

تحلیل تجربی رفتار یک حباب نوسانی در مجاورت سطوح صلب و الاستیک

ابوالفضل حاجی زاده اقدم*

استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

امروزه مطالعه برهم کنش حباب با سطوح صلب و الاستیک در بسیاری از کاربردهای مهندسی و پزشکی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این مقاله رفتار حباب در مجاورت یک سطح الاستیک و همچنین بین دو سطح صلب و الاستیک موازی با هم به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. در تمامی حالات، حضور سطوح در مجاورت حباب باعث افزایش طول عمر حباب گردید. حباب در مجاورت یک سطح الاستیک در فاز فروپاشی به شکل "قارچ" تبدیل شده و نهایتاً به دو حباب کوچکتر تقسیم می شود. زمانی که حباب در وسط دو سطوح صلب موازی هم و همچنین دو سطح الاستیک موازی هم قرار گرفت در فاز فروپاشی به دلیل تغییرات فشار موضعی متقارن اطراف آن، حباب به ترتیب شکل های "دمبلی شکل" و "گلدانی شکل" را به خود گرفت. در این حالات در انتهای فاز فروپاشی، شاهد تقسیم حباب به دو حباب کوچکتر و تشکیل دو جت مایع معکوس به سمت سطوح بودیم. همچنین پارامترهای بی بعد فاصله حباب از سطوح (h) و خروج از مرکزی (ε) بین سطوح صلب و الاستیک بررسی گردید.

واژه های کلیدی: حباب، سطح صلب، سطح الاستیک، الاستیسیته، خروج از مرکزی، جت مایع.

Experimental analysis of the behavior of an oscillating bubble in the vicinity of rigid and elastic surfaces

A. Hajizadeh Aghdam

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Abstract

The study of the interaction of bubbles with rigid and elastic surfaces is of great importance in many engineering and medical applications. In this paper, the bubble behavior adjacent to an elastic surface and also between two rigid and parallel elastic surfaces is studied experimentally. In all cases, the presence of surfaces adjacent to the bubble increased the bubble life time. The bubble becomes a "mushroom" adjacent to an elastic surface in the collapse phase and eventually splits into two smaller bubbles. When the bubble was in the middle of two parallel rigid surfaces as well as two parallel elastic surfaces in the collapse phase due to changes in the symmetric local pressure around it, the bubbles took the form of "dumbbell" and "pot-shaped", respectively. In these cases, at the end of the disintegration phase, we saw the bubble split into two smaller bubbles and the formation of two liquid jets toward the surfaces. The bubble nondimensional distance and eccentricity was also studied between rigid and elastic parallel surfaces.

Keywords: Bubble, Rigid surface, Elastic surface, Elasticity, Eccentricity, Liquid jet.

مطالعه برهم کنش حباب نوسانی با مرز صلب، سطح آزاد و بافت سلولی انسان که در واقع مرز الاستیک می باشد پرداخته اند [1-6]. مشاهده گردیده است که در کنار دیوار صلب، یک جت از طرف حباب به سمت دیواره روانه می گردد. همچنین در مجاورت سطح آزاد، جتی در خلاف جهت سطح از طرف حباب گسترش می یابد. رفتار حباب در کنار مرز الاستیک بسیار پیچیده است طوری که حباب می تواند به دو حباب کوچک تقسیم شود و پدیده های مختلفی مشاهده شود [7, 8].

از طرفی مطالعه تجربی رفتار حباب های نوسانی در کنار غشاء بسیار مشکل، حساس و طاقت فرسا می باشد، چرا که حباب دارای اندازه هایی در ابعاد میکرومتر و یا میلیمتر بوده و زمان نوسان حباب نیز از درجه میکرو ثانیه و یا میلی ثانیه می باشد. بنابراین انجام دقیق آزمایشاتی در ابعاد مکانی و زمانی تا این حد کوچک، مستلزم وجود دستگاهی با فناوری های بسیار بالا و دقیق می باشد.

بروجان و همکاران آخرین مرحله فروپاشی حباب کاویتاسیون را در مجاورت یک سطح صلب تخت و تقسیم شدن حباب را به صورت تجربی (عکسبرداری با سرعت ۵ میلیون فریم بر ثانیه) و عددی (روش

۱- مقدمه

پدیده کاویتاسیون و حباب های تولید شده در مایعات نقش مهمی را در زمینه های مختلف علمی و مهندسی ایفا می کند. این پدیده در صنعت یکی از اصلی ترین مسائلی است که همواره مهندسی و محققین را با مشکل مواجه ساخته است. کاویتاسیون بخصوص در زمینه هیدرودینامیک در هر نوع ماشین هیدرولیکی مانند پمپ ها، توربین ها، دریچه ها، کانال ها و غیره می تواند اتفاق بیفتد. وقوع کاویتاسیون شدید، نه تنها باعث ایجاد سر و صدا و آسیب های جدی به تجهیزات مکانیکی شده بلکه منجر به کاهش قابل توجه بازده و عملکرد این تجهیزات نیز می گردد. با این وجود در سال های اخیر از این پدیده در کاربردهای صنعتی و همچنین پزشکی نظیر درمان انواع سرطان ها، تخریب و انهدام سلول های سرطانی، جراحی های چشم، انتقال دارو، انتقال ژن و شکاندن سنگ کلیه و غیره استفاده های مختلفی شده است. محققین بسیاری چه به شکل نظری و شبیه سازی و یا به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از فناوری عکسبرداری سریع، به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.hajizadeh@araut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۱۰

