



پایان نامه کارشناسی ارشد  
رشته شیمی گرایش شیمی فیزیک

## عنوان

بررسی سینتیک حذف آلاینده رنگی RB5 از محیط آبی توسط امواج فراصوت

به تنهایی و روش ترکیبی (امواج و جاذب)

استاد راهنما

دکتر محمد حسن انتظاری

استاد مشاور

دکتر محمود چمساز

تحقیق و نگارش

سمیرا هژبر عراقی

شهریور ۸۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

خدای راسپاس بدانگونه که مطلوب اوست تا ستوده شود.  
و خدای راسپاس آنچنان که سزاوار اوست.

این تحقیق را تقدیم می‌کنم به:

پدر و مادر عزیزم

آنانکه وجودم برایشان همه نجات بود و وجودشان برایم همه مهر.

عزیزانی که همواره دعای خیرشان بدرقه راهم بوده و برای همیشه مدیون محبتها و حمایت ایشان هستم. برادر و خواهر خوبم که همیشه

مشوق من بودند.

تقدیر و شکر

لازم می دانم که از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر انتظاری که افتخار شاگردی ایشان را دارم شکر نمایم که با راهنمایی های دقیق و سنجیده مسیر مشکلات را هموار نمودند.

و مشاور ارجمند جناب آقای دکتر چمن ساز که افتخار آموختن کلامی از علوم کبریاشان را دارم شکر می نمایم همچنین از

خانم دکتر کوهرستانی و آقای دکتر امام پور که زحمات مطالعه این پروژه را بر عهده داشتند صمیمانه شکر می نمایم.

و شکر می کنم از دوستان عزیزم خانم روحانی - توکلی - مریم غفاری - ملیحه غفاری - علیشاهی - ابارشی که همراه خوبی

برای من بودند.



## چکیده

در میان آلاینده‌های آلی، ترکیب‌های رنگی مشکلات زیست محیطی جدی ایجاد می‌نمایند. در این مطالعه تجزیه و حذف رنگ RB5 توسط دو روش مورد بررسی قرار گرفت.

الف) تجزیه رنگ RB5 توسط امواج فراصوت به تنهایی: در این روش از امواج فراصوت با فرکانس بالا (۹۰۰ kHz) استفاده شد. متغیرهای مورد بررسی شامل زمان تماس، دما و غلظت آلاینده رنگی بودند. بر اساس نتایج بدست آمده، سینتیک تجزیه رنگ با مدل شبه مرتبه دوم تطابق داشت.

ب) حذف رنگ RB5 توسط روش ترکیبی: در این روش ترکیب اسپینلی ( $\text{NiCo}_2\text{O}_4$ ) به عنوان جاذب توسط روش سل-ژل تهیه شد و به همراه امواج فراصوت (۲۰ kHz) برای حذف رنگ RB5 از محیط آبی به کار گرفته شد. متغیرهای اصلی در این آزمایش‌ها شامل میزان جاذب، غلظت جاذب شونده، زمان تماس، شدت فراصوت و دما بودند. تعادل بین فاز مایع و جامد توسط مدل لانگمویر و فرندلیچ مورد بررسی قرار گرفت و هر دو مدل همخوانی خوبی با داده‌های تجربی داشتند. حضور امواج فراصوت افزایش سرعت رسیدن به تعادل و همچنین افزایش ظرفیت جذب برای حذف رنگ RB5 مورد نظر را به دنبال داشت و سینتیک جذبی با مدل شبه مرتبه دوم در تطابق بود.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول:

#### امواج فراصوت و کاربردها

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	تاریخچه	۱
۳-۱	معرفی امواج فراصوت	۲
۴-۱	آغاز کویتاسیون	۲
۱-۴-۱	نمودارهای کویتاسیون	۳
۵-۱	کویتاسیون	۶
۱-۵-۱	حفره زایی پایدار	۶
۲-۵-۱	حفره زایی ناپایدار	۶
۶-۱	نظریه‌های سونوشیمی	۷
۷-۱	انواع کویتاسیون	۹
۱-۷-۱	کویتاسیون اکوستیک	۹
۱-۱-۷-۱	فرکانس امواج صوتی	۱۰
۲-۱-۷-۱	نوع حلال	۱۰
۳-۱-۷-۱	دما	۱۱
۴-۱-۷-۱	نوع گاز و مقدار آن	۱۱
۲-۷-۱	کویتاسیون هیدرودینامیک	۱۳
۸-۱	بهینه سازی فرآیندهای اولتراسونیک	۱۴
۹-۱	امواج فراصوت و سیستم های شیمیایی	۱۴
۱-۹-۱	سیستم های همگن	۱۴
۲-۹-۱	سیستم‌های ناهمگن	۱۶
۱-۲-۹-۱	سیستم مایع-مایع	۱۶
۲-۲-۹-۱	سیستم جامد-مایع	۱۷
۱۰-۱	امواج فرا صوت و فرآیندهای جذب و واجذبی	۱۸
۱-۱۰-۱	اثر امواج بر روی جاذب	۱۹
۲-۱۰-۱	اثر امواج فراصوت بر جذب	۲۰
۳-۱۰-۱	اثر امواج فراصوت بر ایزوترم جذب	۲۱
۳-۱۰-۱	اثر امواج فراصوت بر فرآیند واجذبی	۲۳
۴-۱۰-۱	مقایسه واجذبی اولتراسوند و آب گرم	۲۳
۱۱-۱	دستگاه‌های تولید کننده امواج فراصوت	۲۴
۱-۱۱-۱	حمام فراصوت	۲۴

