بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

دانشکده علوم پایه

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

اعضای هیئت داوران نسخهٔ نهایی پایان‌نامه آقای **مهدی فرجی** رشته **فیزیک** تحت عنوان:«**مطالعه ی سونولومینسانس در اسید فسفریک**» از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجهٔ کارشناسی‌ارشد مورد تائید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر احمد مشاعی	استادیار	
۲- استاد مشاور	دکتر اسماعیل ساعی ور	دانشیار	
۳- استاد ناظر داخلی	دکتر رسول ملک فر	دانشیار	
٤- استاد ناظر خارجی	دکتر رسول صدیقی بنایی	دانشیار	
٥- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رسول ملک فر	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **فیزیک** است که در سال **۱۳۸۸** در دانشکده **علوم پایه** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای **دکتر احمد مشاعی**، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای **دکتر اسماعیل ساعی‌ور ایرانی زاد** و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر ------ از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **مهدی فرجی** دانشجوی رشته **فیزیک** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **مهدی فرجی**

تاریخ و امضا: ۱۳۸۸/۰۲/۰۶

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

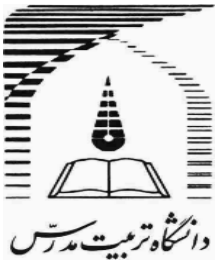
ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب ، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه می باشد، باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.



دانشکده علوم پایه

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک (اتمی و مولکولی)

بررسی سونولومینسانس در اسید فسفریک

نگارش:

مهدی فرجی

استاد راهنما:

دکتر احمد مشاعی

استاد مشاور:

دکتر اسماعیل ساعی ور

بهمن ۱۳۸۸

تقدیم به:

خانواده‌ام که با تمام وجود دوستشان دارم:

پدر عزیزم برای دلگرمی‌ها و حمایت‌هایش،

مادر مهربانم برای فداکاری‌ها و محبت‌هایش،

و برادرانم بابک و فرشید و خواهرم فرانک.

تقدیر و تشکر

احتراماً، از زحمات بی شائبه و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی، جناب آقای دکتر **احمد مشاعی** تشکر می‌نمایم و از سعه صدر ایشان در تعلیم اینجانب سپاسگزارم. لحظه لحظه حضور بنده در کنار ایشان برایم سرشار از آموخته‌هاست و بنده از ایشان علاوه بر یادگیری روش تحقیق در فیزیک، درس تقویت اراده، پشتکاری، سختکوشی و مقابله با مشکلات را یاد گرفتم. از جناب آقای دکتر رسول صدیقی بنابی، استاد مسلم دراین زمینه کاری، از دانشگاه صنعتی شریف که زحمت داوری این پایان‌نامه را تقبل فرمودند، قدردانی می‌نمایم. از استاد مشاورم جناب آقای دکتر اسماعیل ساعی‌ور ایرانی‌زاد که با حمایت‌های مالی‌شان این فرصت را در اختیار ما قرار دادند که بتوانیم آزمایشگاه تازه تاسیسمان را تجهیز کنیم نهایت تشکر را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر رسول ملک‌فر که همچون پدری مهربان و دلسوز، همیشه در کنار دانشجویان، از هیچ کمکی دریغ نکردند تشکر می‌نمایم. همچنین از خانواده عزیزم که همیشه حامی و پشتیبان من بوده‌اند سپاسگزارم و در برابرشان سر تعظیم فرود می‌آورم. در پایان از دوستان گرامی‌ام خانم‌ها **سمیرا تاجیک‌نژاد**، خدیجه ایمانی، مهسا سیلاطانی و زینب گلوانی و آقایان ابوالقاسم توحیدپور، رضا رضایی نصیر آباد و دیگر دوستانم که همیشه امید را در دلم زنده نگه داشتند صمیمانه قدردانی می نمایم.