انتگرالی مرزی) مورد بررسی قرار دادند. مشاهدات آنها نشان داد که هرچه نسبت فاصله مرکز حباب تا مرز صلب به حداکثر شعاع حباب کروی در مایع بیشتر می شود، قدرت جت برخوردی به صلب کاهش می یابد [9]. اوهل و همکارانش با استفاده از روش عددی المان مرزی (BEM) رفتار حباب در محیطی همچون آب در مجاورت بایومواد گوناگون به عنوان مرز الاستیک مدل می شوند بررسی نمودند. برای بایومواد نرم مثل چربی و پوست حباب تمایل به تقسیم شدن به حباب های کوچکتر دارد که در حالت های معینی این حباب ها باعث ایجاد جت هایی در جهت مخالف می شود. در مورد بایومواد سخت همچون غضروف و استخوان حباب به سمت سطح مشترک فرو می باشد [10]. شروانی تبار و همکاران رفتار یک حباب نوسانی را در کنار یک مرز الاستیک با استفاده از روش های عددی شبیه سازی نمودند. آنها پارامترهای الاستیسیته مرز و فاصله بی بعد حباب از مرز را مورد مطالعه قرار دادند [11]. حاجی زاده و همکاران ۲۰۱۵ به بررسی تجربی رفتار یک حباب درون یک لوله عمودی پرداختند. نتایج حاصل از مشاهدات آنها نشان داد که عمر حباب به شدت افزایش پیدا کرد [12]. مولودی و همکاران ۲۰۱۸ به بررسی عددی نوسان یک حباب گذرا در نزدیکی دیافراگم ساخته شده در یک صفحه صلب محدب پرداخته و جهت و قدرت جت حاصله را با و بدون وجود سوراخ در سطح مورد بررسی قرار دادند [13].

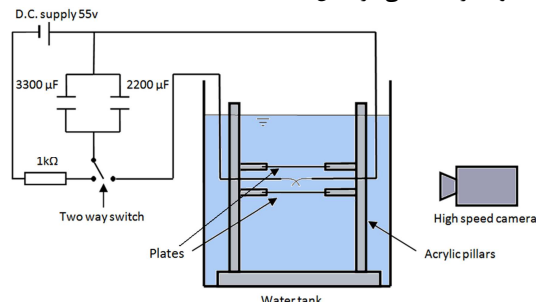
با این حال تاکنون مطالعه رفتار حباب بین سطوح الاستیک موازی صورت نگرفته است. این در حالی است که در مطالعات پزشکی تولید حباب اغلب بین بافت های بدن با الاستیسیته های مختلف صورت می پذیرد. در این تحقیق به تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایشات تجربی انجام شده بر رفتار حبابها در مجاورت سطوح صلب و الاستیک می پردازیم. در بخش اول به بررسی رفتار یک حباب در کنار یک سطح صلب و الاستیک می پردازیم. بخش دوم به بررسی رفتار حباب بین دو سطح موازی صلب و الاستیک اختصاص یافته است. در مطالعات تجربی انجام شده و طی آزمایشات فراوان و بسیار مشکل و البته کاملا دقیق، پدیده های بسیار پیچیده و مختلفی مشاهده گردیدند. با استفاده از روش آنالیز ابعادی و معرفی پارامترهای بی بعد، تمامی این پدیده ها در بازه های مختلف پارامترهای بی بعد طبقه بندی می شوند. با توجه به اینکه بیش از ۶۰٪ وزن بدن انسان را آب تشکیل می دهد نتایج تحقیق حاضر می تواند در مهندسی پزشکی به منظور انتقال دارو و ژن بین سلول ها و بافت های بدن به عنوان غشاء الاستیک، تخریب تومورهای سرطانی، از بین برتن چربی های زائد بدن و ... مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش ها

به منظور مطالعه رفتار حباب در مجاورت سطوح مختلف از یک محفظه آزمایش از جنس شیشه اکریلیک به ابعاد $10 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ استفاده شده و با تعبیه دقیق گیره و متعلقات مربوطه می توان موقعیت و میزان کشش مرز الاستیک را تنظیم کرد.

در مطالعه تجربی رفتار حباب، سه روش عمده جهت تولید حباب وجود دارد. اول، استفاده از لیزر و متمرکز کردن انرژی آن در نقطه هدف جهت تولید حباب. اگرچه با این روش می توان حباب هایی با ابعاد دلخواه از درجه میکرومتر تولید کرد اما علاوه بر گران بودن