۲۵	۱-۱۱-۱-۱ مزایا و معایب استفاده از حمام فراصوت در سونوشیمی
۲۶	۲-۱۱-۱ دستگاه های فرا صوت با شدت بالا
۲۷	۱-۲-۱۱-۱ مزایا و معایب استفاده از سیستم دستگاه های با شدت بالا در سونوشیمی
۲۷	۱۲-۱ کاربرد امواج فراصوت
۲۷	۱-۱۲-۱ استخراج از گیاهان
۲۸	۲-۱۲-۱ تجزیه سلول
۲۸	۳-۱۲-۱ گاززدایی
۲۸	۴-۱۲-۱ تبلور مواد مذاب
۲۸	۵-۱۲-۱ امواج فراصوت و واکنش های شیمیایی
۲۹	۶-۱۲-۱ امواج فراصوت و آلاینده های رنگی

### فصل دوم:

### آلاینده های رنگی و روش های حذف

۳۱	۱-۲ مقدمه
۳۱	۲-۲ آلودگی آب
۳۳	۳-۲ طبقه بندی رنگها
۳۳	۱-۳-۲ رنگ های آزو
۳۴	۲-۳-۲ رنگ های آنتراکینونی
۳۴	۳-۳-۲ مواد رنگزای ایندوگوئید
۳۴	۴-۳-۲ مواد رنگزای آریل کربونیوم
۳۵	۵-۳-۲ مواد رنگزای پلی متین
۳۵	۶-۳-۲ مواد رنگزای فتالوسیانین
۳۶	۷-۳-۲ مواد رنگزای نیترو و نیتروزو
۳۷	۴-۲ طبقه بندی مواد رنگزا براساس کاربرد
۳۷	۱-۴-۲ رنگ های اسیدی
۳۷	۲-۴-۲ رنگ های دیسپرس
۳۷	۳-۴-۲ مواد رنگزای خمی
۳۸	۴-۴-۲ رنگ های حلال
۳۸	۵-۴-۲ رنگ های مستقیم
۳۹	۶-۴-۲ رنگ های بازی
۳۹	۷-۴-۲ رنگ های راکتیو
۴۰	۵-۲ روش های حذف آلاینده های رنگی
۴۰	۱-۵-۲ روش های بیولوژیکی
۴۰	۲-۵-۲ روش های شیمیایی
۴۱	۱-۲-۵-۲ واکنش فنتون

۴۲	..... ۲-۲-۵-۲ سونولیز
۴۲	..... ۳-۲-۵-۲ رادیولیز
۴۳	..... ۴-۲-۵-۲ روش Us/Fenton
۴۳	..... ۳-۵-۲ روش‌های فیزیکی
۴۴	..... ۱-۳-۵-۲ نانوفیلتراسیون
۴۴	..... ۲-۳-۵-۲ اسمز معکوس
۴۴	..... ۳-۳-۵-۲ جذب سطحی
۴۶	..... ۶-۲ تفاوت بین جذب فیزیکی و شیمیایی
۴۷	..... ۷-۲ تشخیص انواع جذب سطحی
۴۷	..... ۱-۷-۲ روش‌های سنتی
۴۷	..... ۱-۱-۷-۲ مقایسه گرمای جذب
۴۷	..... ۲-۱-۷-۲ مقایسه سرعت جذب
۴۷	..... ۳-۱-۷-۲ بررسی دامنه دمایی جذب
۴۷	..... ۳-۱-۷-۲ بررسی قدرت انتخابی جذب
۴۸	..... ۲-۷-۲ روش‌های مدرن
۴۸	..... ۲-۲-۷-۲ اندازه گیری خواص مغناطیسی
۴۸	..... ۲-۲-۷-۲ اندازه گیری ضخامت لایه جذبی
۴۸	..... ۸-۲ مزیت جذب سطحی
۴۸	..... ۱-۸-۲ گزینش گری
۴۸	..... ۱-۱-۸-۲ گزینش گری شکلی
۴۹	..... ۲-۱-۸-۲ گزینش گری سینتیکی
۴۹	..... ۳-۱-۸-۲ گزینش گری تعادلی
۴۹	..... ۹-۲ جاذب‌ها
۴۹	..... ۱-۹-۲ خواص جاذب
۴۹	..... ۱-۱-۹-۲ ظرفیت
۵۰	..... ۲-۱-۹-۲ تخلخل
۵۰	..... ۳-۱-۹-۲ توزیع اندازه منافذ
۵۰	..... ۴-۱-۹-۲ قطبیت سطح
۵۱	..... ۵-۱-۹-۲ گزینش پذیری
۵۱	..... ۱۰-۲ ایزوترم‌ها
۵۱	..... ۱-۱۰-۲ معادله لانگمویر
۵۲	..... ۱۱-۲ جاذب‌ها و حذف آلاینده‌های رنگی
۵۲	..... ۱-۱۱-۲ چیتوسان
۵۲	..... ۲-۱۱-۲ کربن فعال
۵۳	..... ۳-۱۱-۲ آلومینا



