

## شبیه‌سازی عددی پمپاژ مایعات لزج با استفاده از نوسان یک حباب کاویتاسیون

علیرضا اسفندیاری خسروشاهی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران،  
 esfandiyari\_alireza95@yahoo.com

عبدالرحمان دادوند\*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، a.dadvand@mee.uut.ac.ir

کاوه مصطفی عزیز مانمی

محقق فوق دکترا، گروه علوم ریاضی، دانشگاه وارویک، جاده گیبت هیل، CV4 7AL، کاونتری،  
 انگلستان، Kawa.Manmi@warwick.ac.uk

### چکیده

یک حباب کاویتاسیون هنگام فروپاشی در نزدیکی یک دیواره صلب جت مایعی به سمت دیواره ایجاد می‌کند. در صورت وجود سوراخ در دیواره جت حباب باعث پمپاژ (انتقال) مایع از درون سوراخ می‌شود. یک مزیت ویژه چنین میکروپمپ‌هایی، عدم وجود قطعات متحرک و زمان پاسخ سریع است. این فرآیند انتقال مایع، فرآیندی پیچیده، وابسته به زمان و تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند فاصله بین حباب و دیواره  $\gamma$  است. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی فرآیند پمپاژ مایع از سوراخ مخروطی ایجاد شده در یک سطح صلب است. شبیه‌سازی بر اساس روش حجم سیال به همراه معادلات تک-میدانی ناویر-استوکس انجام شده و اثرات کشش سطحی و لزجت سیال لحاظ می‌شود. نتایج برحسب شکل حباب، میدان سرعت و فشار اطراف حباب و دبی جرمی عبوری از سوراخ ارائه می‌گردد. نتایج نشان داد که مقدار جرم خالص عبوری از سوراخ در مدت زمان  $1/44$  میلی‌ثانیه به ازای مقادیر  $\gamma$  برابر با  $0.81$ ،  $0.91$ ،  $1.01$  و  $1.16$  به ترتیب برابر با  $19.26$ ،  $18.13$ ،  $15.95$  و  $12.94$  است. در نتیجه بالاترین قدرت پمپاژ جت حباب مربوط به کوچک‌ترین اندازه  $\gamma$  است. **واژه‌های کلیدی:** مایعات لزج، حباب کاویتاسیون، پمپاژ، حجم سیال، دبی جرمی، جرم خالص.

### Numerical simulation of pumping of viscous liquids via the oscillation of a cavitation bubble

A. R. Esfandiari khosroshahi

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

A. Dadvand

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

K. M. A. Manmi

Mathematics Institute, University of Warwick, Gibbet Hill Road, Coventry, CV4 7AL, United Kingdom

### Abstract

When a cavitation bubble collapses near a rigid wall, it creates a liquid jet towards the wall. If there is a hole in the wall, the bubble jet pumps (transfers) the liquid through the hole. One special advantage of such micropumps is the absence of moving parts and quick response time. This process of liquid transfer is a complex process, time-dependent and influenced by various parameters such as the bubble-wall distance  $\gamma$ . The purpose of this research is to simulate the process of pumping liquid from a conical hole created in a rigid surface. The simulation is based on the volume of fluid method along with the single-field Navier-Stokes equations, and the effects of surface tension and fluid viscosity are considered. The results are presented in terms of bubble shape, the velocity and pressure fields around the bubble and the mass flow rate. The results showed that the amount of net mass passing through the hole during 1.44ms for  $\gamma$  values of 0.81, 0.91, 1.01 and 1.16 was equal to 19.26, 18.13, 15.95, and 12.94, respectively. Thus, the highest pumping power of the bubble jet is obtained for the smallest value of  $\gamma$ .

**Keywords:** Viscous liquids, Cavitation bubble, Pumping, Volume of fluid, Mass flow rate, Net mass.

### ۱- مقدمه

استفاده می‌نمایند [۳۰-۳۳]. روش‌های عددی متداول مورد استفاده در بررسی دینامیک حباب‌ها شامل روش المان مرزی بر مبنای نظری جریان پتانسیلی [۳۸]، روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی شامل حجم محدود بر اساس حل معادله ناویر-استوکس دوفازی [۳۹] و روش بولتزمن شبکه‌ای دوفازی [۴۰-۴۱] است.

همانطور که اشاره شد جت مایع با سرعت بالا که حاصل از فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون در مجاورت سطوح جامد می‌باشد باعث صدمه زدن به آن سطوح می‌شود. در صورت ایجاد یک سوراخ در سطح جامد در محل برخورد جت مایع به آن، ضمن جلوگیری از اثرات مخرب جت می‌توان از آن برای پمپاژ مایع از طریق سوراخ استفاده کرد. در این زمینه کارهای تحقیقاتی انگشت شماری انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. امکان‌سنجی پمپاژ مایع توسط حباب در حال فروپاشی در مجاورت یک سوراخ دایروی برای اولین بار به

حباب‌های کاویتاسیون دارای کاربردهای مضر و مفید هستند. نوسان یک حباب کاویتاسیون در مجاورت سطح‌های صلب باعث اعمال آسیب‌های مکانیکی به سطح می‌شود. دلیل این امر، ایجاد سرعت، فشار و دماهای بالا هنگام فروپاشی حباب می‌باشد [۴-۱۱]. دینامیک حباب دارای کاربردهای مفید گسترده‌ای در علوم مختلف شامل نانومواد [۶-۵]، شیمی [۷-۸]، مکانیک [۹-۱۰]، کشتی‌سازی [۱۱-۱۲]، اقیانوس [۱۳-۱۶]، محیط زیست [۱۷]، زیست فناوری [۱۸]، تولید قطره [۱۹] و تمیزکاری سطوح صلب [۲۰-۲۱] است. از کاربردهای مفید دیگر حباب می‌توان شکستن سنگ کلیه [۲۲]، دارورسانی به عروق [۲۵-۲۳]، درمان تومورهای سرطانی [۲۶-۲۷]، صنایع غذایی [۲۸] و تصفیه آب [۲۹] را نام برد. مطالعه دینامیک حباب به روش نظری پیچیده بوده و بنابراین محققان از روش‌های تجربی و عددی برای این منظور

\* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.dadvand@mee.uut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۲/۰۶/۲۶

صورت عددی توسط کو و همکاران [۴۲] انجام شده است. آنها با استفاده از روش المان مرزی، دینامیک حباب و همچنین دبی جرمی مایع پمپاژ شده از درون سوراخ را به ازای اندازه‌های مختلف سوراخ و فاصله حباب تا سطح مورد بررسی قرار دادند. لیو و همکاران [۴۳] به روش آزمایشگاهی قابلیت پمپاژ حباب جرقه‌ای را با تصویربرداری توسط دوربین سرعت بالا مطالعه نمودند. کری و همکاران [۴۴] به روش آزمایشگاهی تأثیر لزجت مایع را روی مشخصه پمپاژ حباب بررسی نمودند. آنها همچنین جت مایع و اسپری حاصل از فروپاشی حباب را بررسی کردند و نشان دادند که مشخصه‌های جت به شدت به فاصله حباب از سطح و ضخامت سطح وابسته است. مطالعه رفتار دینامیکی حباب در مجاورت سوراخ ایجاد شده در سطح محدب [۴۵] و سطح مقعر [۴۶] با روش المان مرزی نشان می‌دهد که دینامیک حباب به شدت به فاصله حباب تا سطح وابسته است. تحقیق تجربی و عددی اخیر انجام شده توسط ریسه و همکاران [۴۷] در مورد پمپاژ مایع لزج در ابعاد میکرو توسط یک حباب از طریق یک سوراخ با لبه‌های گرد شده نشان دهنده اهمیت تأثیر فاصله حباب-سطح و هندسه سوراخ روی مشخصه‌های جت و بازدهی پمپاژ حاصل دارد. در اغلب تحقیقاتی که روی دینامیک حباب در مجاورت یک سطح سوراخدار انجام گرفته است از روش تجربی (تصویربرداری توسط دوربین سرعت بالا) یا از نظریه جریان پتانسیلی که در آن از اثرات لزجت صرف‌نظر می‌شود استفاده شده است و همچنین سوراخ مخروطی به شکل کار حاضر تاکنون بررسی نشده است. بنابراین، به دلیل عدم وجود مطالعه روی دینامیک یک حباب در مجاورت یک سطح سوراخدار با سوراخ مخروطی شکل با لبه‌های تیز و با توجه به تأثیر زیاد لزجت مایع روی دینامیک حباب و لزوم اعمال آن در شبیه‌سازی عددی، در کار حاضر قابلیت جت حباب برای پمپاژ مایع لزج از درون یک سوراخ و تأثیر پارامتر بسیار مهم فاصله اولیه مرکز حباب تا سوراخ (پارامتر تقابل) روی میزان پمپاژ مایع با استفاده از روش حجم سیال (VOF) بررسی می‌شود. نتایج برحسب شکل حباب، میدان‌های فشار و سرعت و دبی جرمی و حجمی عبوری از سوراخ ارائه می‌گردد.