چکیده

در پدیده‌ی سونولومینسانس، امواج صوتی یا مافوق صوتی در اثر چگالش و تمرکز در مرکز یک حباب گاز غوطه‌ور در یک مایع به فلاشهای نورانی بسیار کوتاه تبدیل می‌شوند. نوسان شدید و غیرخطی حباب در هر تناوب موج صوتی در اثر فرو ریزش بسیار سریع دیواره حباب می‌شود که تراکم شدید محتوای داخل حباب را به همراه دارد. این مطلب باعث افزایش ناگهانی و بسیار زیاد دمای گاز داخل حباب می‌شود که نهایتا منجر به فلاشهای پیکوثانیه‌ای می‌شود. این فلاشها به تابش سونولومینسانس معروف است. آزمایشات نشان می‌دهد تابش سونولومینسانس از سیالات غیرفرار با لزجت بالا، مانند اسید فسفریک دارای شدت بیشتری است. در این پایان نامه سونولومینسانس در آب و غلظت‌های مختلف اسید فسفریک با استفاده از یک مدل هیدروشیمیایی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان دهنده وجود یک غلظت بهینه از اسید فسفریک برای تولید تابش سونولومینسانس است. جزئیات محاسبات ما نشان می‌دهد که این غلظت بهینه، محلول اسید فسفریک ٪۳۵ است. بعلاوه شبیه‌سازی ما در دو سیال آب و اسید فسفریک ٪۷۵ وزنی نشان می‌دهد که شدت تابش با افزایش فشار جزئی گاز نجیب حل شده در مایع، کاهش می‌یابد. همچنین بستگی بیشینه دمای حباب به نوع گاز نجیب حل شده در مایع میزبان بررسی شده است که نتایج نشانگر شدت تابش بیشتر قابل حصول از گازهای نادر سنگین‌تر است.

واژه‌های کلیدی: اسید فسفریک، تابش سونولومینسانس، شبیه‌سازی، گازهای نجیب.

فهرست مطالب

فهرست مطالب.....ا
فهرست شکل‌ها.....د
فهرست جداول.....ز

فصل اول مقدمه‌ای بر پدیده سونولومینسانس

۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ انواع سونولومینسانس ۲
۱-۳ تاریخچه ۳
۱-۴ سیستم آزمایشگاهی پدیده سونولومینسانس تک حباب ۵
۱-۵ اندازه‌گیری تغییرات شعاع حباب سونولومینسانس با استفاده از تکنیک پراکندگی مای ۱۳
۱-۶ کاربردهای سونولومینسانس ۱۷
۱-۷ محتوای پایان‌نامه ۱۸

فصل دوم: دینامیک حباب نوسانی

۲-۱ مقدمه ۲۰
۲-۲ آستانه بلیک ۲۱
۲-۳ معادلات دینامیک حباب ۲۵
۲-۴ معادله ریلی ـ پلیست برای دینامیک حباب نوسانی ۲۹

فصل سوم: مدل هیدروشیمیایی حباب و پایداری‌های حاکم بر آن

۳-۱ مقدمه ۳۸
۳-۲ مدل هیدروشیمیایی ۳۹
۳-۲-۱ دینامیک حباب ۳۹
۳-۲-۲ فشار گاز ۴۰
۳-۲-۳ انتقال جرم ۴۱
۳-۲-۴ تبخیر و چگالش مولکولهای آب و اسید فسفریک ۴۳

۳-۲-۵ انتقال حرارت ۴۴
۳-۲-۶ موازنه انرژی ۴۵
۳-۲-۷ واکنشهای شیمیایی ۴۶
۳-۳ مدل تحول شبه بی‌دررو ۴۹
۳-۴ پایداری‌های حباب سونولومینسانس ۵۰
۳-۴-۱ پایداری دیفیوژنی ۵۰
۳-۴-۲ پایداری شکلی ۵۴
۳-۴-۳ پایداری مکانی ۵۸
۳-۵ شبیه‌سازی تابش سونولومینسانس ۶۲
۳-۵-۱ مکانیزم تابش ترمزی ۶۵

فصل چهارم : شبیه سازی سونولومینسانس تک حبابی درآب و اسید فسفریک و نتایج عددی شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمه ۷۰
۴-۲ سونولومینسانس تک حبابی درآب و غلظت های مختلف اسید فسفریک ۷۳
۴-۲-۱ آب و غلظت‌های مختلف بین ۲۵ و ۱۰۰ درصد وزنی اسید فسفریک ۷۳
۴-۲-۲ آب و غلظت‌های مختلف بین ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی اسید فسفریک ۷۷
۴-۳ بستگی شدت تابش سونولومینسانس به فشار جزئی گاز حل شده در سیال ۸۲
۴-۳-۱ آب و حباب آرگون در فشارهای جزئی مختلف ۸۲
۴-۳-۲ اسید فسفریک ۷۵ درصد وزنی و حباب آرگون در فشارهای جزئی مختلف ۸۴
۴-۴ بستگی شدت تابش سونولومینسانس به نوع گاز حل شده در سیال ۸۴
۴-۵ مقایسه بیشینه شدت تابش در آب، اسید سولفوریک و اسید فسفریک ۸۸

فصل پنجم: ساخت سیستم آزمایشگاهی دستگاه سونولومینسانس

۵-۱ مقدمه ۸۹
۵-۲ دستگاه سونولومینسانس ۹۱
۵-۳ محاسبه فرکانس رزونانس برای دو بالن کروی ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی لیتری ۹۵
۵-۴ انجام آزمایشهای تولید سونولومینسانس ۹۷

فصل ششم : جمع بندی و پیشنهادات ۱۰۲

مراجع ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: (الف) تابش نور از چند حباب و (ب) تک حباب سونولومینسانس ۳

شکل ۱-۲: طرح کلی مجموعه‌ی یک سیستم آزمایشگاهی تولید سونولومینسانس تک حباب ۷

شکل ۱-۳: طرح شماتیک تولید سونولومینسانس از تک حباب..... ۸

شکل ۱-۴ تصویری از مقیاس‌های زمانی و مکانی مرتبط با پدیده‌ی سونولومینسانس..... ۱۰

شکل ۱-۵: شعاع حباب بر حسب زمان در دو پریود موج صوتی در شرایط پایدار ۱۲

شکل ۱-۶: شمایی از ابزار اندازه‌گیری شعاع حباب بر اساس تکنیک پراکندگی مای..... ۱۳

شکل ۱-۷: سیگنال $V(t)$ و نویز $\tilde{V}(t)$ برای یک حباب SL در یک پریود موج صوتی ۱۵

شکل ۱-۸: منحنی تغییرات شعاع حباب و فشار موج صوتی برحسب زمان ۱۵

شکل ۱-۹: تغییرات شعاع حباب برحسب زمان در انتهای ناحیه‌ی فروریزش..... ۱۷

شکل ۲-۱: تعادل مکانیکی یک حباب گاز با شعاع R_0 و فشار یکنواخت P_g با مایع اطراف خود ۲۲

شکل ۲-۲: حل معادله‌ی رایلی پلیست با دامنه‌ی فشار تحریکی مختلف..... ۳۷

شکل۳-۱: نمودارهای شاخه‌ای در فضای پارامتری $R_0 - P_a$..... ۵۳

شکل۳-۲: محاسبه نسبت دامنه انحراف $a_2/R(t)$ برای حباب آرگون در پنج سیکل اول ۵۶

شکل ۳-۳: تغییرات نسبت دامنه انحراف $a_2/R(t)$ ۵۷

شکل ۳-۴: پایداری مکانی حباب..... ۵۹

شکل۳-۵: دینامیک شعاعی محاسبه شده از معادله رایلی– پلیست برای حبابی با شعاع ۵ μm در دامنه فشارهای تحریکی مختلف..... ۶۰

شکل ۳-۶: دیاگرام فاز محاسباتی برای سونولومینسانس حباب آرگن در آب و اسید سولفوریک ۸۵٪ وزنی با فشار ۴ torr و ۵۰ torr غلظت گاز حل شده ۶۱

شکل۳-۷: انطباق نتایج آزمایشگاهی ناشی از طیف یک حباب سونولومینسانس..... ۶۳

شکل۳-۸: طیف تابش جسم سیاه با داده های تجربی Barber برای گازهای نجیب مختلف ۶۵
شکل۳-۹: مقایسه‌ی نتایج تئوری طیف تابشی از یک حباب سونولومینسانس آرگون بر اساس مدل تابش ترمزی با داده‌های آزمایشگاهی ۶۶
شکل۴-۱: دیاگرام فازی برای آب و گاز آرگون در فشار جزئی ۳ torr ۷۲
شکل ۴-۲: نمودار دیاگرام فازی برای یک حباب سونولومینسانس آرگون در آب و چهار غلظت مختلف اسید فسفریک ۷۵
شکل ۴-۳: منحنی تغییرات مشخصه‌های حباب بصورت تابعی از زمان برای یک حباب آرگون با فشار جزئی ۳ تور در آب وچهارغلظت مختلف اسید فسفریک. ۷۶
شکل ۴-۴: شبیه‌سازی شدت تابش حباب سونولومینسانس برای آب و چهار غلظت مختلف اسید فسفریک ۷۷
شکل ۴-۵: دیاگرام فازی برای یک حباب آرگون در شش غلظت مختلف محلول اسید فسفریک ۷۹
شکل ۴-۶: (الف) تغییرات شعاع حباب بصورت تابعی از زمان (ب) دمای ماکزیمم و شعاع مینمم حباب برای یک حباب آرگون با فشار جزئی ۳ تور در شش غلظت مختلف اسید فسفریک ۸۰
شکل۴-۷: شبیه‌سازی شدت تابش حباب در غلظت‌های مختلف اسید فسفریک و آب ۸۱
شکل ۴-۸: الف) دیاگرام فازی آب و حباب آرگون در فشارهای جزئی مختلف. ب) بیشینه دمای حباب آرگون در لحظه‌ی فروریزش حباب در فشارهای جزئی مختلف ۸۳
شکل ۴-۹: الف) دیاگرام فازی اسید فسفریک ۷۵% وزنی و حباب آرگون در فشارهای جزئی مختلف. ب) بیشینه دمای حباب آرگون در لحظه‌ی فروریزش حباب در فشارهای جزئی مختلف ۸۴
شکل ۴-۱۰: تغییرات رسانش گرمایی گازهای بی‌اثر بر حسب دما ۸۵
شکل ۴-۱۱: الف) دیاگرام فازی برای آب در فشارهای جزئی مختلف برای دو حباب شامل گازهای آرگون و زینون. ب) مقایسه دمای بیشینه حباب در آب در دو حباب شامل گازهای آرگون و زینون با فشارهای جزئی مختلف ۸۶

شکل ۴-۱۲: مقایسه دمای بیشینه حباب در اسید فسفریک ۷۵% وزنی در دو حباب شامل گازهای آرگون و زینون با فشارهای جزئی مختلف ۸۷
شکل ۴-۱۳: تحول شعاع حباب در طول یک پریود در دو حباب آرگون و زینون ۸۷
شکل ۴-۱۴: مقایسه بیشینه شدت تابش در آب، اسید سولفوریک و اسید فسفریک ۸۸
شکل ۵-۱: نمودار شعاع حباب بر حسب زمان برای یک دوره تناوب میدان صوتی ۹۰
شکل ۵-۲: مجموعه یک سیستم آزمایشگاهی تولید سونولومینسانس با شکل رزوناتور کروی ۹۱
شکل ۵-۳: مولدهای سینوسی مورد استفاده در آزمایش‌ها ۹۲
شکل ۵-۴: تقویت کننده مورد استفاده در آزمایش سونواومینسانس ۹۳
شکل ۵-۵: رزوناتور کروی آماده شده در آزمایشگاه ۹۵
شکل ۵-۶: آماده کردن آب با استفاده از دستگاه Heater ۹۸
شکل ۵-۷: خروجی موج سینوسی اسیلاتور با فرکانس ۳۲ kHz برای تنظیم فرکانس اسیلاتور ۹۹
شکل ۵-۸: شکل موج خروجی اسیلاتور و تقویت کننده در اسیلوسکوپ ۹۹
شکل ۵-۹: خروجی میکروفن از امواج صوتی ۱۰۰
شکل ۵-۱۰: ایجاد کردن اتاق تاریک برای دیدن بهتر پدیده کاویتاسیون ۱۰۱

فهرست جداول

جدول ۳-۱: تعداد درجات آزادی انتقالی + دورانی و دماهای ویژه ارتعاشی انواع محصولات تولید شده در حباب آرگن..... ۴۶

جدول ۳-۲: واکنش‌های شیمیایی در نظر گرفته شده در مدل هیدروشیمیایی به همراه مقادیر عددی پارامترهای آرینوسی به کار رفته در مدل محاسباتی..... ۴۸

جدول ۴-۱ : پارامترهای فیزیکی چندین مایع میزبان که در آزمایشات تجربی بدست آمده است..... ۷۱

جدول ۴-۲: پارامترهای فیزیکی مختلف آب و غلظت‌های مختلف اسید فسفریک..... ۷۴

جدول ۴-۳: پارامترهای فیزیکی مختلف آب و غلظت‌های مختلف اسید فسفریک در دمای $^{0}\mathrm{C}$ ۲۰ ..... ۷۸

جدول ۴-۴: پارامترهای محاسبه شده برای نقاط تلاقی منحنی‌های دیاگرام فاز برای درصدهای مختلف اسید فسفریک و آب خالص ۸۲

جدول ۴-۵: M جرم اتمی، μ ویسکوزیته و E_{ion} انرژی یونیزاسیون گازهای بی‌اثر..... ۸۵

جدول ۵-۱: اندازه شعاع‌های دو بالن ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی لیتری..... ۹۶

جدول ۵-۲: صفر های تابع بسل کروی و فرکانس رزونانس برای بالن ۲۵۰ میلی لیتری..... ۹۷

جدول ۵-۳: صفر های تابع بسل کروی و فرکانس رزونانس برای بالن ۱۰۰ میلی لیتری..... ۹۷

فصل اول

مقدمه‌ای بر پدیده سونولومینسانس

۱-۱ مقدمه:

پدیده‌ی سونولومینسانس[۱]، پدیده‌ای است که در آن امواج صوتی یا مافوق صوتی (با بسامد $1kHz < \nu < 1GHz$) در اثر چگالش و تمرکز در مرکز یک حباب گاز غوطه‌ور در یک مایع، به فلاش-های نورانی بسیار کوتاه تبدیل می‌شوند. در این پدیده، یک حباب گاز (مثلاً حباب هوا ، حباب گازهای ایده آل و...) در داخل یک مایع (مثلاً آب، اسید سولفوریک ، اسید فسفریک ، گیلیسیرین و ...)، تحت تأثیر امواج صوتی با دامنه‌های بزرگ قرار می‌گیرد. نوسان شدید و غیرخطی حباب در هر تناوب موج صوتی باعث فروریزش[۲] بسیارسریع دیواره‌ی آن می‌شود که افزایش بسیار زیاد دمای گاز داخل حباب را به همراه دارد. در این پدیده حباب گازی به خاطر کمتر بودن فشار در داخل سیال ابتدا منبسط می‌شود و سپس با افزایش فشار و با انقباض سریع شرایط ویژه‌ای در داخل حباب ایجاد می شود که دما و فشار در داخل آن افزایش می‌یابد. در انتهای هر فروریزش که شعاع حباب به کمترین مقدار خود می‌رسد، در بازه‌ی زمانی بسیار کوتاهی، دمای گاز به حدی بالا می‌رود ($۵ - ۳۰\times۱۰^{۳}$ K)

---

[۱] Sonoluminescence

[۲] Collapse

که حباب از خود یک فلاش نورانی با طول زمانی چند ده پیکوثانیه ساطع می‌کند که این پدیده سونولومینسانس (Sonoluminescence) نامیده می‌شود [۱]،که از دو واژه Sound به معنای صدا و Luminescence به معنای نوردهی تشکیل شده است. تولید فلاش نورانی سونولومینسانس، بصورت کوک شده با موج صوتی فرودی می‌باشد و در زمان مشخصی در هر تناوب تکرار می‌شود.

به عبارت دیگر سونولومینسانس تابش پالس‌های نورانی بسیار کوتاه از حباب گازی است که در میدان آکوستیکی به تله افتاده است و توان انرژی خروجی $۱۰^{۱۲}$ مرتبه بزرگتر از انرژی ورودی است [۲]. طیف نور تابیده شده در ناحیه فرابنفش دارای قله است و بستگی به نوع گاز حل شده و مایع میزبان دارد [۳]. همچنین تغییرات اندک در پارامترهای موثر یعنی فرکانس میدان صوتی، دمای مایع محیطی، غلظت گاز حل شده در مایع و دامنه‌ی فشار تحریکی باعث تغییر در میزان تابش نور می‌شود [۴].

در پدیده‌ی سونولومینسانس، با تجهیزات ساده آزمایشگاهی پالس‌های نور حباب با نظم و ترتیبی خاص در مقیاس $۱۰^{-۱۲}$ گسیل می‌شوند، همین نکته سونولومینسانس را به یکی از روش‌های ارزان تولید پالس‌های نور در این مقیاس، تبدیل می‌کند. در ضمن، اندازه‌ی حباب سونولومینسانس به قدری کوچک بوده و پالس‌هایش به اندازه‌ای کوتاهند که تجهیزات دقیقی برای اندازه‌گیری آن لازم است.

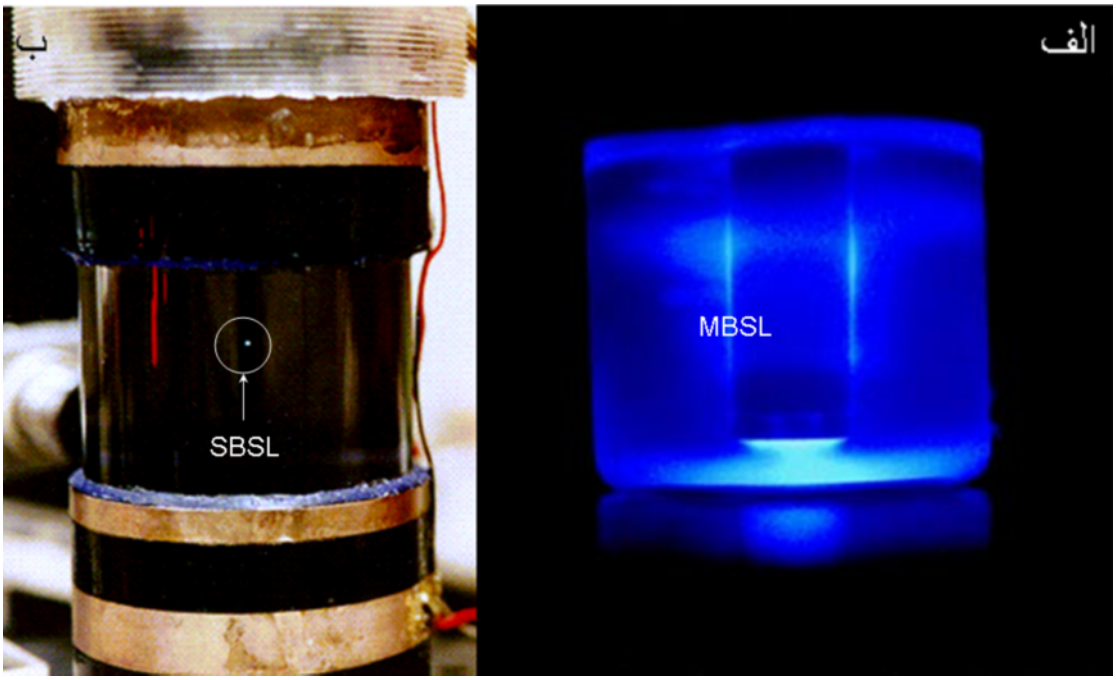
۱-۲ انواع سونولومینسانس:

به طور کلی سونولومینسانس به دو دسته تقسیم می‌شود:

الف) سونولومینسانس چند حبابی ب) سونولومینسانس تک حبابی.

در سونولومینسانس چند حبابی (Multi Bubble Sonoluminescence)، با نام اختصاری (MBSL) تابش نور از گروه حباب‌ها اتفاق می‌افتد که به صورت گذرا و غیر قابل پیش بینی است طیف آن دارای خطوط تابشی و تابش آن به صورت شعله شمع است و عدم کنترل بر روی زمان تابش از عمده‌ترین مشکلات این روش است و مکانیزم این پدیده تا مدت‌ها تقریبا ناشناخته مانده بود (شکل۱-۱-الف).

در سونولومینسانس تک حبابی (Single Bubble Sonoluminescence)، با نـام اختصـاری (SBSL) تابش نور از یک تک حباب معلق در میدان امواج ایستاده‌ی صوتی اتفاق می‌افتد بـر خـلاف MBSL ، تولید حباب پایدار SBSL بسیار راحت‌تر می‌باشد و حباب ایجاد شده می‌تواند برای ساعت‌هـا از خـود نور تابش کند (شکل۱-۱-ب) [۵].



شکل۱-۱: تابش نور از چند حباب (الف) و تک-حباب سونولومینسانس (ب)

۱-۳ تاریخچه:

شناخت پدیده‌ی سونولومینسانس و تولید تابش از حباب‌های نوسان‌کننده موضوع جدیدی نیست و قدمتی هفتاد ساله دارد. از لحاظ تجربی اولین مشاهدات تابش نور به ۱۹۳۳ زمان مارینسو و تریلیت Marinesco و Trillat برمی‌گردد [۶]. آنها به طور تصادفی کشف کردند که صفحه عکاسی که در معرض امواج ماوراء صوت قرار گرفته بود کدر شد. آنها این موضوع را چنین توجیه کردند که امواج فرا صوتی فرآیند احیا را در سطح بسیار حساس صفحات عکاسی که توسط مخلوطی از واکنش دهنده‌ها رخ می‌دهد تسریع می‌بخشد. اما در سال ۱۹۳۴ فرنزل و اسشالتز Frenzel و Schultes در دانشگاه

کولوگن کشف کردند که تیره شدن صفحات عکاسی به دلیل حضور یک نور ضعیف است که از حباب‌های کاویتاسیونی ایجاد شده بود که خود از امواج آکوستیکی با بسامدهای بالا ناشی شده بود. در دستگاه آزمایشگاهی آنها، ابری از حباب‌ها با ایجاد امواج صوتی بسیار قوی در داخل آب تولید می‌شدند. این حباب‌ها می‌توانستند بصورت گذرا و غیرقابل پیش بینی از خود تابش‌های بسیار سریع سوسوماننده بروز دهند [۷]. در سال۱۹۳۹ هاروی Harvey این فرآیند را سونولومینسانس چند حبابی نامید [۸]. به دلیل شرایط سخت آزمایشگاهی و ناپایداری حبابها در MBSL تا مدت‌ها این پدیده ناشناخته بود، تا این‌که اولین آزمایش‌ها برای پی بردن به خصوصیات سونولومینسانس با تک حباب توسط یاسیوکا Yosioka و اومارا Omura در سال ۱۹۶۲ انجام شد [۹]. تمپل Temple در ۱۹۷۰ یک دستگاه آزمایشگاهی SBSL ساخت [۱۰]. او توانست یک تک حباب گازی را در گره سرعت میدان صوتی در بسامد تشدید به تله بیاندازد و تابش نور را با افزایش میدان صوتی ببیند. او دریافت که یک پالس نور در هر پریود موج صوتی تابش می‌شد، چون پهنای پالس‌ها کوتاه‌تر از آب بود توانست با وسایل آزمایشگاهی خود، آن را اندازه‌گیری نماید که در حدود *ns* ۲۰ بود. در سال ۱۹۷۱، رزنبرگ Rozenberg شکل موجی SBSL را نشان داد [۱۱].

سرانجام در سال ۱۹۹۰ تحولی بسیار بزرگ در تولید پدیده‌ی سونولومینسانس بوجود آمد که توجه به این پدیده را به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در این سال فلیپ گیتان (Felipe Gaitan)، که در آن زمان دانشجوی دکتری دانشگاه «می سی سی پی» بود، در طی تحقیقات تز دکتری خود توانست سیستم آزمایشگاهی جدیدی را ابداع کند، که به وسیله‌ی آن سونولومینسانس برای اولین بار از یک حباب منفرد واقع در مرکز یک رزوناتور آکوستیکی ایجاد می‌شد. در واقع او موفق شده بود به جای ابر حباب‌ها، روی یک تک حباب تمرکز کند [۱۲]. پنج سال قبل‌تر در جریان تحقیقات تجربی در فیزیک کاویتاسیونی، کرام Crum (استاد راهنمای رساله دکتری گیتان) نشانه‌هایی از تابش نور از حباب‌های تحریک شده با امواج صوتی در آب مشاهده کرده بود، او در سال‌های بعد گیتان را مامور کرد تا به عنوان موضوع پایان نامه‌ی دوره‌ی دکتری، به طور سیستماتیک به دنبال تولید نور از آب

کاویتاسیونی شود. برجستگی این سیستم در این بود که حباب منفرد در محل مشخصی قرار می‌گرفت و تابش ناشی از آن بر خلاف سونولومینسانس چند حبابی، کاملاً به صورت تکرارپذیر و در زمان‌های مشخصی انجام می‌شد. این کشف ، امکان مطالعات بیشتر در ارتباط با تابش سونولومینسانس را فراهم کرد و به شکل‌گیری شاخه‌ی جدیدی به نام سونولومینسانس تک حباب منجر شد و محققین مطالعات بسیاری بر روی جنبه‌های مختلف تئوریک و آزمایشگاهی این پدیده انجام دادند. از لحاظ آزمایشگاهی، شناخت ویژگی‌های تابش و بستگی آن به جنس مایع و گاز داخل حباب بیشتر مورد توجه قرار گرفت. اما از دیدگاه تئوریک، توصیف دینامیک حرکت حباب و نیز توصیف مکانیزم تابش، بیشتر مورد توجه قرار داشت [۱۳].

۱-۴ سیستم آزمایشگاهی پدیده سونولومینسانس تک حباب:

سیستم آزمایشگاهی حباب سونولومینسانس عموماً به دو صورت است: کروی و استوانه‌ای. شکل (۱-۱) یک رزناتور آکوستیکی استوانه‌ای با نور تولید شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد [۱۴]. در این پروژه بیشتر بررسی رزناتور آکوستیکی کروی بدلیل سادگی آن مد نظر ماست. شکل (۱-۲) شمایی از مجموعه‌ی یک سیستم مولد سونولومینسانس تک حباب در یک رزناتور کروی را نشان می‌دهد.

برای تولید سونولومینسانس تک حباب، لازم است که با ایجاد امواج صوتی در یک مایع، یک حباب گاز به نوسان شعاعی درآید. برای این منظور بایستی امواج صوتی در محیط مایع، که در داخل یک رزوناتور آکوستیکی قرار می‌گیرد، توسط یک عامل خارجی مثلاً سلول‌های پیزو الکتریک (PZT) ایجاد شوند. گیتان پیزو سرامیک‌هایی را به یک فلاسک شیشه‌ای از جنس پیرکس چسباند و آب مقطر را تا ۲۰ درصد غلظت اشباع هوای حل شده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد گاززدایی کرد و در این فلاسک شیشه‌ای ریخت. سلول‌های پیزو سرامیک تحت تأثیر جریان سینوسی که به آن اعمال می‌شد، شروع به نوسان می‌کردند. این نوسان به بالون شیشه‌ای منتقل می‌شد و باعث نوسان شعاعی حباب که در مرکز بالون قرار گرفته بود می‌شد. وقتی فرکانس موج صوتی حاصل از پیزو (که با