۵۳	..... ۴-۱۱-۲ سیلیکاژل
۵۳	..... ۵-۱۱-۲ زئولیت
۵۳	..... ۱۲-۲ مروری بر جاذبه‌های ارزان قیمت
۵۴	..... ۱-۱۲-۲ چوب
۵۴	..... ۲-۱۲-۲ زغال کک
۵۴	..... ۱۳-۲ جاذب های سنتزی
۵۵	..... ۱-۱۳-۲ اسپینل
۵۵	..... ۲-۱۳-۲ فریت
۵۶	..... ۱۴-۲ روشهای مختلف سنتز اسپینل ها
۵۶	..... ۱-۱۴-۲ روش سل-ژل
۵۶	..... ۲-۱۴-۲ روش هم‌رسوبی
۵۷	..... ۳-۱۴-۲ سنتز احتراقی

### فصل سوم: دستگاه‌ها و مواد

۵۸	..... ۱-۳ دستگاه فراصوت ۲۰ kHz
۵۹	..... ۱-۱-۳ ژنراتور
۵۹	..... ۳-۱-۳ هورن
۵۹	..... شکل (۳-۳): نمایی از هورن ۴-۱-۳ تیپ
۶۰	..... ۲-۳ سیرکولاتور
۶۱	..... ۳-۳ سل دو جداره رزت
۶۱	..... ۴-۳ سل دوجداره کلاسیک
۶۲	..... ۶-۳ دستگاه فراصوت ۹۰۰ kHz
۶۲	..... ۳-۳ pH ۷ متر
۶۲	..... ۸-۳ دستگاه اسپکتروفوتومتر (UV-Vis)
۶۳	..... ۹-۳ کوره
۶۳	..... ۱۰-۳ سانتریفوژ
۶۴	..... ۱۱-۳ مواد شیمیایی مورد آزمایش
۶۴	..... ۱۲-۳ ماده جاذب
۶۴	..... ۱-۱۲-۳ روش سنتز کبات(III) نیکل(II) اکسید (Ni Co <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )

### فصل چهارم:

#### تجزیه سونوشیمیایی رنگ RB5 توسط دستگاه ۹۰۰kHz

۶۵	..... ۱-۴ مقدمه
۶۶	..... ۲-۴ آزمایش‌های مقدماتی

۶۷	..... ۱-۲-۴ روش کار
۶۸	..... (Reactive Black 5) RB5 ۳-۴
۶۹	..... ۴-۴ بررسی اثر زمان امواج دهی و دما
۷۰	..... ۵-۴ بررسی اثر غلظت رنگ
۷۲	..... ۶-۴ بررسی سینتیکی
۷۲	..... ۱-۶-۴ معادله شبه مرتبه اول
۷۳	..... ۲-۶-۴ معادله شبه مرتبه دوم
۷۵	..... ۷-۴ تعیین انرژی فعالسازی واکنش

#### فصل پنجم:

#### بررسی سینتیک حذف رنگ RB5 توسط روش ترکیبی (امواج و جاذب)

۷۷	..... ۱-۵ مقدمه
۷۷	..... ۲-۵ بررسی اثر pH بر روی میزان حذف رنگ
۷۸	..... ۱-۲-۵ بهینه‌سازی مقدار جاذب
۷۹	..... ۲-۲-۵ بررسی همزمان اثر زمان تماس و دما
۸۰	..... ۳-۲-۵ بررسی اثر غلظت اولیه آلاینده
۸۲	..... ۴-۲-۵ بررسی اثر شدت امواج
۸۳	..... ۳-۵ مکانیسم احتمالی جذب
۸۴	..... ۴-۵ ایزوترم‌های جذب
۸۴	..... ۱-۴-۵ ایزوترم لانگمویر
۸۶	..... ۲-۴-۵ ایزوترم فرندلیچ
۸۸	..... ۵-۵ پارامترهای ترمودینامیکی
۸۸	..... روش
۸۹	..... ۶-۵ بررسی سینتیکی