تجهیزات تولید لیزر به دلیل خطرناک بودن محیط انجام آزمایش استفاده از لیزر چندان مطلوب نیست. دوم، استفاده از دستگاه التراسونیک و تولید حباب به کمک امواج التراسوند. در این روش می توان همزمان با ایجاد تغییرات فشار در مایع، تعداد زیادی حباب در ابعاد میکرومتر و میلی متر تولید کرد. لذا این روش جهت بررسی رفتار تعداد زیادی حباب یا به اصطلاح "ابری از حباب ها" مفید است اما کنترل دقیق ابعاد دلخواه حباب به این روش امکان پذیر نیست. لذا این روش نیز جهت مطالعه رفتار دقیق یک یا دو حباب با ابعاد دلخواه به هیچ عنوان مفید نمی باشد. سوم، استفاده از دستگاه الکتریکی و برقراری آبی جریان الکتریسیته با استفاده از الکترودهای متصل به هم. در این روش علاوه بر ساده و ارزان بودن آن، از ولتاژهای بسیار کم جهت تولید حباب استفاده می شود. همچنین کنترل نسبتا دقیقی در تولید حباب ها با اندازه مورد نظر دارد. در انجام آزمایشات مربوطه از این روش استفاده شده است. مدار برق طراحی شده از یک منبع تولید ولتاژ با ولتاژهای کم از ۴۰ تا ۶۰ V و قابل تنظیم تشکیل شده است. علاوه بر آن از یک مقاومت $1 \text{ k}\Omega$ و دو خازن هر کدام به ظرفیت های $2200 \mu\text{F}$ و $3300 \mu\text{F}$ که بطور موازی با هم قرار گرفته اند و مجموعا ظرفیتی برابر $5500 \mu\text{F}$ دارند، تشکیل شده است. برای برداشت فیلم از رفتار حباب از یک دوربین سرعت بالا از نوع Photron Fastcam SA1.1 رفتار حباب از یک دوربین سرعت بالا از نوع Photron Fastcam SA1.1 model 675K-C1 استفاده شده است. با برقراری آبی جریان الکتریسیته با استفاده از الکترودهای متصل به هم با ولتاژهای پایین، امکان تولید حباب میسر می شود. در این روش کنترل نسبتا دقیقی در تولید حباب ها با اندازه مورد نظر وجود دارد. طرحواره ای از این مجموعه آزمایشگاهی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- طرحواره ای از مدار دستگاه الکتریکی تولید حباب و موقعیت دوربین سرعت بالا

به منظور تعیین مقدار نیروی مورد نیاز برای کشش دلخواه مرز الاستیک (غشاء سیلیکونی) از دستگاه اینسترون (Instron) مدل ۵۵۰۰ با ظرفیت بار $\pm 1 \text{ KN}$ استفاده شده است. نمونه غشاء سیلیکونی به ضخامت 0.35 mm ، طول اولیه $Lx1 = 47 \text{ mm}$ و عرض $Ly = 30 \text{ mm}$ می باشد. این غشاء در جهت طولی (جهت x) تا مقدار ثانویه $Lx2 = 55 \text{ mm}$ کشیده شده است. بنابر این تغییر طول غشاء برابر $\Delta Lx = Lx2 - Lx1 = 8 \text{ mm}$ می باشد. مقدار نیروی کششی که برای این تغییر طول مورد نیاز است برابر $F = 5.65 \text{ N}$ است. این نیرو توسط دستگاه تعیین نیروی کشش با تحت کشش قرار دادن غشاء محاسبه می گردد. در شکل ۲ مقدار نیروی لازم برای کشش غشاء سیلیکونی نشان داده شده است.

در مواردی که حباب در مرکز صفحات باشد (بدون خارج از مرکزی، $\epsilon = 0$)، در طول رشد آن با تقسیم مساوی و افقی سطح حباب در تصاویر گرفته شده به بخشهای محدود و در نظر گرفتن R_R و R_L به ترتیب برابر شعاع راست و چپ هر بخش و محاسبه R_m به عنوان متوسط آنها، حجم حباب V با انتگرال گیری محاسبه می شود، و سپس ادغام بر روی پروفایل حباب به عنوان:

$$V = \sum_{i=1}^m \pi R_{mi}^2 \Delta z, R_{mi} = 0.5(R_{Ri} + R_{Li}), \Delta z = \frac{(z_2 - z_1)}{m} \quad (3)$$

$$R_{eq} = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (4)$$

در اینجا z_1 و z_2 موقعیت محوری قسمتهای بالا و پایین حباب، m تعداد بخش ها و R_{eq} شعاع حباب کروی معادل است. پارامتر R_{max} حداکثر مقدار R_{eq} را برای مواردی که خارج از مرکزی وجود ندارد، نشان می دهد. در صورت وجود خارج از مرکزی حباب نامتقارن، از مرکز خارج از مرکز برخوردار است، دو برابر R_{max} به عنوان میانگین حداکثر اندازه شعاعی و محوری حباب در پایان مرحله رشد آن تعریف شده است.

در همه موارد، هنگامی که مدار الکتریکی اتصال کوتاه می شود، یک پالس جریان شدید از الکترودها عبور کرده و در نتیجه گرمایش موضعی بالا و سپس حباب تشکیل می شود. حباب رشد کرده و امواج شوک از خود ساطع می کند. این امواج شوک اولیه و همچنین الکترودهای کوچکی که پس از جرقه شکسته می شوند باعث تشکیل برخی حباب های کوچک در نزدیکی کف حباب جرقه می شوند که از نظر اندازه کوچکتر از حباب اصلی هستند و از این رو به نظر می رسد که تأثیر کمتری بر روند رشد و فروپاشی حباب اولیه داشته باشند. حباب به دلیل فشار اولیه داخلی بالا، رشد می کند. سپس فشار داخل با کمتر شدن از فشار اطراف، حباب فرو پاشیده و به حباب های کوچکتر تقسیم می شود.

