

## بررسی عددی رفتار شعاعی و فشار انتشار یافته از میکرو حباب پوشش دار در مجاورت مرزهایی با الاستیسیته متفاوت در تصویربرداری فراصوت

سید بهروز حسینی<sup>۱</sup> و میراعلم مهدی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸)

### چکیده

یکی از بهترین روش‌های بهبود کیفیت و وضوح تصویربرداری فراصوتی، استفاده از حباب‌های پوشش‌دار است. در این مقاله دینامیک حباب کیسوله در نزدیکی دیواره با الاستیسیته مختلف برای تصویربرداری فراصوت شبیه‌سازی شده است. برای این منظور برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده که در آن معادله دیفرانسیل رایلی-پلیست اصلاح شده، به روش رانچ کاتا مرتبه چهارم حل عددی شده است. در ابتدا نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده، سپس رفتار شعاعی حباب پوشش‌دار (عوامل تقابلی فراصوتی) برای دو حالت مجاورت با دیواره صلب و الاستیک بررسی شده و فشار انتشار یافته از حباب شبیه‌سازی شده است. در ادامه تأثیر میزان لزجت پوسته (Ks)، شعاع اولیه حباب و فاصله حباب تا دیواره بر رفتار دینامیکی حباب و میزان فشار انتشار یافته از آن بررسی شده است. نتایج به دست آمده به صورت جدول و نمودار آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار لزجت پوسته حباب و شعاع اولیه حباب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دینامیک حباب دارد. در نهایت پاسخ فرکانسی حباب پوشش‌دار بررسی گردیده و نحوه تأثیر شعاع اولیه حباب، جنس پوسته و مدول کشسانی دیوار بر روی میزان قدرت طیف موج اصلی آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مدول کشسانی دیواره، مقدار قدرت طیف موج اصلی به حالت حدی رسیده و تغییر نمی‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تصویربرداری فراصوتی، حباب پوشش‌دار، دیواره الاستیک، نوسان شعاعی، انتشار موج فشاری، پاسخ فرکانسی

## Numerical Investigation of the Radial Behavior and Scattered Pressure from the Encapsulated Microbubble in Vicinity of the Boundaries with Different Elasticities

S. B. Hosseini

M. Mahdi

Department of mechanical engineering  
Shahid Rajaee teacher training university  
(Received: 287/May/2019 ; Accepted: 17/ May/2020)

### ABSTRACT

One of the best methods for improving quality and clarity of the ultrasound imaging is the use of coated bubbles. In this paper, the dynamics of an encapsulated bubble near the wall is simulated with different elasticity for the ultrasound imaging. For this purpose, a computer program has been developed in MATLAB software, in which the modified Rayleigh-Plesset differential equation is solved numerically using by the fourth-order Runge Kutta method. Initially, the results were compared with experimental data, then the radial behavior of the encapsulated bubble (UCA) was investigated for two adjacent states with rigid and elastic wall and the scattered pressure from the bubble was simulated. In addition, the effect of the shell viscosity (Ks), the initial radius of the bubble and the distance between the bubble and the wall on the dynamic behavior of the bubble and the amount of scattered pressure therefrom are investigated. The results are presented in the form of table and graphs. The results show that the bubble shell's viscosity and the initial bubble radius have a significant effect on the bubble dynamics. Finally, the frequency response of the encapsulated bubble has been investigated and the effect of the initial radius of the bubble, the shell material and the elastic modulus of the wall on the strength of the fundamental spectrum has been presented. The results show that by increasing the elastic modulus of the wall, the strength of the fundamental spectrum reach the limit state and does not change.

**Keywords:** Ultrasound Imaging, Encapsulated Bubble, Elastic Wall, Radial Oscillation, Scattered Pressure, Frequency Respon

## ۱- مقدمه

همکارش [۷]، ژانگ و همکارش [۸] و فانگ و همکارانش [۹] دنبال کرد. اما اخیراً برای کاربردهای پزشکی همانند دارورسانی و تصویربرداری پزشکی، حباب آزاد توسط یک پوسته محصور می‌شود که در این صورت خواص دینامیکی آن با حالت آزاد متفاوت است [۱۰]. پوشش‌دار کردن حباب برای جلوگیری از انحلال سریع میکروحباب‌ها در خون و یا آمیخته شدن آن‌ها با یکدیگر انجام می‌شود. همچنین به منظور افزایش تمایز تصویری بین خون و بافت در طول فرآیند تصویربرداری پزشکی و بهبود کیفیت تصاویر فراصوتی و افزایش دقت در تشخیص، حباب‌ها در خون تزریق می‌شوند [۱۱].

در چند دهه گذشته کاربردهای فراصوت در پزشکی، انگیزه‌ای برای مطالعه بر روی اثر یک مرز بر یک حباب پوشش‌دار<sup>۲</sup> را فراهم کرده است. در تصویربرداری هدفمند، موج فشاری پراکنده شده در ناحیه‌ای دوردست از حباب مورد بررسی قرار می‌گیرد که در این حالت ممکن است حباب‌ها در مجاورت رگ یا مویرگ قرار داشته باشند بنابراین بر روی فشار انتشاریافته از حباب تأثیرگذار خواهد شد. مقدار ضخامت دیواره رگ نسبت به اندازه یک میکروحباب پوشش‌دار بسیار زیاد است اما از طرفی بسیار کوچک‌تر از فاصله‌ای می‌باشد که فشار پراکنده شده در آنجا اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین نه می‌توان از ضخامت دیواره رگ صرف نظر کرد و نه این که آن را نامحدود تلقی نمود. از طرفی فرض یک دیواره برای رگ به صورت صلب به این معنی است که چگالی دیواره بسیار بیشتر از سیال مجاور (خون) آن است درحالی که چگالی خون، رگ و بافت‌های بدن خیلی با هم متفاوت نبوده و لازم است مدل‌سازی دیواره رگ به صورت الاستیک انجام شود [۲۵]. مدل‌های حباب پوشش‌دار عموماً از دو طریق توسعه داده شده‌اند؛ یا این که اثر پوشش را به وسیله آزمایش‌ها و شناخت خواص آن و با جا دادن ترم‌هایی در معادله رایلی- پلیست ایجاد کرده‌اند و یا این که با شروع از اصول اولیه مربوط به قوانین پایه‌ای حاکم بر حباب و معادله رایلی- پلیست به همراه استنتاج دقیق ریاضی به وجود آمده‌اند مانند کارهای افرادی نظیر دوینیکف [۱۱].

سامانه‌های تصویربرداری فراصوتی با کاربرد عمومی یا به عبارتی دستگاه‌های سونوگرافی در سطح بین‌الملل از عناوین مختلفی برخوردار هستند که بسته به نواحی مورد نظر از بدن، می‌توان به اسکنرهای فراصوتی شکمی، تجهیزات فراصوتی سونوگرافی عروق خونی، تجهیزات فراصوتی آرایه خطی، سامانه‌های فراصوتی داپلر، سونوگرافی کلیه، اسکنرهای فراصوتی اورولوژی، سونوگرافی مثانه و غیره اشاره کرد. این نوع سامانه‌ها بدون استفاده از تشعشع، تصاویر دوبعدی از اکثر بافت‌های نرم بدن فراهم می‌کنند و بیشتر در بخش تصویربرداری مراکز درمانی، بیمارستان‌ها، کلینیک‌ها، مطب‌ها و مؤسسات پزشکی استفاده می‌شوند. یکی از روش‌های پرکاربرد در تصویربرداری، تصویربرداری هارمونیک است. تصویربرداری هارمونیک، یک شیوه از روش‌ها سونوگرافی است که در آن تصاویری با کیفیت بالاتر در مقایسه با سامانه‌های عادی تولید می‌شوند. هارمونیک‌ها فرکانس‌هایی هستند که در فرکانس‌هایی چند برابر فرکانس ارسالی در سونوگرافی تولید می‌شوند. اساس و اصول این روش بر ارتعاش میکروحباب‌ها به هنگام برخورد با فرکانس‌های فراصوتی ارسالی استوار است. نوسان میکروحباب‌ها باعث ایجاد بازتابش در مسیر برگشت می‌شود که سبب می‌گردد تا فرکانس موج بازگشتی بیشتر از فرکانس موج اصلی بشود. تولید تصویر از این سیگنال‌های هارمونیک باعث افزایش کیفیت و وضوح تصویر می‌شوند.