#### فصل ششم:

#### نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادات

۹۲	..... ۱-۶ نتیجه‌گیری کلی
۹۲	..... ۱-۱-۶ دستگاه ۹۰۰ kHz
۹۳	..... ۲-۱-۶ روش ترکیبی امواج فراصوت ۲۰ kHz و جاذب
۹۴	..... ۲-۶ پیشنهادات

#### فصل هفتم:

#### منابع و مراجع

۹۵	.....References
----	-----------------

# فصل اول

## امواج فرا صوت و کاربردها

## ۱-۱ مقدمه

در حال حاضر اطلاعات ما درباره‌ی امواج فراصوت و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف افزایش چشمگیری داشته است. امواج فراصوت با علوم مختلفی در ارتباط است از جمله کاربردهای امواج فراصوت می‌توان به تصویربرداری جنینی در پزشکی اشاره نمود. همچنین بررسی‌های انجام شده بر روی حیوانات نشان می‌دهد که وال‌ها و خفاش‌ها برای جهت‌یابی از امواج فراصوت استفاده می‌نمایند [۱]. امواج فراصوت امواج بالاتر از گستره شنوایی انسان می‌باشند و کاربرد امواج فراصوت در واکنش‌های شیمیایی را سونوشیمی<sup>۱</sup> می‌نامند.

## ۲-۱ تاریخچه

اساس عمل دستگاه‌های مولد امواج فراصوت بر مبدل‌های پیزوالکتریک متکی است. اثر پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ توسط کوری‌ها<sup>۲</sup> کشف شد. کریستال‌های پیزوالکتریک انرژی الکتریکی را به انرژی ارتعاشی مکانیکی (صوت) تبدیل می‌کند [۳-۲]. اولین مبدل اولتراسونیک یک صوتک بود که توسط فرانسیس گالتون<sup>۳</sup> در سال ۱۸۸۳ برای بررسی حد شنوایی انسان ساخته شد [۴]. اولین کاربرد تجاری اولتراسونیک در سال ۱۹۱۷ توسط پل لانگوین<sup>۴</sup> با اختراع دستگاه ژرفیاب صوتی توسعه یافت [۵]. این دستگاه در طول جنگ جهانی دوم برای شناسایی زیردریایی‌هایی آلمانی مورد استفاده قرار گرفت [۶]. اولین تأثیرات شیمیایی و بیولوژیکی امواج فراصوت در سال ۱۹۲۷ توسط لومیس<sup>۵</sup> گزارش شد [۷-۸].

<sup>1</sup> Sonochemistry

<sup>2</sup> J.Curie and P.Curie

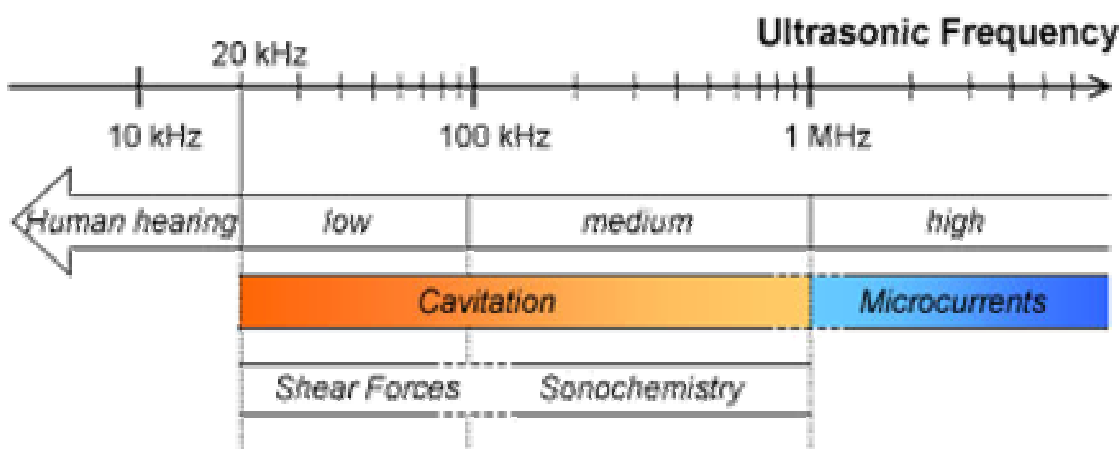
<sup>3</sup> Francis Galton

<sup>4</sup> Paul Langevin

<sup>5</sup> Loomis

### ۳-۱ معرفی امواج فراصوت

فرکانس‌های صوتی در واحد هرتز ثابت می‌شوند. محدوده شنوایی انسان در رنج ۲۰ Hz تا ۲۰ kHz می‌باشد اما بعضی از حیوانات مانند خفاش‌ها دارای محدود شنوایی وسیع‌تری (۱۵۰ kHz تا ۱kHz) هستند [۹]. امواج فراصوت در فرکانس‌های بالاتر از محدوده شنوایی انسان ایجاد می‌شود و گستره فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز تا ۵۰۰ مگاهرتز را در برمی‌گیرد. امواج فراصوت شامل چرخه‌های انقباض و انبساط هستند که به طور متناوب در محیط تکرار می‌شوند [۱۰].



