

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده فیزیک

بررسی آوادرخش تک‌جابی متحرک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک

محمد علی عسگریان

استاد راهنما

دکتر سید ظفرالله کلانتری



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک آقای محمد علی عسگریان
تحت عنوان

بررسی آوا درخش تک‌جابی متحرک

در تاریخ ۱۳۸۶/۱۱/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر سید ظفرالله کلانتری

۲- استند مشاور پایان نامه دکتر محمدحسن علامت‌ساز

۳- استاد داور دکتر اکبر پروازیان

۴- استاد داور دکتر فرهاد شهبازی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر سید ظفرالله کلانتری



مَنْ عَلَّمَنِي حَرْفًا فَقَدْ صَيَّرَنِي عَبْدًا

خداوند بلند مرتبه را سپاس که توفیق عطا فرمود تا در راه گام برداریم که همواره مدووع اولیای الهی بوده است. درود بر پیامبر اندر دشمنان که مسیر دانش و پژوهش را با راهنمایرها و روشنگرها خود همواره پر رونق نگاه داشته اند. همه دانش خود را مرهون بزرگواریان هستیم که از آغازین روزها زندگی را تا بدین لحظه، واژه به واژه زندگی را به ما آموختند و بدین شیوه نهایت سپاس و قدر دانر خود را به ایشان عرضه کردیم. در راستای انجام این پروژه در ابتدا از هدایت و راهنمای استاد گرانقدر و گرامر جناب آقا دکتر کلانتر کمال تشکر را دارم. برگمان اگر درایت ایشان در انتخاب این پروژه و پشتیبانها و راهنمایها سردرغشاخ نبود، این پروژه تصقیقات به این مراحل نرسید. از استاد مشاور این پروژه جناب آقا دکتر علامت ساز که زحمات بازخوانی پیام نامه را بر عهده گرفتند و استاید لرجمند جناب آقا دکتر پروانزیاخ و دکتر شهباز که زحمات داور را بخ را تقبل فرمودند، سپاسگزاریم. در پیام از پدر و مادر و همسر عزیزم و تمام دوستان که همدر و همفکر آنها در تمام لحظات یاور ما بود و مرا صمیمانه در این تلاش یار نمودند سپاسگزاریم.

مصداق علم عسگریان

اسفند ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج
مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از
تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.



اللَّهُ

تقدیم به ساحت مقدسش
که دل‌هایی عاشقانش
به یاد و نام او می‌تپد.

تقدیم به خون پاک شهدا
آزاد مردانی که
آزادگی را برگزیدند.

تقدیم به پدر و مادر که دعای خیرشان
همواره قرین راه می‌گردد.
و همه هستیم تقدیم به

همسرم

صفایبخش زندگی‌م.



فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب.....
۱	چکیده.....
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ کشف آوادرخش تک‌جابی.....
۷	۲-۱ نگاهی تاریخی.....
۲۲	۳-۱ ساختار پایان‌نامه.....
	فصل دوم: دینامیک سیالات درون بالون
۲۵	۱-۲ به دست آوردن معادله رابلی-پلست.....
۲۸	۲-۲ بهینه‌سازی‌های معادله رابلی-پلست.....
۳۱	۳-۲ پاسخ جاب به تحریک‌های قوی و ضعیف.....
۳۳	۴-۲ رمبش رابلی.....
۳۴	۵-۲ مقایسه محاسبات حاصل از نظریه‌ها با آزمایش‌ها.....
۳۵	۶-۲ گسیل موج صوتی از جاب.....
۳۷	۷-۲ نیروی ژرکنس.....
	فصل سوم: مروری بر مدل‌های توصیف‌کننده فضای درون جاب
۴۱	۱-۳ دینامیک گاز درون جاب.....
۴۲	۱-۱-۳ مدل‌های غیر لزوج.....
۴۳	۲-۱-۳ مدل‌های اتلافی.....
۴۶	۳-۱-۳ مدل‌های اتلافی با در نظر گرفتن بخار آب.....
۵۲	۲-۳ مدل‌های ساده.....
۵۲	۱-۲-۳ گاز وان‌دروالس همگن بدون تبادل گرما و جرم.....
۵۳	۲-۲-۳ گاز وان‌دروالس همگن همراه با تبادل گرما و جرم.....
۵۷	۳-۲-۳ دماهای به دست آمده برای جاب، چقدر دقیق هستند؟.....
	فصل چهارم: گستره پارامتری آوادرخش تک‌جابی
۵۹	۱-۴ آستانه بلیک.....

۶۰	۲-۴ پایداری پخشی.....
۶۵	۳-۴ فرآیند تصفیه گازهای نجیب توسط حباب‌های آوادرخشده.....
۶۵	۱-۳-۴ مکانیسم.....
۶۸	۲-۳-۴ تعادل حباب در صورت وجود واکنش‌های شیمیائی.....
۷۳	۴-۴ پایداری شکلی.....
۷۳	۱-۴-۴ معادلات دینامیکی.....
۷۵	۲-۴-۴ ناپایداری پارامتری.....
۷۷	۳-۴-۴ ناپایداری پس‌جهشی.....
۷۹	۴-۴-۴ ناپایداری رایلی-تیلور.....
۸۱	۵-۴-۴ بستگی پارامتری ناپایداری‌های شکلی.....
۸۱	۵-۴ تأثیر متقابل تعادل پخشی و ناپایداری شکلی بر همدیگر.....
۸۳	۶-۴ دیگر مایعات قابل استفاده در SBSL و مایعات آلایش شده.....

فصل پنجم: بررسی آوادرخش تک‌حبابی متحرک

۸۶	۱-۵ دینامیک شعاعی حباب.....
۸۸	۱-۱-۵ رفتار تک‌دما.....
۸۸	۲-۱-۵ رفتار غیر تک‌دما.....
۹۰	۲-۵ دینامیک انتقالی حباب.....
۹۰	۱-۲-۵ وابستگی فضایی میدان فشار تحریک کننده حباب.....
۹۱	۲-۲-۵ نیروهای وارد بر حباب.....
۹۹	۳-۵ نتایج.....
۹۹	۱-۳-۵ مسیر حرکت حباب.....
۱۰۲	۲-۳-۵ دمای حباب متحرک.....
۱۰۳	۳-۳-۵ سرعت انتقالی حباب.....
۱۰۵	۴-۳-۵ مقایسه نتایج مدل تک‌دما و غیر تک‌دما.....
۱۰۷	۵-۳-۵ تأثیر حرکت حباب بر شعاع و دمای حباب.....
۱۰۹	۴-۵ خلاصه و ارائه پیشنهاد.....
۱۱۲	پیوست (الف).....
۱۱۶	مراجع.....

چکیده

آوادرخش تک‌جبابی متحرک، در پی تلاش‌ها در جهت یافتن سیال‌هایی غیر از آب برای مشاهده آوادرخش تک‌جبابی، کشف شده است و مطالعات بر روی آن به تازگی در حال انجام است. ویژگی اصلی این سیالات بالاتر بودن چسبندگی آنها در مقایسه با آب است. در این پایان‌نامه تلاش شده است تا با معرفی نیروهای وارد بر جباب آوادرخشده و به دست آوردن معادله حرکت حاکم بر آن، حرکت جباب را شبیه‌سازی کرده و ویژگی‌های مربوط به حرکت انتقالی آن را به دست آوریم. با جفت کردن این معادله حرکت با معادله رایلی-پلست و معادله مربوط به تغییرات دما و حل آنها از روش رانگ-کوتا، شبیه‌سازی جباب انجام می‌شود.

اصلی‌ترین ویژگی این جباب‌ها، حرکت دایروی یا بیضوی آنها در مرکز بالونی است که جباب آوادرخشده در آن ایجاد شده است. در بررسی عوامل تأثیر گذار بر این حرکت، مشخص می‌شود که وجود نیروهای تاریخچه‌ای است که باعث بروز چنین رفتاری از جباب آوادرخشده می‌شود و با حذف این اثرات از معادله حرکت حاکم بر جباب در شبیه‌سازی، جباب در مرکز بالون ساکن خواهد شد. یکی از نتایج اصلی به دست آمده در این شبیه‌سازی، افزایش دمای بیشینه جباب (در لحظه رمیش) با کاهش فاصله آن نسبت به مرکز بالون است. با توجه به رابطه مستقیم بین گسیل نور و این کمیت، همین نتیجه برای شدت نور گسیل شده نیز، قابل پیش‌بینی است. به عبارت دیگر به دست آورده‌ایم که شدت نور گسیل شده از جباب دارای نوساناتی است و بر این اساس معیاری برای آزمایش بر روی آوادرخش تک‌جبابی متحرک ارائه کرده‌ایم.

برای توصیف ویژگی‌های داخلی جباب از دو مدل متفاوت تک‌دما و غیرتک‌دما استفاده می‌شود. تفاوت این مدل‌ها در نوع معادله حالت به کار رفته برای گاز درون جباب است. علاوه بر ویژگی‌های داخلی، ویژگی‌های انتقالی به دست آمده برای جباب نیز در این دو مدل متفاوت است. در این پایان‌نامه، اثرات ناشی از تغییر مدل به کار رفته در شبیه‌سازی نیز بررسی می‌شود. در پایان نیز با حذف معادله حرکت از شبیه‌سازی و مقایسه نتایج مربوط به جباب آوادرخشده متحرک با جباب ساکن، اثر حرکت انتقالی جباب را بر پارامترهای مهم در آوادرخش همچون شعاع و دما، بررسی کرده‌ایم.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کشف آوادرخش تک‌حبابی^۱

آوادرخش تک‌حبابی در ۱۹۸۹ توسط فلیپ گایتان^۲ دانشجوی تحصیلات تکمیلی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی که با لاری کُرْم^۳ کار می‌کرد کشف شد [۱-۳]. کرم نشانه‌هایی از گسیل نور را از یک تک‌حباب در ۱۹۸۵ دیده بود [۴]. او موضوع تز گایتان را، تحقیق سیستماتیک بر روی این پدیده تعیین کرد. گایتان آزمایش‌هایی را بر روی نوسان و رمبش^۴ حباب‌ها انجام داد. او از یک بالون پر از مایع استفاده کرد که مبدل‌هایی^۵ به دو طرف آن وصل شده بود. این مبدل‌ها یک موج ایستاده صوتی با بسامدی برابر با بسامد تشدید بالون ایجاد می‌کردند. اگر دامنه فشار امواج صوتی P_a بزرگ‌تر از فشار اطراف حباب $P_0 = 1\text{bar}$ شود، فشار درون بالون منفی می‌شود و مایع تحت کشش قرار می‌گیرد. اگر این کشش به حد کافی بزرگ باشد، مایع به صورت تکه تکه پاره می‌شود (حفره‌سازی^۶) و ابرهای حبابی ناپایداری به وجود می‌آیند که حباب‌های درون این ابرها ساختاری شاخه‌ای دارند. این ابرهای ناشی از

^۱ Single-Bubble Sonoluminescence

^۲ Felipe Gaitan

^۳ Larry Crum

^۴ Collaps

^۵ Transducer

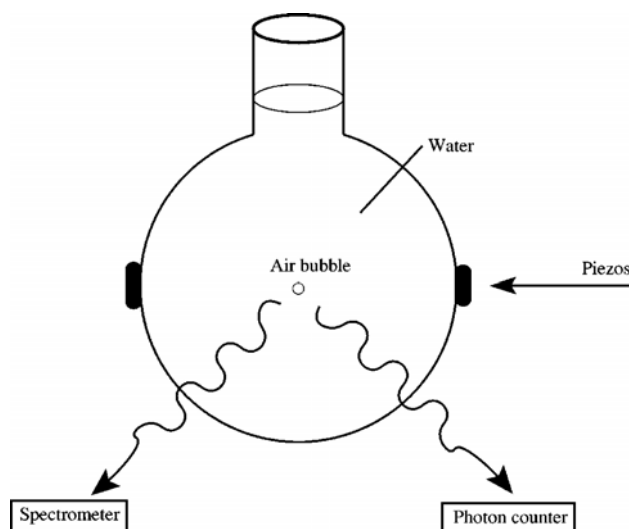
^۶ Cavitation

حفره‌سازی با قدرت عجیبی می‌ربند. این قدرت به حدی قوی است که می‌تواند سطوح اجسام جامد نزدیک حباب را تخریب کند.



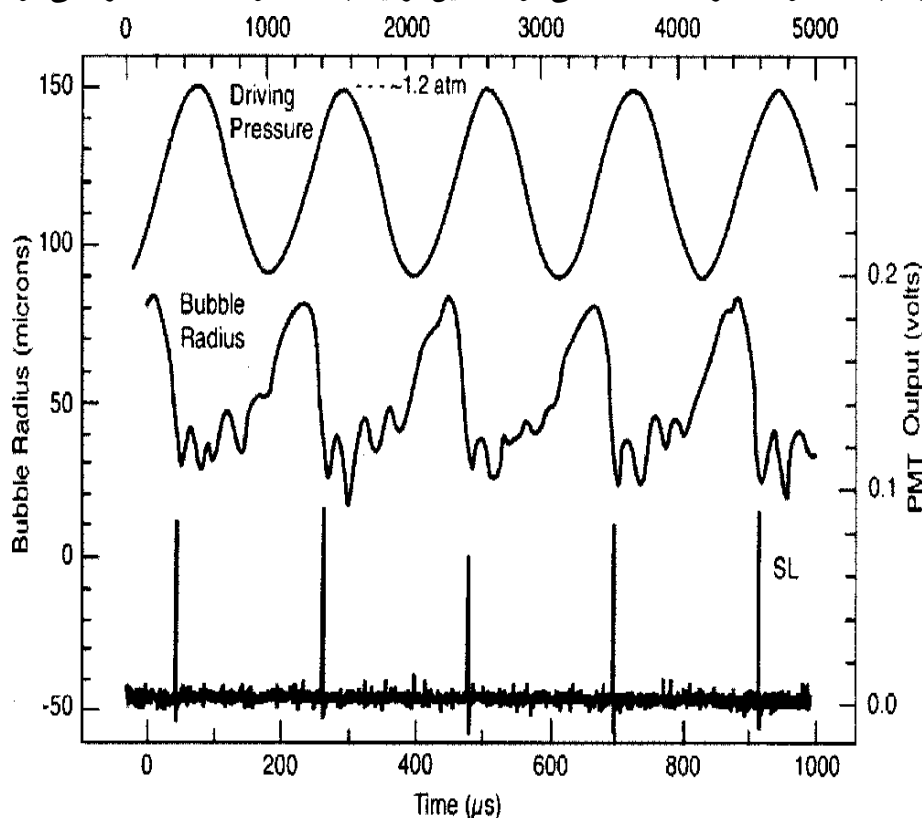
شکل (۱-۱): حباب آوادرخشنده. نقطه‌ی واقع در مرکز ظرف، حباب گسیلنده‌ی نور است [۶].

گایتان در تحقیقاتش بر روی آوادرخش تک‌حبابی، به سازوکاری دست یافت که در آن فشار محرک $P_a/P_0 \approx 1/2 - 1/4$ بود و آب درون بالون تا حدود ۲۰٪ غلظت اشباعش از هوا، گاززدایی شده بود. در این سازوکار مشاهده کرد که "با افزایش فشار، میدان صوتی، مایع را گاززدایی کرده و تعداد حباب‌ها را تا جایی کاهش می‌دهد که باریکه‌های ناشی از حفره‌سازی بسیار نازک شده و تنها یک تک‌حباب باقی بماند. شعاع این حباب به طور تخمینی $20 \mu m$ و به گونه‌ای قابل توجه، مکان، شکل و اندازه‌ی آن پایدار بوده و به نظر می‌رسد در مدی کاملاً شعاعی نوسان می‌کند. با کم کردن روشنایی اتاق، در مکان حباب، نقطه‌ی سبز درخشانی را به اندازه‌ی یک سرسوزن، با چشم غیر مسلح می‌توان دید" [۳]. سازوکار این آزمایش در شکل (۱-۱) نشان داده شده و طرح کلی آن در شکل (۱-۲) آورده شده است.



شکل (۱-۲): نمای کلی سازوکار تولیدکننده‌ی حباب‌های آوادرخشنده.

کارهایی که قبل از گایتان بر روی حباب‌های گسیلنده نور انجام شده بود، مربوط به حباب‌های ناپایداری بود که تعداد زیادی از آنها، همزمان ایجاد شده و از بین می‌رفتند. با به کار بردن پراکندگی مای^۱ برای ردیابی انقباض‌ها و انبساط‌های حجمی حباب [۳-۱]، گایتان و همکارانش نشان دادند که تک حباب تولید شده در سازگان آنها که در مکان ثابتی در شکم فشاری ناشی از میدان فراصوتی درون حباب جای گرفته است، دستخوش نوسان می‌شود. بسامد نوسان حباب f ، از مرتبه صوت سینوسی محرک (معمولاً $20-40\text{ kHz}$) است. دینامیک شعاعی حباب به شدت غیر خطی است. شعاع ناواداشته (محیطی) حباب R_0 ، معمولاً حدود $5\ \mu\text{m}$ است. در هر دوره بسامد یک بار، حباب با سرعت بسیار بالایی از شعاع بیشینه $R_{\text{max}} \approx 50\ \mu\text{m}$ به شعاع کمینه $R_{\text{min}} \approx 0.5\ \mu\text{m}$ می‌رمد و حجمش حدود یک میلیون برابر کوچک‌تر می‌شود [۵]. شکل (۳-۱)، فشار محرک، شعاع و شدت نور را (از بالا به پایین) نشان می‌دهد [۶]. پس از گسیل نور، نیروی پس‌زنی ناشی از رمبش شدید، باعث انبساط حباب می‌شود. با اندازه‌گیری فاز گسیل نور نسبت به فاز صوت محرک، مشاهده می‌شود که این فرآیند با دقت فوق‌العاده‌ای تکرار می‌شود.



شکل (۳-۱): شعاع $R(t)$ ، فشار محرک $P(t)$ و شدت نور $I(t)$ اندازه‌گیری شده توسط گایتان و همکارانش [۶]. فشار تحریکی منفی باعث انبساط حباب می‌شود؛ با تغییر علامت فشار تحریکی، رمبش رخ داده و با ظاهر شدن پالس کوچک نور، SL رخ می‌دهد.

فرآیند گسیل نور از حباب‌های رمنده‌ای که توسط امواج صوتی تحریک می‌شدند، بسیار پیش از این، آوادرخش (SL) نامیده شده بود. از آن جایی که پژوهشگران با پژوهش‌های انجام شده بر روی توان تمرکز انرژی ابرهای ناشی

^۱ Mie

از حفره‌سازی، آشنا بودند و کسانی همچون فِرِنزِل^۱ و شوُلْتِر^۲ (۱۹۳۴)، نشان داده بودند که این ابرهای ناشی از حفره‌سازی به میزان کمی از خود نور گسیل می‌کنند [۷]، نتایج این پژوهش‌ها غافلگیرکننده نبودند. کمی پیش‌تر از این مورد مارینِسکو^۳ و تریلَات^۴ (۱۹۳۳) هنگام بخار گرفتن صفحات عکّاسی در حمام فراصوتی، دلیل غیرمستقیمی برای این فرآیند پیدا کرده بودند [۸]. اگر شدت رمبش‌های ابر، برای شکستن پیوندهای مولکولی درون یک جامد، کافی باشد، باعث خوردگی حفره‌ای می‌شوند [۹]. این توان بالای تمرکز انرژی ناشی از تکنیکی‌ای است که هنگام رمبش حباب وجود دارد [۱۰]: با برقرار بودن قانون بقای جرم، نیروهای داخلی باعث می‌شوند که سرعت دیواره حباب از سرعت صوت در مایع فراتر رفته و فضای درون حباب، به طور ناگهانی گرم شود. برای جامعه مهندسين، جنبه مکانیک سیالات این فرآیند، همیشه جذاب‌تر از ویژگی تولید تابش آن بوده است. دلایل فراوانی برای این گفته وجود دارد: مردم دوست دارند که بفهمند چگونه می‌توان از خوردگی حفره‌ای پیشگیری کرد و یا این که چگونه می‌توان تمرکز انرژی را مهار کرد. اگر چه از لحاظ تاریخی، گسیل نور در اندازه‌گیری ویژگی‌های حفره‌سازی مفید بوده است، تا پیش از گایتان (شناخت آوادرخش تک‌حبابی *SBSL*)، اهمیت گسیل نور مورد بررسی قرار نگرفته بود.

درخشش تک‌حباب بی‌درروی گایتان، شور عظیمی در جامعه علمی افکند؛ این شور و شوق را با نگاهی سطحی هم می‌توان دید. هر چند گسیل نور از ابرهای معمولی ناشی از حفره‌سازی (که اکنون آوادرخش چندحبابی *MBSL*^۵) نامیده می‌شود؛ مراجع ۱۱، ۱۲ و ۱۳ را ببینید) هم قابل مشاهده است، لیکن در این مورد هیچ حباب پایداری را نمی‌توان جداگانه شناسایی کرد. انگیزه پژوهش بر روی آوادرخش تک‌حبابی توسط آزمایش‌هایی پدید آمده است که گروه ست پاترمن^۶ در *UCLA* از سال ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۷ بر روی آن انجام داده‌اند. ویژگی‌های بررسی شده در این آزمایش‌ها، تفاوت‌های زیاد بین آوادرخش تک‌حبابی و چندحبابی را نشان می‌دهند. آیا برای این تفاوت‌ها (افزون بر موردی که دلیل آن را مکانیسم رمبش لرد رایلی^۷ در ۱۹۱۷ پیدا کرد) پاسخ‌های فیزیکی جدیدی وجود دارد؟ کنترل بهتر آوادرخش تک‌حبابی نسبت به همتای چندحبابی‌اش سبب شده است، مردم به انجام پژوهش‌های علمی خوب و دقیق و امکان ایجاد تکنولوژی‌های نوین برای مهار توان تمرکز انرژی در *SBSL*، امید داشته باشند.

^۱ Frenzel

^۲ Schultes

^۳ Marinesco

^۴ Trillat

^۵ Multibubble Sonoluminescence

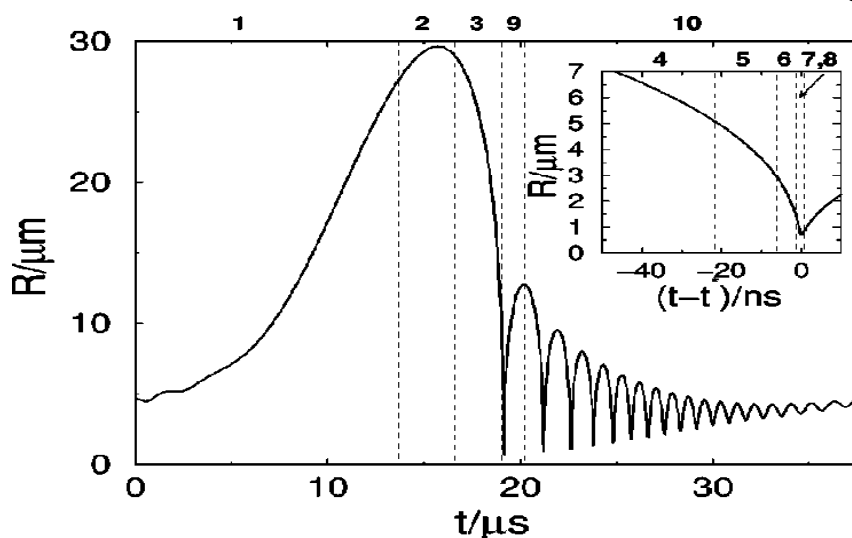
^۶ Seth Putterman

^۷ Lord Rayleigh

چنین انگیزه‌هایی در ابتدا سبب شدند که درباره شرایط بسیار شگفت‌انگیز درون حباب، همچون دما و فشار بسیار بالا، نظریه‌های بلندپروازانه‌ای پدید آید. حتی هالیوود نیز این انگیزه را پیدا کرد که فیلمی تهیه کند که ویژگی اصلی آن، ایجاد یک رآکتور همجوشی به وسیله یک تک‌حباب آوادرخشی است. با گذشت زمان هر چه مدل‌ها کامل‌تر و ظریف‌تر شدند، نتایج واقعی‌تر شدند. برای نمونه، اعتقاد عمومی پیرامون دمای بیشینه در لحظه رمبش حباب، طی یک دهه پژوهش، از تخمین‌های ابتدایی $10^8 K$ به تخمین‌های معقول‌تر امروزی حول و حوش $10^4 K$ ، اصلاح شده است.

در این چند سالی که SBSL کشف شده است، به چگونگی و چرایی رخ دادن آن بیشتر پرداخته شده است. در این جا نیز ایده‌های اساسی لازم را برای فهم کمی آوادرخش تک‌حبابی توضیح می‌دهیم و در مورد وضعیت فعلی این عرصه و چیزهایی که تاکنون شناخته شده است، دیدی کلی به دست می‌آوریم.

با نگاهی کلی به این پدیده، فرآیندهای فیزیکی بسیار متنوعی را مشاهده خواهیم کرد. این فرآیندها را می‌توان بدین صورت رده‌بندی کرد: دینامیک سیالات و آکوستیک پدیده، انتقال گرما و جرم، واکنش‌های شیمیایی و در نهایت گسیل نور. در فصل‌های بعدی به طور مختصر، جزئیات این فرآیندها را بررسی خواهیم کرد. سلسله رخدادهای آوادرخش از تحریک بالون و مایع درون آن شروع شده و تا دینامیک حاکم بر دیواره و فضای درون حباب، ادامه می‌یابد. در شکل (۴-۱)، شعاع $R(t)$ حباب به صورت تابعی از زمان در یک سیکل از تحریک، نشان داده شده است؛ در نمودار ضمیمه شده در این شکل، کمترین بازه زمانی به اندازه $60 ns$ ، حول و حوش لحظه رمبش، بزرگ شده است. در این ناحیه، دمای حباب به دلیل تراکم بی‌درروی آن، به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و نور گسیل می‌شود.



شکل (۴-۱): محاسبه کلاسیکی دینامیک حباب برای دامنه فشار تحریکی $P_a = 1.2 atm$ ، بسامد $f = 26.5 kHz$ و شعاع محیطی $R_0 = 4.5 \mu m$. یک سیکل از نوسان $R(t)$ نشان داده شده است.

با توجه به شکل بالا، حباب تا حدود ده برابر شعاع محیطی اش، منبسط می شود و سپس با سرعت زیادی می رمبد و منجر به گرم شدن بی درروی گاز درون حباب می شود. پس از رمبش، پس جهش هایی به وجود می آید. بسامد این پس جهش ها در حدود بسامد ویژه حباب است. خطوط منقطع قائم و اعداد کوچک چاپ شده در بالای نمودار، بازه های زمانی ۱-۱۰ را تفکیک می کند (هر کدام از این بازه ها به طور مختصر در فصل ۴، بررسی می شوند). در هر کدام از این بازه ها، فرآیندهای فیزیکی مختلفی مهم می باشد. در مورد این فرآیندها در سرتاسر پایان نامه بحث خواهیم کرد. نمودار ضمیمه شده، کوچک ترین بازه $60 ns$ را حول لحظه تراکم بیشینه t^* نشان می دهد. در این نمودار، شعاع حباب در لحظه رمبش رایلی، واضح تر نشان داده شده است.

در باقی مانده این مقدمه، نگاهی کلی به حقایق تاریخی و تجربی برجسته موجود در این زمینه خواهیم انداخت و به طور کیفی، ایده ها و موضوعاتی را بررسی می کنیم که در درک این پدیده مؤثر هستند.

۱-۲ نگاهی تاریخی

پس از کشف گایتان، نخستین هدف پژوهش ها، تعیین بازدهی یک تک حباب در متمرکز کردن انرژی بود. برای رسیدن به این هدف، باربر^۱ و همکارانش [۵ و ۱۴]، با مطالعه پاسخ یک لوله فوتون افزا^۲ به تابش ناشی از آوا درخش، پهنای پالس نوری را اندازه گرفتند. پهنای این پالس کمتر از $50 ps$ بود. اهمیت این اندازه گیری در این است که این اندازه پهنای پالس، از مدت زمانی که حباب در متراکم ترین حالتش باقی می ماند، بسیار کوچک تر است. مقیاس زمانی تراکم حباب، به طور تقریبی از طول بازه زمانی ای به دست می آید که یک موج صوتی در آن بازه، شعاع کمینه حباب را می پیماید. با سرعت صوت $c \sim 1000 m/s$ ، تخمین $R_{min}/c \sim 10^{-9} s$ به دست می آید که بسیار بیشتر از پهنای پالس اندازه گیری شده است. در مکانیسم حفره سازی لرد رایلی، تمرکز انرژی همزمان با رمبش حباب است: این تناقض ما را به این نکته می رساند که در *SBSL*، گسیل نور مستقل از دینامیک حباب است.

بدین ترتیب جامعه علمی تهییج شد و پژوهش بر روی مکانیسم درست این پدیده آغاز شد. نخستین ایده مؤثر این بود که عامل تمرکز انرژی در حباب، یک ضربه^۳ کروی همگرا است [۱۵-۱۷]. از کار مهم گدرلی^۴ (۱۹۴۲) به این نکته پی برده شده بود که چنین ضربه هایی انرژی را متمرکز می کنند و دمای گاز بدون اتلاف به بینهایت واگرا می شود [۱۸]. پیش از این، جارمن^۵ (۱۹۶۰) امواج همگرا را به عنوان سرچشمه آوا درخش چندحبابی پیشنهاد کرده بود [۱۹]. (چون در این تصویر، نور از ناحیه بسیار کوچک تری در مرکز حباب سرچشمه می گیرد) با ترکیب این

^۱ Barber

^۲ Photomultiplier

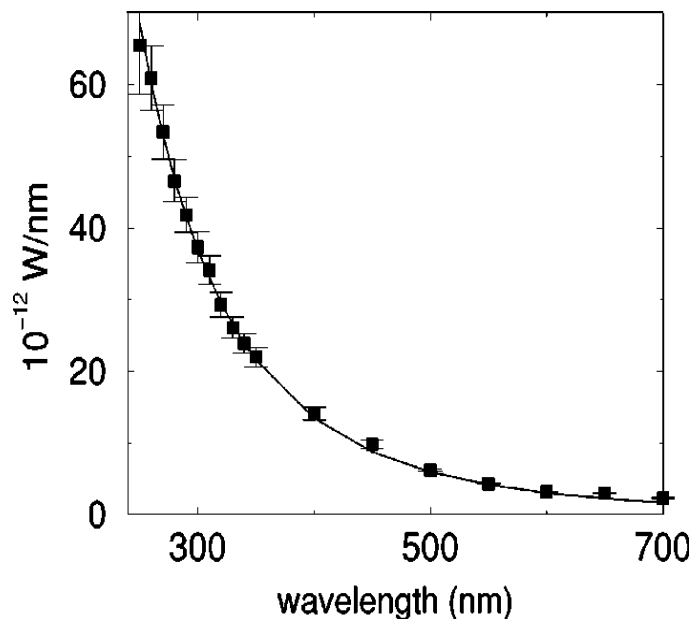
^۳ Shock

^۴ Guderly

^۵ Jarman

روش با مکانیسم رمبش حباب لرد رایلی، مکانیسم زیبایی برای تمرکز انرژی به دست می‌آید که مسأله پهنای پالس نوری را با دقت بالایی حل می‌کند. در پی این کارها، شبیه‌سازی وو^۱ و رابرت^۲ (۱۹۹۳) به دمای بیشینه $1.0^8 K$ ، که واقعاً بسیار داغ است، دست یافت [۱۶].

طی چندین سال، داده‌های تجربی بسیاری درباره حباب‌های آوادرخنده جمع‌آوری شده است. هیلر^۳ و همکارانش (۱۹۹۲، ۱۹۹۴ و ۱۹۹۸) طیف حباب هوای آوادرخشنده درون آب را اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که شدت طیف در حرکت به سمت ناحیه فرابنفش، افزایش می‌یابد (شکل (۱-۵)) [۲۰-۲۲]. قله ظاهر شده در برخی طیف‌ها به دلیل جذب شدید طول‌موج‌های زیر 200 nm توسط آب درون بالون است. آوادرخش تک‌جایی در تمایزی آشکار با طیف *MBSL*، دارای طیف پیوسته بدون خطوط طیفی است (شکل (۱-۶) را ببینید). از آنجایی که گذارهای اتمی که منجر به خطوط می‌شوند، توسط فرآیندهای گسیل پیوسته در دماهای بالا، محو می‌شوند، نقاط خطوط طیفی در دماهای پایین‌تر قرار دارند. هیلر و همکارانش (۱۹۹۲)، با مقایسه طیف مشاهده شده با طیف گسیل شده از جسم سیاه، مانند کاری که در شکل (۱-۵) انجام شده است، به این نتیجه رسیدند که حداقل دمای گاز، 25000 K است [۲۰].

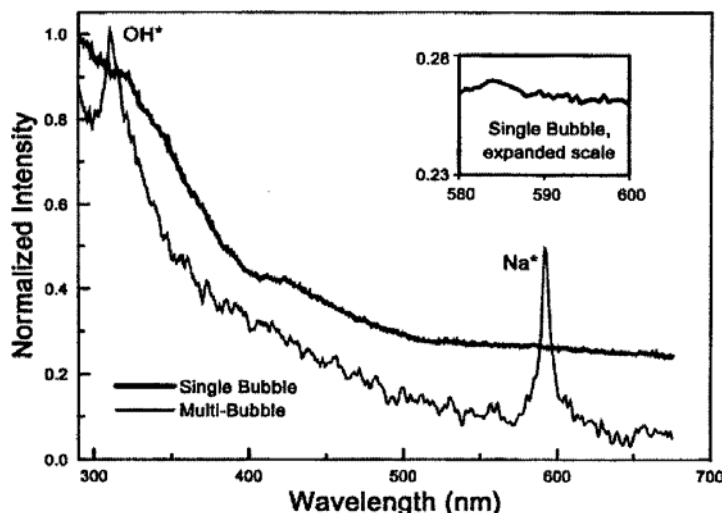


شکل (۱-۵): طیف آوادرخش تک‌جایی درون آب با دمای $22^\circ C$. نقاط داده‌ای مربوط به این شکل از شکل (۱) مرجع [۲۰] متعلق به هیلر و همکارانش باز ترسیم شده است. با متناسب کردن این نقاط با طیف جسم سیاه مربوط به دماهای مختلف، دماهای مختلفی را می‌توان پیشنهاد کرد. بهترین نتیجه که در این جا به دست می‌آید، حدود 40000 K (خط سیاه) است که از مقدار 25000 K که توسط هیلر و همکارانش پیشنهاد شده است [۲۰]، بسیار بیشتر است.

^۱ Wu

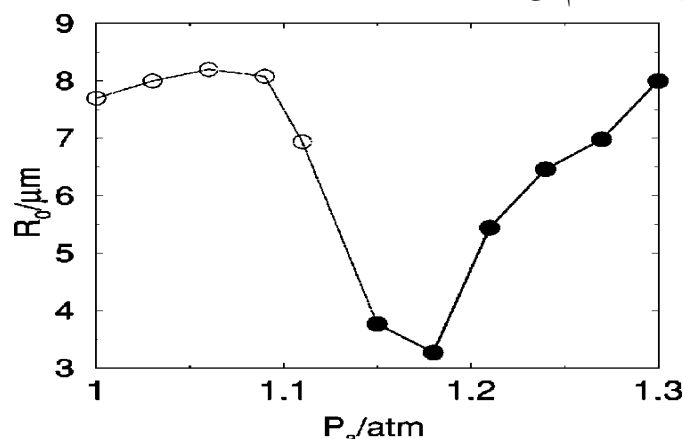
^۲ Roberts

^۳ Hiller



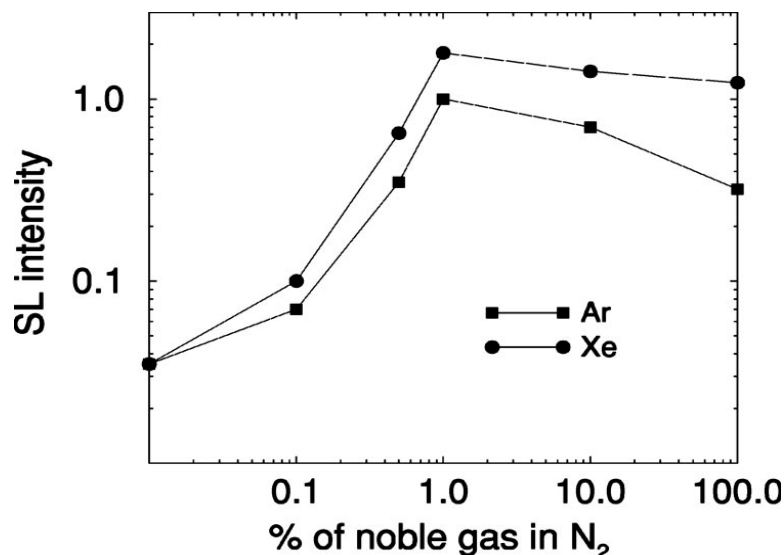
شکل (۶-۱): طیف *MBSL* (خط نازک) و *SBSL* (خط کلفت) در محلول کلرید سدیم $0.1M$. طیف‌ها نسبت به شدت بیشینه‌شان، بهنجار شده‌اند. به برجستگی طیف *MBSL* ناشی از خط سدیم در حوالی 589 nm و نبودن این برجستگی در طیف *SBSL*، توجه کنید [۱۵۱].

باربر و همکارانش (۱۹۹۴) نشان دادند که هم شدت نور و هم دامنه نوسانات حباب، تنها نسبت به دامنه فشار محرک حساس نیستند بلکه نسبت به غلظت گاز حل شده در مایع، دمای مایع، یا مقادیر کم ناخالصی‌های فعال سطحی هم حساس هستند [۲۳-۲۵]. در شکل (۷-۱)، باربر و همکارانش (۱۹۹۴)، بستگی $R(t)$ و شدت کل نور را به دامنه تحریک حباب هوا در آب، نشان داده‌اند [۲۶]. هنگامی که دامنه تحریک افزایش می‌یابد، اندازه حباب به طور ناگهانی کاهش می‌یابد و پس از آن، نور پدیدار می‌شود. برای چندین سال، استدلال دقیق برای این حساسیت (که مکرراً در آزمایشات مشاهده می‌شد) مشکل بود، زیرا اغلب تغییر یکی از پارامترهای آزمایشگاهی مانند دمای آب، منجر به تغییر دیگر پارامترها هم می‌شود.



شکل (۷-۱): شعاع محیطی به صورت تابعی از دامنه فشار تحریکی P_a ، برای مخلوط گازی ۵٪ آرگون و ۹۵٪ نیتروژن در فشار 150 mm . علامت‌های توپر مربوط به حباب‌های آوادرخشده و علامت‌های توخالی مربوط به حباب‌های بدون درخشش هستند. به کاهش ناگهانی اندازه حباب، درست قبل از آستانه آوادرخش توجه داشته باشید [۹۴].

شاید شگفت‌انگیزترین یافته هیلر و همکارانش (۱۹۹۴)، یافتن حساسیت نسبت به نوع گاز درون حباب باشد [۲۱]: هنگامی که هوای حل شده در مایع با نیتروژن خالص جایگزین شود، پایداری ویژگی‌های *SBSL* از بین می‌رود. با گازی مرکب از ۸۰٪ نیتروژن و ۲۰٪ اکسیژن، هنوز هیچ آوادرخشی وجود نخواهد داشت. تنها هنگامی که گاز نجیب آرگون افزوده شود، گسیل نور *SBSL* باز خواهد گشت. شکل (۸-۱)، نموداری را



شکل (۸-۱): شدت آوادرخش (که با شدت به دست آمده از حباب هوا، بهنجار شده است) به صورت تابعی از درصد مولی گاز نجیب مخلوط شده با نیتروژن. در این شکل دو نوع گاز نجیب نشان داده شده است: زینون (●) و آرگون (■). در هر دو مورد، بیشینه شدت نور، در اطراف ۱٪ انحلال قرار دارد [۹۴].

از شدت آوادرخش به صورت تابعی از درصد گاز نجیب اضافه شده در نیتروژن، نشان می‌دهد. هم برای آرگون و هم برای زینون، حول ۱٪ غلظت آرگون در هوا، دارای قله است.

SBSL را با گاز نجیب خالص، در گستره‌ای بسیار گوناگون از غلظت‌های گاز، هم می‌توان به دست آورد: گایتان در نخستین آزمایش با هوا (۱۹۹۰)، با انجام گاززدایی، از فشار جزئی $0.4 - 0.2 \sim P_{\infty}^{air} / P_0$ استفاده کرد و گسیل نور پایداری را مشاهده کرد [۲]؛ چنین آبی اگر با فشار $P_0 = 1 \text{ bar}$ ، در تعادل اشباع قرار داشته باشد، حاوی ۲۰-۴۰٪ هوا خواهد بود. باربر و همکارانش (۱۹۹۵)، نشان دادند که هنگامی که از گاز آرگون خالص استفاده می‌شود، گاززدایی باید ۱۰۰ برابر قوی‌تر شود و برای به دست آوردن *SBSL*، فشار جزئی‌ای به کمی $0.04 - 0.02 \sim P_{\infty}^{Ar} / P_0$ نیاز است [۲۷]. فشار P_0 ، فشار جزئی گاز استفاده شده در آزمایش، هنگام مهیا کردن مایع گاززدایی شده است.

در این مدت، باور عمومی در این عرصه این بود که ضربه‌ها، اساس تمرکز انرژی و گسیل نور از آوادرخش هستند. با این همه، در مورد جزئیات چگونگی انجام این فرآیندها، توافق کوچکی وجود دارد و مکانیسم‌های فیزیکی

بسیاری غیر از این پیشنهاد شده است. این مکانیسم‌ها شامل این موارد هستند: شکست دی‌الکتریک گاز [۲۸-۳۰]، گسیل نور شکست-القاء [۳۱]، تابش ترمزی [۳۲ و ۳۳]، گسیل برخورد-القاء [۳۴-۳۶] و حتی اثر کازمیر^۱ کوانتوم-الکترو دینامیکی [۳۷ و ۳۸] که ایده اصلی آن به شوینگر^۲ (۱۹۹۲) تعلق دارد [۳۹].

مشکل ایده‌های مطرح شده این است که ارزیابی آنها نیازمند بررسی رمبش حباب با دقتی بسیار فراتر از دقت امکانات آزمایشگاهی است. این امر، رابرت آپفل^۳ را بر آن داشت تا در جلسه‌ای پیرامون آوادرخش در همایش سالانه انجمن آکوستیک آمریکا در هونولولو^۴ در سال ۱۹۹۶، بحث "مبارزه طلبی نظریه پردازان" را مطرح کند. هدف این مبارزه، ملموس و تجربی کردن پیش‌بینی‌ها بود. ایده‌های خلاق بسیاری در این همایش حضور داشتند که امروزه تنها کسری از آنها دوام آورده‌اند. یکی از اولین نتایج این همایش نظریه‌ی مشدد آکوستیکی بود که به دست کسانی که بر روی ذخیره انرژی در حباب کار می‌کردند [۴۰]، توسعه داده شد.

در تمام این مدت، این مطلب آشکار بود که بیشتر حقایق تجربی آوادرخش که با نظریه کلاسیکی دینامیک حباب توصیف می‌شدند، به گسیل نور ربطی نداشتند. مقیاس زمانی گسیل نور آن قدر از یک سیکل کامل تحریک آکوستیکی کوچک‌تر است که دینامیک حباب با توضیح موضوعاتی همچون پایداری حباب و محدودیت‌های پارامترهای فعال، بسیار فاصله دارد. تا جایی که لرد رایلی سرشت رمبش حفره‌ها را مشخص کرده است [۱۰]، دینامیک حباب به خوبی قابل درک است ولی با وجود پختگی کامل، این نظریه را برای پیش‌بینی سازوکار آوادرخش تک‌حبابی، هرگز نمی‌توان به کار برد.

دینامیک کلاسیکی حباب *SBSL*، شرایط تجربی را به طور اصولی توضیح می‌دهد. اولین مورد از این توضیحات در مقاله اول گایتان و همکارانش (۱۹۹۲) آورده شد که نشان دادند، شعاع حباب که تابع زمانی تجربی آن به دست آمده است، رفتاری مشابه با حل معادله رایلی-پلسست^۵ دارد [۲]. به دنبال آن، مطالعات لُفسِتد^۶ و همکارانش (۱۹۹۳)، (۱۹۹۵)، این نتایج را تأیید و به طور مفصل شرح دادند [۴۱ و ۴۲]. نظریه رایلی-پلسست فوق‌العاده ساده است و جنبه‌های مهم بسیاری از آوادرخش تک‌حبابی را در بر می‌گیرد. برای کسانی که با دینامیک کلاسیکی حباب کار می‌کردند، این توافق عالی واقعاً شگفت‌انگیز بود، زیرا در مدتی که این نظریه شناخته شده بود، حتی برای حباب‌هایی که تحریک آنها از حباب‌های *SBSL* ضعیف‌تر است، تناقضات بزرگی را نشان می‌داد [۴۳]. در سازوکار پارامتری *SBSL*، تحریک دوره‌ای امواج فشاری درون ظرف، منجر به پاسخ دوره‌ای حباب می‌شود که دقیقاً در هر دوره یک

^۱ Casimir

^۲ Schwinger

^۳ Robert Apfel

^۴ Honolulu

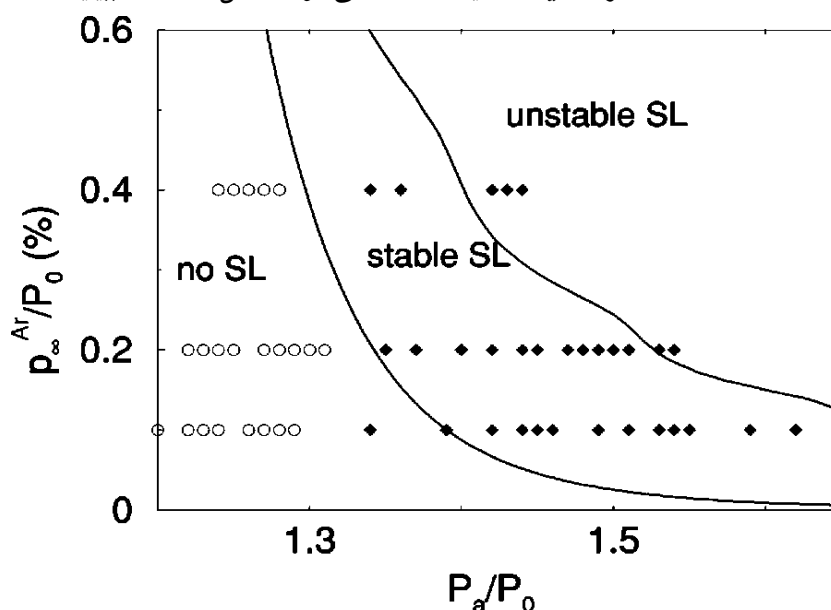
^۵ Rayleigh-Plesset

^۶ Löffstedt

ریمبش حفره‌ای رخ می‌دهد. در این فرآیند حرکات آشوبی به گونه‌ای چشمگیر وجود ندارد [۴۴ و ۴۵]. جنبه‌های کیفی و حتی بیشتر جنبه‌های کمی نوسانات حباب، با مشاهدات تجربی سازگار هستند. جواب معادله اعتبار آن را از بین می‌برد: در لحظه ریمبش حفره‌ای، سرعت دیواره حباب برابر یا فراتر از سرعت صوت است که بر خلاف فرضیات ضروری مسئله است. از آن جایی که مدت زمان فراصوت شدن دیواره حباب، کسر کوچکی از یک سیکل می‌باشد، خطای ناشی از آن اثر خاصی بر روی باقی سیکل ندارد.

اگر جواب‌های معادله رایلی-پلست، با اندازه‌گیری‌های تجربی شعاع حباب توافق داشته باشند، پایداری این جواب‌ها، فضای پارامتری را که در آن *SBSL* رخ می‌دهد، محدود می‌کند [۴۰، ۴۶ و ۴۷]. برای حباب سه ناپایداری عمده وجود دارد که باید از آنها دوری جست: (الف) ناپایداری‌های شکلی: شکل حباب نباید تغییر کند [۴۶ و ۴۷]؛ (ب) ناپایداری پخشی: با گذشت زمان، تعداد میانگین مولکول‌های گاز درون حباب، نباید تغییر کند [۴۷ و ۴۸]؛ (ج) ناپایداری ژرگنس^۱: حباب از دام آکوستیکی که آن را در بر گرفته است، نباید بیرون بیفتد [۴۹-۵۱]. برای سازوکار پارامتری‌ای که در آن آوادرخش رخ می‌دهد و نوسانات حباب غیرخطی است، این محدودیت‌ها بایستی برآورده شوند. بنابراین، فضای پارامتری مجاز *SBSL*، به گستره محدودی از غلظت‌های نسبی گاز

$c_{\infty}/c_0 = P_{\infty}/P_0$ و دامنه‌های فشار محرک P_a ، شدیداً محدود می‌شود (شکل (۹-۱) را ببینید).



شکل (۹-۱): نمودار فاز p_{∞}^{Ar}/P_0 بر حسب P_a/P_0 در فضای پارامتری، بر اساس نظریه هیدرودینامیکی/شیمیایی هیلگنفلت و همکارانش [۴۷] و لاس و همکارانش [۵۲]. نوسان تحریک $f = ۳۳/۴ \text{ kHz}$ است. سه فاز *SL* پایدار، *SL* ناپایدار و بدون *SL*، نشان داده شده است. علامت‌ها، نتایج به دست آمده اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهند [۵۴]. حباب‌های آوادرخشده پایدار با (◆) و حباب‌های بدون پایدار بدون آوادرخش با (O) مشخص شده‌اند. توافق خوبی بین اندازه‌گیری‌ها و پیش‌بینی‌های نظری وجود دارد.

^۱ Bjerknes