## ۲- معادلات حاکم و روش حل

در این تحقیق، رفتار یک حباب گازی به هنگام نوسان در مجاورت یک سطح سوراخ‌دار با استفاده از روش حجم سیال مطالعه می‌گردد. محتویات داخل حباب شامل بخار آب و هوا با نسبت گرماهای ویژه برابر با  $1.4 = c_p/c_v = \eta$  بوده و تراکم‌پذیر و ایده‌آل فرض می‌شود. با توجه به اینکه بیشترین اندازه سرعت در مایع اطراف حباب مربوط به جت مایع هنگام فروپاشی حباب بوده و همواره کمتر از ۵۰ متر بر ثانیه است، با لحاظ نمودن سرعت صوت در آب که حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است، عدد ماخ برابر با ۰.۳۳/۱۰ در نتیجه بسیار کوچکتر از ۰/۳ خواهد بود. بنابراین، جریان مایع (آب) پیرامون حباب همواره تراکم‌ناپذیر است ( $Ma < 0.3$ )، فازهای گاز و مایع غیر قابل اختلاط بوده و فرض می‌شود تبادل جرم بین آنها اتفاق نمی‌افتد. از معادلات ناویر-استوکس به همراه معادله جابجایی برای کسر حجمی سیال برای توصیف حرکت جریان استفاده می‌شود.

## ۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم، بقای انرژی به همراه معادله کسر حجمی سیال است. معادله بقای جرم (پیوستگی) برای مخلوط به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\rho$ ،  $\mathbf{u}$  و  $t$  به ترتیب به چگالی، بردار سرعت و زمان اشاره دارد. معادله ممنتوم به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{f}_{st} \quad (2)$$

که در آن  $p$  فشار استاتیک،  $\mathbf{f}_{st}$  نیروی کشش سطحی بوده و به شکل زیر توصیف می‌شود.

$$\mathbf{f}_{st} = \frac{\rho}{\frac{1}{2}(\rho_g + \rho_l)} \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (3)$$

که در آن  $\sigma$  ضریب کشش سطحی آب بوده که در اینجا مقدار آن برابر با  $0.072 \text{ N/m}$  و ثابت فرض می‌شود. همچنین  $\alpha$  کسر حجمی سیال و  $\kappa$  انحنای سطح در فصل مشترک مایع و گاز بوده و اندیس‌های  $l$  و  $g$  به ترتیب به مایع و گاز اشاره دارد. معادله انرژی به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

که در آن  $E$  انرژی کل و  $k$  رسانایی گرمایی بوده و  $T$  معرف دما است. معادله کسر حجمی سیال که ردیابی فصل مشترک بین مایع و گاز را انجام می‌دهد به شکل معادله (۵) است.

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_i = 0 \quad (5)$$

کسر حجمی فاز گاز بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (6)$$

چگالی و لزجت سیال در هر حجم کنترل توسط رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho = \rho_l \alpha_l + \rho_g \alpha_g \quad (7)$$

$$\mu = \mu_l \alpha_l + \mu_g \alpha_g$$

در نهایت، چگالی گاز به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_g = \frac{p_g M}{R_g T} \quad (8)$$

که در آن  $\bar{R}_g$  ثابت جهانی گازها و  $M$  جرم مولکولی گاز (هوا) است.

با توجه به ارائه بخشی از نتایج به صورت پارامترهای بی‌بعد، در اینجا دبی حجمی (حجم مایع انتقال یافته از سوراخ) و زمان بی‌بعد داده می‌شود. دبی حجمی بی‌بعد به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۴۲]

$$F' = F(t)/V_m \quad (9)$$

که در آن

$$F(t) = \int_0^t \bar{U}_{\text{Outlet}} S dt. \quad (10)$$

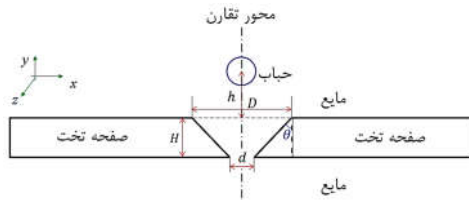
در رابطه (۱۰)،  $\bar{U}_{\text{Outlet}}$  سرعت میانگین در مقطع خروجی سوراخ و  $S = \pi d^2/4$  مساحت آن مقطع است. بعلاوه، در رابطه (۹)  $V_m$  حجم بیشینه حباب است که صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V_m = (4/3)\pi R_m^3 \quad (11)$$

که در آن  $R_m$  شعاع بیشینه حباب است که به هنگام نوسان کروی آن در یک دامنه بی‌نهایت به دست می‌آید. زمان بی‌بعد به شکل زیر تعریف می‌شود [۴۲]

$$t' = t/t_{\text{osc}} \quad (12)$$

که در آن زمان نوسان حباب با رابطه زیر داده می‌شود.



شکل ۱- طرحواره مسأله فیزیکی و علائم مربوطه

### ۳-۲- روش حل عددی

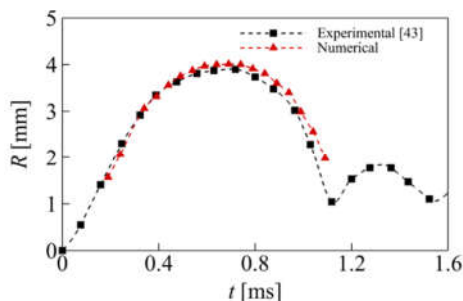
برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود در نرم‌افزار تجاری Fluent نسخه 2019R1 استفاده می‌گردد. برای مرتبط کردن میدان فشار و سرعت از الگوریتم فشار مینای پیرو PISO روی شبکه‌ی جابجا شده (PRESTO در Fluent) استفاده می‌شود. معادله VOF به صورت صریح با استفاده از اسکیم بازسازی هندسی مجدد حل می‌شود. برای گسسته‌سازی جملات جابجایی در معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی از اسکیم بالادست مرتبه دوم استفاده می‌شود. گام زمانی مورد استفاده برابر با  $10^{-9} - 10^{-7}$  S و عدد کورانت 0.25 است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و ممنتوم برابر با  $10^{-5}$  و برای معادله انرژی برابر با  $10^{-6}$  انتخاب شده است.

### ۳- اعتبار سنجی

در این بخش، برای اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده، دو نمونه مسأله شبیه‌سازی می‌شود. یکی مربوط به نوسان حباب در یک دامنه بی‌نهایت بوده و دیگری نوسان حباب در مجاورت یک سطح صلب تخت سوراخ‌دار است که در هر دو مورد نتایج حاصل با نتایج تجربی یا عددی معتبر که در ادبیات فن موجود هستند مقایسه می‌شود.

#### ۳-۱- نوسان حباب در دامنه بی‌نهایت

نتایج عددی به دست آمده از شبیه‌سازی دینامیک حباب در دامنه بی‌نهایت در یک چرخه نوسانی مطابق با شکل ۲ بوده که با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۴۳] مقایسه شده است. تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج تجربی لیو و همکاران برقرار است.



شکل ۲- تغییرات زمانی شعاع حباب هنگام نوسان در یک دامنه بی‌نهایت؛ نتایج عددی حاضر و نتایج تجربی [۴۳]

$$t_{\text{osc}} = 1.830 R_m \sqrt{\rho / (p_{\infty} - p_v)} \quad (13)$$

### ۲-۲- شرایط مرزی و اولیه

طرحواره مسأله تحت بررسی به صورت متقارن محوری مطابق با شکل ۱ است. مرکز اولیه حباب در امتداد محور تقارن و در فاصله  $h$  از سطح بالایی صفحه تخت با ضخامت  $H$  قرار می‌گیرد. صفحه به طور کامل در آب غوطه‌ور است. سوراخ دارای دو قطر بزرگ  $D$  و کوچک  $d$  است. فشار ناشی از گاز داخل حباب به عنوان نیرو محرکه حرکت حباب و در نتیجه سیال پیرامون آن عمل می‌کند. در سطح صفحه تخت و دیواره‌های مخزن شرط عدم لغزش اعمال می‌شود. در سطح آزاد آب داخل مخزن شرط فشار خروجی اعمال می‌شود. دما در سطح و دیواره‌های مخزن ثابت فرض می‌شود. حباب در ابتدا کروی بوده و با شعاع بی‌بعد  $R'_0$  و حجم متناظر  $V'_0$  بیان می‌شود به طوری که  $R'_0$  از حل معادله رایلی-پلیست (۱۴) به دست می‌آید.

