا و فرکانس پایین موجب کاهش توانایی موج فرکانس پایین در حذف آمونیاک و ایجاد کاویتاسیون می‌گردد. همچنین اثر تلفیق امواج بر روی اختلاط میکرو در یک سیستم ناپیوسته و نیز در میکروکانال T شکل نیز در این پروژه بررسی شده است. برای تعیین کیفیت اختلاط میکرو از واکنش موازی-رقابتی داشمن استفاده شده است. اثر مکان تزریق اسید به داخل سیستم ناپیوسته و محاسبه‌ی شاخص جدایی و زمان اختلاط در این سیستم‌ها و اثر غلظت اسید و سرعت جریان‌های ورودی به میکروکانال از جمله مواردی است که مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصله، با استفاده از امواج تلفیقی، مقادیر شاخص جدایی و زمان اختلاط کمتری نسبت به حالات تابش امواج فرکانس پایین و فرکانس بالا حاصل شده است. این نتایج نشانگر افزایش میزان اختلاط میکرو به واسطه‌ی استفاده از این روش چه در سیستم ناپیوسته و چه در میکروکانال، در مقایسه با استفاده‌ی تک فرکانسه از امواج، می‌باشند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: معرفی مفاهیم اولیه
۲	۱-۱- التراسونیک
۲	۱-۱-۱- تاریخچه‌ی التراسونیک
۳	۱-۱-۲- معرفی موج صوتی
۵	۱-۱-۳- ویژگی‌های موج صوتی
۹	۱-۱-۴- معادله‌ی موج
۹	۱-۱-۵- تولید امواج التراسونیک
۱۰	۱-۱-۵-۱- روش مغناطیسی
۱۰	۱-۱-۵-۲- روش مکانیکی-الکتریکی
۱۰	۱-۱-۵-۲-۱- پیزوالکتریسته
۱۲	۱-۱-۵-۲-۲- کاربرد پیزوالکتریک ها
۱۳	۱-۱-۶- کاپیتاسیون
۱۶	۱-۱-۶-۱- انواع کاپیتاسیون
۱۸	۱-۱-۶-۲- آستانه‌ی کاپیتاسیون
۲۰	۱-۱-۶-۳- کاپیتاسیون صوتی در سیستم‌های مایع-مایع
۲۱	۱-۱-۶-۴- کاپیتاسیون صوتی در سیستم‌های جامد-مایع
۲۲	۱-۱-۶-۵- فاکتور های موثر در کاپیتاسیون
۲۳	۱-۱-۷- جریان های صوتی
۲۴	۱-۱-۸- کاربرد امواج التراسونیک
۲۴	۱-۱-۸-۱- کاربرد امواج التراسونیک در پزشکی
۲۴	۱-۱-۸-۲- شستشو به کمک امواج فراصوت
۲۵	۱-۱-۸-۳- التراسونیک در دریانوردی
۲۶	۱-۱-۸-۴- کاربرد التراسونیک در صنعت
۲۷	۲-۱- اختلاط
۲۸	۲-۱-۱- اختلاط با جریان آشفته
۲۸	۲-۲-۱- اختلاط ماکرو
۲۸	۲-۲-۳- اختلاط میکرو
۲۹	۲-۲-۴- اختلاط و واکنش‌های شیمیایی
۳۰	۳-۱- میکرو کانال‌ها
۳۱	۳-۱-۱- تاریخچه و خصوصیات میکروکانال ها
۳۲	۳-۱-۲- زمینه‌های کاربردی میکرو کانال‌ها
۳۲	۳-۱-۳- میکرو راکتورها

فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

- ۳۵ ۱-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تصفیه‌ی پساب.....
- ۳۸ ۲-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی اختلاط.....
- ۴۱ ۳-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی میکروکانال.....
- ۴۵ ۴-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تلفیق امواج التراسونیک.....
- ۴۹ ۵-۲- نتیجه‌گیری از مطالعات.....

فصل سوم: مواد و روش‌ها

- ۵۳ ۱-۳- آزمایش‌ها بررسی عملکرد حذف و تصفیه.....
- ۵۶ ۲-۳- آزمایش‌ها بررسی میزان کاویتاسیون.....
- ۵۹ ۳-۳- آزمایش‌ها بررسی اختلاط میکرو در سیستم ناپیوسته.....
- ۵۹ ۱-۳-۳- معرفی روش‌های بررسی اختلاط میکرو.....
- ۶۱ ۲-۳-۳- محاسبه زمان اختلاط میکرو.....
- ۶۲ ۳-۳-۳- روش آماده‌سازی محلول.....
- ۶۴ ۴-۳- آزمایش‌ها بررسی اختلاط میکرو در میکروکانال.....

فصل چهارم: نتایج

- ۶۹ ۱-۴- نتایج آزمایش‌ها حذف و تصفیه.....
- ۶۹ ۱-۱-۴- اثر تابش امواج التراسونیک بر حذف آمونیاک.....
- ۷۳ ۲-۱-۴- اثر غلظت اولیه‌ی آمونیاک بر بازدهی حذف.....
- ۷۳ ۲-۲-۲- بررسی فعالیت کاویتاسیون.....
- ۷۳ ۱-۲-۴- اثر تابش امواج التراسونیک بر فعالیت کاویتاسیون.....
- ۲-۲-۴- اثر مکان مبدل‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین نسبت به هم بر میزان کاویتاسیون.....
- ۷۷ کاویتاسیون.....
- ۷۸ ۳-۴- بررسی اختلاط میکرو در سیستم ناپیوسته.....
- ۷۹ ۱-۳-۴- اثر تابش امواج التراسونیک بر میزان اختلاط.....
- ۸۰ ۲-۳-۴- اثر مکان تزریق اسید.....
- ۸۲ ۳-۳-۴- اثر غلظت اسید بر میزان اختلاط میکرو.....
- ۸۴ ۴-۳-۴- زمان اختلاط میکرو.....
- ۸۵ ۴-۴- بررسی اختلاط میکرو در میکروکانال.....
- ۸۶ ۱-۴-۴- بررسی اثر مقدار R و غلظت اسید بر مقادیر شاخص جدایی.....
- ۸۹ ۲-۴-۴- محاسبه‌ی زمان اختلاط.....

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۹۵ ۱-۵- نتیجه‌گیری.....
- ۹۶ ۲-۵- پیشنهادها.....
- ۹۸ منابع.....

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱- محدوده‌ی فرکانس امواج صوتی
۴	شکل ۲-۱- کاربردهای امواج التراسونیک طبق فرکانس و توان.....
۵	شکل ۳-۱- الف) موج طولی ب) موج عرضی ج) ورودی سینوس وار.....
۵	شکل ۴-۱- چگونگی انتشار امواج التراسونیک درون ماده.....
۶	شکل ۵-۱- نمونه‌ای از سیکل یک موج صوتی.....
۱۰	شکل ۶-۱- شماتیک مبدل مگنتوستریکشن.....
۱۱	شکل ۷-۱- تغییر شکل ماده پیزوالکتریک در اثر اعمال ولتاژ.....
۱۱	شکل ۸-۱- ساختار کریستال‌های پیزوالکتریک.....
۱۲	شکل ۹-۱- برخی از انواع مختلف پیزوالکتریک.....
۱۴	شکل ۱۰-۱- روند رشد و ترکیدن حباب‌ها در فرآیند کاویتاسیون.....
۱۵	شکل ۱۱-۱- مراحل تولید نقاط داغ در اثر کاویتاسیون.....
۱۶	شکل ۱۲-۱- تقسیم بندی کاویتاسیون از نظر عامل پدید آورنده.....
۱۷	شکل ۱۳-۱- ایجاد میکرو جریان‌های ناشی از نوسان حباب کاویتاسیون.....
۱۹	شکل ۱۴-۱- فشار هیدروستاتیک نسبت به شعاع حباب.....
۲۱	شکل ۱۵-۱- ترکیدن حباب در مایع.....
۲۲	شکل ۱۶-۱- ترکیدن حباب در نزدیکی سطح جامد.....
۲۴	شکل ۱۷-۱- فواره صوتی و ابر ایجاد شده در اثر امواج التراسونیک.....
۳۱	شکل ۱۸-۱- نمایی از یک میکروکانال سیلیکونی.....
۳۳	شکل ۱۹-۱- میکرو راکتور شیشه‌ای با عرض و عمق $150 \mu\text{m}$
۳۳	شکل ۲۰-۱- میکرو راکتور شیشه‌ای با ساختار درونی میکرو برای سنتز ترکیبات و توسعه فرآیندی.....
۳۷	شکل ۱-۲- سیستم پیشنهادی حذف آمونیاک توسط امواج التراسونیک فرکانس بالا.....
۴۲	شکل ۲-۲- اشکال هندسی مختلف با سطح مقاطع مختلف.....
۴۳	شکل ۳-۲- نمونه‌هایی از میکروراکتورهای گازی و مایع و طریقه تماس واکنشگرهای گاز و مایع.....
۴۳	شکل ۴-۲- راکتور میکروکانالی با شکل Y.....
۴۴	شکل ۵-۲- سمت راست: میکروراکتور پر شده با کاتالیست. سمت چپ: میکروراکتور سرامیکی پوشیده با کاتالیست.....
۴۶	شکل ۶-۲- الف)، ب) و ج) سه نمونه از سونوراکتورهای چند مبدل با چینش متفاوت پیزوالکتریک ها.....
۴۷	شکل ۷-۲- یک سیستم پیشنهادی تلفیق امواج 20 kHz و 40 kHz برای فرایند لیچینگ.....
۴۹	شکل ۸-۲- یک سیستم دو فرکانسه تلفیق فرکانس‌های 20 kHz و 211 kHz
۵۲	شکل ۱-۳- سمت راست: مبدل $1/7 \text{ MHz}$ ، سمت چپ: مبدل 24 kHz
۵۳	شکل ۲-۳- دستگاه UV اسپکتروفتومتر.....

- شکل ۳-۳- شماتیک سیستم مورد استفاده برای بررسی عملکرد حذف و تصفیه و فعالیت کائیتاسیون ۵۴
- شکل ۳-۴- منحنی کالیبراسیون آمونیاک..... ۵۵
- شکل ۳-۵- منحنی کالیبراسیون غلظت I_3^- ۵۷
- شکل ۳-۶- (الف) مکان‌های مختلف قرار گرفتن مبدل فرکانس پایین (۱) و مبدل فرکانس بالا (۲) نسبت به هم. (ب) نما از بالا..... ۵۸
- شکل ۳-۷- شماتیک سیستم ناپیوسته جهت بررسی اختلاط میکرو..... ۶۳
- شکل ۳-۸- پمپ سرنگ استفاده شده در آزمایش ها..... ۶۴
- شکل ۳-۹- (الف) لوله های بکار برده شده جهت ساخت میکروکانال. (ب) و (ج) شماتیک و تصویر میکروکانال ساخته شده..... ۶۵
- شکل ۳-۱۰- (الف) مخزن آب. (ب) (۱) پمپ سرنگ، (۲) شیر، (۳) میکروکانال، (۴) اسپکتروفتومتر، (۵) مخزن محصول..... ۶۶
- شکل ۴-۱- نمودار درصد حذف آمونیاک توسط امواج MHz ۱/۷ بر حسب زمان..... ۷۰
- شکل ۴-۲- نمودار درصد حذف آمونیاک توسط امواج kHz ۲۴ بر حسب زمان..... ۷۱
- شکل ۴-۳- نمودار درصد حذف آمونیاک توسط امواج تلفیقی بر حسب زمان..... ۷۲
- شکل ۴-۴- مقایسه‌ی درصد حذف آمونیاک برای سه حالت تابش امواج التراسونیک بر حسب زمان..... ۷۲
- شکل ۴-۵- درصد حذف آمونیاک در حالت تلفیق برای غلظت‌های اولیه‌ی متفاوت..... ۷۳
- شکل ۴-۶- میزان تری‌یدات تولید شده در حالت تابش امواج MHz ۱/۷ بر حسب زمان..... ۷۵
- شکل ۴-۷- میزان تری‌یدات تولید شده در حالت تابش امواج kHz ۲۴ بر حسب زمان..... ۷۵
- شکل ۴-۸- میزان تری‌یدات تولید شده در حالت تابش امواج تلفیقی بر حسب زمان..... ۷۶
- شکل ۴-۹- مقایسه‌ی میزان تری‌یدات تولید شده در سه حالت تابش امواج التراسونیک بر حسب زمان..... ۷۷
- شکل ۴-۱۰- اثر مکان مبدل MHz ۱/۷ و پراب kHz ۲۴ نسبت به هم بر مقدار فعالیت کائیتاسیون..... ۷۸
- شکل ۴-۱۱- مکان‌های تزریق اسید در سیستم ناپیوسته..... ۸۱
- شکل ۴-۱۲- اثر محل تزریق اسید بر اختلاط میکرو در سیستم ناپیوسته..... ۸۲
- شکل ۴-۱۳- اثر غلظت اسید بر اختلاط میکرو در سیستم ناپیوسته..... ۸۳
- شکل ۴-۱۴- مقدار شاخص جدایی نسبی در حالات مختلف تابش امواج التراسونیک..... ۸۳
- شکل ۴-۱۵- زمان اختلاط میکرو بر حسب مشخصه شاخص جدایی..... ۸۴
- شکل ۴-۱۶- مقادیر شاخص جدایی بر حسب نسبت دبی خوراک به اسید در غلظت M ۰/۲۵..... ۸۷
- شکل ۴-۱۷- مقادیر شاخص جدایی بر حسب نسبت دبی خوراک به اسید در غلظت M ۰/۵..... ۸۷
- شکل ۴-۱۸- مقادیر شاخص جدایی بر حسب نسبت دبی خوراک به اسید در غلظت M ۱..... ۸۸
- شکل ۴-۱۹- مقدار شاخص جدایی نسبی در مقادیر مختلف R و غلظت اسید..... ۸۹
- شکل ۴-۲۰- ارتباط بین شاخص جدایی و زمان اختلاط در حالت‌های مختلف..... ۹۰
- شکل ۴-۲۱- مقادیر زمان اختلاط بر حسب نسبت دبی خوراک به اسید در غلظت M ۰/۲۵..... ۹۱
- شکل ۴-۲۲- مقادیر زمان اختلاط بر حسب نسبت دبی خوراک به اسید در غلظت M ۰/۵..... ۹۱
- شکل ۴-۲۳- مقادیر زمان اختلاط بر حسب نسبت دبی خوراک به اسید در غلظت M ۱..... ۹۲

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۷	جدول ۱-۱- مقادیر مقاومت ظاهری برخی مواد.....
۶۲	جدول ۱-۳- غلظت اولیه مواد واکنش دهنده.....
۶۹	جدول ۱-۴- مقادیر غلظت باقی مانده و درصد حذف آمونیاک در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه برای سه حالت تابش التراسونیک.....
۷۴	جدول ۲-۴- مقادیر غلظت تری یدات تولید شده در حالت‌های مختلف تابش امواج التراسونیک..... (الف): تلفیق، (ب): فرکانس بالا، (ج): فرکانس پایین.....
۸۰	جدول ۳-۴- مقادیر شاخص جدایی در غلظت $M \ 0/5$ اسید و تزریق در موقعیت ۱.....
۸۵	جدول ۴-۴- مقادیر زمان اختلاط میکرو سیستم ناپیوسته در حالت‌های مختلف تابش امواج التراسونیک.....
۸۶	جدول ۴-۵- مقادیر شاخص جدایی برای میکروکانال در حالت‌های مختلف تابش امواج التراسونیک.....

فصل اول

معرفی مفاهیم اولیه

۱-۱- التراسونیک^۱

التراسونیک درجه ای از صوت است که بالاتر از قابلیت شنیداری انسان می‌باشد (بالای ۲۰ kHz) و امروزه به عنوان یک تکنولوژی جدید توجه بسیاری از محققین را در نتیجه‌ی کاربردهای گسترده‌ی آن به خود جلب کرده است. انتقال انرژی التراسونیک به درون یک مایع منجر به پدیده‌های فیزیکی در مقیاس میکرو^۲ می‌گردد که مهم‌ترین آن‌ها تولید جریان‌های صوتی^۳ و پدیده‌ی کاویتاسیون^۴ است [۱]. در این قسمت به معرفی این امواج، نحوه‌ی تولید آن‌ها و پدیده‌های حاصل از عبور آن‌ها از محیط، پرداخته خواهد شد.

۱-۱-۱- تاریخچه‌ی التراسونیک

ایده‌ی انتشار موج صوتی درون یک ماده و مشاهده‌ی انعکاس صدای آن، اولین بار در سال ۱۸۰۰ میلادی توسط Jean-Daniel Colladon بیان شد [۲]. این محقق از یک زنگ زیرآبی^۵ برای تعیین سرعت صوت درون آب استفاده کرد. در سال ۱۸۷۷ میلادی، اصول فیزیکی صوت، امواج و انتشار آن‌ها گسترش پیدا کرد و بعد از بیان تئوری صوت توسط Lord Rayleigh، بیشتر 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 پایه‌ی مطالعات بعدی در زمینه‌ی صوت "مدرن" و فهم الگوی موج صوتی و 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 التراسونیک بر اساس فشارهای فیزیکی و مکانیکی توسط Pierre Curie و برادرش Jacques Curie در سال ۱۸۸۰ میلادی کشف شد [۲]. توانایی آن‌ها در به کار بردن پتانسیل الکتریکی در عبور از کریستال کوارتز و مشاهده‌ی موج فشاری مکانیکی پایه‌ی ای برای مطالعات بعدی در مورد امواج التراسونیک فرکانس بالا شده است. در سال ۱۹۰۰ میلادی، یک محقق فرانسوی به نام Paul Langevin استفاده از صوت برای کشف زیردریایی و

¹ Ultrasonic

² Micro Scale

³ Acoustic Streaming

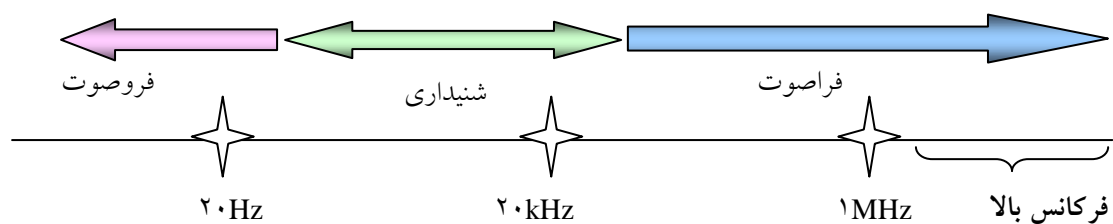
⁴ Cavitation

⁵ Underwater Bell

کشتی رانی را پیشنهاد داد. تکنیک این محقق که بر اساس مطالعات برادران Curie بود، شاید اولین استفاده از التراسونیک فرکانس پایین (۲۰ تا ۵۰۰ kHz) برای کشفیات زیرآبی بوده است [۲].

۱-۲- معرفی موج صوتی

صوت نتیجه‌ی ارتعاش یک جسم است و در محیط مادی (هوا یا آب) به صورت موج انتشار می‌یابد. امواج صوتی شامل تراکم‌ها و انبساط‌های مکانیکی هستند که با پراکندگی آن‌ها در یک محیط مادی به وجود می‌آیند و توسط فرکانس، طول موج و سرعت انتشار توصیف می‌شوند. شکل (۱-۱) طیف کلی صوت با محدوده‌های فرکانسی مربوط به آن را نشان می‌دهد [۳].



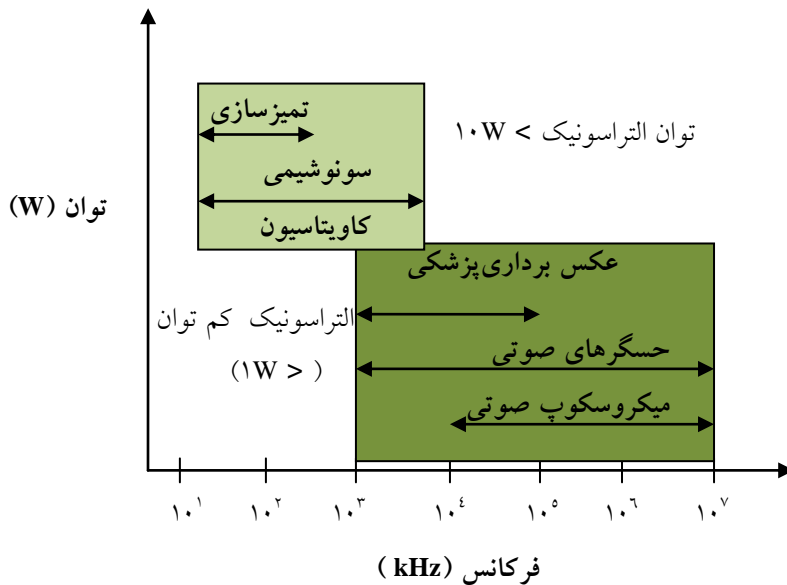
شکل (۱-۱) محدوده‌ی فرکانس امواج صوتی [۳]

امواج صوتی با فرکانس بالاتر از محدوده‌ی شنوایی انسان (۲۰ kHz) التراسونیک نامیده می‌شود. گوش انسان تنها قادر به شنیدن صداها در بازه‌ی بسامدی بین ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ Hz می‌باشد. امواج التراسونیک اغلب بر طبق فرکانس یا توان دسته بندی می‌شوند. امواج با فرکانس ۲۰ تا ۱۰۰ kHz با عنوان "التراسونیک توانی"^۱ یا "التراسونیک فرکانس پایین" تعریف می‌شوند. این امواج معمولاً در سطح بالایی از توان (بالاتر از ۱۰ وات) انتقال می‌یابند. از جمله کاربردهای امواج التراسونیک فرکانس پایین، در پاک سازی (مانند رفع گرفتگی غشاء و تصفیه پساب) و صنایع شیمیایی است. امواج با فرکانس در محدوده ۱ MHz - ۱۰۰ kHz "التراسونیک فرکانس بالا"^۲ نامیده می‌شوند. 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 می‌شوند [۴].

شکل (۲-۱) محدوده‌ی فرکانس امواج صوتی و کاربردهای آن‌ها را نشان می‌دهد.

^۱Power Ultrasonic

^۲High Frequency Ultrasonic



شکل (۱-۲) کاربردهای امواج التراسونیک طبق فرکانس و توان [۴]

امواج التراسونیک یا مافوق صوت با توجه به کاربردی که دارند خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول امواج مافوق صوت غیر مخرب^۱ است که محدوده‌ی فرکانس آن‌ها بین ۱ تا ۱۰ MHz می‌باشد. این امواج شدت پایینی دارند و برای انواع پدیده‌های آرام‌کننده همچون کنترل رها سازی دارو استفاده می‌شود. دسته دوم امواج مافوق صوت مخرب با محدوده‌ی فرکانس بین ۲۰ تا ۹۰۰ kHz با شدت بالا می‌باشند که از آن‌ها برای تمیز کاری و فرآیندهای سونوشیمی^۲ استفاده می‌شود.

هر موج فشاری وابسته به حرکت ذره و خواص مواد در حال حرکت به دو گروه تقسیم می‌شود:

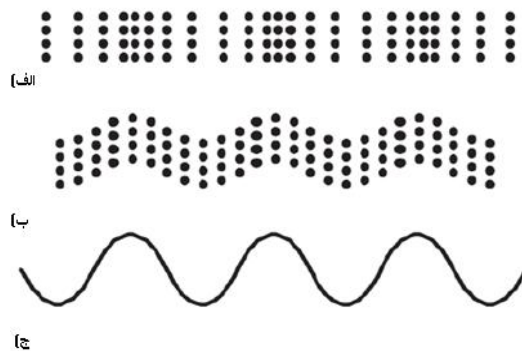
- امواج محوری (طولی)^۳: در این امواج ذرات نسبت به جهت انتشار به سمت جلو و عقب حرکت می‌کنند و در همه‌ی مواد مانند گازها، مایعات و جامدات می‌توانند نفوذ کنند.
- امواج برشی (عرضی)^۴: در این امواج، ذرات در زوایای مستقیم نسبت به جهت موج انتشار می‌یابند و فقط درون مواد جامد نفوذ می‌کنند و در سیالات دیده نمی‌شوند. سرعت موج برشی در یک ماده جامد، معمولاً نصف موج محوری است. شکل (۱-۳) شماتیک دو نوع موج فشاری را نشان می‌دهد که از یک ورودی سینوسی تولید می‌شوند [۵].

^۱Non-destructive Ultrasound

^۲Sonochemistry

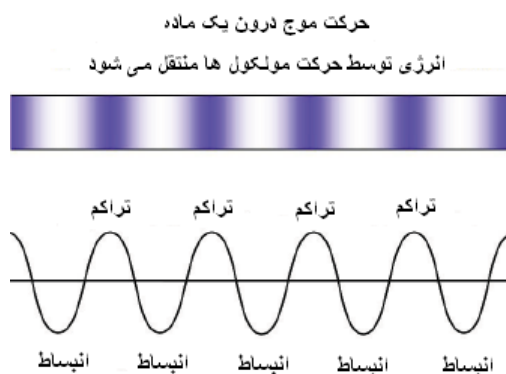
^۳Longitudinal

^۴Shear



شکل (۱-۳) الف) موج طولی ب) موج عرضی ج) ورودی سینوس وار [۵]

یک مثال برای موج عرضی هنگامی است که یک سنگ به درون استخر آب می افتد. اگر اغتشاش در استخر به صورت دوره ای تکرار شود، سیکل های انبساط و تراکم درون آب اتفاق می افتد. سیکل های تراکم مولکول ها را به هم فشار داده در حالی که سیکل های انبساط آن ها را از هم باز می کند [۶]. در یک مایع، سیکل انبساط فشار منفی ایجاد می کند، در حالی که مولکول ها را از هم باز می کند. به طور کلی، انتقال انرژی در نقاط تراکم، فشار مثبت و در نقاط انبساط، فشار منفی ایجاد می کند. چگونگی انتشار این امواج در شکل (۱-۴) نشان داده شده است [۷]. اگر شدت امواج التراسونیک به اندازه کافی بالا باشد سیکل انبساط باعث ایجاد حباب در مایع می گردد. در واقع، این سیکل های تراکم و انبساط باعث ایجاد پدیده ای به نام کاویتاسیون می گردد که از مهم ترین اثرات امواج التراسونیک است.

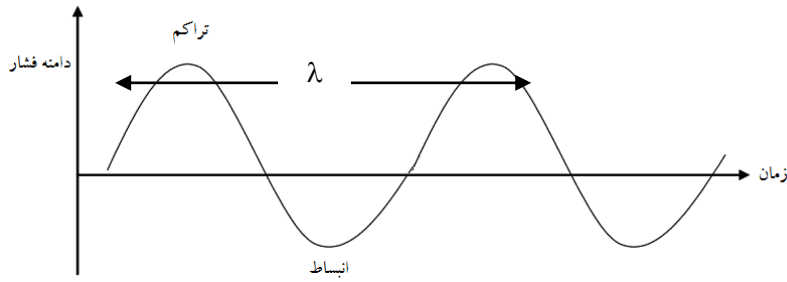


شکل (۱-۴) چگونگی انتشار امواج التراسونیک درون ماده

۱-۱-۳- ویژگی های موج صوتی

- طول موج (λ)

فاصله میان دو نقطه در موج که ویژگی فیزیکی یکسانی را داشته باشند (برای نمونه دو مرکز فشردگی) را طول موج می گویند (شکل (۱-۵)) [۸].



شکل (۵-۱) نمونه‌ای از سیکل یک موج صوتی [۸]

- بسامد یا فرکانس (f)

تعداد تکرارهای کامل موج در یک ثانیه را بسامد یا فرکانس می‌گویند. واحد بسامد امواج صوتی مانند دیگر امواج، هرتز (Hz) است. پس یک هرتز یک نوسان در یک ثانیه است.

- دوره تناوب (T)

مدت زمانی که موج یک نوسان کامل انجام می‌دهد دوره تناوب نامیده می‌شود. بنابراین وابستگی میان دوره تناوب و فرکانس چنین است [۱۸]:

(۱-۱)

$$f = \frac{1}{T}$$

- سرعت گسیل موج

فاصله ای که موج در واحد زمان می‌پیماید سرعت گسیل موج است. سرعت التراسونیک با چگالی و میزان تراکم محیطی که موج در آن منتشر می‌شود متناسب است.

هر چه تراکم پذیری ماده بیشتر باشد، سرعت التراسونیک کمتر است. در حقیقت فشردگی کسری از تغییر حجم ایجاد شده به وسیله‌ی تغییر فشار است. سرعت گسیل موج التراسونیک به بسامد بستگی ندارد. سرعت امواج صوتی (c) در یک ماده کاملاً الاستیک در یک دما و فشار معین از عبارت زیر بدست می‌آید [۸]:

(۲-۱)

$$c = (\rho\beta)^{-0.5}$$

که در آن β تراکم پذیری و ρ دانسیته ماده (kg/m^3) می‌باشد. این سرعت در مواد مختلف متفاوت است.

- بازتابش یا انعکاس

امواج مکانیکی که التراسونیک نیز نمونه ای از آن است در برخورد با اجسام در مسیر انتشار، بازتابیده می‌شوند. این بازتابش چند گونه است، در بازتابش آینه ای که در رویه‌ی تخت و صیقلی انجام می‌گیرد، راستای تابش و بازتاب یکی است. در بازتابش غیر آینه ای موج به رویه‌ی ناصاف برخورد می‌کند. گونه‌ی دیگر از بازتابش، بازتاب پراکنده است که مانند بازتابش غیر آینه ای می‌باشد، در این نوع بازتابش، موج به ذرات کوچک برخورد می‌کند و هر کدام از این ذرات خود مانند چشمه فراصوت کار می‌کند و در همه

راستاهای موج گسیل می‌شود. کسری از انرژی که از فصل مشترک دو محیط بازتابیده می‌شود به مقاومت ظاهری صوتی^۱ (Z_a) ماده در آن سوی فصل مشترک بستگی دارد. مقاومت ظاهری صوتی یک محیط متناسب با چگالی و سرعت صوت در آن محیط است [۸]:

(۳-۱)

$$Z_a = \rho c$$

با استناد به مراجع موجود، هوا مقاومت ظاهری کمی دارد، اما آب مقدار Z_a بیشتری از هوا دارد و فلزات مقاومت ظاهریشان از آب بیشتر است. نسبت مقاومت ظاهری صوتی عبارت است از مقاومت ظاهری ماده‌ی دوم تقسیم بر ماده‌ی اول؛ هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد حین انتشار موج از ماده اول به دوم انرژی بیشتری بازتاب می‌گردد. به طور مثال وقتی التراسونیک از آب به فلز منتقل می‌شوند مقاومت ظاهری تقریباً ۲۰ به ۱ است. در حالی که زمانی که این امواج از هوا به فلز منتقل می‌شوند دارای مقاومت ظاهری ۱۰۰۰۰۰ به ۱ هستند. پس وقتی موج فراصوت از هوا به جامدی مثل فلز منتقل می‌شود تقریباً ۱۰۰٪ انرژی آن بازتاب خواهد شد. بنابراین هوا یک واسطه‌ی خیلی ضعیف برای امواج التراسونیک است. در جدول (۱-۱) مقاومت ظاهری برخی مواد آورده شده است.

جدول (۱-۱) مقادیر مقاومت ظاهری برخی مواد [۸]

ماده	مقاومت ظاهری صوتی ($\text{kg/m}^2\text{s}) \times 10^{-4}$
هوا	۰/۰۰۰۴
آب	۱/۵
پلی اتیلن	۱/۸۵
پلکسی گلس	۳/۲
آلومینیوم	۱۸

- شدت^۲ امواج التراسونیک

وقتی که امواج صوتی از میان یک محیط عبور داده می‌شوند، انرژی این امواج در یک شدت خاص به محیط انتقال داده می‌شود، شدت انتقال انرژی به ازای واحد سطح را شدت موج می‌نامند. شدت امواج التراسونیک متناسب با بیش‌ترین فشار صوتی یا دامنه^۳ فشار صوتی در محیط است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

^۱ Acoustic Impedance

^۲ Intensity

^۳ Amplitude

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad (4-1)$$

که در آن P_A دامنه‌ی فشار صوتی، I شدت امواج التراسونیک، c سرعت صوت در محیط مورد نظر و ρ دانسیته‌ی محیط می‌باشد [۹ و ۱۰].

- برخورد امواج التراسونیک به مرز میان دو محیط

هنگامی که موجی با زاویه‌ی عمود به مرز مشترک دو ماده برخورد می‌کند، بدون هیچ انحرافی از محیط دوم و در راستای تابش گذر می‌کند. البته بخشی در همان راستا بازتاب می‌شود. اگر تابش امواج به گونه‌ی مایل به مرز مشترک ماده‌ها انجام گیرد و اگر سرعت صوت، c ، در دو محیط یکسان نباشد موج در محیط دوم شکسته می‌شود.

- قانون‌های اسنل

هنگامی که موج التراسونیک به مرز مشترک دو محیط برای نمونه هوا - بافت برخورد می‌کند، بخشی از آن بازتابش پیدا کرده و بخشی به درون آن راه می‌یابد. که در این حالت:

الف) موج تابشی و بازتابشی و گذری در یک صفحه‌اند.

ب) زاویه تابش با زاویه بازتابش برابر است.

اگر تابش به اندازه‌ی ای برسد که زاویه شکست 90° درجه شود، یعنی مماس بر مرز مشترک دو محیط باشد، زاویه تابش در این حالت زاویه بحرانی نامیده می‌شود. در این حالت موج وارد محیط دوم نخواهد شد و بازتاب کلی رخ می‌دهد.

- ضریب بازتابش و گذر

امواج هنگامی که به مرز مشترک دو محیط مادی می‌رسند می‌توانند از آن گذر کنند. از دید فیزیکی چنین حالتی هنگامی رخ می‌دهد که دو محیط در تماس کامل باشند.

اگر امپدانس^۱ صوتی دو محیط برابر باشد، امواج بدون اینکه تحت تأثیر دو محیط باشند از آن محیط می‌گذرند (البته شکست می‌تواند صورت بگیرد) ولی زمانی که امپدانس‌های صوتی دو محیط با هم برابر نباشند موج تابنده به پیروی از شرایط فیزیکی دو محیط، سرعت و فشار ذرات در مرز مشترک به دو بخش بازتابشی و گذری تقسیم می‌شود.

هنگامی که امواج صوتی به دیواره‌ی سخت برخورد می‌کنند (برخورد امواج صوتی به کوه) بازتاب می‌یابند. در این جا بازتاب یا اکو یا پژواک هنگامی به وجود می‌آید که اندازه‌های دیواره‌ی سخت (رویه‌ی بازتاب کننده) نسبت به طول موج امواج تابشی بسیار بزرگتر باشد. هر اندازه که دانسیته یا چگالی محیط در رویه‌ی بازتاب کننده بیشتر باشد دامنه‌ی بازتابش بلندتر و امواج شنیدنی آشکارتر خواهد بود. (برخورد فریاد با سنگ‌های کوه). از سوی دیگر هر چه طول موج تابنده کوچکتر باشد بازتاب اکو بهتر انجام می‌شود

¹ Impedance