از طرفی دیگر و از منظر مطالعات تئوری، بررسی دینامیک یک حباب گازی آزاد در نزدیکی یک مرز جامد، از مطالعات انجام‌گرفته بر روی پدیده کاویتاسیون<sup>۱</sup> به دلیل مشکلات ناشی از آن (خسارات کاویتاسیونی) سرچشمه گرفته است. در این زمینه بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بسیاری انجام شده که نتایج آن‌ها را می‌توان در مطالعات افرادی مانند برن [۱]، لیتون [۲] و بلیک و همکارش [۳] یافت. تجربیات اخیر در راستای برهمکنش بین یک حباب گازی کاویتاسیونی با انواع مرزها و همچنین روش‌های عددی که جهت مدل‌سازی حرکت یک حباب نزدیک یک مرز به کاررفته را می‌توان از طریق بررسی‌های صورت گرفته توسط افرادی همچون بروجان و همکارانش [۴-۶]، کوداما و

2- Encapsulated Bubble (UCA = Ultrasound Contrast Agents)

1- Cavitation

آن‌ها همچنین در مقاله‌ای دیگر یک مدل صریح در حالت آدیاباتیکی برای توصیف دینامیک یک حباب گازی کروی در نزدیکی یک دیواره الاستیک یا صلب استخراج کردند [۳۱].

هدف از مطالعه حاضر استفاده از یک معادله رایلی-پلیست اصلاح شده برای میکرو حباب‌های پوشش‌دار فراصوتی (UCA) در نزدیکی یک دیواره الاستیک با ضخامتی محدود و معین است تا بتوان بررسی کرد که تغییر ترم لزجت ناشی از پوشش‌دار کردن حباب<sup>۳</sup>، فاصله حباب از دیواره و شعاع اولیه حباب چگونه بر رفتار و پاسخ آکوستیک<sup>۴</sup> میکرو حباب تأثیر می‌گذارد.

در این مطالعه برای اولین بار تأثیر تغییرات خواص پیرامونی حباب پوشش‌دار در مجاورت یک دیواره الاستیک (نظیر جنس دیواره و فاصله از آن) و تغییر خواص پوسته آن (نظیر شعاع اولیه، لزجت پوسته) بر روی رفتار شعاعی، موج پراکنده شده از حباب و پاسخ فرکانسی آن بحث شده است که می‌تواند بینش خوبی از شرایط مطلوب برای تصویربرداری تشخیصی فراصوتی به دست بدهد. همچنین در طول شبیه‌سازی عددی از یک کدنویسی پویا با گام زمانی متغیر استفاده شده که به دقت و بهبود همگرایی مساله کمک شایانی می‌نماید.

## ۲- شرایط حاکم بر مساله

وجود گازهای محلول و ذرات جامد معلق، باعث گسیختگی مایع و موجب تشکیل هسته‌های<sup>۵</sup> کاویتاسیون می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در آب معمولی همواره حباب‌هایی با اندازه میکرون وجود دارد و کشش سطحی مایع باعث می‌شود که شکل حباب‌ها به صورت کروی درآید. با وارد شدن این حباب‌ها به ناحیه کم‌فشار، بزرگ شده و هنگام افزایش مجدد فشار فروریزش می‌کنند. با فروریزش<sup>۶</sup> حباب گاز درون آن متراکم شده و در نتیجه دما و فشار حباب افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که بیماری‌های قلبی و عروقی و سرطان، دو عامل عمده مرگ و میر در جهان امروز ما هستند و هر ساله نیز هزینه‌های زیادی جهت درمان و تشخیص این نوع بیماری‌ها صورت می‌گیرد، به همین جهت

بررسی‌های عددی صورت گرفته بر روی حباب مجاور دیواره ابتدا توسط هرینگ [۱۲] انجام شد. ایشان یک معادله به منظور توصیف حرکت جابجایی یک حباب آزاد در حضور یک مرز سخت را به دست آورد. سپس استراسبرگ [۱۳] و بولو [۱۴] اثر یک دیواره صلب بر روی فرکانس تشدید یک حباب کاویتاسیونی را بررسی کردند. در فرضیات آن‌ها برهم‌کنش یک حباب با یک مرز صلب به لحاظ ریاضی با برهم‌کنش بین دو حباب در حال ضربه و هم‌فاز و مجاور با هم معادل است. از آن به بعد این هم‌ارزی در بسیاری از مطالعات در زمینه بررسی رفتار دینامیک حباب مانند ایلسینگ و همکارش [۱۵] و دوینیکف و همکارانش [۱۶] به کار گرفته شده است. از طرفی در کار تومیتا و شیما [۱۷]، مطالعه آن‌ها از آن جهت که به طور مستقیم با مطالعه حاضر مرتبط است، ارزش توجه خاصی دارد. آن‌ها یک معادله رایلی-پلیست اصلاح شده<sup>۱</sup> شامل اصلاحاتی نظیر لحاظ کردن اثرات دیواره صلب و تراکم‌پذیری مایع اطراف حباب، استخراج کردند. این معادله توسعه یافته توأم با روش منبع تصویر مجازی (Image source) به وسیله دوینیکف و همکارانش [۱۸] برای استنتاج یک معادله رایلی-پلیست اصلاح شده دیگر برای یک حباب کپسوله نزدیک یک لایه سیال با ضخامت محدود استفاده شده است. به دلیل آن‌که داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مجاورت یک مرز و همچنین خواص مکانیکی ماده‌ای که حباب را با آن پوشش داده‌اند، می‌تواند تغییرات قابل توجهی در دامنه نوسان یک میکرو حباب و فشار پراکنده شده از آن ایجاد کند [۱۹، ۲۰، ۲۱] این دسته از مطالعات بسیار شایان توجه هستند. اخیراً نیز گراشچوک و همکارانش [۳۰] مدل‌های مختلفی از حباب پوشش‌دار را در نظر گرفته و آن‌ها را از منظر کنترلی مانند پایداری دینامیکی چندگانه و بروز دینامیک غیرخطی پیچیده سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در حباب بدون پوشش هرچه فشار تحریک کمتر و در حباب پوشش‌دار هرچه دامنه فشار تحریک بالاتر باشد آنگاه پتانسیل بروز دینامیک غیرخطی پیچیده برای حباب بیشتر می‌شود، همچنین دریافتند که رفتار آشوبی حباب می‌تواند برای بهبود کیفیت تصویربرداری فراصوتی مناسب‌تر باشد چراکه پاسخ آکوستیک حباب به طور قابل توجهی از اکوهای ناشی از بافت اطراف متمایز می‌گردد.

2- Ultrasound Contrast Agent

3- Dilatational Viscosity

4- Acoustic Response

5- Nuclei

6- Collapse

1- Modified Rayleigh-Plesset

$\rho_1$  و  $\rho_3$  یک سیال ایده آل تراکم‌ناپذیر هستند.  $P_0$  فشار هیدرودینامیک مایع اطراف،  $\sigma$  کشش سطحی حباب،  $a$  شعاع حباب هسته سخت واندروالس (برای عوامل کنتراست با هسته گازی  $C_4F_{10}$  برابر  $0.1976R_0$  می‌باشد) [۱۱]،  $\gamma$  نسبت گرماهای ویژه گاز،  $\eta$  لزجت مایع محیطی،  $P_{ac}(t)$  فشار آکوستیک تحرک،  $P_{scat}$  فشار پراکنده شده از حباب و  $S$  اثر کپسوله کردن حباب را توصیف می‌کند.

ترم  $\beta$  که به نوعی متأثر از رفتار دیواره بوده و نماینده خواص و ویژگی‌های دیواره در معادلات می‌باشد نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\beta = \rho_2 \frac{3K - 2\mu}{3K + 4\mu} \quad (2)$$

و معادله فشار پراکنده شده نیز به صورت زیر است:

$$P_{scat} = \frac{\rho_1(R^2\ddot{R} + 2R\dot{R}^2)}{L} \left[ 1 - \frac{(\rho_1 - \beta)}{(\rho_1 + \beta)} \frac{L}{\sqrt{(L^2 + 4d^2 - 4dz)}} - \frac{(\beta - \rho_3)}{(\beta + \rho_3)} \frac{L}{\sqrt{(L^2 + 4(d+h)^2 - 4(d+h)z)}} + \frac{(\rho_1 - \beta)(\beta - \rho_3)}{(\rho_1 + \beta)(\beta + \rho_3)} \frac{L}{\sqrt{(L^2 + 4h^2 + 4hz)}} \right] \quad (3)$$

که  $z$  مختصات راستای  $z$  در نقطه اندازه‌گیری می‌باشد. اگر  $L$  در مقایسه با  $d$  و  $h$  بسیار بزرگ باشد، آنگاه معادله (۳) می‌شود:

$$P_{scat}(L \gg d, h) = \frac{4\beta\rho_3}{(\rho_1 + \beta)(\beta + \rho_3)} \times \frac{\rho_1(R^2\ddot{R} + 2R\dot{R}^2)}{L} \quad (4)$$

که  $L$  فاصله بین مرکز حباب و نقطه اندازه‌گیری فشار پراکنده شده می‌باشد و ترم  $S$  نیز نماینده غشاء کپسول می‌باشد که در این مقاله از مدل مارمونتنت [۲۰] برای جایگذاری آن استفاده شده است.

$$S = -4X \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) - 4Ks \left( \frac{\dot{R}}{R^2} \right) \quad (5)$$

## ۲-۲- روش حل مساله

روش استخراج معادلات حاکم بر حباب از طریق مینا قرار دادن معادلات پیوستگی، بقا مومنتوم و معادله اوپلر و همچنین روش منبع تصویر مجازی جهت تصویرسازی دیواره به صورت یک حباب ضربانی همسایه و اعمال نتایج

روش‌های تشخیص پزشکی دقیق‌تر و رویکردهای درمانی مؤثر و کارآمدتر می‌تواند کمک بزرگی برای درمان این نوع بیماری‌ها باشد. در همین راستا باید اثرات حضور سطح را بر رفتار این میکروحباب‌های پوشش‌دار سنجیده شود تا فهم دقیق‌تری از آن به دست آید چرا که در اکثر موارد کاربردی در این زمینه، میکروحباب‌های مقابله‌ای نزدیک به سطوح مرزی مانند دیواره عروق خونی یا دیواره یک ظرف آزمایشگاهی حرکت می‌کنند. حضور یک دیواره بر رفتار میکروحباب‌های تقابلی تأثیر می‌گذارد و به طور خاص، فرکانس تشدید میکروحباب‌ها و شدت میدان صوتی پراکنده از آن‌ها را تغییر می‌دهد. بنابراین با استفاده از معادلات بقاء، ارتباطی بین تغییر شعاع هسته اولیه حباب و فشار سیال پیرامون آن برقرار می‌شود که با تغییر فشار سیال، شعاع حباب نیز تغییر می‌کند. این معادلات برای حباب آزاد و حباب پوشش‌دار متفاوت بوده که در ادامه معادله مربوط به هر کدام آمده است [۱].

## ۲-۱- معادلات حاکم بر مساله

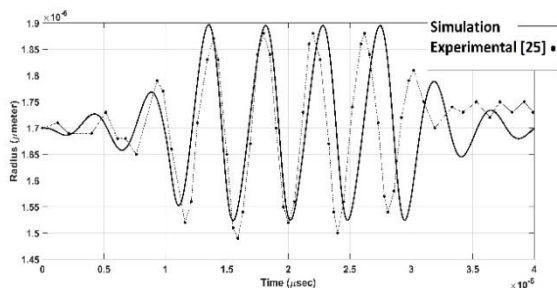
اکثر مدل‌هایی که دینامیک میکروحباب پوشش‌دار را توصیف می‌کنند بر پایه معادله رایلی-پلیست می‌باشند. برای بررسی رفتار شعاعی حباب پوشش‌دار در نزدیکی یک دیواره، دوینیکوف و همکاران [۱۱] رابطه زیر را ارائه داده‌اند:

$$R\ddot{R} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_1 - \beta}{\rho_1 + \beta} \right) \frac{R}{2d} - \left( \frac{\beta - \rho_3}{\beta + \rho_3} \right) \frac{R}{2(d+h)} + \frac{(\rho_1 - \beta)(\beta - \rho_3)}{(\rho_1 + \beta)(\beta + \rho_3)} \frac{R}{2h} \right] + \frac{3}{2} R^2 \left[ 1 - \left( \frac{\rho_1 - \beta}{\rho_1 + \beta} \right) \frac{2R}{3d} - \left( \frac{\beta - \rho_3}{\beta + \rho_3} \right) \frac{2R}{3(d+h)} + \frac{(\rho_1 - \beta)(\beta - \rho_3)}{(\rho_1 + \beta)(\beta + \rho_3)} \frac{2R}{3h} \right] = \frac{1}{\rho_1} \left( 1 + \frac{\dot{R}}{C} + \frac{R}{C} \frac{d}{dt} \right) \left[ \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0^3 - a^3}{R^3 - a^3} \right)^\gamma - \frac{2\sigma}{R} - 4\eta \frac{\dot{R}}{R} - P_0 - P_{ac}(t) - S \right] \quad (1)$$

که  $d$  فاصله حباب از دیواره،  $h$  ضخامت دیواره،  $K$  مدول بالک سیال،  $\mu$  مدول برشی سیال می‌باشد. فرض شده جنس دیواره به صورت یک جامد الاستیک با چگالی  $\rho_2$  رفتار کند و

### ۳- بحث و بررسی نتایج

در شکل ۲ بررسی عددی معادله رایلی- پلیست تغییر یافته (مدل دوینیکوف) برای حباب پوشش-دار در مجاورت دیواره با نتایج آزمایشگاهی که با استفاده از دوربین‌هایی با سرعت فوق‌العاده بالا توسط فن درمیر [۲۲] ثبت گردیده، مقایسه شده است تا بتوان کد برنامه را اعتبارسنجی کرد. در بخش اعتبارسنجی از پارامترهای مورد استفاده در مطالعات فن درمیر [۲۲] الگو گرفته شده است، بدین‌صورت که از حباب عامل BR-14 با شعاع اولیه  $R_0=1.7\mu\text{m}$  در فاصله  $d=100\mu\text{m}$  از دیواره یک رگ خونی با خواص پوسته  $\kappa_s = 2.10^{-9} \text{ kg/s}$  و  $\chi = 0.32 \text{ N/m}$  استفاده شده است. حباب فوق به‌منظور تحریک در یک میدان فراصوتی به‌صورت پالس گاوسی با دامنه‌ای به بزرگی  $P_a = 58 \text{ kPa}$  و فرکانس مرکزی  $f = 2.5 \text{ MHz}$  قرار داده شده است. برای استخراج معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار شعاعی حباب از استنتاج ریاضی و روش تصویر مجازی برای مدل‌سازی حضور دیواره در مجاورت حباب و در مرحله حل عددی از روش رانچ کاتا<sup>۱</sup> مرتبه چهارم استفاده شده است، این الگوریتم برای مسائلی که دارای نوسانات ناگهانی بوده و مستعد واگرا شدن در روند حل می‌باشند مناسب است. جهت افزایش دقت حل نیز از گام زمانی متغیر و متناسب با رفتار نوسانی حباب در هر لحظه استفاده شده است که در همگرایی مسئله کمک شایانی می‌نماید.



شکل (۲): نمودار تغییرات شعاعی حباب پوشش‌دار با زمان و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با استفاده از مدل دوینیکوف.

فشار صوتی اعمال شده  $f = 2.5 \text{ MHz}$ ,  $P_a = 58 \text{ kPa}$

پارامترهای پوسته ویسکوالاستیک  $\chi = 0.32 \text{ N/m}$  و

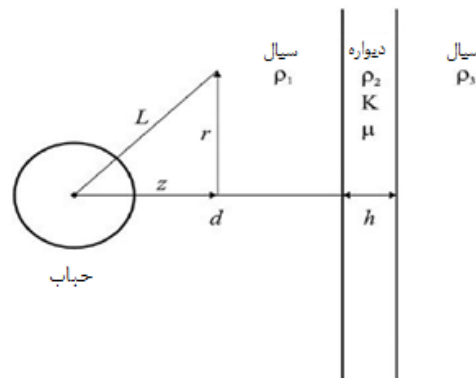
$$\kappa_s = 2.10^{-9} \text{ kg/s}$$

$$d = 100 \mu\text{m} \text{ و}$$

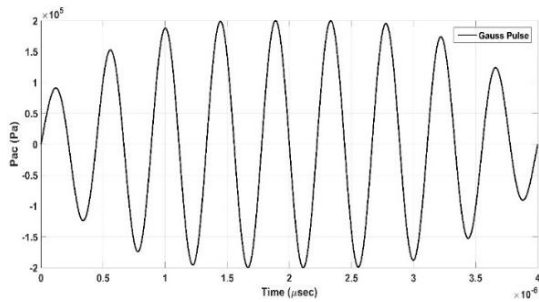
حاصله بر روی تساوی نیرویی حباب آزاد کایتاسیونی مربوط به معادله رایلی- پلیست می‌باشد [۱۱]، نتایج استخراج به‌صورت معادلات ODE هستند که در اینجا از طریق کدنویسی عددی و با الگوریتم حل رانچ کاتا مرتبه چهارم و اعمال گام زمانی پویا (جهت جلوگیری از واگرا شدن حل) و پالس تحریک گاوسی کنترل شده (فرکانس و دامنه و سیکل مشخص) بر آن حل شده است.

شکل ۱ شماتیک کلی از یک حباب در مجاورت دیواره که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است را نشان می‌دهد،  $\rho_1$  و  $\rho_2$  چگالی سیال اطراف حباب،  $h$  و  $\mu, K$  به‌ترتیب چگالی، مدول بالک، مدول برشی و ضخامت دیواره،  $d$  فاصله بین مرکز حباب و دیواره و  $r$  و  $z$  مؤلفه‌های مبدأ مختصات استوانه‌ای از مرکز حباب می‌باشند. در این بخش شبیه‌سازی عددی که با استفاده از معادلات (۱) و (۴) و پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در کاربردهای تجربی ارائه شده و شبیه‌سازی از طریق کدنویسی عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام گردیده است.

در این بررسی همچون سایر مطالعات عددی مربوط به مطالعه برهمکنش بین حباب و دیواره، جهت تمرکز بر روی اهداف کار و ساده‌سازی برخی اثراتی که بر روی اهداف مطلوب ناچیز هستند و یا اصولاً در نظر گرفتن آن‌ها مورد نیاز نمی‌باشد فرض شده است که حباب دارای نوسانات متقارن بوده و کروی باقی می‌ماند (حضور یک حباب پوشش‌دار در مجاورت دیواره برخلاف حباب کایتاسیونی منجر به جت فشاری به سمت دیواره نمی‌شود) و حباب در موقعیت خود ساکن و ثابت باقی می‌ماند، همچنین در معادله استفاده شده اثر تراکم‌پذیری مایع محیط بر حباب گنجانده شده است [۱، ۱۱].



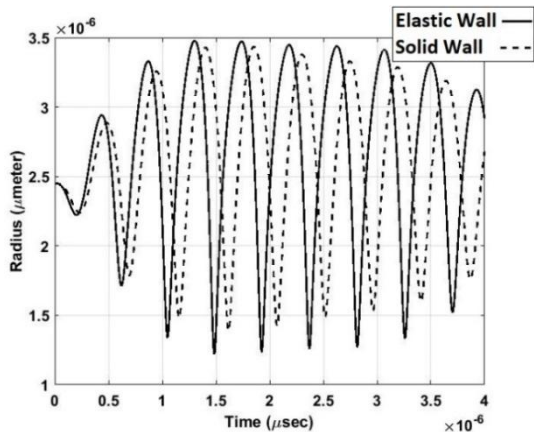
شکل (۱): شماتیک حضور حباب در مجاورت دیواره الاستیک



شکل (۳): پالس تحریک گاوسی

۳-۱- تأثیر حضور دیواره با الاستیسیته مختلف

شکل ۴ نمودار مربوط به تغییر شعاع حباب برحسب زمان را برای حالتی که حباب مجاور دیوار صلب یا الاستیک است را نشان می‌دهد. منحنی توپر منحنی نوسانات شعاعی حباب نزدیک دیواره الاستیک و منحنی خط‌چین منحنی نوسانات شعاعی حباب نزدیک دیواره صلب است. روند تغییر شعاع حباب برای دو حالت مشابه بوده به طوری که ابتدا دامنه نوسان شعاع افزایش یافته سپس روند نزولی پیدا می‌کند. شعاع حباب در مرحله رشد تا حدود ۳ µm افزایش یافته و در مرحله فروریزش نیز به مقدار کمینه ۱/۲۵ µm می‌رسد. تغییر ماهیت دیواره از حالت صلب به الاستیک موجب شده که دامنه نوسانات حباب افزایش یافته درحالی‌که دوره تناوب کاهش پیدا می‌کند. درواقع می‌توان چنین نتیجه گرفت که هرچه صلبیت دیواره بیشتر باشد، نوسان شعاعی حباب بیشتر سرکوب می‌شود. از آنجاکه حضور دیواره در مجاورت حباب سبب یک موج بازتابیده به سمت حباب شده و نوسانات آن را سرکوب می‌نماید پس چون دیواره الاستیک انرژی مکانیکی بیشتری را جذب می‌کند در نتیجه در حالت دیواره الاستیک شاهد دامنه نوسان بیشتری هستیم.



شکل (۴): تغییرات شعاع-زمان برای دو دیواره صلب و الاستیک

در شکل ۲، مشاهده شد که نتایج عددی و آزمایشگاهی هردو حول شعاع تعادلی ۱/۷ µm نوسان را بروز داده و در کرانه اکسترمم‌های محلی نمودار به میزان ۰/۵۸٪ اختلاف دارند. همچنین مشاهده می‌شود که نتایج عددی روند تغییر رفتارهای نوسانی، انقباضی و انبساطی حباب را به خوبی پیش‌بینی می‌کند، از طرفی کشیدگی بیشتر منحنی عددی از زمان ۲/۵ µs به بعد به نظر می‌رسد که ناشی از تفاوت جزئی بین پالس گاوسی تحریک ما و کار آزمایشگاهی انجام‌شده می‌باشد چراکه در مقاله فن درمیر [۲۲] منحنی پالس تحریک داده نشده و فقط به دادن پارامترهای کلی آن اکتفا کرده است و از آنجاکه پالس تحریک در فرکانس نوسان حباب و کشیدگی آن در طول محور زمان مؤثر می‌باشد و همچنین تولید پالس گاوسی کاملاً مشابه نیاز به داده‌های بیشتری دارد، این میزان اختلاف قابل قبول می‌باشد.

در ادامه کار پس از مرحله اعتبارسنجی ذکرشده در بالا بررسی نتایج شبیه‌سازی برای حبابی که در مجاور دیوار صلب یا الاستیک قرار دارد انجام شده است. برای این منظور حباب پوشش‌دار از جنس BR-14 و با شعاع اولیه R0=2.45 µm در فاصله‌ای معادل با شعاع اولیه حباب (d=R0) دیواره قرار دارد. داده‌های فیزیکی در کل این مطالعه شبیه‌سازی مطابق با پارامترهایی است که گاربین [۲۳] در کار آزمایشگاهی استفاده کرده و عبارت‌اند از:

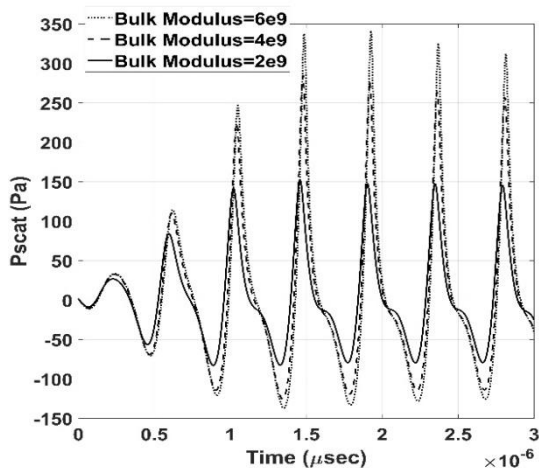
$$P_0=101.3 \text{ kPa} \quad \rho_1=1000 \text{ kg.m}^{-3} \quad \eta=0.001 \text{ Pa.s}$$

$$\sigma=0.072 \text{ N.m}^{-1} \quad \rho_2=1060 \text{ kg.m}^{-3} \quad c=1500 \text{ m.s}^{-1}$$

مقادیر مربوط به پارامترهای پوسته حباب مطابق [۲۰] به صورت زیر انتخاب شده است:

$$X=0.51 \text{ N.m}^{-1}, \quad K_s=0.72 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1}$$

که  $K_s$  و  $X$  به ترتیب لزجت و الاستیسیته ناشی از اضافه‌شدن پوسته کپسول به حباب هستند. حباب مورد آزمایش تحت یک پالس تحریک گاوسی با دامنه ۲۰۰ kPa، فرکانس مرکزی ۲/۲۵ MHz و به صورت ۸ سیکل متناوب مطابق شکل (۳) قرار گرفته است.



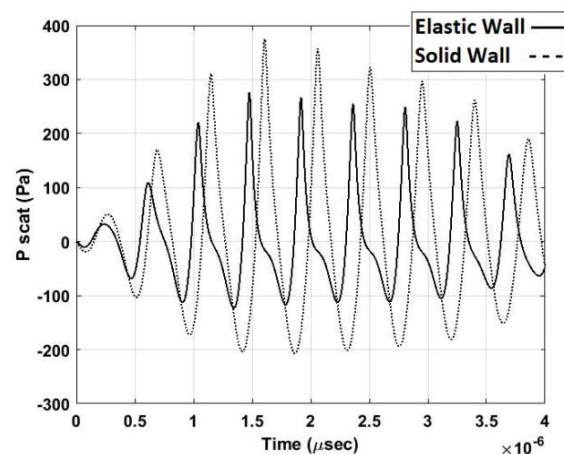
شکل (۶): نمودار فشار پراکنده برای دیوارهایی با خواص الاستیکی مختلف

مطابق نتایج به دست آمده حضور دیواره، فشار پراکنده شده از حباب را نیز تحت تأثیر قرار داده و هرچه الاستیسیته دیواره بالاتر برود فشار پراکنده بیشتر تقویت می شود از طرفی نیز می توان فهمید از آنجاکه منحنی ها در طول محور افقی دچار جابجایی شده اند پس حضور دیواره با الاستیسیته های مختلف بر روی فرکانس طبیعی حباب نیز اثرگذار هستند. به نظر می رسد فشار پراکنده شده از حباب به دو دلیل تغییر کرده باشد؛ یکی این که حضور دیواره بر معادله رفتار دینامیک حباب تأثیر می گذارد و دیگری این که دیواره موج پراکنده شده از حباب را بازتاب می دهد و به دنبال این دو اتفاق فشار پراکنده شده نیز دستخوش تغییرات می گردد. در ادامه با استفاده از مقادیر واقعی مربوط به پارامتر لزجت پوسته ( $K_s$ ) میزان تأثیر آن بر رفتار شعاعی و فشار پراکنده شده از میکرو حباب مقابله ای بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از مقادیر  $K_s$  که در جدول ۱ آورده شده میزان تغییر در فشار، شعاع و همچنین رفتار انقباض غالب حباب مقایسه گردیده و سپس نتایج به صورت مقادیر عددی و نمودار ارائه شده است.

شکل ۷، نمودار تغییرات شعاع حباب بر حسب زمان را به ازای مقادیر مختلف لزجت پوسته نشان می دهد. با توجه به این که سه حباب در معرض یک فشار تحریک قرار گرفته اند بنابراین بسامد مربوط به نوسانات حباب ها یکسان است ولی دامنه تغییر شعاع حباب ها متفاوت می باشد. با افزایش  $K_s$  مقدار شعاع بیشینه و کمینه حباب تغییر کرده

### ۳-۱- تأثیر حضور دیواره با الاستیسیته مختلف

شکل ۵ موج فشار انتشار یافته از حباب های مربوط به شکل ۴ را نشان می دهد که در فاصله  $L=0.01m$  از حباب اندازه گیری شده است. فشار انتشار یافته از حباب نیز همانند تغییرات شعاع به صورت نوسانی است. زمانی که حباب رشد می کند کاهش فشار رخ می دهد و با فروریزش حباب، فشار انتشار یافته به مقدار بیشینه می رسد. برخلاف تغییرات شعاعی حباب، دامنه موج فشاری در حباب نزدیک دیوار صلب بیشتر است به طوری که مقدار بیشینه فشار منتشر شده از این حباب حدود  $375Pa$  است در صورتی که مقدار بیشینه فشار مربوط به حباب مجاور دیوار الاستیک حدود  $262Pa$  است. همان طور که مشاهده می شود حضور دیواره با صلبیت بیشتر موج فشاری پراکنده را بسیار قوی تر پراکنده می نماید چراکه هرچه دیواره صلب تر باشد انرژی کمتری را جذب کرده و منتقل می نماید در نتیجه موج بازتابیده به حباب قوی تر بوده که منجر به موج فشاری پراکنده شده پر قدرتی می شود.



شکل (۵): تغییرات فشار پراکنده شده برای دیواره صلب و الاستیک

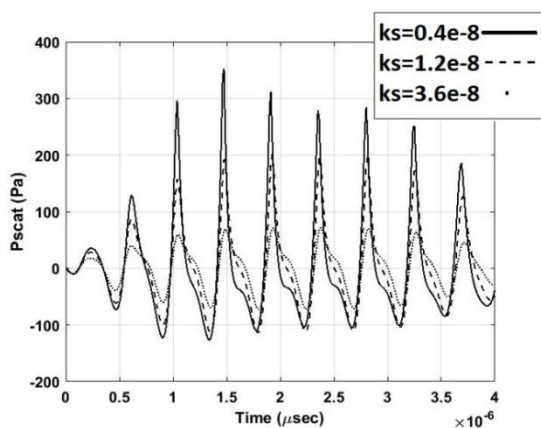
### ۳-۲- تأثیر لزجت پوسته حباب

در شکل ۶، موج فشاری پراکنده شده از حباب برای دیوارهایی با خواص مکانیکی متفاوت آورده شده است و همان طور که دیده می شود مطابق آنچه ذکر شد با افزایش مدول بالک و در پی آن افزایش صلبیت دیواره موج فشاری پراکنده شده از حباب نیز قوی تر است.

افت کیفیت و وضوح تصویربرداری پزشکی خواهد شد در نتیجه حباب پوشش‌داری با لزجت پوسته هرچه کمتر با خواص اکوژنیک بالاتر مانند پوسته‌های لیپیدی و پروتئینی برای استفاده در فرآیند تصویربرداری تشخیصی مطلوب‌تر خواهند بود. مقادیر مربوط به شعاع و فشار کمینه و بیشینه برای مقادیر مختلف  $K_s$  برای بررسی دقیق‌تر در جدول ۱ آمده است. ستون  $E/C$  در واقع وقوع رفتار انقباضی- غالب را در نوسان شعاعی حباب را پیش‌بینی می‌کند به طوری که اگر  $E/C < 1$  باشد حباب دارای رفتار انقباضی- غالب بوده و در غیر این صورت حباب دارای رفتار انقباضی- غالب نمی‌باشد. مقدار  $E/C$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = R_{\max} - R_0 \quad (\text{میزان حداکثر انبساط حباب})$$

$$C = R_0 - R_{\min} \quad (\text{میزان حداکثر انقباض حباب})$$



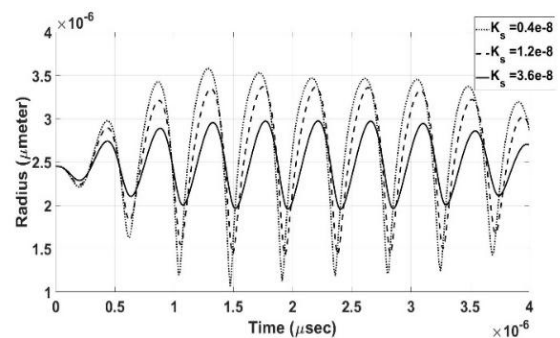
شکل (۸): نمودار فشار پراکنده- زمان برای  $K_s$  های مختلف

با توجه به جدول ۱ و تصاویر ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان لزجت ناشی از پوسته ( $K_s$ )، اولاً دامنه نوسان شعاعی حباب سرکوب‌شده، دوماً میزان فشار پراکنده‌شده از حباب کاهش‌یافته و همچنین رفتار انقباضی- غالب نیز به تدریج ضعیف شده و در نهایت از بین می‌رود.

جدول (۱): داده‌های مرتبط با تصاویر ۷ و ۸

مقاله مورد استفاده	$K_s$ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$R_{\max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\min}$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_{\max}$ (Pa)	$P_{\min}$ (Pa)	$E/C$
Tu 2009[۲۸]	$0.4 \times 10^{-8}$	$3.58 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-6}$	$3.37 \times 10^{-2}$	$-1.26 \times 10^{-2}$	0.807
Sarkar 2010[۲۷]	$1.2 \times 10^{-8}$	$3.36 \times 10^{-6}$	$1.41 \times 10^{-6}$	$2.01 \times 10^{-2}$	$-1.13 \times 10^{-2}$	0.875
Kumar 2015[۲۹]	$3.6 \times 10^{-8}$	$2.97 \times 10^{-6}$	$1.95 \times 10^{-6}$	$0.71 \times 10^{-2}$	$0.71 \times 10^{-2}$	1.04

به طوری که شعاع بیشینه کاهش‌یافته در صورتی که فشار کمینه افزایش پیدا می‌کند. این تغییرات برای مقادیر بزرگ‌تر  $K_s$  بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش لزجت پوسته حباب نوسانات شعاعی حباب سرکوب شده و دامنه نوسانات آن محدود می‌گردد، این رفتار را در نمودار فشار پراکنده‌شده از حباب نیز می‌توان دید. از آنجاکه حباب‌های پوشش‌دار گوناگون با خواص فیزیکی متفاوتی توسط شرکت‌های داروسازی تولید می‌شود، طبیعتاً تأثیر پارامتر لزجت پوسته در عواملی با پوشش ضخیم پلیمری با پایداری زیاد که عمدتاً برای دارورسانی استفاده می‌شوند حائز اهمیت هستند.



شکل (۷): نمودار شعاع- زمان برای  $K_s$  های مختلف

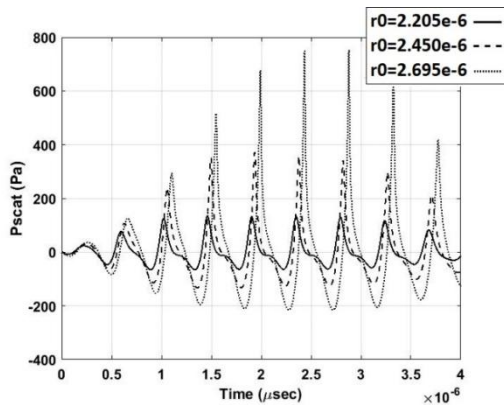
تغییرات مربوط به فشار پراکنده‌شده ناشی از نوسانات حباب در شکل ۸ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه مربوط به فشار پراکنده شده، در زمان فروریزش حباب اتفاق می‌افتد. برای مقادیر پایین  $K_s$  که تغییرات شعاع حباب بیشتر بوده، مقدار فشار پراکنده نیز بیشتر می‌باشد. در مورد پارامتر لزجت پوسته حباب برخلاف دیواره مشاهده شد که با گرایش الاستیسیته پوسته به سمت هرچه صلب‌تر بودن از میزان قدرت موج پراکنده‌شده از حباب کاسته می‌شود که این امر منجر به



### ۳-۳- تأثیر شعاع اولیه حباب

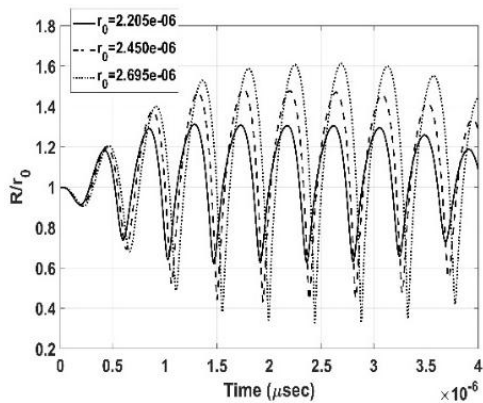
برای بررسی تأثیر شعاع اولیه حباب بر مقدار فشار انتشار یافته از حباب، شبیه‌سازی عددی برای دو حالتی که مقدار شعاع اولیه حباب به اندازه ۱۰٪ نسبت به شعاع مرجع ( $R_0=2.45\mu\text{m}$ ) کاهش و افزایش یافته انجام شده است.

شکل ۹ تغییرات شعاع حباب برحسب زمان را برای شعاع اولیه مختلف نشان می‌دهد. افزایش شعاع اولیه موجب شده که مقدار شعاع بیشینه به میزان ۱۹/۵۶٪ افزایش یابد در صورتی که شعاع کمینه نسبت به حالت مرجع به اندازه ۲۰/۴٪ کمتر می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات فشار انتشار یافته از نوسانات حباب‌های مربوط به شکل ۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود همانند حالت قبلی مقادیر بیشینه مربوط به فشار پراکنده در زمان‌های فروریزش حباب اتفاق می‌افتد و برای مقادیر شعاع بالاتر، مقدار فشار پراکنده نیز بیشتر می‌باشد. با توجه به جدول ۲ و تصاویر ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان شعاع اولیه حباب ( $R_0$ )، اولاً دامنه نوسان شعاعی حباب تقویت شده و بر میزان حداقل و حداکثر شعاع حباب نیز افزوده می‌گردد، دوماً فشار پراکنده شده از حباب نیز افزایش یافته و مقدار حداقل و حداکثر فشار پراکنده شده از حباب نیز بیشتر می‌گردد. از طرف دیگر در تمام این سه حالت رفتار انقباضی-غالب وجود دارد اما با افزایش شعاع اولیه این رفتار ضعیف‌تر می‌شود.

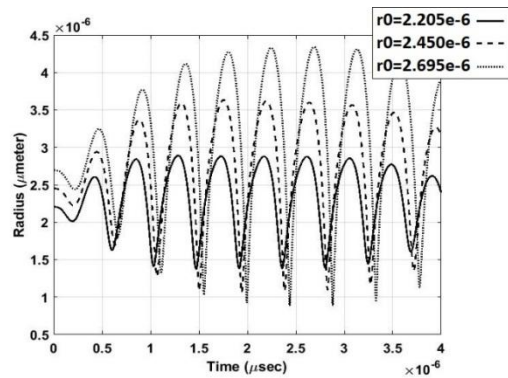


شکل (۱۰): تغییرات فشار انتشار یافته از حباب برحسب زمان برای شعاع‌های مختلف

به منظور مقایسه بهتر بین شعاع‌های اولیه مختلف و به دلیل این که بررسی روند تغییرات شعاعی حباب پوشش‌دار در شرایط گوناگون شفاف‌تر باشد از یک مولفه بی‌بعد  $\frac{R}{R_0}$  استفاده شده است. همان‌طور که قبل‌تر بیان شد حباب پوشش‌دار بزرگ‌تر دارای دامنه نوسانات بالاتری است و همچنین مشاهده می‌شود این تغییرات شعاعی سبب اندکی تغییر در فرکانس طبیعی حباب‌ها نیز شده به طوری که نمودار شعاعی حباب‌های بزرگ‌تر در امتداد محور زمان کمی کشیده‌تر شده‌اند و توجه به این مورد در مطالعه رژیم غیرخطی حباب‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. در شکل ۱۱ نمودار تغییرات پارامتر بی‌بعد  $\frac{R}{R_0}$  برای شعاع‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل (۱۱): نمودار تغییرات پارامتر بی‌بعد  $\frac{R}{R_0}$  برای شعاع‌های مختلف

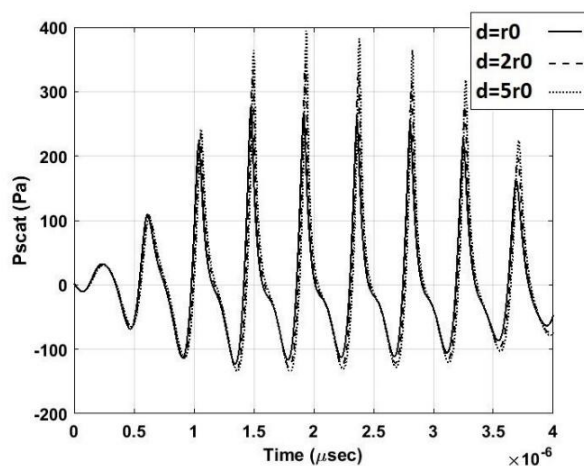


شکل (۹): نمودار شعاع- زمان برای شعاع‌های مختلف

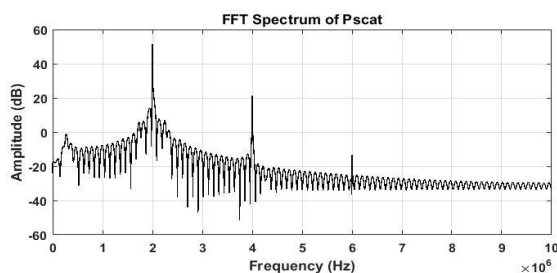
جدول (۲): داده‌های مرتبط با تصاویر ۹ و ۱۰

$R_0$	$R_{\max} (\mu\text{m})$	$R_{\min} (\mu\text{m})$	$P_{\max} (\text{Pa})$	$P_{\min} (\text{Pa})$	E/C
$2/2.05 \times 10^{-6}$	$2/89 \times 10^{-6}$	$1/37 \times 10^{-6}$	۱۳۵/۰۸	-۶۵/۶۴۴	۰/۸۲۰
$2/4.50 \times 10^{-6}$	$2/۶۳ \times 10^{-6}$	$1/۰۶ \times 10^{-6}$	۳۷۲/۰۸	-۱۳۳/۰۴	۰/۸۴۹
$2/۶.۹۵ \times 10^{-6}$	$۴/۳۴ \times 10^{-6}$	$۰/۸۸ \times 10^{-6}$	۷۵۲/۶۱	-۲۱۵/۴۲	۰/۹۰۶

دیواره، دامنه نوسان شعاعی حباب و همچنین دامنه فشار پراکنده شده از حباب افزایش می‌یابد اما تاثیر آن بر روی دامنه نوسان شعاعی حباب چندان شدید نیست از طرف دیگر هرچه بر میزان این فاصله افزوده می‌شود، رفتار دینامیک حباب نیز به رفتار یک حباب نوسانی در یک مایع بی‌کران نزدیک‌تر می‌گردد. علت تقویت موج فشاری پراکنده شده از حباب نیز می‌تواند همان اثر تقویت‌کنندگی موج بازتابیده از دیواره باشد که قبل‌تر به آن اشاره شد و طبیعتاً هرچه قدر حباب از دیواره دورتر باشد این اثر را کمتر احساس می‌نماید.



شکل (۱۳): تأثیر فاصله حباب از دیواره بر فشار انتشار یافته

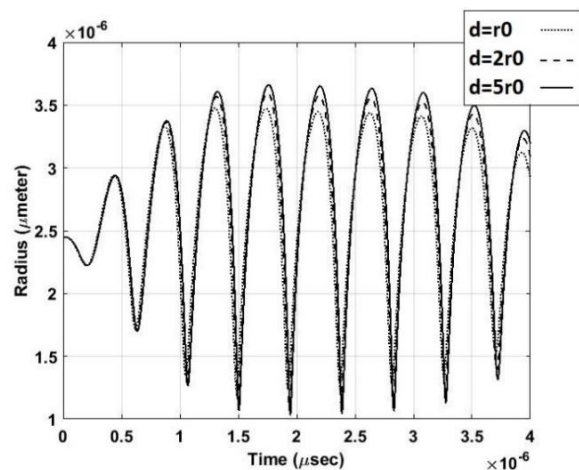


شکل (۱۴): طیف فوریه از فشار پراکنده شده از حباب پوشش‌دار با خواص مشابه شکل ۴ در مجاورت دیواره الاستیک با دامنه فشار تحریک ۳ MPa

در شکل ۱۵ تأثیر شعاع اولیه بر روی میزان قدرت طیف موج اصلی (Fundamental) بررسی شده و خواص حباب نیز در این شکل همانند قبل مشابه شکل ۴ می‌باشد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود هرچه از حباب با شعاع اولیه بزرگ‌تری در فرآیند تصویربرداری فراصوتی بر مبنای روش پالس-اکو استفاده گردد، تصویر دارای وضوح و کیفیت

### ۳-۴- تأثیر فاصله حباب از دیواره

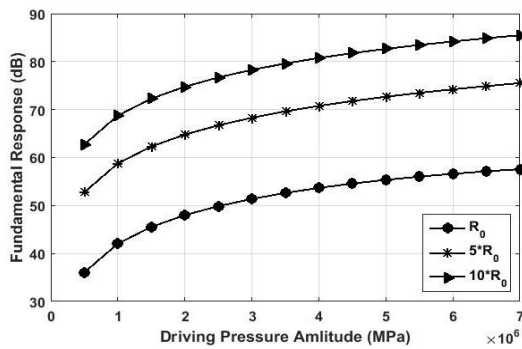
با توجه به این‌که حباب‌های پوشش‌دار هم در کاربردهای بالینی و هم در کاربردهای آزمایشگاهی در فواصل گوناگونی از دیواره مویرگ قرار می‌گیرند، بنابراین، بررسی تأثیر فاصله مرکز حباب از دیواره نیز می‌تواند جالب توجه باشد. بدین‌منظور در این قسمت رفتار دینامیک حباب در سه فاصله مختلف از دیواره الاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار شعاع- زمان برای سه فاصله مختلف از دیواره به صورت زیر حاصل گردیده است؛ همان‌طور که در تصاویر ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود با افزایش فاصله بین حباب و



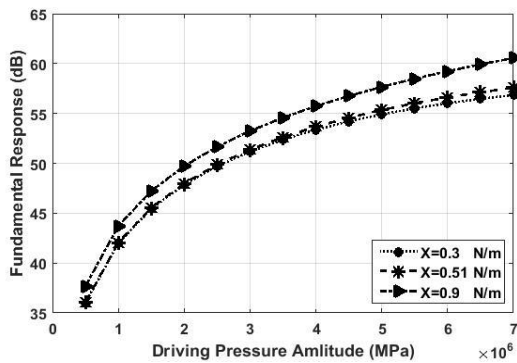
شکل (۱۲): تأثیر فاصله حباب از دیواره بر دینامیک حباب

در شکل ۱۴ طیف فوریه موج پراکنده شده از حباب پوشش‌دار در مجاورت یک دیواره الاستیک و با خواص مشابه با حباب شکل ۴ و فشار تحریک  $P_a=3\text{MPa}$  آورده شده است.

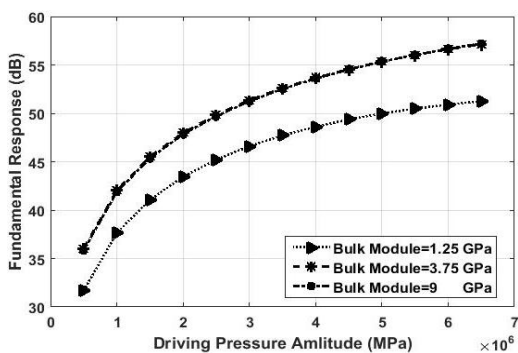
همان‌طور که مشاهده می‌شود حباب در این شرایط دارای یک طیف موج اصلی (Fundamental) و هارمونیک‌های دوم و سوم بوده و در صورت افزایش دامنه فشار تحریک امکان ظهور هارمونیک‌های بالاتر و بروز نوسانات غیرخطی حباب نیز فراهم می‌گردد. عوامل مختلفی همچون اندازه شعاع اولیه حباب، فرکانس تحریک و دامنه فشار تحریک می‌توانند بر روی ظاهر شدن این فرکانس‌های هارمونیک مؤثر باشند که در ادامه نحوه تأثیر شعاع اولیه و الاستیسیته پوسته حباب پوشش‌دار در مجاورت یک دیواره الاستیک و همچنین مدول کشسانی حجمی خود دیواره بر روی فرکانس موج اصلی بررسی شده است.



شکل (۱۵): پاسخ فرکانسی حباب با خواص مشابه شکل ۴ و با سه شعاع اولیه مختلف و با فرکانس تحریک ۲ مگاهرتز و دامنه فشارهای تحریک مختلف



شکل (۱۶): پاسخ فرکانسی حباب با خواص مشابه شکل ۴ و با سه الاستیسیته پوسته مختلف و با فرکانس تحریک ۲ مگاهرتز و دامنه فشارهای تحریک مختلف



شکل (۱۷): پاسخ فرکانسی حباب با خواص مشابه شکل ۴ و با مدول کشسانی حجمی مختلف برای دیواره و با فرکانس تحریک ۲ مگاهرتز و دامنه فشارهای تحریک مختلف

#### ۴- نتیجه گیری

با توسعه یک کد عددی در نرم افزار متلب، معادله دیفرانسیل غیرخطی رایلی-پلیست اصلاح شده برای حباب کاویتاسیون

بالاتری خواهد بود چراکه در این روش تصویربرداری فراصوتی مؤلفه مطلوب همان طیف موج اصلی و میزان قدرت آن می باشد و افزایش قدرت این بخش از طیف فرکانسی تأثیر مستقیم بر کیفیت تصویر بازسازی شده خواهد داشت. مطابق با شکل ۱۵ مشاهده می شود با افزایش تدریجی دامنه فشار تحریک اعمالی بر حباب، مؤلفه موج اصلی برای هر سه شعاع رو به افزایش می رود اما حباب با شعاع بیشتر دارای مؤلفه موج اصلی قوی تری می باشد و از آنجا که عوامل تقابلی فراصوتی به صورت محلول هایی شامل حباب هایی با شعاع های مختلف ارائه می شوند پس در نتیجه سازنده این عوامل با توجه با محدودیت های فنی و عملی هرچه بتواند حباب هایی با میانگین شعاع بالاتری در محلول داشته باشد، آنگاه برای فرآیند تصویربرداری بر مبنای روش پالس-اگو مطلوب تر خواهد بود.

در شکل ۱۶ تأثیر الاستیسیته پوسته حباب بر روی میزان قدرت طیف موج اصلی مشاهده شده و خواص حباب نیز در این شکل مشابه شکل ۴ می باشد. همان طور که دیده می شود هرچه عامل تقابلی فراصوتی انتخاب شده برای فرآیند تصویربرداری دارای ضریب الاستیسیته بالاتری باشد سبب افزایش قدرت طیف موج اصلی بازگشتی از حباب می گردد.

در شکل ۱۷ نیز پس از بررسی تأثیر خود حباب در فرآیند تصویربرداری به نقش دیواره بر روی پاسخ فرکانسی پرداخته شده و تأثیر خواص الاستیکی دیواره (مدول کشسانی حجمی) بر روی میزان قدرت طیف موج اصلی بررسی شده است.

همان طور که دیده می شود هرچه مدول بالک دیواره بالاتر باشد قدرت طیف موج اصلی بیشتر خواهد بود، در واقع می توان دریافت خواص الاستیکی بافتی که به عنوان دیواره برای حباب تقابلی فراصوت در نظر گرفته می شوند در کیفیت تصویر اثرگذار هستند. مطابق شکل ۱۷ با افزایش مدول بالک از میزان تأثیر آن بر موج اصلی کاسته شده و نمودارها بسیار به هم نزدیک می شوند در نتیجه در تولید عوامل تقابلی فراصوت تولیدکنندگان باید حداقل مقداری که سبب بروز حداکثر میزان تقویت طیف موج اصلی می شود را مدنظر قرار دهند.

3. Blake, J. R. and Gibson, D. C. "Cavitation Bubbles Near Boundaries", J. of Annual Review Fluid Mechanics, Vol. 19, pp. 99-123, 1987.
4. Brujan, E. A., Nahen, K., Schmidt, P., and Vogel, A. "Dynamics of Laser-induced Cavitation Bubbles Near an Elastic Boundary", J. Fluid Mech., Vol. 433, pp. 251-281, 2001.
5. Brujan, E. A., Nahen, K., Schmidt, P., and Vogel, A. "Dynamics of Laser-Induced Cavitation Bubbles Near Elastic Boundaries: Influence of the Elastic Modulus", J. Fluid Mech., Vol. 433, pp. 283-314, 2001.
6. Brujan, E. A., Pearson, A., and Blake, J. R. "Pulsating Buoyant Bubbles Close to a Rigid Boundary and Near the Null Final Kelvin Impulse State" Int. J. Multiphas. Flow, Vol. 31, no. 3, pp. 302-317, 2005.
7. Kodama, T. and Tomita, Y. "Cavitation Bubble Behavior and Bubble-shock Wave Interaction Near a Gelatin Surface as a Study of in Vivo Bubble Dynamics" Appl. Phys. B, Vol. 70, no. 1, pp. 139-149, 2000.
8. Zhao, S., Kruse, D. E., Ferrara, K. W., and Dayton, P. A. "Acoustic Response from Adherent Targeted Contrast Agents" J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120, no. 6, pp. 63-69, 2006.
9. Fong, S. W., Klaseboer, E., Turangan, C. K., Khoo, B. C., and Hung, K. C. "Numerical Analysis of a Gas Bubble Near Bio-Materials in an Ultrasound Field" Ultrasound Med. Biol., Vol. 32, no. 6, pp. 925-942, 2006.
10. Bettinger, T. and Tranquart, F. "Design of Microbubbles for Gene and Drug Delivery" Therapeutic Ultrasound, Advances in Experimental Medicine and Biology Vol. 880, pp.191-204, 2016.
11. Doinikov, A. A., Aired, L. and Bouakaz, A. "Acoustic Scattering From a Contrast Agent Microbubble Near An Elastic Wall Of finite thickness" Physics in Medicine & Biology Vol. 56, no. 21, pp. 6951-6967, 2011.
12. Herring, C. "Theory of the Pulsations of the Gas Bubble Produced by an Underwater Explosion" Technical report, New London, Conn. Columbia Univ., Div. of National Defense Research, OSRD report 236, 1941.
13. Strasberg, M. "The pulsation frequency of nonspherical gas bubbles in liquids" J. Acoust. Soc. Am., Vol. 25, pp. 536-537, 1953.
14. Blue, J. E. "Resonance of a Bubble on an Infinite Rigid Boundary" J. Acoust. Soc. Am., Vol. 41, pp. 369-372, 1967.

پوشش‌دار در نزدیکی یک دیوار حل عددی شده و نوسانات شعاعی حباب و موج فشاری انتشاریافته از آن به ازای پارامترهای مختلف همانند شعاع اولیه حباب، لزجت پوسته و فاصله حباب از دیواره بررسی شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که نوسان شعاعی یک حباب پوشش‌دار نزدیک دیواره‌ای با الاستیسته بالاتر به مقدار بیشتری سرکوب می‌شود. کاهش لزجت ناشی از پوسته  $(K_s)$  و افزایش شعاع اولیه حباب موجب تقویت دامنه نوسانات حباب و تقویت رفتار انقباض غالب گردیده و شدت فشار انتشار یافته از فروریزش حباب نیز افزایش می‌یابد. همچنین هرچه فاصله حباب از دیواره بیشتر شود رفتار دینامیکی حباب به حباب آزاد نزدیک‌تر شده و شعاع بیشینه آن افزایش پیدا می‌کند. با افزایش میزان شعاع اولیه حباب و ضریب الاستیسته پوسته آن میزان قدرت موج اصلی نیز افزایش می‌یابد در نتیجه شعاع اولیه بزرگ‌تر و پوششی الاستیک‌تر برای حباب در فرآیند تصویربرداری پزشکی مطلوب‌تر می‌باشد و سازندگان عوامل کنتراست فراصوتی هرچه بتوانند محلولی شامل حباب‌هایی با میانگین شعاع بالاتر و دارای ضریب الاستیسته بیشتری برای پوسته حباب ارائه بدهند، می‌توانند سبب بهبود کیفیت تصویر فرآیند تصویربرداری پالس-اکو گردند. همچنین از آنجا که تصویربرداری از بافت‌های گوناگونی از بدن انجام می‌شود و این بافت‌ها نقش دیواره را برای حباب ایفا می‌کنند مشاهده شد که هر چه بافت دارای مدول کشسانی حجمی بیشتری باشد اثر مطلوب‌تری در تصویربرداری خواهد داشت.

در انتها با توجه به رفتار پیچیده حباب در مجاورت مرزها و همچنین تشکیل میکروجریان‌ها و جت پرفشار در نزدیک مرز پیشنهاد می‌شود که این‌گونه رفتارهای حباب‌های پوشش‌دار نیز به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی و بررسی گردد. ضمناً از آنجا که در روش‌های نوین تصویربرداری پزشکی بر روی مؤلفه‌های نوسان غیرخطی حباب تمرکز زیادی وجود دارد از این رو بهتر است این رژیم نوسانی مورد بررسی قرار بگیرد.

## ۵- مراجع

1. Brennen, C. E. "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press, New York, 1995.
2. Leighton, T. G. "The Acoustic Bubble", Academic Press, University of Southampton, England, 1994.

24. Shirshendu, P., Amit, K., and Kausik S., "Material Characterization of the Encapsulation of an Ultrasound Contrast Microbubble and its Subharmonic Response: Strain-Softening Interfacial Elasticity Model", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 127, no. 6, pp. 3846–3857, 2010.
25. Doinikov, A. A., Aired, L., and Bouakaz, A. "Modeling and experiments on the far-field scattering of a bubble pulsating near a wall with finite density and thickness," *IEEE International Ultrasonics Symposium*, San Diego, CA, 2010.
26. Doinikov, A. A., Aired, L., and Bouakaz, A. "Effect of an Elastic Wall on the Dynamics of an Encapsulated Microbubble: A Simulation Study", *Ultrasonics*, Vol. 53, pp. 23-28, 2013.
27. Sarkar, K., Paul, S., and Katiyar, A. "Material Characterization of the Encapsulation of an Ultrasound Contrast Microbubble and its Subharmonic Response" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 127, pp. 3846-3857, 2010.
28. Tu, J., Guan, J., Qui, Y., and Matula, T. J. "Estimating the Shell Parameters of Sonovue Microbubbles Using Light Scattering" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 126, no. 6, pp. 2954-295462, 2009.
29. Kumar, K. and Sarkar, K. "Effects of Ambient Hydrostatic Pressure on the Material Properties of the Encapsulation of an Ultrasound Contrast Microbubble" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 138, no. 2, 624–634, 2015.
30. Garashchuk, I., Sinelshchikov, D., and Kudryashov, N. "Nonlinear Dynamics of a Bubble Contrast Agent Oscillating near an Elastic Wall" *Regular and Chaotic Dynamics*, Vol. 23, pp. 257–272, 2018.
31. Garashchuk, I., Sinelshchikov, D. and Kudryashov, N. "General Solution of the Rayleigh Equation for Description of Bubble Oscillations Near a Wall" *Mathematical Modeling and Computational Physics 2017 (MMCP 2017)*, Dubna, Russia, EPJ Web of Conferences, Vol. 173.
32. Doinikov, A.A., Novell, A., Escoffre, JM. And Bouakaz, A. "Encapsulated Bubble Dynamics in Imaging and Therapy" *Bubble Dynamics and Shock Waves*, Vol. 8 , pp. 259-289, 2013.
15. Illesinghe, S., Ooi, A., and Manasseh, R. "Eigenmodal resonances of polydisperse bubble systems on a rigid boundary" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 126, pp. 2929-2938, 2009.
16. Doinikov, A., Zhao, S., and Dayton, P. "Modeling of the acoustic response from contrast agent microbubbles near a rigid wall" *J. of Ultrasonics*, Vol. 49, pp. 195-20, 2009.
17. Shima, A. and Tomita, Y. "The behavior of a spherical bubble near a solid wall in a compressible liquid" *Ing. Arch*, Vol. 51, pp. 243–255, 1981.
18. Doinikov, A., Aired, L., and Bouakaz, A. "Acoustic response from a bubble pulsating near a fluid layer of finite density and thickness" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 129, pp. 616-621, 2011.
19. Garbin, V., Cojoc, D., Ferrari, E., Fabrizio, E., Overvelde, M. L. J., Van Der Meer, S. M., De Jong, N., Lohse, D., and Versluis, M. "Changes in microbubble dynamics near a boundary revealed by combined optical micromanipulation and high-speed imaging" *Applied physics letters*, Vol. 90, pp. 114103-1-114103-3, 2007.
20. Marmottant, P., Van Der Meer, S., Emmer, M., Versluis, M., De Jong, N., Hilgenfeldt, S., and Lohse, D. "A model for large amplitude oscillations of coated bubbles accounting for buckling and rupture" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 118, pp. 3499-3505, 2005.
21. Martynov, S., Stride, E., and Saffari, N. "The natural frequencies of microbubble oscillation in elastic vessels" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 126, pp. 2963-2972, 2009.
22. Der Meer, S. M., Dollet, B., Voormolen, M. M., Chin, C. T., Bouakaz, A, De Jong, N., Versluis, M., and Lohse, D. "Microbubble spectroscopy of ultrasound contrast agents" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 121, pp. 648-656, 2007.
23. Garbin V, Cojoc D, Ferrari E, Di Fabrizio E, Overvelde M L J, van der Meer S M, de Jong N, Lohse D and Versluis M "Changes in microbubble dynamics near a boundary revealed by combined optical micromanipulation and high-speed imaging" *Appl. Phys. Lett.* Vol. 90, pp.114103-1-114103-3, 2007.