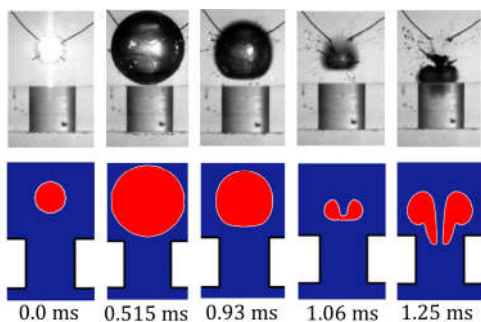
$$R' \frac{d^2 R'}{dt'^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR'}{dt'} \right)^2 - \varepsilon \left( \frac{R'_0}{R'} \right)^{3\eta} + \frac{2}{R' We} - 1 = 0 \quad (14)$$

که در آن،  $\varepsilon = p_{i,g} / \Delta p$  فشار بی‌بعد گاز چگالش‌ناپذیر داخل حباب و  $We$  عدد وبر و  $\eta$  نسبت گرماهای ویژه گاز،  $\Delta p = p_{\infty} - p_v$  و  $R'_0 = R_0 / R_m$  و  $R' = R / R_m$  شعاع بی‌نهایت حباب هنگام نوسان آن در دامنه بی‌نهایت است. با ضرب معادله (۱۴) در  $2R'^2 \dot{R}'$  و انتگرال‌گیری از آن و سپس اعمال شرایط  $\dot{R}' = 0$  در  $R' = R'_0$  و  $R' = 1$  می‌توان به معادله (۱۵) رسید.

$$\frac{\varepsilon R'_0{}^{3\eta}}{\eta - 1} (1 - R'_0{}^{3(1-\eta)}) + \frac{3}{We} (1 - R'_0{}^2) - R'_0{}^3 + 1 = 0 \quad (15)$$

از حل معادله (۱۵) با استفاده از روش نیوتن-رافسون به ازای مقادیر مختلف  $\varepsilon$  مقادیر متناظر مختلفی برای  $R'_0$  به دست می‌آید. انتخاب فشار اولیه مناسب برای محتویات گاز چگالش‌ناپذیر و بخار آب داخل حباب یکی از اساسی‌ترین نیازها در حل عددی است. فشار بخار  $p_v$  فقط وابسته به دمای دیواره‌های حباب است و این موضوع به خصوص برای حباب‌های جرقه‌ای با اندازه کوچک صادق است. عموماً حباب‌های دارای اندازه کوچک‌تر دارای فشار بخار بیشتری هستند. در تحقیقات بوگو و کانلی [۴۸] برای حباب جرقه‌ای با شعاع بی‌نهایت ۳۵mm فشار بخار برابر با  $p_v \cong 0.3 \times 10^5$  پاسکال گزارش شده است. مقدار فشار بخار داخل حباب در کار تورنگان و همکاران [۴۹] برای حباب جرقه‌ای با شعاع بی‌نهایت ۳/۳mm برابر با  $p_v \cong 0.5 \times 10^5$  پاسکال گزارش شده است.

در کار عددی حاضر مقدار  $\eta$  برابر با ۰.۱۴، و مقدار  $R'_0$  برابر با ۰.۳۸۰۴ قرار داده شده است. با قرار دادن مقادیر  $p_{\infty} = 101.325 \text{ kPa}$  و  $p_v = 12.64 \text{ kPa}$  و  $R_m = 4.12 \text{ mm}$  اندازه فشار اولیه داخل حباب ۸۸۷ کیلوپاسکال و شعاع اولیه حباب برابر با ۱/۵۶۷۲ میلی‌متر به دست می‌آید. چگالی آب مایع (در دمای  $20^\circ\text{C}$ ) و چگالی هوا (در دمای ۷۱۰ کلویین) به ترتیب  $998 \text{ kg/m}^3$  و  $0.719 \text{ kg/m}^3$  و مقادیر لزجت دینامیکی مربوطه به ترتیب  $10^{-3} \text{ Ns/m}^2$  و  $3.394 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- شکل حباب (ردیف بالا: نتایج تجربی لیو و همکاران [۴۳]؛ ردیف پایین: نتایج عددی) در زمان‌های مختلف؛ در زمان ۰/۵۱۵ میلی ثانیه حباب دارای شعاع بیشینه است.

#### ۴- استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از اندازه شبکه، رفتار دینامیکی یک حباب به هنگام نوسان در مجاورت یک سطح صلب سوراخدار با شرایط  $\theta = 10^\circ$ ،  $D = 5 \text{ mm}$  و  $d = 3.236 \text{ mm}$  بررسی می‌گردد. با توجه به فیزیک جریان و هندسه مسأله و به پیروی از کار عددی کو و همکاران [۴۲]، مسأله مورد مطالعه به صورت متقارن محوری حل می‌گردد. به دلیل تقارن محوری مسأله، نصف دامنه فیزیکی به عنوان دامنه محاسباتی انتخاب و شبیه‌سازی می‌گردد. شرایط مرزی و اولیه حاکم بر مسأله همان شرایط ذکر شده در بخش قبلی است. پنج حالت با ابعاد شبکه مختلف مطابق جدول ۱ انتخاب و نتایج حاصل برای شکل حباب، تغییرات بیشینه سرعت جت مایع و نرخ دبی جرمی عبوری از سوراخ برای هر پنج حالت مختلف مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول ۱- تعداد سلول‌های مورد استفاده در پنج شبکه مختلف

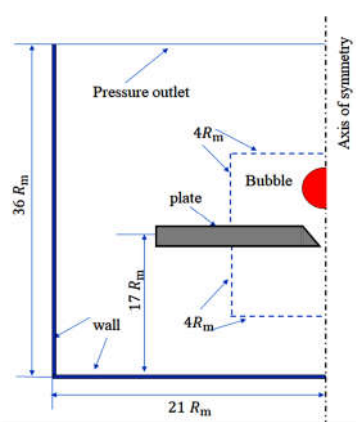
شماره شبکه	Grid-I	Grid-II	Grid-III	Grid-IV	Grid-V
تعداد سلول	۷۵۹۰۴	۱۰۸۴۱۶	۱۴۱۴۲۸	۳۴۶۷۸۰	۴۶۵۱۲۱

نتایج عددی مربوط به شکل حباب برای حالت شبکه III مطابق با شکل ۵ است. حباب در انتهای مرحله رشد (در زمان ۰/۵۲۲ms) به شعاع بیشینه خود (۰/۹۴۱mm) می‌رسد. در مرحله آخر فروپاشی حباب (در زمان ۱/۰۶ms) یک سطح از حباب با سطح دیگر آن برخورد کرده و حباب شکل چنبره به خود می‌گیرد و نفوذ جت مایع به درون سوراخ در زمان ۱/۰۶ms اتفاق می‌افتد. نتایج به دست آمده برای شکل حباب برای پنج شبکه مختلف نشان می‌دهد که نتایج مربوط به شبکه‌های اول و دوم متفاوت از نتایج شبکه‌های سوم، چهارم و پنجم بوده و برای شبکه‌های سوم، چهارم و پنجم نتایج تقریباً یکسان است. در نتیجه برای انجام شبیه‌سازی‌های این تحقیق از شبکه سوم استفاده می‌شود.