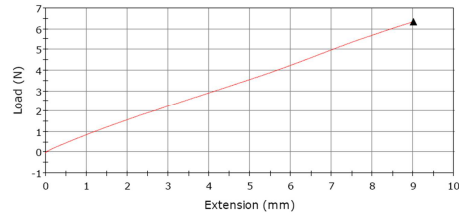
۳- نتایج و بحث

چنانچه اشاره گردید جهت عکسبرداری از تحولات حباب از دوربین سرعت بالای نوع Photron Fastcam SA1.1 model 675K-C1 استفاده شده است. این دوربین دارای سرعت 54000 فریم در ثانیه (FPS) و شاتر 1/61000 s تا 1/118000 s برهم کنش حباب و غشاء را ضبط می کند. مقدار سرعت 54000 FPS معادل با فاصله زمانی 18.52 μ s بین دو فریم متوالی می باشد که بیانگر میزان عدم قطعیت اندازه گیری زمان مربوطه می باشد.

در بخش اول به بررسی رفتار حباب در مجاورت یک سطح الاستیک می پردازیم. سپس رفتار حباب را بین دو سطح صلب موازی هم را در بخش دوم مورد بررسی قرار داده و نهایتاً برهم کنش حباب و سطوح الاستیک موازی هم را در بخش سوم مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۱- برهم کنش یک حباب نوسانی و یک سطح الاستیک

چنانچه پیشتر هم اشاره گردید مطالعات بسیاری بر روی برهم



شکل ۲- مقدار نیروی لازم برای کشش غشاء سیلیکونی بصورت تابعی از میزان کشش

مدول یانگ (EL) برای سطح الاستیک طبق رابطه $EL = F/\Delta L \times L \times 1/A$ محاسبه می شود که پارامتر A نشان دهنده مساحت مقطع سطح الاستیک است. بدین ترتیب مقدار الاستیسیته غشاء از جنس سیلیکن برابر $EL = 3.16 \text{ MPa}$ می باشد. همچنین چگالی این غشاء برابر $\rho = 1250 \text{ kg m}^{-3}$ است.

حال با نصب غشاء و کشیدن آن به مقدار 8 mm جریان الکتریسیته 55 V را در مدار برقرار می کنیم. سپس با تعویض موقعیت سوئیچ در مدار الکتریکی در محل اتصال دو الکترودی که در بالای غشاء و درون مایع قرار دارند انرژی الکتریکی از طریق خازن تخلیه شده و باعث تولید حباب می شود. بایستی دقت کرد که قطر الکترودها برابر 0.12 mm است که به دور سیم حاوی جریان در مدار پیچیده شده است. چون حباب های تولید شده دارای شعاعی بین 2.9 mm تا 4.92 mm می باشد لذا الکترودها تأثیری بر حباب ندارند. ضمن تولید حباب، با نصب دقیق دوربین سرعت بالا با سرعت 54000 فریم در ثانیه (FPS) و شاتر 1/61000 s تا 1/118000 s برهم کنش حباب و غشاء را ضبط می نماییم. مقدار سرعت 54000 FPS معادل با فاصله زمانی 18.52 μ s بین دو فریم متوالی می باشد. این فاصله زمانی بسیار کوچک امکان مشاهده دقیق رفتار حباب و غشاء را برای ما مقدور می سازد.

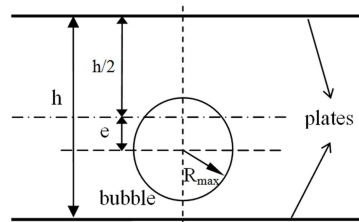
مهمترین پارامترهای بی بعد در آزمایشات H و ϵ است. پارامتر H به عنوان نسبت فاصله بین دو صفحه (h) به حداکثر شعاع حباب (R_{max}) تعریف شده است:

$$H = \frac{h}{R_{max}} \quad (1)$$

پارامتر ϵ به عنوان نسبت خروج از مرکزی (e) به حداکثر شعاع حباب (R_{max}) تعریف شده است:

$$\epsilon = \frac{e}{R_{max}} \quad (2)$$

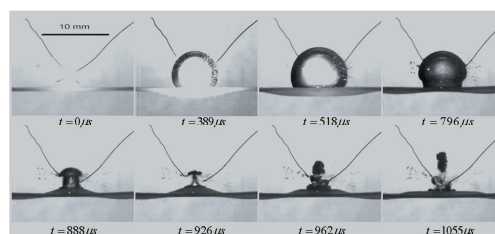
بطوریکه خروج از مرکزی (e)، فاصله بین مرکز حباب و مرکز صفحات (از سطح صاف اولیه) است. شکل ۳ طرحواره موقعیت حباب بین دو صفحه موازی افقی را نشان می دهد.



شکل ۳- طرحواره ای از موقعیت حباب بین دو صفحه موازی

کنش حباب و سطح صلب صورت گرفته است. حباب در مجاورت سطح صلب در فاز فروپاشی بدلیل اختلاف فشار طرفین آن، جت مایعی را به سمت سطح روانه می کند. لذا از توضیح بیشتر این حالت صرف نظر گردیده است.

در این بخش به مطالعه رفتار یک حباب در مجاورت یک غشاء در آب پرداخته شده است. به منظور اعتبار بخشی به آزمایشات انجام شده به مقایسه رفتار حباب در مجاورت یک سطح الاستیک و مقایسه با نتایج دیگر محققین پرداخته شده است. شکل ۴ رفتار یک حباب با شعاع حداکثر $R_m = 4.1 \text{ mm}$ و فاصله 2 mm نقطه تشکیل حباب از مرز در کنار یک غشاء با الاستیسیت $EL = 3.16 \text{ MPa}$ را نشان می دهد. حباب در زمان $t = 0 \text{ } \mu\text{s}$ تولید می شود. حین رشد سریع حباب، غشاء به سمت پایین فشار داده می شود و همان طوری که در زمان $t = 389 \text{ } \mu\text{s}$ نشان داده شده است در غشاء یک فرو رفتگی ایجاد می شود. پس از اینکه حباب به حداکثر حجم خود رسید ($t = 518 \text{ } \mu\text{s}$)، فشار داخل حباب از آب اطراف کمتر شده و بنابراین فاز فروپاشی حباب آغاز می گردد. سپس غشاء به سمت بالا حرکت کرده و با انتقال ممنتوم خود از پایین حباب به سمت بالا باعث قارچی شکل شدن حباب می گردد ($t = 888 \text{ } \mu\text{s}$, $t = 796 \text{ } \mu\text{s}$ = در نهایت، در زمان $t = 926 \text{ } \mu\text{s}$ حباب در حجم حداقل خود به دو حباب کوچکتر تقسیم می شود. در ادامه به نظر می رسد که یک جت مایع از حباب کوچک بالایی به سمت بالا و یک جت مایع از حباب کوچک پایینی به سمت غشاء روانه می شود ($t = 1055 \text{ } \mu\text{s}$, $t = 962 \text{ } \mu\text{s}$. سرعت متوسط جت مایع رو به بالا حدود 36 m/s می باشد درحالی که مشخص نمودن سرعت جت رو به پایین به دلیل نزدیکی آن به غشاء امکان پذیر نیست. نتایج بررسی ها در میزان الاستیسیت غشاء و اندازه برابر حباب و فاصله برابر نشان می دهد که اختلاف بسیار ناچیزی (کمتر از ۵٪) با تحقیقات انجام شده در ادبیات فن وجود دارد [8].



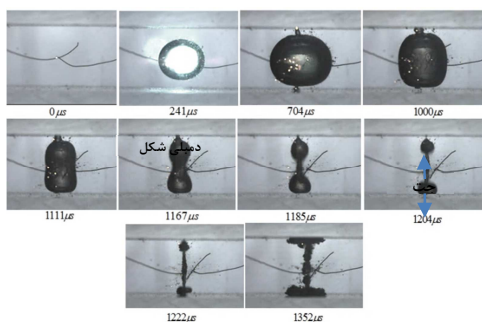
شکل ۴- رشد و فروپاشی حباب در مجاورت یک سطح الاستیک با $EL = 3.16 \text{ MPa}$ و شعاع حداکثر $R_m = 4.1 \text{ mm}$ و فاصله 2 mm نقطه تشکیل حباب از سطح

۳-۲- رفتار یک حباب نوسانی بین دو سطح صلب موازی

در بسیاری از کاربردهای مهندسی و پزشکی حباب بین سطوح و در حالت محبوس تشکیل می شود. در این حالت رفتار حباب به دلیل حضور سطوح در دو طرف آن و تغییرات موضعی فشار مایع اطراف آن پیچیده می شود. در ادامه نتایج تجربی رفتار حباب بین دو سطح صلب موازی و بین دو سطح الاستی موازی با فاصله های متفاوت تشکیل حباب در مقایسه با دو صفحه مورد مطالعه قرار می گیرد.

در شکل ۵ تحولات حباب را از زمان تشکیل و رشد تا فروپاشی و انهدام آن بین دو سطح صلب با $H = 1.8$ در چند فریم انتخاب شده

(۱۰ فریم) نمایش داده شده است.



شکل ۵- رشد و فروپاشی حباب در بین دو سطح صلب موازی با $H = 1.8$ و بدون خروج از مرکزی ($\epsilon = 0$)

هنگامی که حباب در مرکز صفحات ایجاد می شود (بدون خارج از مرکزی) بصورت متقارن محوری رشد کرده و فرو می پاشد.

زمان سپری شده برای هر فریم از شروع جرقه در میکرو ثانیه محاسبه می شود. حباب در $t = 0 \text{ } \mu\text{s}$ ایجاد می شود (فریم ۱ اندکی پس از آغاز تخلیه الکتریکی گرفته شده است) و به رشد خود ادامه می دهد ($t = 241 \text{ } \mu\text{s}$) تا زمانی که در $t = 704 \text{ } \mu\text{s}$ به حداکثر اندازه برسد. صفحات گسترش حباب را در جهت عمودی محدود می کنند.

سپس حباب در $t = 1000 \text{ } \mu\text{s}$ شروع به کوچک شدن می کند. حباب اندکی پس از شروع فاز فروپاشی، شکل "دمبل" گونه به خود می گیرد و از حالت کروی خود خارج می شود ($t = 1111 \text{ } \mu\text{s}$, $t = 1167 \text{ } \mu\text{s}$). این حالت بسیار متفاوت از تحولات حباب در یک دامنه بدون مرز است. سپس در $t = 1185 \text{ } \mu\text{s}$ حباب به دو حباب عمودی کوچکتر تقسیم می شود. از حباب بالایی یک جت به سمت صفحه فوقانی روانه می شود در حالی که شاهد آنیم جت دیگری از حباب پایینی به سمت صفحه پایین زده می شود و به دیواره ها برخورد می کنند ($t = 1204 \text{ } \mu\text{s}$, $t = 1252 \text{ } \mu\text{s}$).

در حقیقت، جت ها به دلیل اختلاف فشار بین قسمت های فوقانی و تحتانی آنها، در دو حباب کوچک نفوذ کرده و صفحات اطراف را تحت تأثیر قرار می دهند.

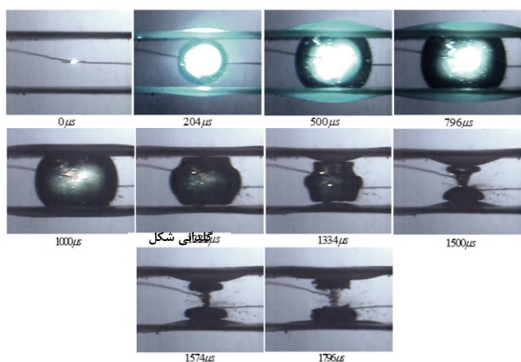
برای مقادیر بزرگتر H (یعنی حباب های کوچکتر، از آنجا که فاصله بین صفحات در آزمایشات یکسان است)، صفحات کمتر تحت تأثیر حباب و جت های حاصله قرار می گیرند.

با انجام آزمایشات مکرر ملاحظه گردید که به ازای $H > 2.4$ ، صفحات تقریباً حداقل اثر را بر رشد و فروپاشی حباب اعمال نموده و حباب نسبتاً کروی باقی می ماند.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که طول عمر حباب به واسطه حضور بین سطوح، نزدیک به دو برابر افزایش یافت. چنانچه برای حباب با شعاع $R_{max} \approx 2.6 \text{ mm}$ ، طول عمر حباب بین صفحات (بدون خارج از مرکز) $1185 \text{ } \mu\text{s}$ گردید درحالی که طبق آزمایشات صورت گرفته عمر حباب با شعاع برابر حدود $670 \text{ } \mu\text{s}$ ثبت شد. در واقع ایجاد محدود در اطراف حباب در سرعت رشد و فروپاشی آن تأثیر کاهشی می گذارد.

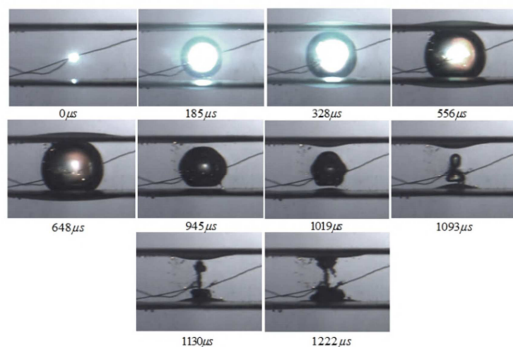
شکل ۶ تغییرات طول عمر حباب (فاصله زمانی بین جرقه اولیه تا تقسیم آن به حباب های کوچکتر) را برای مقادیر مختلف H نشان می

در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است ($\varepsilon = 0$).



شکل ۸- رشد و فروپاشی حباب در بین دو سطح الاستیک با $H = 1.5$ و $\varepsilon = 0$

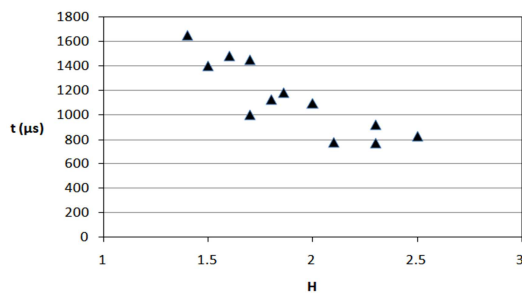
رشد و فروپاشی حباب با $H = 1.5$ و $\varepsilon = 0$ در شکل ۸ نشان داده شده است. حباب در $t = 0 \mu s$ ایجاد شده و سپس در حالی که صفحات الاستیک به سمت بیرون رانده می شوند بصورت کروی گسترش می یابد. ($t = 500 \mu s$). وقتی حباب به حداکثر حجم خود در $t = 796 \mu s$ برسد، فشار داخل حباب از فشار آب اطراف کمتر می شود و بنابراین فاز فروپاشی حباب آغاز می شود. ملاحظه می گردد که زمانی که حداکثر جابجایی بیرونی صفحات را داریم، حباب هنوز به حداکثر حجم خود نرسیده است. به عبارت دیگر، صفحات شروع به حرکت به سمت حباب کرده اند در حالی که حباب هنوز در حال رشد است. این منجر به صاف شدن نیمکره بالا و پایین حباب می شود. در این حال نیروی ذخیره شده حاصل از فشار حباب بر سطوح الاستیک آزاد شده و هر دو صفحه به سمت حباب حرکت می کنند. حباب در مرحله فروپاشی به واسطه نیروی مضاعف حاصل از ریباند سطوح الاستیک شکل متقارنی همچون "گلدان" را به خود می گیرد ($t = 1222 \mu s$, $t = 1334 \mu s$). در انتهای فاز فروپاشی، حباب به دو حباب کوچکتر تقسیم شده ($t = 1500 \mu s$) و سپس شاهد روانه شدن دو جت به سمت سطوح هستیم ($t = 1796 \mu s$, $t = 1574 \mu s$).



شکل ۹- رشد و فروپاشی حباب در بین دو سطح الاستیک با $H = 1.8$ و $\varepsilon = 0$

شکل ۹ تحولات حباب را برای $H = 1.8$ و $\varepsilon = 0$ نشان می دهد. با رشد حباب، صفحات الاستیک به سمت بیرون رانده می شوند ($t = 328 \mu s$, $t = 556 \mu s$). حباب به حداکثر حجم خود در $t = 648 \mu s$ رسیده

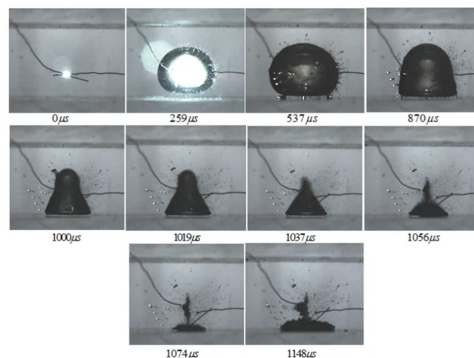
دهد. برای حباب بزرگتر (یعنی مقادیر کوچکتر H)، با کشیدگی های محوری بزرگتر افزایش طول عمر حباب را نشان می دهد.



شکل ۶- تغییرات طول عمر حباب با تغییر پارامتر H

با وجود خروج از مرکزی شاهد رشد و فروپاشی نامتقارن حباب هستیم.

شکل ۷ تصاویر ضبط شده با استفاده از دوربین سرعت بالا را برای $H \approx 2$ با $\varepsilon \approx 0.3$ را نشان می دهد.



شکل ۷- رشد و فروپاشی حباب بین دو سطح صلب موازی با $H \approx 2$ و $\varepsilon \approx 0.3$

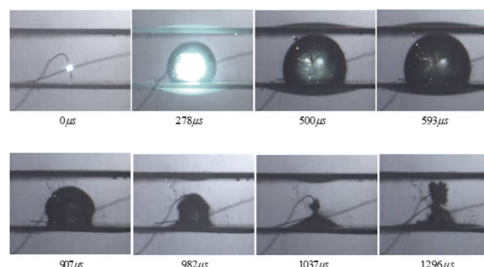
حباب در $t = 0$ ایجاد می شود و گسترش می یابد ($t = 259 \mu s$) تا زمانی که به حداکثر اندازه خود در $t = 537 \mu s$ برسد. با وجود خروج از مرکزی دیگر تأثیر صفحات صلب بر قسمتهای عمودی حباب مساوی نیست و در مرحله فروپاشی، حباب به سمت سطح نزدیکتر مسطح شده و محیط اطراف حباب نسبت به محور عمودی کج شده و شاهد پستانکی شدن حباب هستیم ($t = 1000, 1019 \mu s$). سپس از قسمت بالای حباب جت مایع به سمت پایین روانه می شود ($t = 1037 \mu s$). این جت در نهایت در داخل حباب نفوذ کرده و در پایان فروپاشی، تأثیر خود را روی قسمت پایین حباب می گذارد ($t = 1056 \mu s$) تا $t = 1146 \mu s$. نکته حائز اهمیت این است که علی رغم فاصله کم صفحه دورتر (صفحه بالایی) تأثیر حباب از سطح دورتر به شدت کاهش می یابد و صفحه نزدیکتر (صفحه پایین) اثر غالب را بر روی حباب دارد. این موضوع مشابه رفتار حباب در مجاورت یک سطح صلب می باشد.

۳-۳- رفتار یک حباب نوسانی بین دو سطح الاستیک موازی

رفتار حباب در مرکز صفحات الاستیک و بدون خروج از مرکزی

و سپس فروپاشی آغاز می‌گردد. ریباند صفحات به سمت حباب، آشفته‌گی در مرز حباب ایجاد نموده که منجر به تشکیل یک شکل "گلدان" برای حباب می‌شود ($t = 1019 \mu s$). سرانجام حباب در $t = 1093$ به دو حباب کوچکتر تقسیم می‌شود و دو جت مایع غیر هم جهت حاصل از فروپاشی هر حباب کوچک به سمت صفحات روانه می‌گردد ($t = 1130 \mu s$, $t = 1222 \mu s$). انجام آزمایشات در ابعاد میلیمتر و در بازه زمانی میکروثانیه بسیار سخت و پیچیده و مستلزم تجهیزات با تکنولوژی بالا می‌باشد. نتایج حاضر حاصل ده‌ها آزمایش زمانبر بوده و سعی گردیده در حد ممکن با قدری چشم پوشی اثر عدم خروج از مرکزی بر رفتار حباب در شکل ۹ نشان داده شود.

در شکل ۱۰ رشد و فروپاشی حباب بین صفحات الاستیک با پارامترهای $H = 1.8$ و $\epsilon = 0.3$ (دارای خروج از مرکزی) نشان داده شده است. حباب در $t = 0 \mu s$ ایجاد می‌شود و به گسترش خود ادامه می‌دهد ($t = 278 \mu s$) تا زمانی که در $t = 593 \mu s$ به حداکثر اندازه خود برسد. با وجود خروج از مرکزی، تأثیر صفحات الاستیک در قسمتهای عمودی حباب مساوی نیست و در مرحله فروپاشی کف حباب (بخشی از حباب که به سطح نزدیکتر است) مسطح است. اطراف حباب نسبت به محور عمودی مایل شده است ($t = 907 \mu s$, $t = 1037 \mu s$). سپس حباب به حباب‌های کوچکتر تقسیم می‌شود ($t = 1037 \mu s$) و از هر حباب کوچک یک جت ایجاد می‌شود ($t = 1296 \mu s$). نکته مهم این است که حباب به سمت صفحه نزدیکتر (صفحه پایین) مشابه حباب در یک میدان آزاد در نزدیکی مرز الاستیک حرکت می‌کند. مشابه رفتار حباب در کنار سطح صلب، علی‌رغم فاصله کم صفحه دورتر (صفحه بالایی) تأثیر حباب از سطح دورتر به شدت کاهش می‌یابد و صفحه نزدیکتر (صفحه پایین) اثر غالب را بر روی حباب دارد.



شکل ۱۰- رشد و فروپاشی حباب در بین دو سطح الاستیک با $H = 1.8$ و $\epsilon = 0.3$

۴- نتیجه‌گیری

برهم کنش یک حباب نوسانی و یک سطح الاستیک و همچنین رفتار حباب بین دو سطح صلب و الاستیک موازی با هم به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. ملاحظه گردید عمر حباب بدلیل حضور سطوح تا بیش از دو برابر زمانی که در محیط بیکران تولید می‌شود می‌تواند افزایش یابد. حباب در مجاورت یک سطح الاستیک در فاز فروپاشی به شکل "فارچ" تبدیل شده و نهایتاً به دو حباب کوچکتر تقسیم می‌شود و نهایتاً دو جت مایع خلاف جهت از هر یک از حباب‌های وچک را شاهدیم. زمانی که حباب در وسط دو سطوح صلب موازی هم قرار گرفت، شکل متقارنی شبیه "دمبل" به خود می‌گیرد. در

این حالت در انتهای فاز فروپاشی، شاهد تقسیم حباب به دو حباب کوچکتر و تشکیل دو جت مایع معکوس به سمت سطوح هستیم. با انجام آزمایشات مکرر ملاحظه گردید که به ازای $H > 2.4$ ، صفحات تقریباً حداقل اثر را بر رشد و فروپاشی حباب اعمال نموده و حباب نسبتاً کروی باقی می‌ماند. حباب در فاز فروپاشی میان دو سطح الاستیک با شکل‌های شبیه "گلدانی" و "پستانکی" رویت گردید. پارامتر بی بعد فاصله حباب از سطوح الاستیک (h) بر طول عمر و میزان کشیدگی آنها افزود. پارامتر خروج از مرکزی (ϵ) حباب بررسی گردید. با وجود خروج از مرکزی دیگر تأثیر صفحات صلب بر قسمتهای عمودی حباب یکسان نبوده و در مرحله فروپاشی، حباب به سمت سطح که به آن نزدیکتر است مسطح می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Klaseboer E. and Khoo B. C., Boundary integral equations as applied to an oscillating bubble near a fluid-fluid interface. *Comput. Mech*, Vol. 33, pp.129-38, 2004.
- [4] Klaseboer E. and Khoo B. C., An oscillating bubble near an elastic material. *J. Appl. Phys*, Vol. 96, pp. 8-18, 2004.
- [5] Shaw S. J., Jin Y. H., Gentry T. P. and Emmony D. C., Experimental observations of the interaction of a laser generated cavitation bubble with a flexible membrane. *Phys. Fluids*, Vol. 11. No. 2, pp.43-79, 1999.
- [6] Davvand A., Khoo B.C., Shervani-Tabar M.T., Khalilpourazary S., Boundary element analysis of the droplet dynamics induced by spark-generated bubble, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 36, No. 11, pp. 1595-1603, 2012.
- [7] Turangan C.K., Ong G.P., Klaseboer E. and Khoo B. C., Experimental and numerical study of transient bubble-elastic membrane interaction. *J. Appl. Phys*, Vol. 100: pp. 054910, 2006.
- [8] Hajizadeh Aghdam A., Ohl S. W., Khoo B. C., Shervani-Tabar M. T., and Nobari M.R.H., Effect of the viscosity on the behavior of a single bubble near a membrane. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 47, pp. 17-24, 2012.
- [9] 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.
- [10] Ohl S.W., Klaseboer E., and Khoo B.C. The dynamics of a non-equilibrium bubble near bio-materials. *Phys Med Biol*, Vol. 54, pp.6313-6336, 2009.
- [11] Shervani-Tabar M. T., Hajizadeh Aghdam A., and Farhangmehr V., Numerical analysis of a cavitation bubble in the vicinity of an elastic membrane, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 45, No. 5, pp. 055503, 2013.
- [12] Hajizadeh Aghdam A., and Khoo B. C., A note on the dynamics of two aligned bubbles perpendicular to and above a thin membrane, *Fluid Dyn. Res*, Vol. 47 No. 035503, 2015.
- [13] Moloudi G., Davvand A., Dawoodian M., Saleki-Haselghoubi N., Oscillation of a transient bubble near an aperture made in a convex rigid plate, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 103, pp. 51-65, 2019.