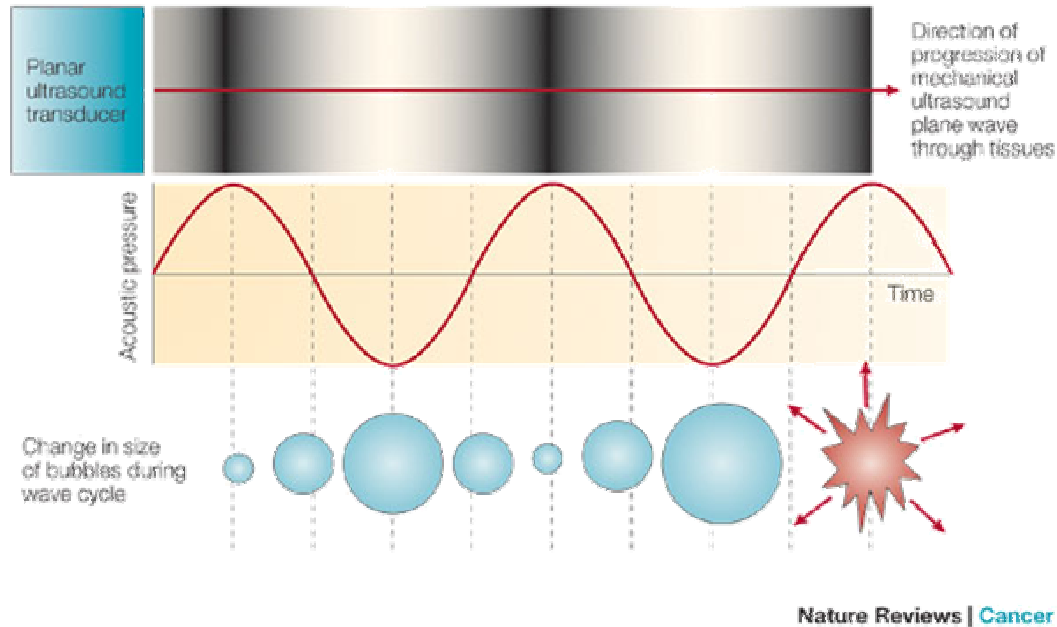
شکل (۱-۱): نواحی مختلف فرکانسی

### ۴-۱ آغاز کویتاسیون

اثرات شیمیایی امواج فراصوت نتیجه پدیده کویتاسیون<sup>۱</sup> است. در شدت‌های بالا تنش کششی مایع زیاده شده که سبب ایجاد حبابهای گاز کوچک در طی سیکل انبساط امواج فراصوت می‌شود. این حباب‌ها تحت یک یا چند سیکل انقباض و انبساط تا چندین برابر اندازه اولیه‌شان رشد می‌نمایند زمانی که به اندازه بحرانی برسند در طی سیکل انقباض

<sup>۱</sup> Cavitation

منفجر می‌شوند در اثر انفجار<sup>۱</sup> حباب دماهای بالا در حد چندین هزار درجه کلوین و فشارهای بالا در حدود چند صدبار در مجاورت حباب ایجاد می‌شود [۱۱].



شکل (۲-۱): نمایی از فرایند کویتاسیون

#### ۱-۴-۱ نمودارهای کویتاسیون

این نمودارها برای تخمین رفتار دینامیکی حباب در میدان صدا مفید می‌باشند. چنین نموداری برای سه فرکانس مختلف در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. در این نمودار محور X لگاریتم قطر حباب و محور Y لگاریتم معکوس فشار اعمالی امواج فراصوت می‌باشد نمودارهای کویتاسیون به چندین منطقه تقسیم‌بندی می‌شوند که در ذیل به شرح مختصر آنها می‌پردازیم.