تغییرات زمانی بیشینه سرعت جت برای هر پنج حالت شبکه در شکل ۶-الف نشان داده شده است. مطابق این نمودار، به خصوص در زمان ۱/۰۲ ms جت مایع به سرعت نسبتاً بالایی رسیده که در زمان ۱/۰۶ms برخورد جت مایع به سطح دیگر حباب اتفاق می‌افتد و بعد از آن شکل حباب چنبره‌ای را شاهد هستیم. سپس بیشینه سرعت جت

#### ۲-۳- نوسان حباب در مجاورت یک سطح تخت سوراخدار

دینامیک حباب جرقه‌ای ایجاد شده در مجاورت یک سوراخ دایروی در کار عددی حاضر بررسی و نتایج حاصل با نتایج تجربی لیو و همکاران [۴۳] (که تنها شامل شکل حباب است) مقایسه می‌شود. شعاع بیشینه حباب در آزمایش برابر با ۴/۱۲ میلی‌متر و پارامتر تقابل (فاصله بی‌بعد مرکز اولیه حباب تا لبه بالایی صفحه تخت یعنی  $\gamma = h/R_m$ ) برابر با ۱/۰۱ میلی‌متر، ضخامت صفحه تخت ۵ میلی‌متر ( $H = 5 \text{ mm}$ ) و قطر سوراخ دایروی ایجاد شده در صفحه تخت نیز ۵ میلی‌متر است ( $D = d = 5 \text{ mm}$ ). در روش عددی مسأله به صورت متقارن محوری در یک هندسه مطابق با شکل ۳ شبیه‌سازی می‌شود. ابعاد دامنه محاسباتی مورد بررسی برابر با  $21R_m \times 36R_m$  در نظر گرفته می‌شود که هم اندازه‌ی ابعاد کار آزمایشگاهی [۴۳] است. به منظور ردیابی دقیق فصل مشترک حباب و مایع، شبکه‌بندی ناحیه پیرامون حباب با ابعاد  $4R_m \times 4R_m$  ریزتر از بقیه نقاط دامنه محاسباتی است. کمینه تعداد سلول‌های مورد نیاز برای به دست آوردن نتایج مستقل از شبکه در این مسأله برابر با ۱۴۲۲۸۱ سلول است. شعاع اولیه حباب برابر با ۱/۵۶۷۲ میلی‌متر مطابق با شرایط کار آزمایشگاهی [۴۳] انتخاب شده است. فشار گاز داخل حباب برابر با  $\epsilon = 10.887 \text{ kPa}$ ،  $R'_0 = 0.3804$ ،  $p_\infty = 101.325 \text{ kPa}$ ،  $p_v = 12.64 \text{ kPa}$  و  $\eta = 1.4$  و دمای داخل حباب ۷۱۰ کلوین است.



شکل ۳- طرحواره دامنه محاسباتی مسأله در نظر گرفته شده در بخش ۲-۳

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به همراه نتایج تجربی در شکل ۴ نشان داده شده است. شعاع بیشینه حباب ۴/۰۵ mm در زمان ۰/۵۱۵ms در کار عددی است. اندازه شعاع بیشینه حباب برابر با ۴/۱۲mm و در زمان ۰/۶۴ms است. زمان برخورد سطح حباب به سطح دیگر آن توسط جت مایع حاصله ۱/۰۶ms است. بیشینه سرعت مایع عبوری از سوراخ دایروی ایجاد شده در صفحه تخت در کار تجربی برابر با ۲۴m/s و در کار عددی برابر با ۲۴/۳m/s نتیجه می‌شود.

## ۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده برای حباب در حال نوسان در مجاورت سطح سوراخ‌دار شامل شکل حباب، میدان سرعت و فشار، دبی جرمی عبوری از سوراخ، بیشینه سرعت جت مایع، دبی حجمی بی‌بعد و در نهایت جرم خالص عبوری از سوراخ در طی یک مدت زمان مشخص به ازای مقادیر مختلف پارامتر تقابل (فاصله بی‌بعد مرکز حباب تا سوراخ  $\gamma = h/R_m$ ) ارائه و تحلیل می‌گردد. در تمامی حالت‌های شبیه‌سازی مقادیر  $\theta = 10^\circ$ ،  $D = 5 \text{ mm}$  و  $d = 3.236 \text{ mm}$  ثابت نگه داشته می‌شود ولی پارامتر تقابل  $\gamma$  مقادیر مختلفی مانند ۰/۸۱، ۰/۹۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۶ را به خود می‌گیرد. ابتدا نتایج مربوط به تکامل شکل حباب و میدان‌های سرعت و فشار سیال پیرامون آن در طی فازهای رشد و فروپاشی حباب آورده و توضیح داده می‌شود. شایان ذکر است که مرز حباب در شکل‌های این بخش به ازای کسر حجمی ۰/۵ رسم شده و با رنگ سفید نشان داده شده است.

### ۵-۱- نوسان حباب با پارامتر تقابل ۰/۸۱

در شکل ۷ تصاویر حباب و میدان سرعت و فشار حاصله مربوط به پارامتر تقابل  $\gamma = 0/81$  نشان داده شده است. در این حالت حباب تا شعاع بیشینه ۳/۹۵ میلی‌متر در زمان ۰/۵۳ms در طی فاز رشد خواهد رسید. بردارهای سرعت در طی فاز رشد نشان‌دهنده جریان جرمی مثبت (به طرف پایین) در سوراخ در طی فاز رشد است که جهت این جریان مثبت در طی فاز فروپاشی عوض شده و سبب ایجاد جریان جرمی منفی (به طرف بالا) در سوراخ خواهد شد به طوری که تا زمان برخورد سطح حباب با سطح دیگر آن که در زمان ۱/۰۶ ms اتفاق می‌افتد دوباره سبب ایجاد جریان جرمی مثبت در سوراخ می‌شود. در لحظه برخورد جت بیشینه سرعت جت مایع برابر با ۴۸/۸ m/s است که به مقادیر ۲۹/۶m/s و ۲۳/۷m/s در زمان‌های ۱/۱۶ ms و ۱/۲۶ ms خواهد رسید.

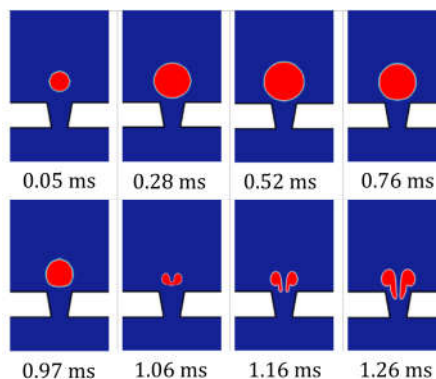
### ۵-۲- نوسان حباب با پارامتر تقابل ۰/۹۱

در شکل ۸ تصاویر حباب و میدان سرعت و فشار حاصله مربوط به پارامتر تقابل  $\gamma = 0/91$  ارائه شده است. فاز رشد حباب تا شعاع بیشینه آن تا زمان ۰/۵۲۵ میلی‌ثانیه ادامه داشته و شعاع بیشینه حباب برابر با ۳/۹۶۳ میلی‌متر است. سرعت بیشینه جت مایع در زمان برخورد جت با سطح دیگر حباب برابر با ۴۷/۸ متر بر ثانیه است که در ادامه به مقادیر ۳۳/۸ و ۲۳/۴ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. همچنین بیشینه فشار جت در لحظه برخورد جت برابر با ۶۷۳ کیلوپاسکال است که به ترتیب به مقادیر ۲۸۹ و ۱۳۷ کیلوپاسکال در زمان‌های ۱/۱۶ و ۱/۲۶ میلی‌ثانیه کاهش خواهد یافت.

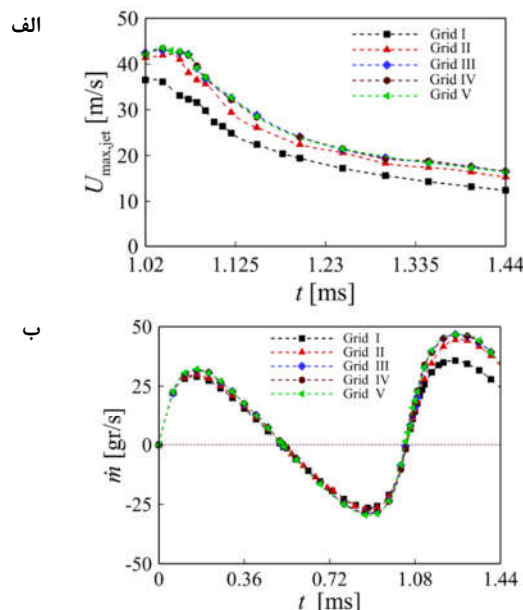
### ۵-۳- نوسان حباب با پارامتر تقابل ۱/۰۱

تصاویر حباب و میدان سرعت و فشار مربوط به پارامتر تقابل  $\gamma = 1/01$  در شکل ۹ ارائه می‌شود. شعاع بیشینه حباب در زمان ۰/۵۲۲ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. بردارهای سرعت در زمان شعاع بیشینه حباب نشان از چرخش جریان دارد که در طی فاز فروپاشی حباب جهت

مایع شروع به کاهش خواهد نمود. با توجه به نمودار، نتایج مربوط به حالت‌های سوم، چهارم و پنجم تطابق خوبی دارند. تغییرات زمانی دبی جرمی عبوری از سوراخ برای پنج حالت شبکه مورد نظر مطابق با شکل ۶-ب است. طبق این نمودار اولین قله مثبت دبی جرمی در فاز رشد حباب در زمان ۱/۰۶ms اتفاق می‌افتد. دومین قله مثبت دبی جرمی در زمان ۱/۲۵ms اتفاق می‌افتد که برای شبکه‌های حالت سوم، چهارم و پنجم یکسان است. مقایسه نتایج مربوط به دبی جرمی عبوری از سوراخ برای هر پنج حالت شبکه، نشان دهنده تطابق خوب نتایج برای حالت‌های سوم، چهارم و پنجم است. بنابراین کمینه تعداد شبکه در این سه حالت اخیر (حالت شبکه سوم) که به منجر به نتایج یکسان می‌گردد، برای شبکه‌بندی انتخاب و در سایر شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵- تصویر حباب برای حالت سوم شبکه (Grid-III) در زمان‌های مختلف

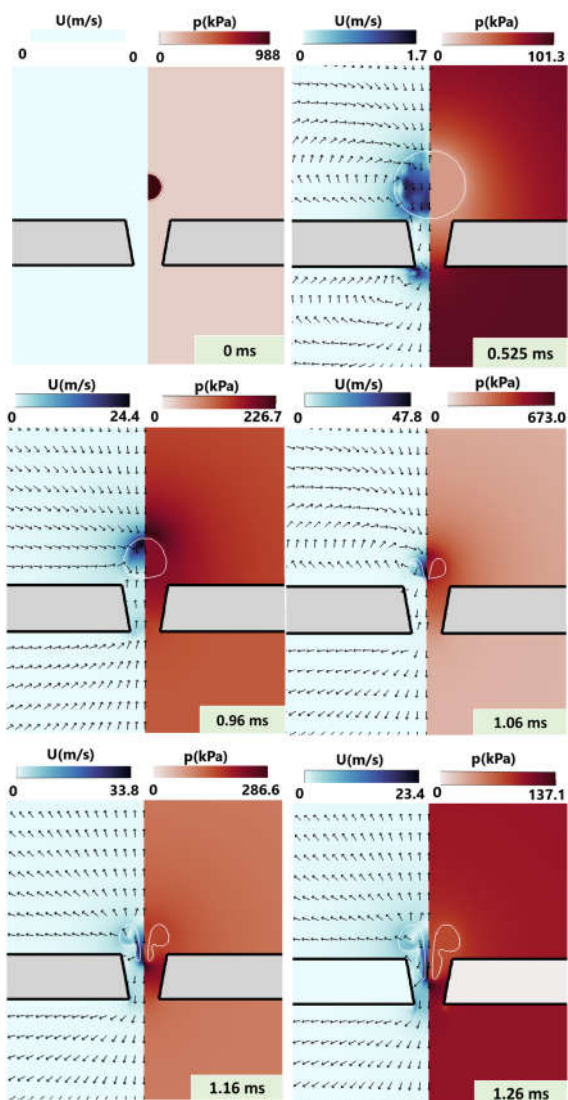


شکل ۶- (الف) سرعت بیشینه‌ی جت مایع؛ (ب) دبی جرمی عبوری از مقطع سوراخ برای پنج شبکه مختلف

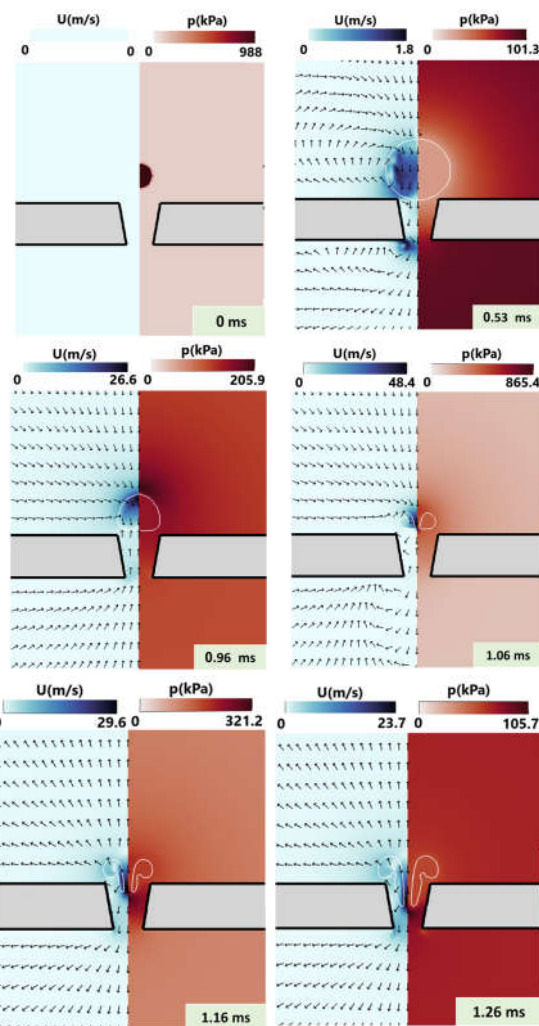
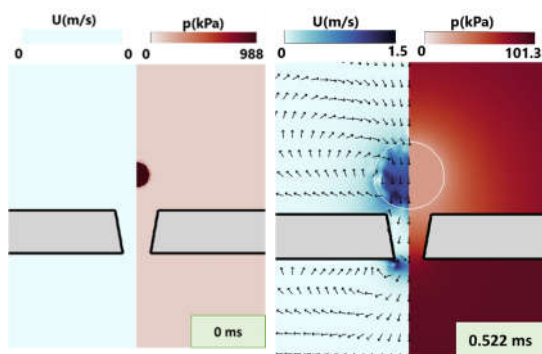
جریان جرمی از مثبت به منفی عوض می‌شود. سرعت در لحظه برخورد جت مایع از یک سطح به سطح دیگر حباب برابر با  $42/5$  متر بر ثانیه است، که به مقدارهای  $28/4$  و  $21/6$  متر بر ثانیه به ترتیب در زمان‌های  $1/16$  و  $1/26$  میلی ثانیه کاهش خواهد یافت.

#### ۵-۴- نوسان حباب با پارامتر تقابل $1/16$

در شکل ۱۰، تصاویر حباب و میدان سرعت و فشار مربوط به پارامتر تقابل  $\gamma$  برابر با  $1/16$  نشان داده شده است. در این حالت حباب تا شعاع بیشینه  $3/91$  میلی‌متر در زمان  $0/515$  میلی‌ثانیه رشد خواهد کرد. میدان سرعت و فشار نشانگر وجود سرعت‌های بالای جت مایع در لحظه برخورد سطح بالایی حباب به سطح پایینی آن است به طوری که اندازه سرعت در این لحظه برابر با  $40/3$  متر بر ثانیه است که به مقادیر  $28/6$  و  $22/7$  متر بر ثانیه در زمان‌های  $1/16$  و  $1/26$  میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد. اندازه فشار روی جت مایع در لحظه برخورد جت حباب برابر با  $476$  کیلوپاسکال است که به مقادیر  $236/6$  و  $124/4$  کیلوپاسکال به ترتیب در زمان‌های  $1/16$  و  $1/26$  میلی‌ثانیه کاهش خواهد یافت.

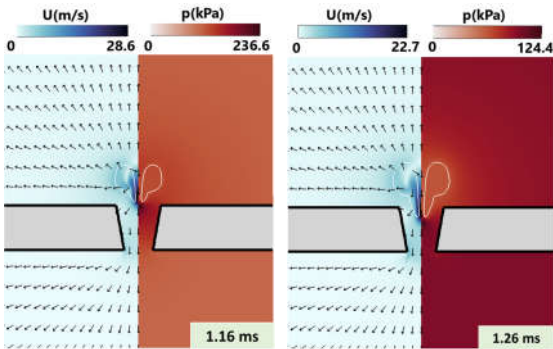


شکل ۸- تصویر حباب، میدان سرعت و فشار سیال پیرامون حباب در زمانهای مختلف برای  $D = 5 \text{ mm}$  و  $\theta = 10^\circ$ ،  $H = 5 \text{ mm}$  با  $\gamma = 0.91$



شکل ۷- تصویر حباب، میدان سرعت و فشار سیال پیرامون حباب در زمانهای مختلف برای  $D = 5 \text{ mm}$  و  $\theta = 10^\circ$ ،  $H = 5 \text{ mm}$  با  $\gamma = 0.81$



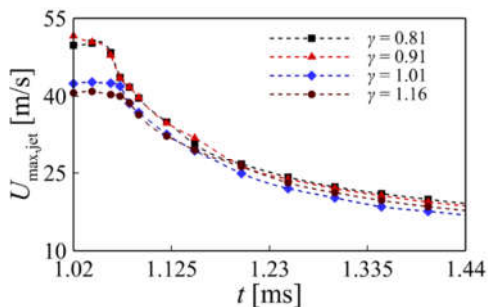


شکل ۱۰- تصویر حباب، میدان سرعت و فشار پیرامون حباب در زمانهای مختلف برای  $D = 5 \text{ mm}$  و  $\theta = 10^\circ$ ،  $H = 5 \text{ mm}$  با  $\gamma = 1.16$

در ادامه نتایج مربوط به تغییرات زمانی بیشینه سرعت جت مایع، نرخ جرم عبوری از سوراخ، میانگین سرعت عبوری از خروجی مقطع و نرخ دبی حجمی بی‌بعد به ازای تغییرات پارامتر تقابل  $\gamma$  ارائه و توضیح داده می‌شود.

#### ۵-۵- بیشینه سرعت جت مایع

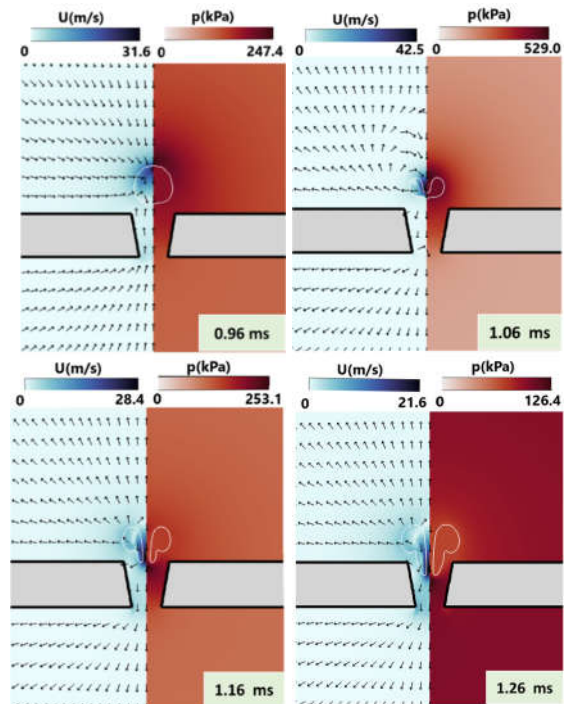
تغییرات زمانی بیشینه سرعت جت مایع برای چهار مقدار متفاوت پارامتر تقابل  $\gamma$  مطابق با شکل ۱۱ است. از این نمودار مشخص است که برای یک مقدار ثابت  $\gamma$  اندازه بیشینه سرعت جت مایع با افزایش زمان کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش  $\gamma$  (نزدیک‌تر شدن مرکز حباب به سوراخ) اندازه بیشینه سرعت جت مایع در همه مقاطع زمانی افزایش می‌یابد.



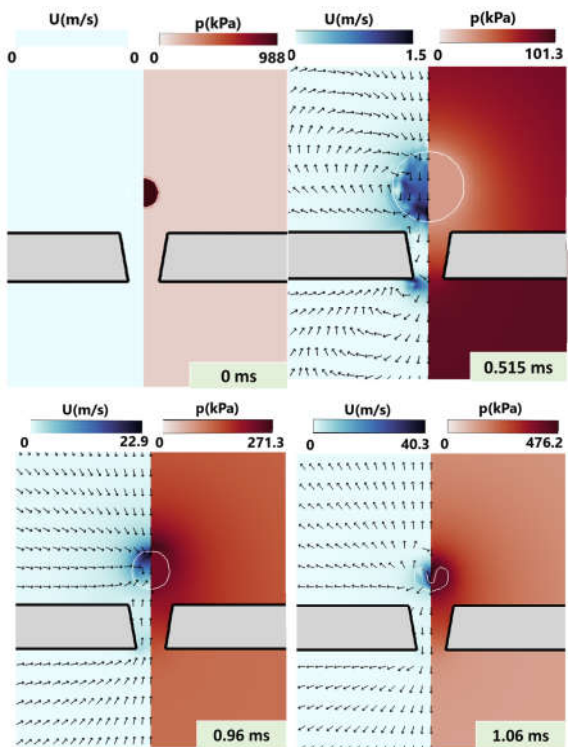
شکل ۱۱: تغییرات زمانی بیشینه سرعت جت مایع برای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$

#### ۵-۶- دبی جرمی عبوری از سوراخ

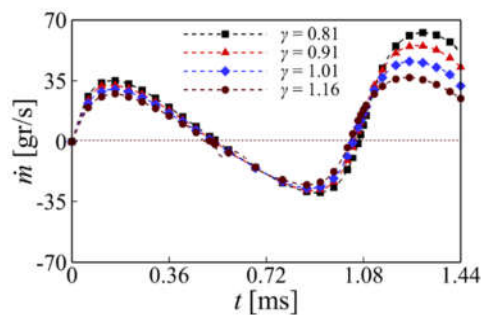
تغییرات دبی جرمی عبوری از مقطع خروجی سوراخ بر حسب زمان با تغییرات پارامتر تقابل  $\gamma$  مطابق با شکل ۱۲ است. با توجه به این نمودار می‌توان سه ناحیه مختلف را مشخص کرد. ناحیه اول مربوط به رشد حباب است که در آن جهت دبی جرمی برای همه حالت‌ها مثبت است. ناحیه دوم مربوط به فاز فروپاشی حباب قبل از برخورد جت به سطح دیگر حباب است که جهت دبی جرمی در این ناحیه برای تمامی حالت‌ها منفی است. ناحیه سوم مربوط به فاز فروپاشی حباب و بعد از برخورد جت به سطح دیگر حباب و تشکیل حباب چنبره‌ای است.



شکل ۹- تصویر حباب، میدان سرعت و فشار سیال پیرامون حباب در زمانهای مختلف برای  $D = 5 \text{ mm}$  و  $\theta = 10^\circ$ ،  $H = 5 \text{ mm}$  با  $\gamma = 1.01$

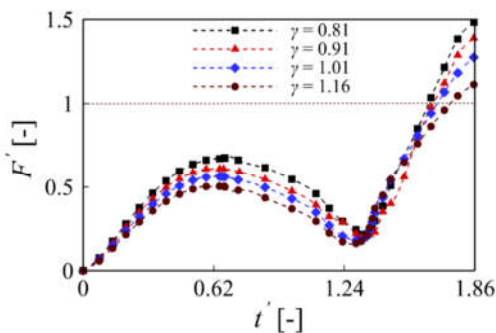


که جهت دبی جرمی در این ناحیه نیز برای تمامی حالت‌ها مثبت است. مطابق با نمودار مشخص است که با کاهش پارامتر تقابل  $\gamma$  اندازه جبری دبی جرمی عبوری از مقطع هم در فاز رشد و هم در فاز فروپاشی افزایش خواهد یافت. مقادیر بیشینه دبی جرمی عبوری از مقطع به ازای مقادیر مختلف  $\gamma$  تحت بررسی مطابق شکل ۱۲ است به طوری که برای پارامتر تقابل ۰/۸۱، ۰/۹۱، ۱/۰۱، ۱/۱۶ و ۱/۱۶ در زمان ۱/۴۴ میلی‌ثانیه به ترتیب برابر با ۵۲/۹، ۴۲/۹۷، ۳۴/۲۸ و ۲۴/۸۲ گرم بر ثانیه است.



شکل ۱۲- تغییرات زمانی دبی جرمی عبوری از سوراخ برای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$

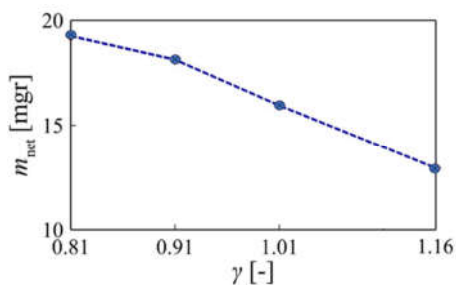
کسری از حجم بیشینه حباب در طی فاز رشد و فروپاشی حباب، مایع از سوراخ عبور می‌کند، به طوری که مقدار  $F'$  بزرگتر از واحد بیانگر کارایی حباب در پمپاژ مایع از طریق سوراخ است. این پارامتر بی‌بعد برحسب زمان بی‌بعد  $t'$  (رابطه ۱۲) در شکل ۱۴ به ازای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$  رسم شده است. با مقایسه مقادیر دبی حجمی بی‌بعد  $F'$  در زمان بی‌بعد ۱/۸۶ مشاهده می‌شود که با کاهش  $\gamma$  قابلیت پمپاژ حباب افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۴- دبی حجمی بی‌بعد بر حسب زمان بی‌بعد برای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$

#### ۵-۹- جرم خالص عبوری از سوراخ

اندازه خالص جرم عبوری از سوراخ تا زمان  $t_f = 1.44 \text{ ms}$  اثرات پمپاژ حاصل از نوسان حباب را نمایان می‌سازد. مساحت زیر نمودار دبی جرمی  $\dot{m}$  برحسب زمان که به صورت  $m_{\text{net}} = \int_0^{t_f} \dot{m} dt$  تعریف می‌شود، جرم خالص عبوری از سوراخ را نتیجه می‌دهد. در اینجا انتگرالگیری به صورت عددی و با استفاده از قاعده دوزنقه‌ای انجام می‌گیرد. بدیهی است که در طی فاز رشد اندازه جرم عبوری از سوراخ مثبت و در طی فاز فروپاشی جهت جریان بر عکس و منفی خواهد شد و بعد از تشکیل جت مایع جهت جریان دوباره عوض می‌شود. اندازه خالص جرم عبوری از سوراخ در طی زمان ۱/۴۴ میلی‌ثانیه برای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$  به صورت شکل ۱۵ می‌باشد.

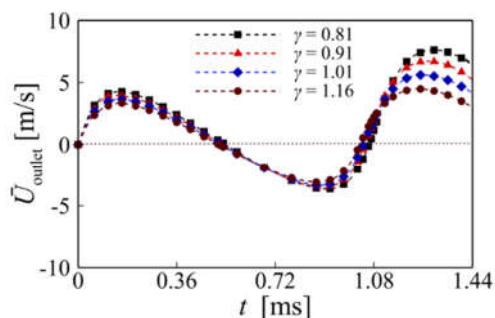


شکل ۱۵- جرم خالص عبوری از سوراخ در طی زمان ۱/۴۴ میلی‌ثانیه برای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$

همان طور که در نمودار مشخص است جرم خالص عبوری از سوراخ برای حالت  $\gamma = 0.81$  برابر با ۱۹/۲۶ میلی‌گرم است که با افزایش اندازه پارامتر تقابل  $\gamma$  مقدار آن کاهش می‌یابد.

#### ۵-۷- سرعت میانگین در مقطع خروجی

رابطه دبی جرمی عبوری از سوراخ به صورت  $\dot{m} = \rho \bar{U}_{\text{outlet}} S$  تعریف می‌شود که در آن  $S$  مساحت سطح مقطع خروجی سوراخ با قطر  $d$  بوده،  $\rho$  چگالی مایع و  $\bar{U}_{\text{outlet}}$  سرعت میانگین خروجی از سوراخ است. با توجه به اینکه هندسه مقطع خروجی سوراخ در بررسی تاثیر پارامتر تقابل  $\gamma$  ثابت فرض می‌شود، نمودار حاصل برای سرعت میانگین خروجی از سوراخ مشابه با نمودار دبی جرمی عبوری از مقطع خروجی مطابق با شکل ۱۳ است به طوری که با کاهش  $\gamma$  اندازه سرعت میانگین در مقطع خروجی هم در فاز رشد و هم در فاز فروپاشی حباب افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- تغییرات زمانی سرعت میانگین مایع خروجی از سوراخ برای مقادیر مختلف پارامتر تقابل  $\gamma$

#### ۵-۸- دبی حجمی بی‌بعد مایع عبوری از سوراخ

یک پارامتر مهم دیگر به عنوان توصیف کننده اثر پمپاژ حباب، پارامتر بی‌بعد دبی حجمی (حجم مایع انتقال یافته)  $F'$  مطابق با رابطه (۹) است [۴۲]. مفهوم فیزیکی این پارامتر این است که معادل چه



underwater explosion in waves. *Ocean Engineering*. 2018 Aug 1; 161:277-90.

[12] Wang J, Li S, Gu J, Zhang A. Particle propulsion from attached acoustic cavitation bubble under strong ultrasonic wave excitation. *Physics of Fluids*. 2023 Apr 1; 35(4).

[13] Cheng SH, Quan XB, Zhang S, Zhang TY, Li S. Modeling tail bubble dynamics during the launch of an underwater vehicle using the boundary element method. *Journal of Hydrodynamics*. 2022 Jun; 34(3):434-43.

[14] Zhang S, Wang SP, Zhang AM, Cui P. Numerical study on motion of the air-gun bubble based on boundary integral method. *Ocean Engineering*. 2018 Apr 15; 154:70-80.

[15] Li S, Li YB, Zhang AM. Numerical analysis of the bubble jet impact on a rigid wall. *Applied Ocean Research*. 2015 Mar 1; 50:227-36.

[16] Li G, Yi L, Wang J, Song Y. Hydrodynamic cavitation degradation of Rhodamine B assisted by Fe<sup>3+</sup>-doped TiO<sub>2</sub>: Mechanisms, geometric and operation parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020 Jan 1; 60:104806.

[17] Koukouvinis P, Gavaises M, editors. *Cavitation and Bubble Dynamics: Fundamentals and Applications*. Elsevier; 2021 Sep 24.

[18] Chahine GL, Kapahi A, Choi JK, Hsiao CT. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016 Mar 1; 29:528-49.

[۱۹] کنعان سامرند، دادوند عبدالرحمان. شبیه‌سازی عددی تولید قطره از یک محفظه متقارن محوری به کمک حباب جرقه‌ای. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز* ۱۳۹۷، ۱۳، ش ۲، ص ۲۶۹-۲۷۸.

[20] Reuter F, Mettin R. Mechanisms of single bubble cleaning. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016 Mar 1; 29:550-62.

[21] Chahine GL, Kapahi A, Choi JK, Hsiao CT. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016 Mar 1; 29:528-49.

[22] Sagar HJ, El Moctar O. Dynamics of a cavitation bubble between oblique plates. *Physics of Fluids*. 2023 Jan 1; 35(1).

[23] Kooiman K, Roovers S, Langeveld SA, Kleven RT, Dewitte H, O'Reilly MA, Escoffre JM, Bouakaz A, Verweij MD, Hynynen K, Lentacker I. Ultrasound-responsive cavitation nuclei for therapy and drug delivery. *Ultrasound in medicine & biology*. 2020 Jun 1; 46(6):1296-325.

[24] Kooiman K, Vos HJ, Versluis M, De Jong N. Acoustic behavior of microbubbles and implications for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2014 Jun 15; 72:28-48.

[25] Kaykanat SI, Uguz AK. The role of acoustofluidics and microbubble dynamics for therapeutic applications and drug delivery. *Biomicrofluidics*. 2023 Mar 1; 17(2).

[26] Chen X, Liang D, Sun W, Shou X, Shang L, Shen X. Suspended bubble microcapsule delivery systems from droplet microfluidic technology for the local treatment of gastric cancer. *Chemical Engineering Journal*. 2023 Feb 15; 458:141428.

[27] Ibsen S, Schutt CE, Esener S. Microbubble-mediated ultrasound therapy: a review of its potential in cancer treatment. *Drug Design, Development and Therapy*. 2013 May; 3:375-88.

[28] Zhang ZH, Wang S, Cheng L, Ma H, Gao X, Brennan CS, Yan JK. Micro-nano-bubble technology and its applications in food industry: A critical review. *Food Reviews International*. 2023 Aug 25; 39(7):4213-35.

[29] Singh B, Shukla N, Cho CH, Kim BS, Park MH, Kim K. Effect and application of micro-and nanobubbles in water purification. *Toxicology and Environmental Health Sciences*. 2021 Mar; 13:9-16.

[30] Cao Z, Zhou J, Wei J, Sun D, Yu B. Direct numerical simulation of bubble dynamics and heat transfer during nucleate boiling on the micro-pin-finned surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020 Dec 1; 163:120504.

[31] Liu LT, Yao XL, Zhang AM, Chen YY. Numerical analysis of the jet stage of bubble near a solid wall using a front tracking method. *Physics of Fluids*. 2017 Jan 1; 29(1).

[32] Tang H, Liu YL, Cui P, Zhang AM. Numerical study on the bubble dynamics in a broken confined domain. *Journal of Hydrodynamics*. 2020 Dec; 32(6):1029-42.

## ۶- نتیجه گیری

دینامیک یک حباب نوسانی در نزدیکی یک سطح صلب سوراخدار و خاصیت پمپاژ حاصل از آن با استفاده از روش حجم سیال VOF مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی حالت‌های تحت بررسی هنگامی که حباب به بیشینه حجم خود می‌رسد، بردارهای سرعت چرخش جریان را نشان می‌دهند. جریان جرمی عبوری از مقطع در فاز رشد حباب مثبت است به طوری که در ابتدای فاز فروپاشی حباب، جهت جریان جرمی به دلیل وجود جریان برگشتی از مثبت به منفی تغییر جهت می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت بیشینه جت مایع در لحظه برخورد جت، و فشار بیشینه روی آن با افزایش پارامتر تقابل  $\gamma$  کاهش می‌یابد به طوری که سرعت بیشینه جت مایع به ازای  $\gamma$  برابر با ۰/۸۱، ۰/۹۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۶ به ترتیب برابر با ۴۷/۸، ۴۲/۵، ۴۰/۳ متر بر ثانیه و فشار بیشینه روی جت به ترتیب برابر با مقادیر ۸۶۵، ۶۷۳، ۵۲۹ و ۴۷۶ کیلوپاسکال خواهد بود. همچنین مقدار جرم خالص عبوری از سوراخ ( $m_{net}$ ) در مدت زمان ۱/۴۴ میلی‌ثانیه به ازای مقادیر  $\gamma$  برابر با ۰/۸۱، ۰/۹۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۶ به ترتیب برابر با ۱۹/۲۶، ۱۸/۱۳، ۱۵/۹۵ و ۱۲/۹۴ خواهد بود که بیشترین مقدار جرم خالص (بالاترین قدرت پمپاژ) را به ازای کوچک‌ترین  $\gamma$  نتیجه می‌دهد. بنابراین با افزایش اندازه  $\gamma$  قدرت پمپاژ حاصل از نوسان حباب کاهش خواهد یافت.

## ۷- مراجع

- [1] Zhang S, Zhang R, Zhang S, Yang J. Effect of impeller inlet geometry on cavitation performance of centrifugal pumps based on radial basis function. *International Journal of Rotating Machinery*. 2016; 2016(1):6048263.
- [2] Dong Z, Zhou T, Liu J, Zhang X, Shen B, Hu W, Liu L. Cavitation erosion behaviors of surface chromizing layer on 316L stainless steel. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019 Nov 1; 58:104668.
- [3] Kim TH, Kim HY. Disruptive bubble behaviour leading to microstructure damage in an ultrasonic field. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014 Jul; 750:355-71.
- [4] Hua JG, Ren H, Huang J, Luan ML, Chen QD, Juodkazis S, Sun HB. Laser-Induced Cavitation-Assisted True 3D Nano-Sculpturing of Hard Materials. *Small*. 2023 Jun; 19(24):2207968.
- [5] Jiang H, Lu H, Zhou Y, Liu Y, Hao C. High-efficiency degradation catalytic performance of a novel *Angelica sinensis* polysaccharide-silver nanomaterial for dyes by ultrasonic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023 Feb 1; 93:106289.
- [6] Xu L, Park K, Lei H, Liu P, Kim E, Cho Y, Kim T, Chen C. Chemically-induced active micro-nano bubbles assisting chemical mechanical polishing: Modeling and experiments. *Friction*. 2023 Sep; 11(9):1624-40.
- [7] Talabazar FR, Aghdam AS, Jafarpour M, Grishenkov D, Koşar A, Ghorbani M. Chemical effects in "hydrodynamic cavitation on a chip": The role of cavitating flow patterns. *Chemical Engineering Journal*. 2022 Oct 1; 445:136734.
- [8] Wang Z, Huang B, Zhang M, Wang G. Experimental and numerical investigation of ventilated cavitating flow structures with special emphasis on vortex shedding dynamics. *International Journal of Multiphase Flow*. 2018 Jan 1; 98:79-95.
- [9] Yang DD, Yu A, Ji B, Zhou JJ, Luo XW. Numerical analyses of ventilated cavitation over a 2-D NACA0015 hydrofoil using two turbulence modeling methods. *Journal of Hydrodynamics*. 2018 Apr; 30:345-56.
- [10] Liu YL, Zhang AM, Tian ZL, Wang SP. Numerical investigation on global responses of surface ship subjected to underwater explosion in waves. *Ocean Engineering*. 2018 Aug 1; 161:277-90.
- [11] Liu YL, Zhang AM, Tian ZL, Wang SP. Numerical investigation on global responses of surface ship subjected to

- [۳۳] حاجی زاده اقدم ابوالفضل. تحلیل تجربی رفتار یک حباب نوسانی در مجاورت سطوح صلب و الاستیک. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۱۴۰۰، ۵۱، ش ۳، ص ۳۵-۴۰.
- [34] Huang G, Zhang M, Ma X, Chang Q, Zheng C, Huang B. Dynamic behavior of a single bubble between the free surface and rigid wall. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020 Oct 1; 67:105147.
- [35] Ma X, Huang B, Zhao X, Wang Y, Chang Q, Qiu S, Fu X, Wang G. Comparisons of spark-charge bubble dynamics near the elastic and rigid boundaries. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018 May 1; 43:80-90.
- [36] Lv L, Zhang Y, Zhang Y. Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019 Sep 1; 56:63-76.
- [37] Pontes P, Cautela R, Teodori E, Moita A, Liu Y, Moreira AL, Nikulin A, del Barrio EP. Effect of pattern geometry on bubble dynamics and heat transfer on biphilic surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2020 Jul 1; 115:110088.
- [38] Jund AA, Dadvand A, Aziz IA, Manmi KM. An extended Laplacian smoothing for boundary element analysis of 3D bubble dynamics. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2024 Mar 1;160:76-88.
- [39] Bapir SA, Manmi KM, Saeed RK, Dadvand A. Oscillation of an ultrasonically driven gas bubble in an asymmetric confined domain. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024 Mar 1;265:108861.
- [40] Reuter F, Mettin R. Mechanisms of single bubble cleaning. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016 Mar 1; 29:550-62.
- [40] Mao Y, Peng Y, Zhang J. Study of cavitation bubble collapse near a wall by the modified lattice Boltzmann method. *Water*. 2018 Oct 12;10(10):1439.
- [41] Shan ML, Zhu CP, Zhou X, Yin C, Han QB. Investigation of cavitation bubble collapse near rigid boundary by lattice Boltzmann method. *Journal of Hydrodynamics*. 2016 Jun; 28(3):442-50.
- [42] Khoo BC, Klaseboer E, Hung KC. A collapsing bubble-induced micro-pump using the jetting effect. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005 Jan 31; 118(1):152-61.
- [43] Lew KS, Klaseboer E, Khoo BC. A collapsing bubble-induced micropump: an experimental study. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007 Jan 8; 133(1):161-72.
- [44] Karri B, Ohl SW, Klaseboer E, Ohl CD, Khoo BC. Jets and sprays arising from a spark-induced oscillating bubble near a plate with a hole. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2012 Sep; 86(3):036309.
- [45] Dadvand A, Moloudi G, Saleki-Haselghoubi N, Dawoodian M. Dynamics of a gas bubble near the aperture of a perforated concave rigid plate. *Ocean Engineering*. 2022 Aug 15; 258:111697.
- [46] Moloudi G, Dadvand 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*. 2019 Jun 1; 103:51-65
- [47] Reese H, Schädel R, Reuter F, Ohl CD. Microscopic pumping of viscous liquids with single cavitation bubbles. *Journal of Fluid Mechanics*. 2022 Aug; 944:A1.
- [48] Buogo S, Cannelli GB. Implosion of an underwater spark-generated bubble and acoustic energy evaluation using the Rayleigh model. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002 Jun 1; 111(6):2594-600.
- [49] Turangan CK, Ong GP, Klaseboer E, Khoo BC. Experimental and numerical study of transient bubble-elastic membrane interaction. *Journal of Applied Physics*. 2006 Sep 1; 100(5).