



## مطالعه تجربی دینامیک رشد و جدایش حباب منفرد از مجرای زیرآبی در ستون مایع به روش انتشار آوایی غیرفعال

امیر اکبری سولا<sup>۱</sup> و محمدرضا انصاری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> استاد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

### چکیده

در پژوهش حاضر، دینامیک مرتبط با رشد و جدایش حباب منفرد به کمک دو روش تجربی انتشار آوایی غیرفعال و تصویربرداری با نرخ فریم بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. همگام‌سازی تصویربرداری با داده‌برداری آکوستیک، قابلیت بالای روش‌های مبتنی بر انتشار آوایی را در مطالعه دینامیک رشد و جدایش حباب به اثبات رساند. بررسی‌ها نشان داد که بیشینه‌ی دامنه‌ی نوسانات در سری زمانی سیگنال انتشار آوایی، اندکی قبل از لحظه‌ی جدا شدن حباب از مجرا رخ می‌دهد و در این لحظه نرخ افزایشی حجم حباب در حال کند شدن می‌باشد. از روی فرکانس غالب موج انتشار آوایی که در همین زمان رخ می‌دهد، اندازه‌ی حباب تخمین زده شده است که براساس رابطه‌ی میناерт با ضرائب تصحیح، تنها ۱/۳۷ درصد با نتایج حاصل از پردازش تصویر اختلاف دارد. مطابق توالی تصاویر ثبت شده از مراحل رشد حباب، نسبت طول محورهای عمودی و افقی حباب همواره در طول زمان رشد حباب در حال تغییر است و حباب زمانی از مجرا جدا می‌شود که این نسبت به ۱ نزدیک شود؛ هرچند در این لحظه به دلیل نیروهای فشاری، حباب شکل کروی ندارد.

**کلمات کلیدی:** مطالعه تجربی؛ رشد و جدایش؛ حباب منفرد؛ انتشار آوایی؛ تصویربرداری پرسرعت.

## Experimental Study of a Single Bubble Growth and Detachment from a Submerged Orifice in the Liquid Column Using Passive Acoustic Emission

A. Akbari Sula<sup>1</sup>, M. R. Ansari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

In the present study, the dynamics associated with single bubble growth and its detachment has been studied using passive acoustic emission and high frame rate imaging methods. Synchronization of imaging with acoustic data acquisition demonstrated the functionality of the acoustic emission method in studying the dynamics of bubble growth and detachment. The investigations showed that the maximum amplitude of the oscillations in the time series of the acoustic emission signal occurs shortly before the bubble detaches. Instantly the rate of bubble volume rise is decelerating, in accordance with the dominant frequency of the acoustic emission wave that arises at the same time with the jump in acoustic time series, the bubble size based on the Minnaert equation with the corrected coefficients is estimated to be only 1.37% different from the results of image processing. According to the sequence of images recorded from the bubble growth frames, the ratio of the vertical and horizontal axis lengths of the bubble is continually changing during the bubble growth period and eventually, the bubble detaches from the orifice when the ratio approaches 1. Although by detachment, the bubble does not have a spherical shape due to the pressure forces.

**Keywords:** Experimental Study; Growth and Detachment; Single Bubble; Acoustic Emission; High Frame Rate Imaging.

## ۱- مقدمه

وجود حباب در یک سامانه‌ی دو یا چند فاز تأثیر انکارناپذیری در وقوع پدیده‌ها و انجام فرایندها دارد. حباب می‌تواند به صورت خودبخودی یا غیرخودبخودی تشکیل شود؛ اما در هر حال روی هیدرودینامیک، انتقال حرارت، انتقال جرم و سایر ویژگی‌های سامانه تأثیرگذار است. رفتار حباب‌ها در مراحل مختلف عمر آن‌ها از مرحله‌ی تشکیل تا ترکیدن، در فرایندهای مهمی از جمله جداکننده‌ها و جذب-کننده‌های گاز-مایع، تخمیر، خلاءزایی<sup>۱</sup>، جوشش، برکافت<sup>۲</sup> و ستون‌های حباب‌دار موثر بوده و مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

یک روش عمومی برای تشکیل غیرخودبخودی حباب، تزریق مستقیم گاز به درون مایع است که عمدتاً به وسیله‌ی یک محیط متخلخل، فیلتر یا نازل انجام می‌شود. این روش به دلیل قابلیت اطمینان و کنترل برای تولید حباب‌هایی با اندازه‌ی مشخص، علاوه بر کاربردهای صنعتی در بررسی‌های آزمایشگاهی نیز بکار می‌رود. پارامترهایی نظیر نرخ جریان هوا، فشار هوا، ساختار فیزیکی و هندسی مجرای تزریق و نیز مشخصات فیزیکی گاز و مایع در شکل‌گیری رژیم‌های تشکیل حباب حائز اهمیت هستند.

چندین نیرو در تشکیل حباب نقش بازی می‌کنند که مهم‌ترین آن‌ها در شکل ۱ معرفی شده‌اند. نیروی شناوری<sup>۳</sup> موثرترین نیرو در حرکت صعودی حباب می‌باشد. این نیرو از اختلاف چگالی سیال مایع و گاز ناشی شده و مستقیماً از اختلاف چگالی دو فاز و همچنین حجم حباب تأثیر می‌پذیرد. این نیرو همواره به سمت بالا و در خلاف جهت گرانش عمل می‌کند و به دلیل بالا بودن چگالی مایعات نسبت به گازها، این نیرو همواره مقدار قابل توجهی دارد [۱]. نیروی بالابرنده‌ی دیگر، نیروی ناشی از مومنتوم گازهای ورودی به داخل مایع است. نیروهای مومنتوم محصول حرکت شتاب‌دار هستند و در مورد حباب مقدار این نیرو با شعاع مجرای ورودی هوا رابطه‌ی عکس دارد [۲].