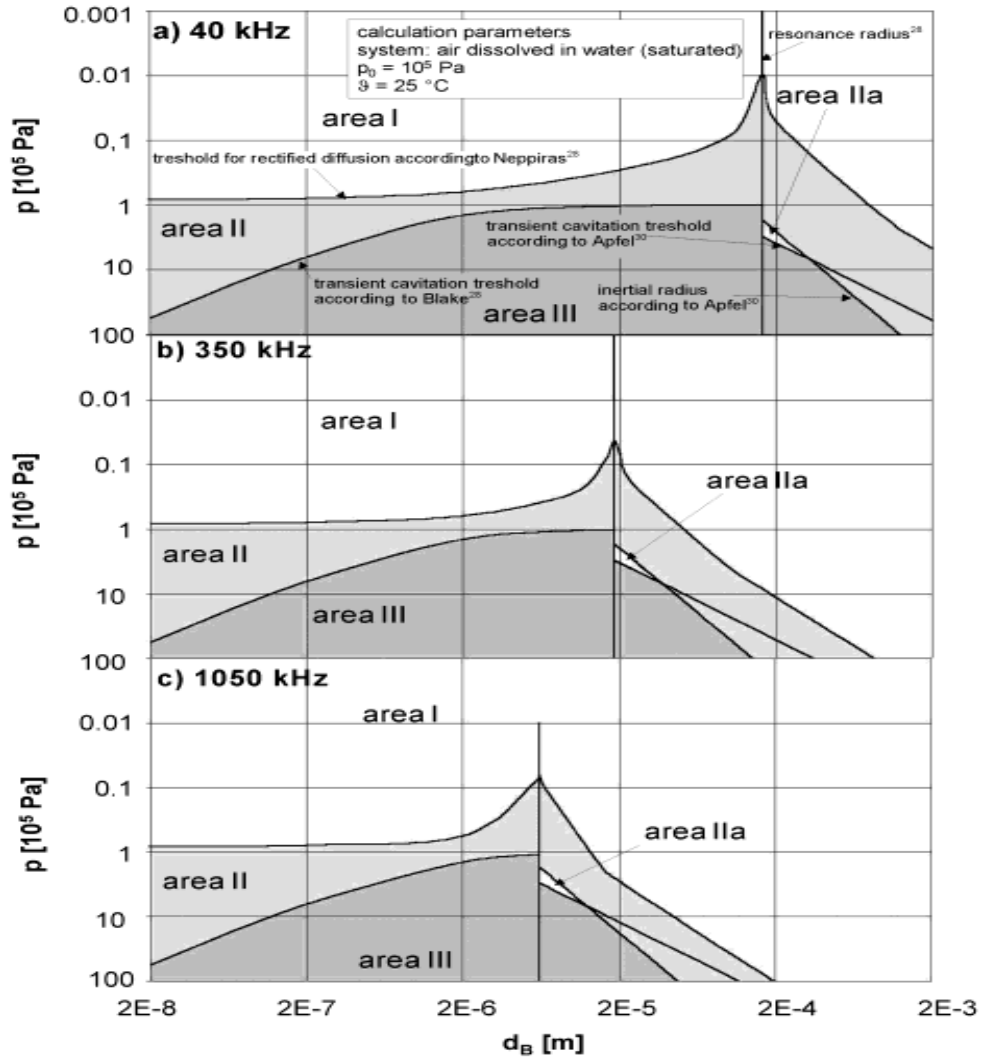
<sup>۱</sup> Collapsing

۱- در ناحیه I فشار اعمال شده در اثر امواج فراصوت برای تولید حبابهای پایدار کافی نمی‌باشد. حبابهای کوچکتر از شعاع رزونانسی حل می‌شوند و حبابهای بزرگتر از شعاع رزونانسی بر روی سطح شناور می‌شوند.

۲- در ناحیه II در طی سیکل انبساط گاز از طریق دیواره‌های حباب به درون آن نفوذ می‌کند و در طی سیکل انقباض گاز از حباب خارج می‌شود [۱۲] و در اثر چند سیکل صوتی متناوب حباب رشد می‌نماید [۱۳].

۳- علاوه بر این در ناحیه IIa حبابها در اثر جذب انرژی اولتراسوند رشد می‌نمایند.

۴- در ناحیه III حبابها ناپایدار می‌شوند و شدت امواج فراصوت کافی است، تا حبابها بتواند در طی یک چرخه صوتی به اندازه بحرانی برسند و سرانجام منفجر شوند [۱۴].



شکل (۱-۳): نمودار کویتاسیون

بعضی از اثرات مهم کویتاسیون شامل: ایجاد نقاط داغ، آزادسازی رادیکال‌های

واکنش‌پذیر، افزایش سطح کاتالیزور جامد و افزایش سرعت انتقال جرم می‌شود [۱۶-۱۵].



## ۱-۵ کویتاسیون

حفره‌زایی به دو دسته پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی می‌شود:

### ۱-۵-۱ حفره‌زایی پایدار<sup>۱</sup>

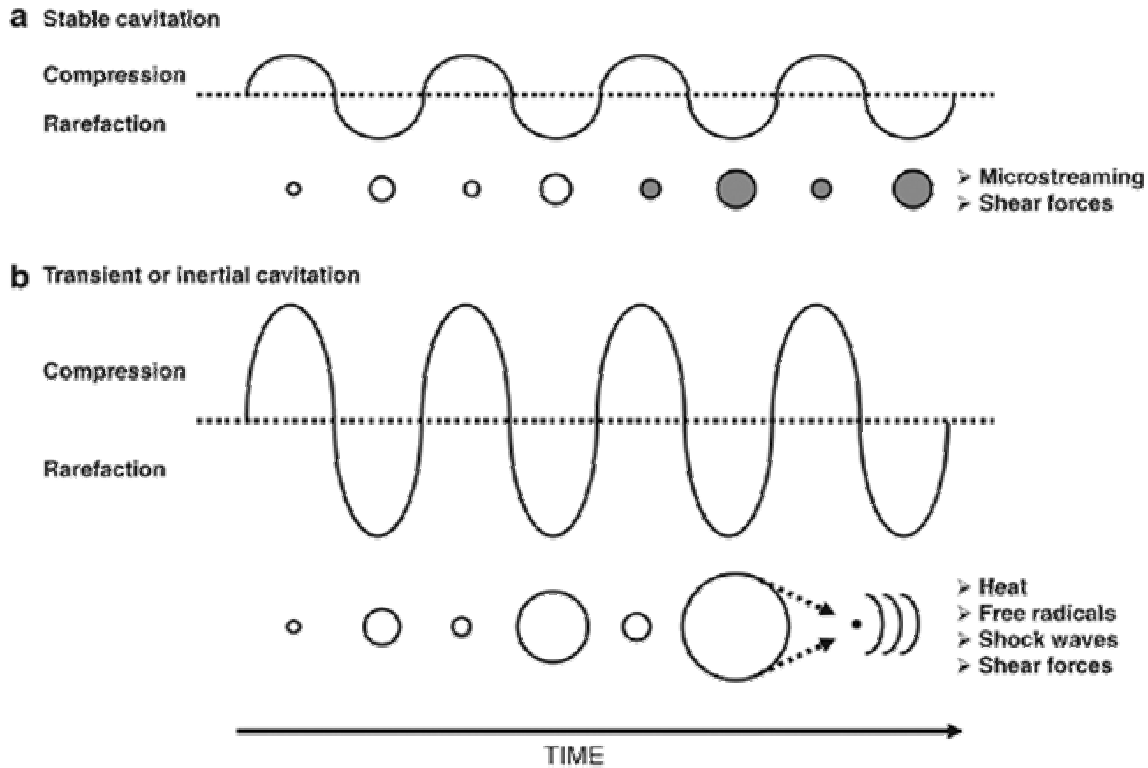
پدیده کویتاسیون پایدار در شدت‌های پایین ( $1-3 \text{ Wcm}^{-2}$ ) امواج فراصوت ایجاد می‌شود که برحسب پدیده نفوذ قابل توجه است. در مرحله انبساط چرخه صوتی نفوذ گاز از مایع به داخل حباب است در حالیکه در مرحله انقباض نفوذ گاز از حباب به سمت مایع می‌باشد. از آنجایی که در مرحله انبساط ناحیه بین سطوح بزرگتر می‌باشد نفوذ گاز به داخل حفره بیشتر می‌شود و این سبب رشد کامل حباب می‌شود. به دلیل چرخه زمانی رشد طولانی این حفره‌ها قبل از انفجار، مقدار گاز وارد شده به درون حبابها زیاد بوده و از شدت انفجار آنها کاسته می‌شود [۱۷].

### ۱-۵-۲ حفره‌زایی ناپایدار<sup>۲</sup>

این نوع حفره‌زایی در شدت‌های بالاتر از  $10 \text{ Wcm}^{-2}$  ایجاد می‌شود. حفره در طی یک یا چند سیکل صوتی با سرعت زیاد رشد کرده و شعاع حفره به بیش از دو برابر اندازه اولیه می‌رسد. در این مرحله چون حباب انرژی بیشتری را از امواج صوتی برای نفوذ گاز و بخارات به درون و یا بیرون حباب جذب نمی‌کند در اثر حرکت‌های سریع می‌ترکند در اثر انفجار درونی دما و فشار زیادی داخل حفره ایجاد می‌شود [۱۸].

<sup>1</sup> Stable Cavitation

<sup>2</sup> Transient Cavitation



شکل (۴-۱): تغییرات رشد حباب در کویتاسیون پایدار و نا پایدار

### ۶-۱ نظریه‌های سونوشیمی

دو نظریه برای توجیه اثرات سونوشیمیایی حاصل از کویتاسیون با هم رقابت می‌کنند:

۱- نظریه نقطه داغ<sup>۱</sup>

۲- نظریه الکتریکی<sup>۲</sup>

نظریه نقطه داغ: در سال ۱۹۵۰ توسط نولیتنگ<sup>۳</sup> و نیپراس<sup>۴</sup> با بررسی معادلات دینامیکی حباب کویتاسیون نظریه نقطه داغ را بیان نمودند. دمای داخل حباب در زمان فروپاشی تا ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. در این نظریه با فرض آدیاباتیک