اولین نیرویی که پس از شکل‌گیری اولیه‌ی حباب در جهت جلوگیری از رشد آن وارد عمل می‌شود، نیروی کشش سطحی<sup>۴</sup> است. این نیرو به دلیل وجود خاصیت کشش سطحی در مایعات بوده و با مساحت مقطع اریفیس رابطه مستقیم دارد. هرچه حباب بزرگ‌تر شود، نیروی کشش سطحی کاهش می‌یابد [۳]. دیگر نیروی مقاوم در برابر جدا شدن حباب، نیروی پسای لزج<sup>۵</sup> است. مقدار این نیرو قبل از جدا شدن حباب، متناسب با سرعت بالارفتن مکان مرکز جرم حباب است. در سیالات با چگالی بالاتر، نیروی پسا بیشتر است. بعلاوه، حباب‌های بزرگ‌تر برای اینکه بتوانند از مجرا جدا شوند بایستی به نیروی پسای بزرگ‌تری غلبه کنند [۴]. آخرین نیرو از نیروهایی که تلاش می‌کند از جدا شدن حباب جلوگیری کند، نیروی جرم افزوده<sup>۶</sup> است. این نیرو به دلیل رشد حباب و در نتیجه تلاش آن در جابجا کردن سیال اطرافش است. در واقع نیروی جرم افزوده را می‌توان به صورت مقاومت سیال مایع در مقابل تغییراتی که در سطح مشترک حباب رخ می‌دهد تعریف کرد؛ همچنین، آخرین نیرویی که روی حباب اثر کرده و به جدا شدن آن کمک می‌کند، نیروهای فشاری است. ویژگی‌های فیزیکی سیال مایع یعنی چگالی و کشش سطحی و همچنین اندازه حباب در حال تشکیل در مقدار این نیرو نقش دارند. نیروی فشاری با بزرگ‌تر شدن اندازه‌ی روزنه افزایش محسوسی می‌یابد [۵].

نیروهای عمل‌کننده روی حباب ثابت نیستند و تغییرات آن‌ها تحت اثر پارامترهای مختلف، به ایجاد وضعیت‌های مختلفی در تشکیل حباب منجر می‌شوند که از آن به رژیم تشکیل یاد می‌شود. اگر بتوان وضعیتی را برای تشکیل حباب متصور شد که در آن فشار جریان هوای تغذیه با فشار درون حباب برابر باشد، در این حالت تزریق هوا باعث کاهش شعاع انحنای سطح مشترک گاز و مایع به مقدار کمینه خواهد شد که برابر شعاع داخلی مجرا است. به این ترتیب مقدار کمینه خط تامین هوا مطابق رابطه‌ی (۱) است [۶].

<sup>4</sup> Surface Tension

<sup>5</sup> Viscous Drag

<sup>6</sup> Added Mass

<sup>1</sup> Cavitation

<sup>2</sup> Electrolyze

<sup>3</sup> Buoyancy

تناوب جدا شدن حباب مستقیماً به نرخ جریان ارتباط دارد. رابطه‌ی (۲) ارتباط حجم حباب با شعاع مجرا را از روی بالانس نیروهای استاتیکی بیان می‌کند [۷].

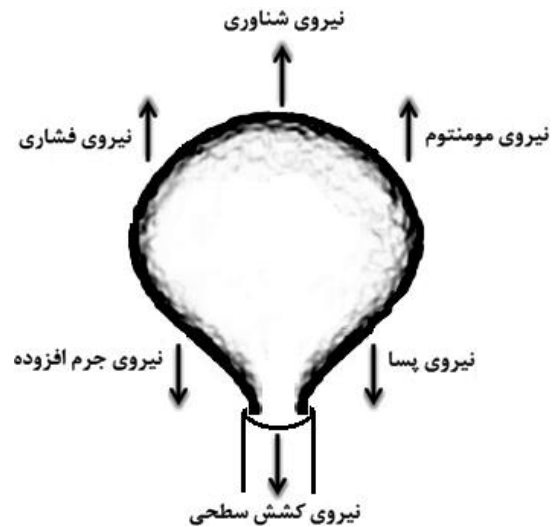
$$V_b = \frac{2\pi r_n}{(\rho_L - \rho_G)g} \quad (2)$$

در طول سال‌ها پژوهشگران مختلف روش‌های عددی متعددی را مورد استفاده قرار داده اند تا خصوصیات مختلف جریان‌های دوفازی حباب‌دار را مطالعه کنند. همواره جهت اعتباردهی به نتایج بررسی عددی و درک بیشتر فیزیک حاکم بر مسئله، به روش‌های تجربی مطمئنی نیاز است. روش‌های مبتنی بر صوت و در راس آن‌ها روش انتشار آوایی غیرفعال<sup>۲</sup> از جمله روش‌هایی است که امروزه به سبب قابلیت‌های ویژه‌اش مورد توجه محققان قرار گرفته است.

ریشه‌ی روش‌های مبتنی بر انتشار آوایی به تئوری صدای آب برمی‌گردد که در سال ۱۹۳۳ توسط مارسل میناوت [۸] پایه‌گذاری شد. وی که در حین پژوهش روی صدای تولیدی از آب در حال حرکت، سعی کرد آب را به کمک ورود حباب از یک مجرای غوطه‌ور به حرکت درآورد؛ او برای اولین بار انتشار آوایی حباب را مورد مطالعه قرار داده و ادعا کرد صدای اصلی گسیل شده از حباب نه به دلیل ترکیدن، بلکه به دلیل تشکیل آن است. میناوت با بکار گرفتن قضیه‌ی کار و انرژی روی نوسان سطح حباب، تناظری یک به یک بین فرکانس موج صوتی و اندازه حباب مطابق رابطه (۳) پیشنهاد کرد. بعدها این رابطه با توسعه یافتن نظریه نوسانات کم‌دامنه حباب توسط پلست و پروسپرتی [۹] با اضافه شدن اثر کشش سطحی تکمیل‌تر شد.

$$f = \frac{1}{2\pi r_{eq}} \sqrt{\frac{3\gamma P_{\infty}}{\rho}} \quad (3)$$

رابطه‌ی (۳) با فرض آدیاباتیک بودن فرایندهای به وقوع پیوسته روی گاز درون حباب است. این درحالیست که پلست و پروسپرتی ادعا کردند، این فرض تنها برای حباب‌های بسیار بزرگ می‌تواند منطقی باشد و در غیر این صورت بایستی فرایند پلی‌تروپیک در نظر گرفته شود. لونگت هیگنز و همکاران [۱۰] با مطرح کردن اثر میرایی حرارتی، موفق



شکل ۱- دیاگرام نیروهای وارده به حباب هنگام تشکیل

$$P_{C,min} = P_{\infty} + 2\sigma/r_{eq} \quad (1)$$

اگر فشار خط تغذیه در نزدیکی مقدار اظهار شده در رابطه‌ی (۱) باشد، رژیم تشکیل فشار پایین و اگر فشار تغذیه بسیار بالاتر باشد، رژیم تشکیل فشار بالا رخ می‌دهد. تعادل نیروها در هر کدام از حالت‌ها فراز و نشیب‌های مختلفی را تجربه می‌کند که باعث تغییر در شکل حباب می‌شود. در رژیم فشار پایین، نیروی شناوری در لحظه‌ی جدا شدن در حال مقابله با نیروهای جرم افزوده و پسا است. مرتبه بزرگی نیروهای مقاوم کمتر از نیروی شناوری است؛ لذا حباب در راستای عمودی کشیدگی پیدا کرده و به شکل بیضی از مجرا جدا می‌شود. این درحالیست که در رژیم‌های فشار بالا اگرچه نسبت طول محور عمودی و افقی حباب در لحظه‌ی جدا شدن نزدیک به ۱ است، اما وجود نیروهای فشاری قوی باعث می‌شود، حباب شکل کروی نداشته و شکل خم پروانه‌ای<sup>۱</sup> به خود بگیرد [۵].

از منظر تغییر در نرخ جریان، وضعیت تشکیل حباب در سه دسته‌ی تشکیل تک‌حباب، جفت شدن و به هم پیوستگی چندین حباب قرار می‌گیرد. در نرخ جریان پایین، نیروهای دینامیکی عملاً در وضعیت نهایی حباب تشکیل شده موثر نیستند. در این حالت اگر نرخ جریان خیلی کم باشد، حجم حباب بدون توجه به تغییرات نرخ جریان، ثابت مانده و زمان

<sup>2</sup> Passive Acoustic Emission

<sup>1</sup> Lemniscate

استفاده از روش‌های مختلف در کنار هم به منظور بررسی دینامیک حاکم بر تشکیل حباب نیز مفید است. برای نمونه با همگام کردن تصویربرداری و داده‌برداری آکوستیک، وقوع جریان فواره‌ای داخل رونده از سیال مایع به حباب تشخیص داده شده و الگوی سیگنال متناظر با این پدیده در سری زمانی نوسانات فشار بدست آمده است [۱۳]. به لطف توسعه تجهیزات رایانه‌ای، مدلسازی نویزهای صوتی نیز مورد توجه قرار گرفته است. مقایسه سیگنال انتشار آوایی با خروجی‌های مدل کامپیوتری به درک بهتر فیزیک نهفته در سیگنال‌ها کمک می‌کند؛ همچنین نتایج روش عددی و تجربی در تخمین اندازه‌ی حباب مطابقت خوبی با هم نشان می‌دهند. لیو و همکاران در این پژوهش، تولید شدن موج صوتی از حباب را همزمان با جدا شدن آن از مجرا دانسته‌اند [۱۴]. این در حالی است که مطالعات جدیدتر که به روش تجربی و به کمک مدل‌های دقیق ریاضی انجام شده است، تولید موج فشاری از حباب را همزمان با مرحله انبساط حباب دانسته و دلیل آن را انبساط سریع حباب بیان کرده‌اند [۱۵].

پژوهش حاضر را در سایه طراحی و ساخت یک بستر آزمون ساده و کارآمد، می‌توان یک تلاش نوآورانه دانست. زیرا برخلاف تحقیقات مشابه در این حوزه که سخت-افزارهای مورد استفاده تنها برای رصد کردن حباب هوا در داخل سیال آب کارآمد است، در این پژوهش از المان ساده و ارزان قیمت پیزوالکتریک استفاده شده است که با تغییر در جنس سکه‌ی آن می‌توان انتشارات آوایی حاصل از حباب را در داخل انواع سیالات مایع ثبت کرد. مدار تقویت و فیلتر کردن سیگنال نیز به راحتی برای انواع محیط‌های دوفازی قابل تنظیم است. در این پژوهش با همگام‌سازی سیگنال و تصویر، تناظر هر قسمت از سیگنال با تصویر حباب در همان لحظه بررسی شده است. این بررسی کمک می‌کند تا مکانیزم تولید صدا و زمان انتشار آن مشخص شود. به این ترتیب می‌توان تعیین کرد که فرکانس غالب صوت گسیل شده با اندازه‌ی حباب در کدام مرحله از تشکیل آن متناظر است. ضمناً در این مطالعه برخلاف مطالعات پیشین، با اعمال مدل‌های حرارتی رابطه‌ی میناثرت تصحیح شده و سپس مورد استفاده قرار گرفته است.

شدند نمای پلی‌تروپیک را برای تصحیح رابطه‌ی میناثرت محاسبه کنند. بعدها مطالعات دقیق‌تری روی جریان‌های دوفازی به کمک روش انتشار آوایی غیرفعال انجام گرفت. بوید و وارلی [۱۱] با مروری بر پژوهش‌هایی که در زمینه انتشار آوایی غیرفعال در گذشته انجام شده بود، تلاش کردند مزایا و معایب این روش را برجسته‌تر کرده و افق مطالعات آتی در این زمینه را تصویر کنند. بر همین اساس نتیجه شد که در بیشتر موارد سیگنال‌های انتشار آوایی را می‌توان با هر یکایی گزارش کرد؛ چرا که تنها تغییرات نسبی سیگنال در حین تغییر با زمان، اطلاعات مهمی در مورد فرایند به دست می‌دهد؛ همچنین براساس این نتایج، در بیشتر فرایندها، محتوای فرکانسی سیگنال برای تمیز دادن آن از نویزهای پس‌زمینه کافی است؛ البته این مسئله با پیچیدگی‌هایی در تحلیل سیگنال همراه است.

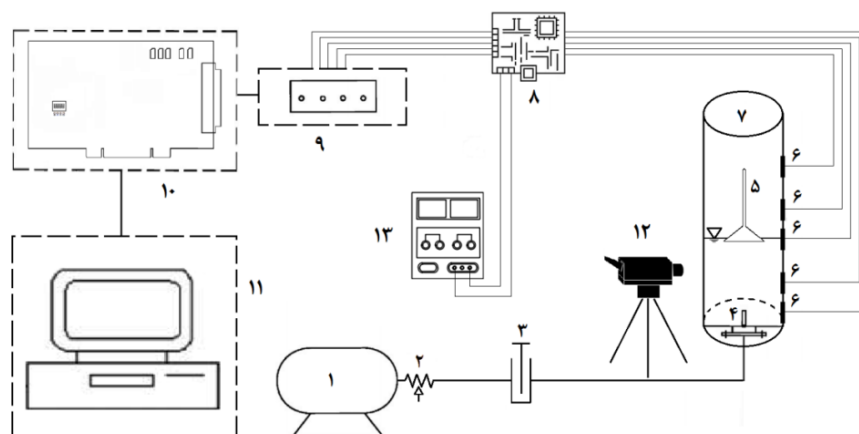
کارایی روش انتشار آوایی در مقایسه با سایر روش‌های تجربی متداول، در مطالعه‌ی واسکز و همکاران [۱۲] با تمرکز بر روی محاسبه‌ی اندازه‌ی حباب مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از روش قیف وارون به عنوان روش مرجع استفاده شده که در این آزمایش خطای تکرارپذیری در حدود ۰/۵ درصد دارد. محققان در این پژوهش المان پیزوالکتریک را جایگزین هیدروفون تجاری کرده و نشان دادند، این وسیله می‌تواند سیگنال‌های انتشار آوایی ساطع شده از حباب‌هایی با شعاع ۱/۳۹ تا ۲/۴۵ میلی‌متر را ثبت کنند. نکته‌ی حائز اهمیت، غیرخطی بودن پاسخ حسگر در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس تشدید است.

با استفاده از روابط تحلیلی برای برازش مرزهای حباب، نتایج حاصل از تصویربرداری ۸۶ تا ۹۹ درصد با نتایج روش قیف وارون مطابقت دارد و خطای تکرارپذیری برای آن ۵ درصد است. با بهبود شکل برازش شده حباب روی تصویر، صحت نتایج تصویربرداری به محدوده‌ی ۹۰ تا ۹۸ درصد با خطای تکرارپذیری ۱ درصد ارتقا یافت. با این حال، روش انتشار آوایی غیرفعال با صحت ۹۷ تا ۹۹ درصد و خطای تکرارپذیری ۰/۳ درصد، به عنوان یک روش کاملاً قابل اطمینان معرفی می‌شود. ضمناً روش انتشار آوایی علاوه بر صحت بالای نتایج، به دلیل قابل استفاده بودن در شرایط مختلف نیز به روش تصویربرداری برتری دارد [۱۲].

## ۲- بستر آزمون و پردازش سیگنال

چینش آزمایشگاهی پژوهش، متشکل از چندین جز مکانیکی و الکترونیکی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. ساخت بستر آزمون و اجرای آزمایشات در آزمایشگاه جریان‌های چندفازی دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفته است. محیط انجام آزمایش یک مخزن استوانه‌ای از جنس پلاستیک شفاف (پلکسی گلس) به قطر داخلی ۹۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر است. روی دیواره‌ی استوانه، ۵ سوراخ دایره‌ای به قطر ۳۰ میلی‌متر جهت نصب المان‌های پیزوالکتریک تعبیه شده است که موقعیت حسگر اول با عدم قطعیت یک میلی‌متر، همتراز با نوک مجرای ورود هوا می‌باشد. ستون سیال محتوی آب شهری با چگالی ۹۹۷/۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب (Pycnometer Gay-Lussac) است که در دمای محیط (۲۰ درجه سلسیوس) به صورت کاملاً ساکن و با ارتفاع  $10 \pm 100$  میلی‌متر از نوک مجرا قرار دارد. جریان هوا از توسط پمپ هوای آکواریومی (aco-5505, Hailea Group Co.) تامین می‌شود. با توجه به تاثیر مستقیم چگالی سیال مایع بر فرکانس نوسانات، بایستی در صورت استفاده از سیالات دیگر، چگالی آن اندازه‌گیری شود. هوا از طریق لوله‌ای با قطر داخلی ۴ میلی‌متر به قسمت تحتانی ستون سیال منتقل شده و توسط اتصال پنوماتیکی مناسب، به یک روزنه شیشه‌ای وارد می‌شود که قطر آن برای آزمایشات مختلف قابل تغییر است. در پژوهش حاضر تزریق حباب با مجرای شیشه‌ای به قطر اسمی ۰/۵ میلی‌متر و از مرکز سطح مقطع ستون سیال انجام شده است. جریان هوا به

کمک یک مقاومت الکتریکی متغیر بصورت یکپارچه با پمپ هوا و یک شیر لغزشی در ورودی ستون سیال تنظیم می‌شود. حسگر استفاده شده در ساخت این بستر آزمون، المان سکه‌ای از نوع پیزوالکتریک (#273-0073, Radio Shack Co.) است که در دیواره ستون مایع نصب شده است. یک سمت سکه به آب عرضه شده و سکه درون غلاف پلاستیکی برای محافظت از آسیب دیدن ماده پیزوالکتریک، کاملاً آب‌بندی شده است. مطابق رابطه ۳، برای این آزمایشات انتظار می‌رود فرکانس نوسانات فشاری ایجاد شده بین ۱ تا ۲ کیلوهرتز باشد. آزمون‌های اولیه نشان می‌دهند که حسگر استفاده شده، در باند فرکانسی مذکور به دلیل قرار داشتن در نزدیکی فرکانس تشدید ( $f_{res} = 2500 \text{ Hz}$ )، حساسیت بالایی دارد. سیگنال ثبت شده با حسگرها، بایستی در زمان واقعی به سیستم کامپیوتری مخابره شوند. مجموعه‌ای متشکل از یک ترمینال سیم بندی (PCLD-8710, Advantech Co.) و یک کارت داده‌برداری (PCI-1710U, Advantech Co.) برای دریافت سیگنال‌های انتشار آوایی به کار گرفته شده است. در این پژوهش، سیگنال‌های انتشار آوایی به کمک رابط نرم‌افزاری LabVIEW با نرخ یکصد هزار داده در ثانیه دریافت و ذخیره می‌شوند. ضمناً به منظور تقویت سیگنال و رفع اثرات نامطلوب وجود مولفه‌های فرکانسی بالاتر از فرکانس نایکوئیست، یک مدار الکترونیکی شامل تقویت‌کننده و فیلتر پایین‌گذر، طراحی شده و قبل از مجموعه‌ی داده‌برداری نصب شده است. حد فرکانسی قطع کردن سیگنال در فیلترکننده به گونه‌ای است که اطمینان حاصل شود، مولفه‌ی فرکانسی



۱. کمپرسور هوا
۲. رنوستا
۳. شیر لغزشی
۴. مجرای ورود هوا
۵. قیف وارون
۶. المان پیزوالکتریک
۷. ستون مایع
۸. تقویت کننده سیگنال
۹. ترمینال سیم پیچی
۱۰. کارت الکترونیکی داده
۱۱. سیستم کامپیوتری
۱۲. دوربین دیجیتال
۱۳. منبع تغذیه دیجیتال

شکل ۲- نما کلی از طراحی بستر آزمون

حسگر نصب شده همتراز با نوک مجرای خروجی هوا، ثبت شده اند. تصویربرداری نیز با سرعت ۹۶۰ تصویر در ثانیه انجام گرفته و با داده برداری صوتی همگام شده است. لازم به ذکر است که عوامل دیگری نیز در حین آزمون اختلالاتی به وجود می آورند که بصورت نویز در سیگنال های صوتی خود را نشان داده اند. این اختلالات غالباً در فرکانس های پایین تر از فرکانس صدای حباب قرار دارند و از مهمترین عوامل ایجاد آن ها می توان به ضربانی بودن سازوکار تولید هوای فشرده در پمپ هوای آکواریومی اشاره کرد.

براساس تحلیل فوریه، هر سیگنال فیزیکی نتیجه ی برهم نهی تعدادی مولفه ی فرکانسی گسسته است. چگالی طیفی توان معیاری است که توزیع انرژی سیگنال روی طیف های فرکانسی مختلف را بیان می کند. شکل ۳ منحنی چگالی طیفی سیگنال گسیل شده از تشکیل چندین حباب متوالی را نشان می دهد.

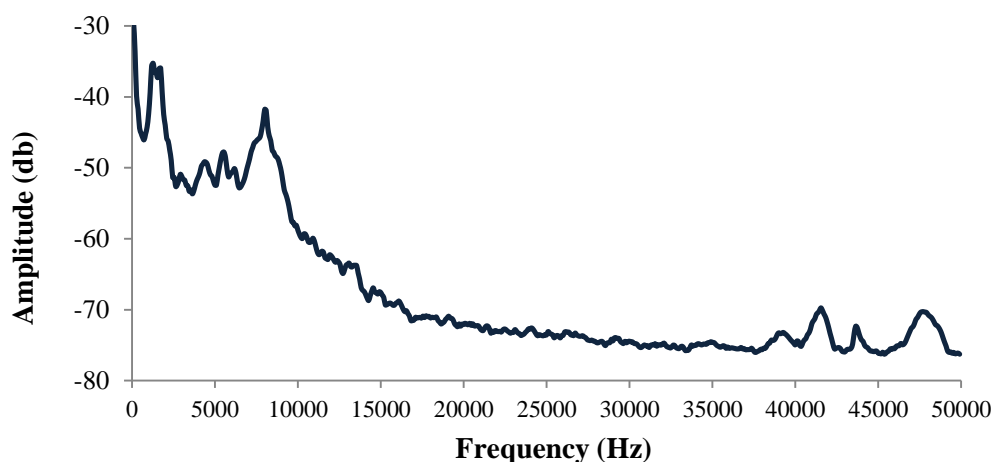
با توجه به منحنی شکل ۳، صرف نظر از مولفه های فرکانسی بسیار پایین (زیر ۵۰۰ هرتز)، یک نقطه بیشینه مطلق در حدود ۱۲۰۰ هرتز وجود دارد. براساس رابطه ی ۳ انتظار می رود مولفه های فرکانسی مرتبط با فیزیک تشکیل حباب در همین محدوده ی فرکانسی قرار دارد. بر همین اساس سری زمانی سیگنال متناظر با یک حباب منفرد پس از عبور از فیلتر میان گذر با حدود فرکانسی ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز، در شکل ۴ نشان داده شده است. مقیاس زمانی این منحنی دقیقاً برابر با زمان ضبط ۲۰ تصویر متوالی توسط دوربین است. در شکل ۵ مراحل رشد و جدایش حباب به

بالتر از نصف فرکانس نمونه برداری در داده های اخذ شده وارد نمی شود. بعلاوه، سیگنال انتشار آوایی از نویزهای مختلفی از منابع متعدد مانند نویزهای حرارتی، نویزهای صوتی و حتی نویزهای ناشی از نور تاثیر می پذیرد که بایستی با فیلتر مناسبی از سیگنال اصلی کنار گذاشته شوند [۱۶]؛ بنابراین مرحله دیگری از پردازش و تفسیر داده ها پس از ذخیره سازی در رایانه، از طریق اعمال فیلترها و تبدیلات، به کمک نرم افزار MATLAB انجام شده است.

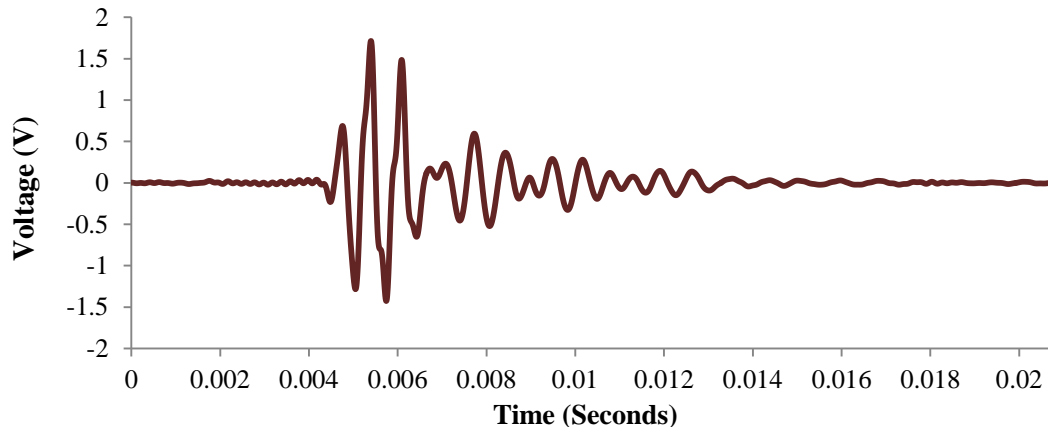
برای بررسی دینامیک رشد حباب و تحلیل فیزیک حاکم بر نوسانات داده های انتشار آوایی، ثبت تصاویر بسیار کمک کننده است. برای این منظور در چینش آزمایشگاهی از دوربین دیجیتال (RX100V, Sony Co.) استفاده شده است. به این ترتیب تصاویر متناظر با سیگنال با سرعت ۹۶۰ فریم در ثانیه ثبت و برای مقایسه استفاده شده اند. همگام سازی سیگنال صوتی و تصویر به کمک یک لامپ LED انجام شده است؛ با شروع داده برداری، بلافاصله یک سیگنال ۵ ولتی توسط کارت داده ارسال می شود که LED را روشن می کند و معیار همزمانی صدا و تصویر است.

### ۳- نتایج و بحث

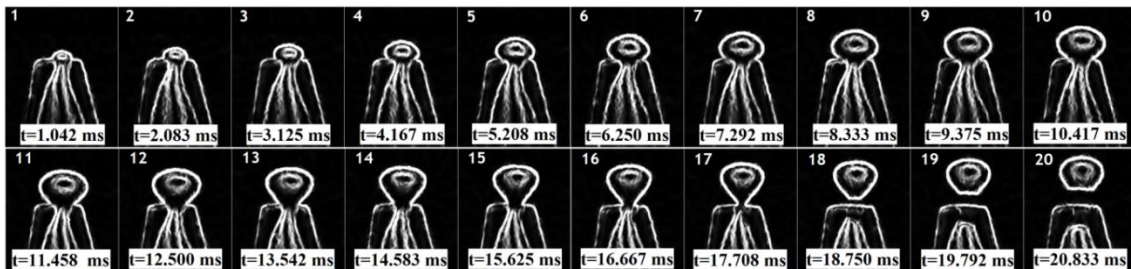
ورود هوا به درون سیال مایع، ضمن تشکیل حباب، نوعی ناپایداری هیدرو دینامیکی ایجاد می کند که منجر به گسیل موج هایی با ماهیت صوتی در محیط سیال می شود. در این پژوهش امواج صوتی ساطع شده از تشکیل حباب در خروجی مجرای شیشه ای با سرعت صد هزار نمونه در ثانیه توسط



شکل ۳- منحنی چگالی طیفی توان سیگنال انتشار آوایی برای چندین حباب متوالی



شکل ۴- سری زمانی سیگنال صوتی گسیل شده در اثر ورود یک حباب منفرد به درون سیال مایع



شکل ۵- توالی تصویری رشد و جدایش حباب از مجرای زیرآبی

$$e = \begin{cases} a/b; & a > b \\ b/a; & b > a \end{cases} \quad (5)$$

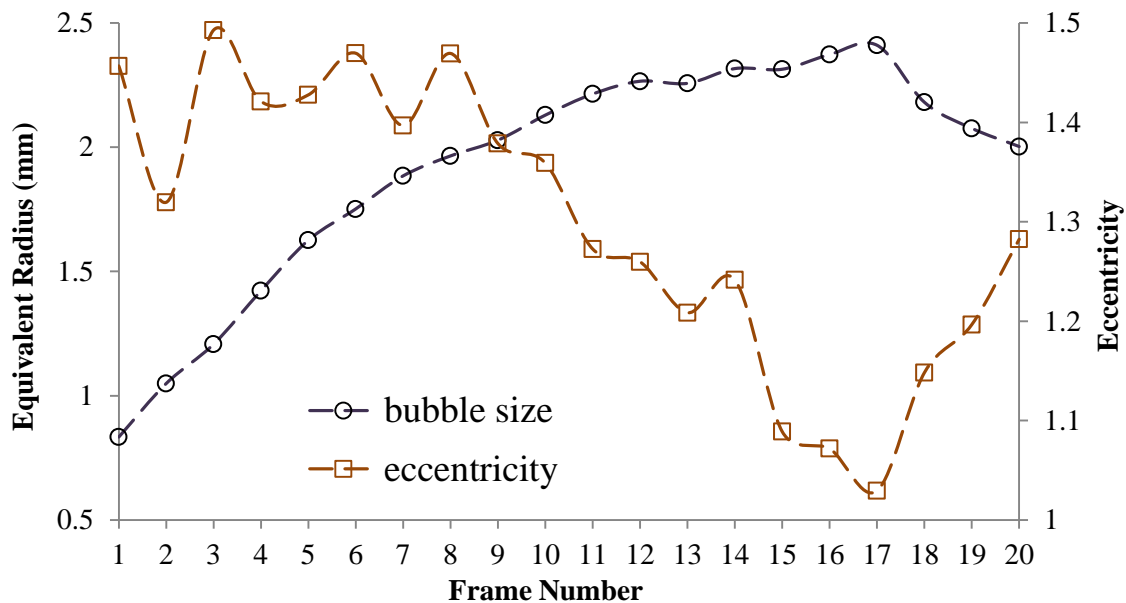
به این ترتیب شعاع معادل حباب و نسبت طول محورهای آن در مراحل مختلف رشد و جدا شدن به کمک پردازش تصویر محاسبه شده است. در منحنی‌های شکل ۶، شعاع معادل و نسبت طول محورها برای حباب منفرد نشان داده شده در شکل ۵ ارائه داده شده است.

مقایسه شکل ۶ با تصاویر مربوط به روال شکل‌گیری حباب و همچنین سری زمانی نوسانات فشار، می‌تواند ضمن کمک به درک دینامیک رشد و جدایش تک‌حباب از مجرای زیرآبی، جهت تفسیر سیگنال‌های انتشار آوایی نیز مثر ثمر باشد. در شکل ۶ واضح است که افزایش اندازه‌ی حباب در ابتدا با نرخ بالایی اتفاق می‌افتد و سپس این نرخ کاهش می‌یابد. بعلاوه، مقایسه شکل ۴ با منحنی اندازه حباب در شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که زمان وقوع جهش‌های بزرگ در سیگنال سری زمانی متناظر با زمان کاهش نرخ افزایش حجم حباب است. به این ترتیب می‌توان به این نکته پی برد که

کمک توالی تصاویر بیان شده است. در پردازش این تصاویر پس از منفک کردن ۲۰ فریم متوالی از فیلم ضبط شده، تکنیک لبه‌یابی توسط نرم‌افزار ImageJ به کار رفته و مرزهای حباب مشخص شده است. برای کاستن از نویزهای نوری در تصاویر، فیلترهای دوبعدی موجود در جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار MATLAB بکار گرفته شده‌اند. این توالی تصاویر به طول حدوداً ۲۱ میلی‌ثانیه دقیقاً همگام با سیگنال نشان داده شده در شکل ۴ است.

با توجه به شکل ۵ واضح است که حباب در تمامی مراحل رشد و جدا شدن نسبت به وضعیت کروی انحراف دارد. اگر شعاع معادل حباب را معیاری برای اندازه آن در نظر بگیریم، این کمیت مطابق رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود [۱۷]. نسبت طول محور بزرگ‌تر به طول محور کوچک‌تر حباب فاکتوری برای بیان انحراف حباب از حالت کروی است. این کمیت مطابق رابطه‌ی (۵) تعریف می‌شود.

$$r_{eq} = \frac{\sqrt[3]{a^2b}}{2} \quad (4)$$



شکل ۶- شعاع معادل و نسبت طول محورهای حباب در طی رشد و جدا شدن

حباب نشان می‌دهد حباب کروی نبوده و شکل خم پروانه‌ای دارد. این موضوع بیانگر رژیم فشار بالا در تشکیل حباب است. منحنی شکل ۷ از محاسبه‌ی چگالی طیفی توان برای تک‌حباب مورد مطالعه حاصل شده است. این منحنی دارای بیشینه‌ی مطلق در فرکانس ۱۵۳۱ هرتز است. به کمک تفکیک طیفی سیگنال نشان داده شده در شکل ۴ و محاسبه‌ی فرکانس غالب بصورت پنجره‌بندی شده، این فرکانس غالب در فریم هشتم از توالی تصویری جدایش حباب رخ می‌دهد. مطابق رابطه‌ی (۳)، روش انتشار آوایی شعاع معادل حباب را ۲/۰۰۸۰ میلی‌متر تخمین می‌زند؛ در حالی که در فریم هشتم از تصاویر، شعاع معادل حباب با توجه به رابطه‌ی (۴)، ۱/۷۵۱۷ میلی‌متر است.

روش انتشار آوایی اندازه‌ی حباب را با تقریب رو به بالا تخمین می‌زند. با بررسی انجام شده، بین تخمین اندازه توسط روش انتشار آوایی و اندازه‌ی محاسبه شده از پردازش تصویر، حدود ۱۳ درصد اختلاف وجود دارد. عوامل متعددی در بروز این اختلاف سهیم هستند. رابطه‌ی میناثرت که برای تبدیل فرکانس غالب سیگنال صوتی به شعاع معادل حباب استفاده می‌شود، بر فرض آدیاباتیکی بودن فرایندهای تراکم و انبساط درون حباب استوار است و پلی‌تروپیک بودن فرایند درون حباب در این رابطه دیده نشده است. ضمناً بایستی در نظر

علت گسیل شدن سیگنال صوتی از حباب، تغییر شکل در سطح آن است. در واقع با شروع فرایند تشکیل حباب، ابتدا تزریق هوا از مجرای زیرآبی به افزایش محسوس حجم حباب می‌انجامد؛ سپس با ادامه تزریق هوا، نرخ افزایش حجم کاهش یافته و ورود هوا به درون حباب منجر به تغییرات شدید در فشار هوای درون حباب می‌شود. در واقع انتشار موج‌های فشاری از حباب به دلیل تراکم و انبساط متناوب هوای درون حباب است.

مطابق شکل ۶، اندازه‌ی حباب با رسیدن به مقدار بیشینه کاهش می‌یابد. این اتفاق با فریم مربوط به جدا شدن حباب همزمان است. بر این اساس می‌توان این‌گونه بیان کرد که سیگنال زمانی ثبت شده در اثر تشکیل یک حباب منفرد از مجرای زیرآبی زمانی بیشترین انرژی را دارد که نرخ افزایش حجم حباب کم شده و نوسانات در سطح حباب پدید می‌آید. همچنین با جدا شدن کامل حباب از مجرا، انرژی سیگنال به کمترین مقدار خود که برابر با سیگنال زمینه است می‌رسد. بعلاوه، تغییرات نسبت طول محورهای حباب در زمان رشد آن، حاکی از آن است که طول محورهای افقی و عمودی حباب در لحظه‌ی جدا شدن تقریباً با هم برابر می‌شوند. علیرغم اینکه نسبت طول محورها در هنگام جدا شدن حباب به یک نزدیک است، اما تصاویر ثبت شده از توالی تشکیل



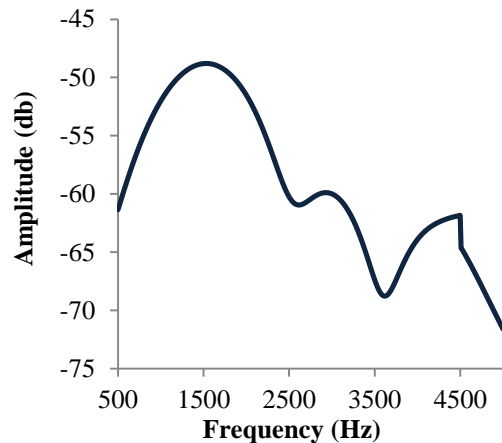
غیرکروی بودن آن وارد شده است. با اعمال این تصحیح مقدار تخمین زده شده برای شعاع حباب به کمک روش انتشار آوایی ۱/۷۷۶۱ میلی‌متر است که تنها ۱/۳۷٪ با مقدار بدست آمده از پردازش تصویر تفاوت دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

ورود حباب از یک مجرای زیرآبی به درون سیال مایع سبب ایجاد موج‌های فشاری با ماهیت صوت در محیط سیال می‌شود. این موج‌های صوتی توسط المان پیزوالکتریک که در دیواره‌ی ستون سیال نصب شده‌اند، به خوبی تشخیص داده شده و سیگنال متناسب با آن پدیده مخابره می‌شود. با توجه به تحلیل طیفی سیگنال‌ها، بیشینه انرژی سیگنال در محدوده‌ای از فرکانس (حدوداً ۱۲۰۰ هرتز) اتفاق می‌افتد که براساس رابطه‌ی میناثرت به تشکیل حباب مرتبط می‌شود. در فرکانس‌های بالای ۵۰۰۰ هرتز عملاً اطلاعات مهم و قابل تعبیری که مربوط به تشکیل تک‌حباب باشد وجود ندارد؛ همچنین در فرکانس‌های پایین (زیر ۵۰۰ هرتز) برخی مولفه‌های فرکانسی نسبتاً قوی که از نویزهای محیطی یا ضربه‌ی تزریق هوا توسط پمپ آکواریومی ناشی می‌شوند، به شدت تأثیر می‌گذارند.

از تصویربرداری با سرعت ۹۶۰ فریم در ثانیه برای کمک به استحصال نتایج بهتر و درک فیزیک مسئله استفاده شده است. نوسانات فشاری در سیگنال انتشار آوایی لحظه‌ای قبل از جدا شدن حباب بیشینه انرژی را دارند. ضمناً در مرحله‌ی رشد و جدا شدن حباب، ابتدا اندازه‌ی حباب سریعاً زیاد شده و سپس سرعت رشد کند می‌شود؛ مقایسه سیگنال و تصویر نشان می‌دهد که جهش بزرگ در سیگنال انتشار آوایی منطبق بر زمان وقوع حالت کاهشی در نرخ افزایش حجم حباب است. علت گسیل شدن موج‌های فشاری از حباب، تغییر شکل سطح آن است. این اتفاق زمانی می‌افتد که نرخ افزایش حجم حباب کند شده و تزریق هوا به درون حباب باعث می‌شود، تغییرات شدیدی در فشار گاز درون حباب ایجاد شود.

با گذشت زمان حباب رشد کرده و سپس از مجرا جدا می‌شود. در لحظه‌ی جدا شدن نسبت طول محور بزرگ حباب به طول محور کوچک آن نزدیک شده و نسبت آن‌ها به یک میل کند. به کمک پنجره‌بندی سیگنال، طیفی از



شکل ۷- منحنی چگالی طیفی توان سیگنال انتشار آوایی برای یک حباب منفرد

داشت که روابط تحلیلی در این زمینه با فرض کروی بودن حباب استخراج شده اند؛ لذا فاکتور دیگری که در تصحیح تخمین اندازه حباب توسط روش انتشار آوایی بایستی منظور گردد، اعمال اثر کروی نبودن حباب است.

تشکیل لایه‌ی مرزی حرارتی در اطراف حباب باعث می‌شود که فرکانس گسیل شده از حباب تحت تأثیر میرایی حرارتی قرار گیرد. هرچه نسبت شعاع حباب به ضخامت لایه‌ی مرزی بزرگ‌تر باشد، فرض آدیاباتیک بودن منطقی‌تر است. با این تفاسیر، ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی، ضریب میرایی حرارتی و مقدار نمای پلی‌تروپیک برای نوسان حباب قابل محاسبه است [۱۰]. اثر میرایی حرارتی ایجاب می‌کند که در رابطه‌ی میناثرت به جای نسبت گرماهای ویژه از نمای پلی‌تروپیک استفاده شود. با استفاده از مقادیر شعاع حباب و فرکانس نوسانات، نمای پلی‌تروپیک برای حباب‌های با شعاع حدوداً دو میلی‌متر، ۱/۱۱۱ بدست آمده است. با اعمال نمای پلی‌تروپیک به جای نسبت گرماهای ویژه، مقدار تخمینی روش انتشار آوایی برای شعاع حباب حدود ۱۱ درصد کم شده و به مقدار ۱/۷۸۸۸ میلی‌متر می‌رسد.

بیشتر حباب‌ها هنگام جدا شدن از یک مجرای زیرآبی، به صورت بیضی یا دوک‌وار در می‌آیند. فرکانس نوسان حباب کروی قدری بیشتر از حباب غیرکروی که شعاع معادل برابر دارند است. با توجه به شکل ۶، هنگام انتشار سیگنال انتشار آوایی از حباب، نسبت طول محورها حدود ۱/۴ است که به این ترتیب در تخمین شعاع حباب ۰/۷٪ خطا نیز به دلیل

### مراجع

- [1] Terasaka K, Tsuge H (1993) Bubble formation under constant-flow conditions. *Chem Eng Sci* 48(19): 3417-3422.
- [2] Martín M, Montes FJ, Galán MA (2006) Numerical calculation of shapes and detachment times of bubbles generated from a sieve plate. *Chem Eng Sci* 61(2): 363-369.
- [3] Duhar G, Colin C (2006) Dynamics of bubble growth and detachment in a viscous shear flow. *Phys Fluids* 18(7).
- [4] Zhang L, Shoji M (2001) Aperiodic bubble formation from a submerged orifice. *Chem Eng Sci* 56(18): 5371-5381.
- [5] Vazquez A, Leifer I, Sánchez RM (2010) Consideration of the dynamic forces during bubble growth in a capillary tube. *Chem Eng Sci* 65(13): 4046-4054.
- [6] Oguz HN, Prosperetti A (1993) Dynamics of Bubble Growth and Detachment from a Needle. *J Fluid Mech* 257: 111-145.
- [7] Mccann DJ, Princes RGH (1971) Regimes of bubbling at a submerged orifice. *Chem Eng* 26.
- [8] Minnaert M (1933) On musical air-bubbles and the sound of running water. *Philos Mag* 16(104): 235-248.
- [9] Plesset MS, Prosperetti A (1977) Bubble Dynamics and Cavitation. *Annu Rev Fluid Mech* 9(1): 145-185.
- [10] Longuet-Higgins M, Kerman B, Lunde K (1991) The release of air bubbles from an underwater nozzle. *J Fluid Mech* 230: 365-390.
- [11] Boyd JWR, Varley J (2001) The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes. *Chem Eng Sci* 56(5): 1749-1767.
- [12] Vazquez A, Sanchez RM, Salinas-Rodríguez E, Soria A, Manasseh R (2005) A look at three measurement techniques for bubble size determination. *Exp Therm Fluid Sci* 30(1): 49-57.
- [13] Deane GB, Czerski H (2008) A mechanism stimulating sound production from air bubbles released from a nozzle. *J Acoust Soc Am* 123(6): EL126-EL132.
- [14] Liu J, Wang W, Chu N, Wu D, Xu W (2018) Numerical simulations and experimental validation on passive acoustic emissions during bubble formation. *Appl Acoust* 130: 34-42.
- [15] Huang G, Zhang M, Han L, Ma X, Huang B (2021) Physical investigation of acoustic waves induced by the oscillation and collapse of the single bubble. *Ultrason Sonochem* 72: 105440.

سیگنال با فرکانس حدود ۱۵۳۱ هرتز بیشترین چگالی توان را دارد. این فرکانس به همراه تصحیح فرمول میناوت به کمک اثر میرایی حرارتی و انحراف از وضعیت کروی، شعاع حباب را ۱/۷۷۶۱ میلی‌متر تخمین می‌زند که با مقدار محاسبه از پردازش تصویر تنها ۱/۳۷٪ اختلاف دارد.

### ۶- سپاسگزاری

سپاس از دکتر رضا مداحیان بابت توصیه‌های مفید و ارزشمند ایشان در انجام این پژوهش و نیز تشکر از دانشگاه تربیت مدرس که حمایت مالی کار را متقبل شدند.

### ۷- علائم و اختصارات

#### علائم انگلیسی

طول محور عمودی حباب، $mm$	$a$
طول محور افقی حباب، $mm$	$b$
انحراف از حالت کروی	$e$
فرکانس، $Hz$	$f$
شتاب گرانش، $ms^{-2}$	$g$
فشار، $Pa$	$P$
شعاع، $mm$	$r$
حجم، $m^3$	$V$

#### علائم یونانی

نسبت گرماهای ویژه‌ی گاز	$\gamma$
چگالی، $kgm^{-3}$	$\rho$

#### زیر نویس‌ها

حباب	$b$
مقدار معادل	$eq$
مجرای تزریق هوا	$n$
واحد تامین هوا	$C$
گاز	$G$
مایع	$L$

[17] Sam A, Gomez CO, Finch JA (1996) Axial velocity profiles of single bubbles in water/frother solutions. *Int J Miner Process* 47(3-4): 177-196.

[16] Dehra H (2019) Acoustic Filters for Sensors and Transducers. *Energy Procedia* 158(2018): 4023-4030.