<sup>1</sup> Hot Spot Theory

<sup>2</sup> Electrical Theory

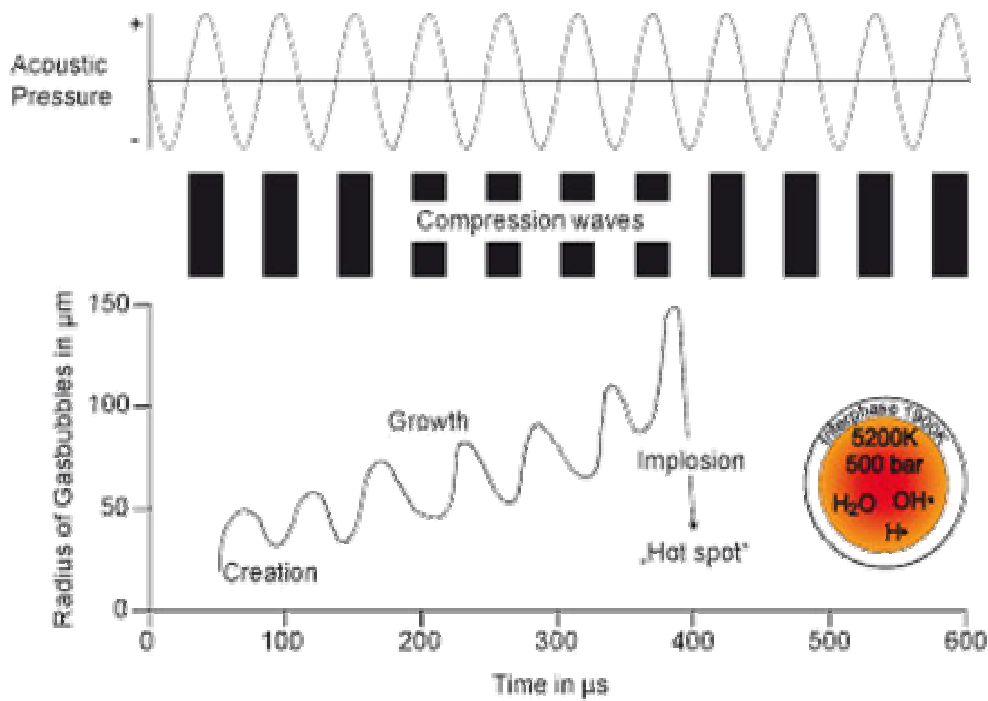
<sup>3</sup> Noltingk

<sup>4</sup> Neppiras

بودن فرآیند کویتاسیون و اندازه حبابها در زمان فروپاشی دما و فشار حبابها در میدان اکوستیک قابل محاسبه است [۱۹-۲۱].

ساسلیک<sup>۱</sup> و همکارانش این دما را حدود ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد و فشار آنرا حدود ۱۰۰۰ اتمسفر تخمین زدند.

با وجود دمای بسیار بالا که در سطح دمای خورشید است تغییر دمایی زیاد در محیط ایجاد نمی‌شود و این به دلیل کوچک بودن سایز حبابها و انتقال سریع گرما به محیط قابل توجه است [۲۲]. در شرایط حاد ایجاد شده توسط فرآیند کویتاسیون بخار آب پیرولیز شده و تولید رادیکالهای  $H^\circ$  و  $OH^\circ$  می‌نماید.



شکل (۱-۵): ایجاد نقطه داغ حاصل از انفجار حباب

<sup>۱</sup> Suslick

نظریه الکتریکی: در سال ۱۹۸۵ مارگولیس و همکارانش تئوری الکتریکی را پیشنهاد کردند. طبق این نظریه در اثر میدان اکوستیک لایه دوگانه الکتریکی بر روی سطح حباب تشکیل می‌شود. در طی حرکت حبابهای کویتاسیون مرز بین فاز مایع و گاز به طور مداوم در حال تجدید شدن می‌باشد [۲۳].

ایجاد پتانسیل سطحی می‌تواند به دلیل حضور ناخالصی‌های یونی در محیط باشد. اگر میزان این ناخالصی‌ها اندک باشد طوری که به طریق تجربی قابل شناسایی نباشند در این حالت بر روی خواص شیمیایی و فیزیکی محلول اثری ندارد ولی بر روی بار سطحی حباب کویتاسیون مؤثر هستند [۲۴].

### ۱-۷ انواع کویتاسیون

کویتاسیون براساس روش‌های مختلف تولید به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود.

\* اکوستیک

\* هیدرودینامیک

\* اپتیک

در این میان کویتاسیون اکوستیک و هیدرودینامیک در به وجود آوردن تغییرات شیمیایی مطلوب مؤثر واقع می‌شوند.

#### ۱-۷-۱ کویتاسیون اکوستیک

کویتاسیون اکوستیک در فرکانس‌های بالای امواج صوتی در گستره فرکانسی (۱۶ kHz - ۱۰۰ MHz) در مایع بوجود می‌آید. سیکل‌های متناوب انقباض و انبساط امواج صوتی سبب ایجاد مراحل مختلف کویتاسیون از قبیل تولید کویتی یا حفره، مرحله رشد و مرحله انفجار کویتی می‌شود. که پدیده کویتاسیون سبب آزاد شدن مقادیر زیادی انرژی در محل می‌شود [۲۵-۲۷].

عوامل مؤثر بر کویتاسیون اکوستیک شامل: