



Numerical and Experimental Investigation of the Rising Shape Regime of the Air Bubble Injected into the Water Column

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Jahangiri A.¹ PhD,
Majidi S.^{*1} PhD,
Roshandel Kh.² MSc,
Borzuei D.¹ MSc,
Moosavian S.F.¹ MSc,
Naji Ranjbar M. ¹ MSc

How to cite this article

Jahangiri A, Majidi S, Roshandel Kh, Borzuei D, Moosavian S.F, Naji Ranjbar M. Numerical and Experimental Investigation of the Rising Shape Regime of the Air Bubble Injected into the Water Column. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):97-106.

ABSTRACT

Investigating the history of production and dynamics of growing or collapsing bubbles under various environmental conditions plays an important role in the correct understanding of the process of boiling, evaporation, cavitation, and condensation. In this paper, the rising shape regime the air bubble injected into the water column was studied and simulated using numerical and experimental methods. For this purpose, a column filled with water was used in the laboratory as a host fluid and using the high-speed image recording method, the most important hydrodynamic properties of the bubbles, such as velocity, size, pathway, and other bubble properties were measured. Then, using the computational fluid dynamics and the volume of fluid two-phase flow model, ascent and deformation of the single-bubble injected into a stationary reservoir were investigated and compared with previous and current experimental and numerical results. The result of this validation with a good approximation was in accordance with the reference results and it proved the correctness of the solver's and its settings. Finally, the bubble shape regime was calculated by the non-dimensional numbers of Eötvös and Morton and compared with the numerical simulation and empirical test. The regime obtained from the Clift diagram is a spherical cap regime, which at the same conditions, is in accordance with the bubble shaped regime simulated by numerical and experimental methods and this confirms the validity of the numerical solution.

Keywords Bubble Rising; Shape Regime; Clift Graph; 3-D Numerical and Experimental Simulation

¹Energy Conversion Department, Mechanical & Energy Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Energy Systems Department, Mechanical & Energy Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical and Energy Engineering Faculty, Abbaspour College of Technology, Shahid Beheshti University (SBU), East Vafadar Boulevard, Tehranpars, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 73932717
Fax: +98 (21) 77311280
s_majidi@sbu.ac.ir

Article History

Received: November 7, 2018

Accepted: May 4, 2019

ePublished: January 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Bubbles, drops, and particles [2] Investigation of transport phenomena in a vapour film formed in contact between hot metallic sphere and water [3] Modeling the growth of a vapor film formed in contact between a hot metal sphere and water in pressure vessels [4] An interface-capturing method for incompressible two-phase flows. Validation and application to bubble dynamics [5] The stability of vapor film immersed in superfluid helium on the surface of the hot ball [6] Simulating the rise characteristics of gas bubbles in liquids using CFD [7] A study of drift velocity in bubbly two-phase flow under microgravity conditions [8] Numerical simulation of gas bubbles behaviour using a three-dimensional volume of fluid method [9] Bubbles in viscous liquids: Shapes, wakes and velocities [10] Numerical simulation of bubble impact and movement alongside to the inclined plate with VOF method [11] Numerical simulation and investigation of bubble velocity and deformation in inclined channel with two consecutive slopes using VOF-PLIC method [12] Simulation of oblique coalescence of a pair of bubbles using Level Set method [13] A coupled volume-of-fluid/level-set method for simulation of two-phase flows on unstructured meshes [14] Two-dimensional bubble rising through quiescent and non-quiescent fluid: Influence on heat transfer and flow behavior [15] Numerical simulation of bubble rising behavior in liquid LBE using diffuse interface method [16] An extended volume of fluid method and its application to single bubbles rising in a viscoelastic liquid [17] Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution [18] Quantitative benchmark computations of two-dimensional bubble dynamics

بررسی رژیم شکلی صعود حباب هوای تزریق شده در ستون آب به روش عددی و آزمایشگاهی

علی جهانگیری PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سهند مجیدی PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خسرو روشندل MSc

گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

داریوش برزوئی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سید فرحان موسویان MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

میلاد ناجی رنجبر MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

شناخت تاریخچه تولید و دینامیک رشد یا محو حباب‌ها تحت شرایط محیطی مختلف نقش مهمی را در درک صحیح در فرآیند جوشش، تبخیر، کاویتاسیون و چگالش ایفا می‌کند. در این مقاله رژیم شکلی تصعید حباب هوا درون ستون آب مطالعه و با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده است. برای این منظور از یک ستون پر از آب در ابعاد آزمایشگاهی به عنوان سیال میزبان استفاده شده و با استفاده از روش عکس‌برداری پرسرعت، مهم‌ترین خواص هیدرودینامیکی حباب‌ها مانند سرعت، اندازه، مسیر حرکت و سایر خواص مربوط به حباب اندازه‌گیری شد. سپس به روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل دوفازی حجم سیال، صعود و تغییر شکل تزریق تک‌حباب در یک مخزن ساکن شبیه‌سازی شد و با نتایج عددی و تجربی پیشین و حاضر مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این اعتبارسنجی با تقریب خوبی منطبق بر نتایج مرجع بوده و صحت عملکرد حلگر مورد استفاده و تنظیمات آن را اثبات نموده است. در نهایت با محاسبه اعداد بی‌بعد اتووس و مورتن، رژیم شکلی حباب تعیین شده و با رژیم شکلی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی مقایسه شد. رژیم به دست آمده از نمودار کلیفت، رژیم کپسول کروی بوده که با رژیم شکلی حباب شبیه‌سازی شده به روش عددی و آزمایشگاهی در شرایط یکسان کاملاً انطباق دارد و این موضوع اعتبار حل عددی را اثبات می‌کند.

کلیدواژه‌ها: صعود حباب، رژیم شکلی، دیاگرام کلیفت، شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی و آزمایشگاهی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴

*نویسنده مسئول: s_majidi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

رژیم شکلی- حرکتی حباب‌ها در یک فاز پیوسته در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند فرآوری غذایی، تولید روغن‌های روان‌کننده، رنگ‌ها و فرآورده‌های دارویی و بهداشتی و کندانسورهای حبابی دارای اهمیت است. پدیده مشترکی که نقش مهمی را در تمام این

فرآیندها ایفا می‌کند، جریان دوفازی با سطح مشترک است. جریان‌های دوفازی با سطح مشترک به آن دسته از جریان‌ها گفته می‌شود که دو سیال در یک سطح مشترک با یکدیگر در تماس هستند، نظیر آنچه در تماس آب و روغن یا هوا و سوخت مایع در فرآیندهای احتراقی وجود دارد. مدل‌سازی سطح مشترک دو سیال به دلیل وجود نیروی کشش سطحی و ناپایداری‌های همراه با آن از پیچیدگی زیادی برخوردار است [1]. فرآیند تولید حباب را می‌توان نمونه‌ای از جریان‌های دوفازی با سطح مشترک دانست [2].

حباب‌ها در صنایع در اندازه‌ها و اشکال مختلفی تشکیل می‌شوند. اندازه اولیه این حباب‌ها تأثیر زیادی بر تغییر شکل آنها دارد؛ چرا که با کاهش سطح حباب، مقدار نیروی کشش سطحی موجود در سطح تماس دو فاز که بر سطح حباب موثر است، به دلیل افزایش انحنای سطح حباب افزایش یافته و مانع از دگرگونی آن در اثر تنش‌های وارده می‌شود. این پدیده در حباب‌های بزرگ‌تر ضعیف‌تر بوده و موجب تغییر شکل و حتی فروپاشی حباب می‌شود [3].

حرکت حباب در سیال ساکن در اثر نیروی شناوری آغاز می‌شود. با شروع حرکت و ایجاد سرعت نسبی (سرعت حباب نسبت به سیال محیط) و در اثر برخورد سیال محیط بر بدنه آن، یک نیروی درگ در مقابل حرکت، بر حباب وارد می‌شود که با بزرگ‌تر شدن حباب و افزایش سطح پیشانی آن در جهت عمود بر حرکت، این نیرو نیز افزایش می‌یابد. حرکت سیال محیط در اطراف حباب و تنش‌های حاصل از سیال بر بدنه آن، سبب القای جریان درون حباب می‌شود که مجموع این جریان‌های داخلی و خارجی و همچنین میزان اثر کشش سطحی روی سطح آن نحوه تغییرات شکل حباب را رقم می‌زند [4].

هنگامی که یک حباب در یک مایع ساکن در حال صعود است، رفتار حباب به خصوصیات فیزیکی مایع اطرافش وابسته است. اعداد بدون بعد، جهت بررسی رفتار حباب مفید بوده و می‌توان شناخت آنها را از پیش‌نیازهای مطالعه حباب دانست؛ چرا که با بررسی آنها می‌توان اطلاعات جامعی در مورد نحوه رفتار و رژیم شکلی حباب به دست آورد [5]. از مهم‌ترین اعداد بی‌بعد در زمینه بررسی شکل و دینامیک حباب می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) عدد رینولدز: مطابق رابطه ۱، یک عدد بدون بعد شناخته شده است و گویای نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز است.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

ب) عدد باند (اتوس): عددی بدون بعد است که مطابق رابطه ۲ بیانگر نسبت نیروی شناوری به نیروی کشش سطحی است.

$$Eo = Bo = \frac{\rho g d^2}{\sigma} \quad (2)$$

که σ ثابت کشش سطحی، ρ دانسیته سیال محیط و d قطر اولیه است.

ج) عدد مورتن: یک عدد بدون بعد است که در دینامیک سیالات، همراه با عدد باند برای توصیف شکل یک حباب با قطره در حال حرکت در یک سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عدد بیانگر نسبت نیروی لزجت به نیروی کشش سطحی است و رابطه آن به

خدا/ادی و همکاران حرکت حباب در کنار صفحه مایل را شبیه سازی نمودند. آنها تاثیر پارامترهایی مانند زاویه شیب، زاویه تماسی و اعداد بی بعد مورتون و باند را بر شکل حباب بررسی کرده و با تغییر زاویه شیب صفحه مایل سه رژیم لغزشی، پرشی و زیگزگی را مشاهده نمودند [10].

انصاری و همکاران تغییر شکل حباب هوا را در مایع ساکن و در شیب های مختلف بررسی کرده و آن را با استفاده از روش حجم سیال شبیه سازی نمودند. مشاهدات آنها حاکی از آن بود که در محل تغییر شیب، به دلیل حرکت مایع تحت نیروی گرانش، گردابه ای تشکیل می شود که این گردابه باعث تغییر شکل حباب می شود [11]. حدیدی و همکاران برهم کنش جفت حباب تحت نیروی شناوری را به صورت عددی و با استفاده از روش سطح تراز شبیه سازی نمودند. آنها برای بهبود روش سطح تراز، از معادلات بازسازی شده به همراه یک حلقه کنترل هندسی بقای جرم، استفاده نموده و نتایج حاصل از شبیه سازی خود را با نتایج تجربی مشابه مقایسه و مطابقت خوبی را گزارش نمودند [12].

بالکارا و همکاران جریان دوفازی حباب در شبکه ای ساختار نیافته را به وسیله کوپل کردن روش های حجم سیال و سطح تراز، شبیه سازی نمودند. آنها مدل عددی خود را با مدل های دوبعدی و سه بعدی حاصل از مطالعات قبلی، اعتبارسنجی کرده و مطابقت خوبی را گزارش نمودند [13].

اخیرا با توجه به پیشرفت شایان تکنیک های محاسباتی، مطالعه عددی مسئله صعود حباب در طیف وسیعی از کاربردها مورد مطالعه قرار گرفته است. لاریمی و رامیر [14] با استفاده از روش حجم سیال به مطالعه دوبعدی مسئله صعود حباب در محیط مایع ساکن و متحرک با کاربرد در راکتورهای هسته ای پرداخته اند. در پژوهش دیگری وانگ و کای [15] به شبیه سازی صعود حباب با کاربرد در راکتورهای هسته ای و به کمک روش شبکه بولتزمن پرداخته اند. نیتمار و همکاران [16] با تعمیم روش حجم سیال به بررسی فرآیند صعود حباب در مایع ویسکوالاستیک پرداخته اند.

در مقاله حاضر به شبیه سازی عددی حباب هوای در حال صعود در مخزنی از سیال ساکن به صورت سه بعدی پرداخته و نتایج حاصل از رژیم شکلی به دست آمده با نتایج آزمایش تجربی مقایسه می شود. همچنین نتایج حاصله با نتایج کیفیت نیز مقایسه شده است. اهمیت مطالعه حاضر، کاربرد آن در مدل های حرارتی دوفاز، مانند دی اریتور یا کندانسور تماس مستقیم و ضرورت هوازایی از چنین سیستم هایی است. همچنین شناخت خواص این پدیده می تواند مانع اثرات مخربی نظیر کاویتاسیون شود.

شرایط و هندسه مورد استفاده در این پژوهش از روی یک ستاپ آزمایشگاهی که شماتیک آن در شکل ۱ مشهود است، شبیه سازی شده است. این ستاپ به منظور مطالعه و بررسی صعود حباب هوا در مخزن پر از آب ساکن طراحی شده است.

مسئله صعود تک حباب ابتدا در کیس فوق مورد آزمایش قرار گرفته و تصاویری از رژیم شکلی حباب حین صعود به دست می آید. در

شرح ذیل است:

$$Mo = \frac{g\mu_c^4\Delta\rho}{\rho_c^2\sigma^3} \quad (3)$$

که در رابطه فوق g شتاب ثقل، μ_c ویسکوزیته سیال اطراف، ρ_c چگالی سیال اطراف، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی در فاز و σ ثابت کشش سطحی است.

به علت کاربردهای صنعتی و همچنین پیچیدگی مسئله مطالعه حباب، تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته است. در ابتدا به علت نبودن امکانات حل عددی، بررسی ها معمولاً به صورت تجربی صورت می گرفت؛ ولی با گسترش روش های عددی، تحقیقات بیشتر به این سمت جهت گیری نمودند. در سنوات گذشته تعداد زیادی از محققان از روش های مختلفی جهت شبیه سازی عددی حباب بهره جستند که در همه این روش ها سرعت محاسبات و قدرت روش عددی مورد استفاده در توصیف سطح مشترک، اهمیت ویژه ای دارد. از روش های مرسوم برای شبیه سازی عددی حباب می توان به روش حجم سیال (Volume of Fluid; VOF) و روش سطح تراز (Level set Method; LSM) اشاره نمود که در این حوزه مقالات با ارزشی تالیف شده که غالباً به بررسی رژیم شکلی حباب پرداخته اند.

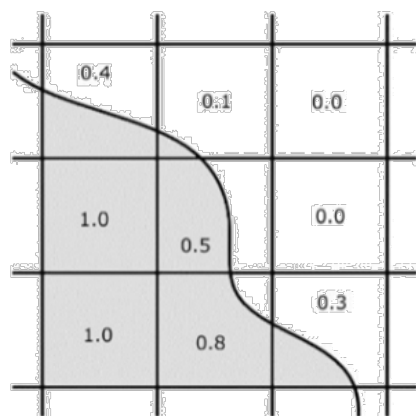
کلیفت و همکاران ضمن جمع آوری نتایج تجربی بسیاری از محققین (که صعود حباب هوا در آب را بررسی کرده بودند)، به بررسی نحوه تغییر رژیم شکلی حباب پرداخته و نتایج خود را در قالب نموداری برحسب اعداد بی بعد باند، مرتن و رینولدز، ارائه نمودند [1]. بنومتی و مگنات تحت تحقیق جامعی را بر حرکت حباب برای اعداد باند و اتوس و مورتون مختلف انجام دادند [4]. این نتایج برای مقایسه اولیه و همچنین بررسی شکل حباب برای اعداد بدون بعد بسیار مفید است.

کریشنا و ون بیتن ضمن مطالعه تجربی حرکت تک حباب در سیال ساکن و ثبت تغییرات شکل و نوع مسیر حرکت حباب، این پدیده را توسط دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و به صورت دوبعدی تحت الگوریتم حجم سیال، شبیه سازی نمودند و نتایج حاصل از شبیه سازی را به صورت کیفی (مقایسه شکل و مسیر حرکت) با نتایج آزمایش خود مقایسه کرده و تطابق خوبی را گزارش نمودند [6].

کلارک و رزکاله حرکت توده حباب را در شرایط میکروگراویتی جهت بررسی سرعت انحرافی به صورت دوبعدی توسط روش حجم سیال و مدل آشفتة $k - \epsilon$ و تابع دیواره استاندارد در کد تجاری FLUENT- R4.4 شبیه سازی نمودند. آنها صعود حباب در سیال ساکن را به صورت دوبعدی بررسی کرده و پس از مقایسه نتایج خود با نمودار کیفیت تطابق خوبی را گزارش نمودند [7].

آنالند و همکاران حرکت تک حباب و دو حباب را در سیال ساکن به صورت سه بعدی توسط الگوریتم حجم سیال شبیه سازی نمودند [8]. آنها برای اطمینان از صحت جواب، مدل خود را در معرض دو تست استاندارد اثر کشش سطحی و تست انتقال قرار دادند. باهاگا و ویر تغییرات شکل حباب را در طیف وسیعی از دامنه تغییرات اعداد بی بعد مطالعه کردند [9].

ادامه تصاویر به دست آمده از رژیم شکلی حباب با شبیه سازی عددی در شرایط فیزیکی یکسان مقایسه می شود.



شکل ۲) توزیع شمتائیک کسر حجمی در شبکه

در روش حجم سیال دوسیال غیرقابل امتزاج و غیرقابل تراکم به صورت یک سیال موثر در سراسر شبکه مدل می شود. خواص فیزیکی سیال موثر به صورت روابط ۷ و ۸ است که این روابط بر اساس مقدار کسر حجمی γ محاسبه می شوند.

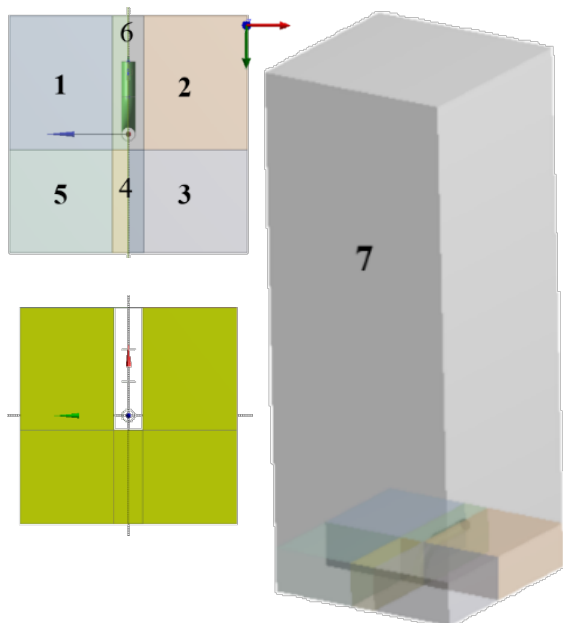
$$\rho = \rho_L \gamma + \rho_g (1 - \gamma) \quad (7)$$

$$\mu = \mu_L \gamma + \mu_g (1 - \gamma) \quad (8)$$

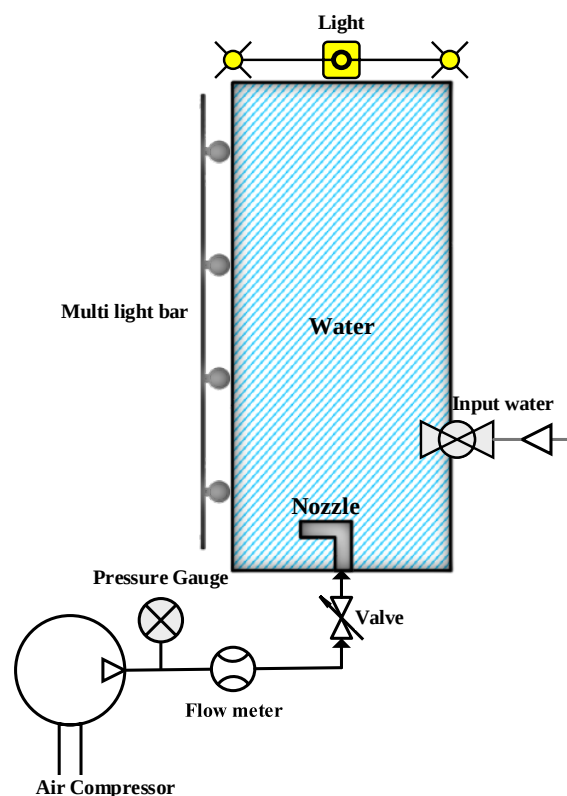
که در روابط فوق، ρ_L و ρ_g به ترتیب چگالی مایع و گاز و μ_L و μ_g معرف ویسکوزیته مایع و گاز است [17].

۳- هندسه مسئله

مطابق شکل ۳ هندسه مسئله از مکعب مستطیلی به ابعاد مقطع 40×40 و ارتفاع 120 سانتی متر تشکیل شده است. همان گونه که ذکر شد، مرجع شرایط شبیه سازی عددی، کیس آزمایش تجربی بوده و هندسه آن نیز مطابق کیس تجربی است.



شکل ۳) هندسه سه بعدی مسئله



شکل ۱) شمتائیک ستاپ آزمایشگاهی

۲- معادلات حاکم

از آنجایی که در مقاله حاضر از روش حجم سیال برای شبیه سازی حباب استفاده شده است، لازم است معادلات حاکم بر آن تشریح شود.

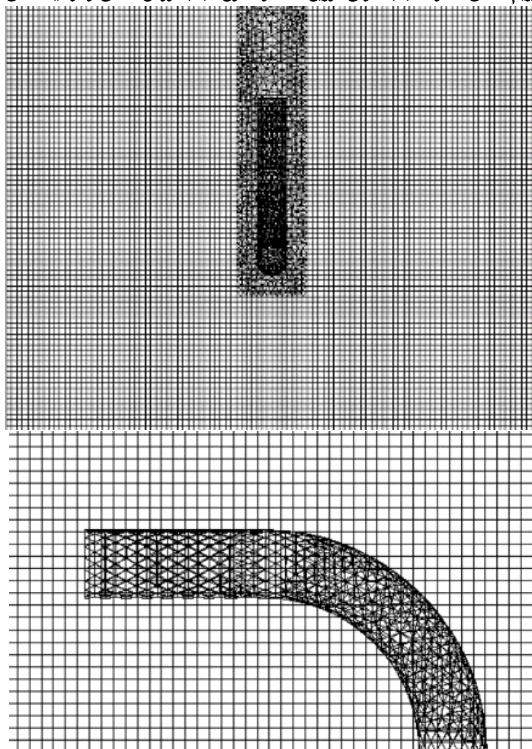
در این روش، معادله انتقال تابع نشانگر فاز γ ، نشان دهنده کسر حجمی فاز است و مطابق معادلات زیر به صورت هم زمان با معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، حل می شود [10].

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \gamma) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu [\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T]) = -\nabla p + F_b + F_\sigma \quad (6)$$

که در معادلات فوق، U بردار سرعت، γ کسر حجمی، ρ چگالی، p فشار، نیروی حجمی $F_b = \rho g$ و F_σ نیروی کشش سطحی است. لازم به ذکر است مقدار کسر حجمی γ در محدوده صفر و یک است به طوری که در حضور فاز گازی صفر و در فاز مایع یک است و مقدار آن برای سلول هایی که در سطح مشترک دوفاز واقع شده اند، بین صفر و یک است. لذا گرادینان کسر حجمی تنها در سطح مشترک تعریف شده است. در شکل ۲ توزیع شمتائیک کسر حجمی در شبکه ای فرضی مشاهده می شود.



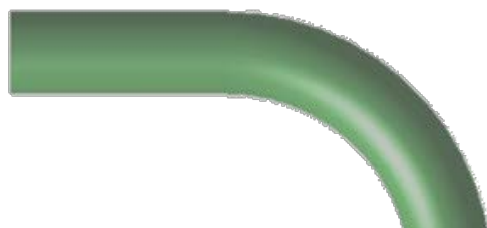
شکل ۵) نحوه شبکه بندی هندسه

استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، بایستی از تعداد سلولهای محاسباتی متفاوتی استفاده کرده و سلولها را در هر مرحله تا جایی ریز نمود که با ریزتر شدن سلولها، در سرعت و شکل نهایی حباب تغییرات محسوسی حاصل نشود. برای اثبات استقلال از شبکه در نمونه مورد استفاده در این آزمایش، مقایسه ای میان شبکه ریزتر و شبکه درشت تر انجام و نتایج ارائه می شود. در این مقایسه ابتدا باید شبکه ای ایجاد نمود که در آن، اضلاع موجود دارای تقسیماتی دو برابر تقسیمات شبکه اصلی باشد (تعداد المانها ۴ برابر) و در شبکه بندی ایجاد شده مسئله صعود تک حباب در مدت اثنایه و با شرایط مدل تزریق تک حباب حل و نمودار صعود مرکز جرم (در راستای عمودی) برحسب زمان رسم شود. سپس شبکه دیگری ایجاد شود که در آن اضلاع موجود دارای تقسیماتی نصف شبکه اصلی (تعداد المان ۲۵٪ برابر) بوده و بار دیگر مسئله در آن شبکه بندی ظرف مدت ۱ ثانیه حل و نمودار صعود مرکز جرم حباب برحسب زمان استخراج شود. نهایتاً نموداری با همین شرایط از شبکه بندی اصلی استخراج و هر سه نمودار در یک دستگاه مختصات رسم شود. در صورتی که هر سه نمودار با تقریب خوبی بر هم منطبق باشند، می توان استقلال حل از شبکه را اثبات نمود. در شکل ۶ مقایسه ای از حضور حباب در شبکه بندی های ذکر شده جهت اثبات استقلال از مش، مشاهده می شود.

نمودار حاصل از مرکز جرم حباب در شبکه بندی های ذکر شده، مطابق نمودار ۱ به دست می آید و با توجه به انطباق نسبی این سه نمودار، استقلال مسئله از شبکه، ملاحظه می شود.

نازل مورد استفاده در این مجموعه به صورت زانویی ۹۰ درجه منحرف شده و ساختاری L-شکل دارد. طول نازل ۱۵ سانتی متر و ارتفاع آن از کف مخزن ۷ سانتی متر و قطر مقطع آن ۲/۵۴ سانتی متر (معادل با ۱ اینچ) است. در انتهای نازل یک عدد شیر یک طرفه نصب شده تا از ورود آب به خط گاز جلوگیری کند. در شکل ۴ شمایی از نازل مورد استفاده در آزمایش تجربی و شبیه سازی عددی مشهود است.



شکل ۴) هندسه نازل

۴- تولید شبکه محاسباتی و استقلال از مش

برای شبکه بندی بهینه، هندسه مدل مطابق شکل ۳، به ۷ ناحیه متفاوت تقسیم شده است که از این میان، ۶ ناحیه (نواحی ۱ تا ۵ و ناحیه ۷) دارای شبکه بندی سازمان یافته و یک ناحیه که مربوط به اطراف نازل است (ناحیه ۶)، دارای شبکه بندی سازمان نیافته است. در جدول ۱ ابعاد هندسی نواحی و در جدول ۲ تعداد تقسیمات هر ناحیه، جهت ایجاد شبکه بندی مربوطه، آورده شده است. در شکل ۵ مقایسه ای از نواحی شبکه بندی شده سازمان یافته با ناحیه اطراف نازل (ناحیه ۶) که دارای شبکه بندی سازمان نیافته است، ارائه شده است. باتوجه به موارد ذکر شده تعداد المانهای شبکه بندی ۲۷۴۱۴۸۴ است و معیار کیفیت تعامد (Orthogonal Quality) آن ۰/۹۹۴۷ است.

جدول ۱) ابعاد هندسی مدل

نواحی شکل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
طول (cm)	۱۹/۵	۱۹/۵	۱۹/۵	۶	۱۹/۵	۶	۴۵
عرض (cm)	۲۵/۵	۲۵/۵	۱۹/۵	۱۹/۵	۱۹/۵	۲۵/۵	۴۵
ارتفاع (cm)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۱۰

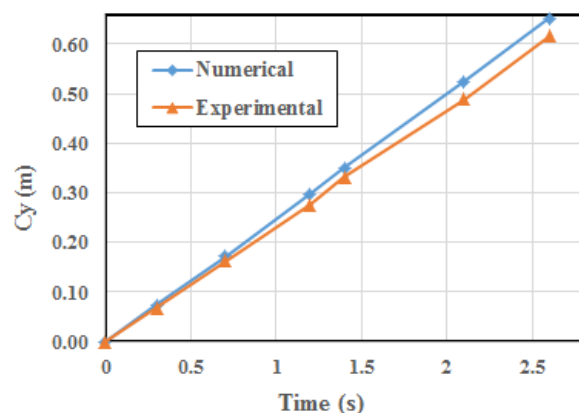
جدول ۲) تعداد تقسیمات هندسه مدل

نواحی شکل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
طول (تعداد)	۴۳	۴۳	۴۳	۱۴	۴۳	۱۴	۱۰۰
عرض (تعداد)	۵۷	۵۷	۴۳	۵۷	۴۳	۵۷	۱۰۰
ارتفاع (تعداد)	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۴۴

سطحی، لزجت و شتاب گرانش. پارامترهای فوق را می‌توان به اعداد بی‌بعد رینولدز و اتوس خلاصه نمود.

در اولین گام از اعتبارسنجی حل عددی، نمودار تغییرات ارتفاع صعود مرکز جرم حباب در طول زمان که به روش عددی تولید شده است با نتایج تجربی ارائه شده در همین پژوهش مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در نمودار ۲ نشان داده شده است و می‌توان دید که تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج تجربی برقرار است. در ادامه به بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار در شبیه‌سازی دیگر مطالعات تجربی پرداخته می‌شود. مطالعه تجربی کلیفت، از شناخته شده‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه صعود حباب است. حاصل این تحقیق در قالب نمودار معروف شکل حباب که تابعی از اعداد رینولدز و اتوس است، ارائه شده است و این معیار به عنوان یک معیار مقایسه و اعتبارسنجی کیفی نتایج عددی پذیرفته شده است. در این مقاله نیز جهت اعتبارسنجی، شکل نهایی حباب به دست آمده از نتایج عددی با مشاهدات تجربی کلیفت، مقایسه می‌شود.

علاوه بر این، استفاده از مطالعه عددی پارامتری هایسینگ و همکاران [18] به عنوان یک پایه در مقایسه کمی متغیرهایی مانند ارتفاع صعود حباب، سرعت صعود و میزان دایره‌ای بودن حباب، متداول است. در این تحقیق میزان صعود حباب با نتایج عددی هایسینگ و همکاران نیز مقایسه می‌شود.

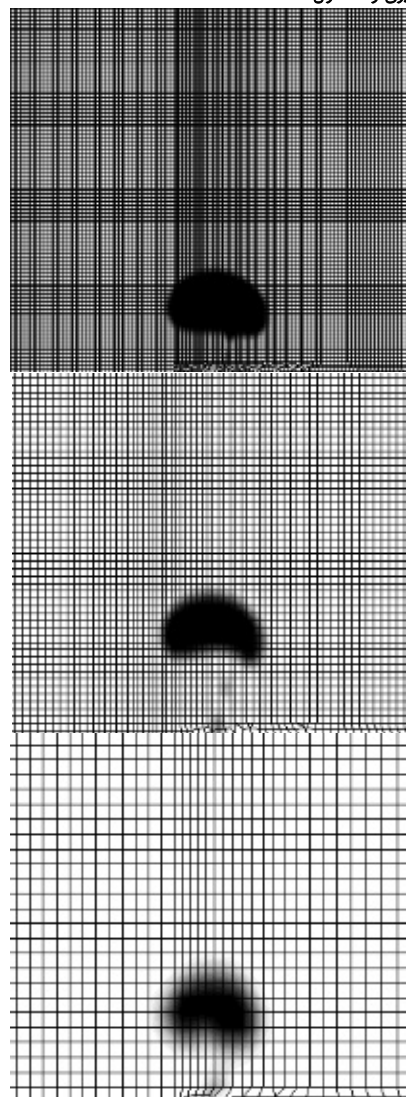


نمودار ۲) ارتفاع صعود مرکز جرم حباب در طول زمان به روش عددی و آزمایشگاهی

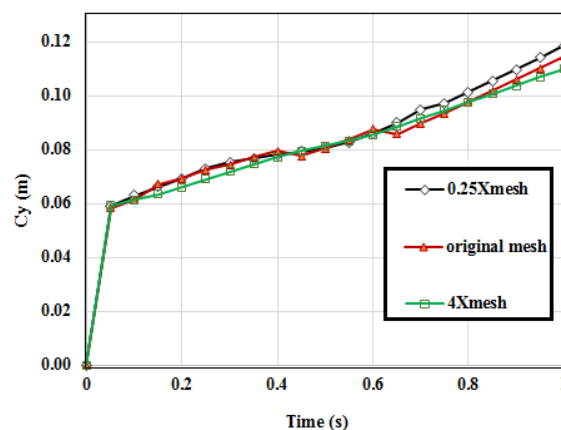
معرفی صورت مسئله اعتبارسنجی

حبابی دارای شکل دایره‌ای با شعاع ۰/۲۵ متر که مرکز آن در مختصات (۰/۵، ۰/۵) است، در یک دامنه مستطیلی به ابعاد ۴×۱ واقع است. در مرزهای چپ و راست، شرط مرزی دیوار بدون لغزش حاکم بوده و مرزهای بالا و پایین به صورت دیوار بدون تنش در نظر گرفته شده است. دامنه محاسباتی با مش پایه ۳۶×۹۰ به صورت یکنواخت به همراه دو سطح مش تطبیقی گسسته شده است.

پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مورد شبیه‌سازی انجام شده از این مسئله در جدول ۳ آمده است. این پارامترها دقیقاً برابر



شکل ۶) شبکه‌های مورد استفاده در استقلال از مش

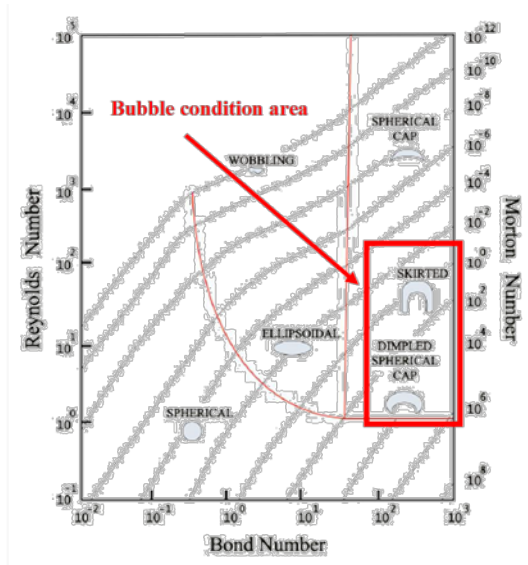


نمودار ۱) نمودار اثبات استقلال حل از شبکه

۵- اعتبارسنجی

جهت بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار ANSYS FLUENT و تنظیمات آن از مسئله معروف صعود حباب گازی محصور در فاز مایع استفاده شده است. پارامترهای موثر عبارت‌اند از: ضریب کشش

بررسی رژیم شکلی صعود حباب هوای تزریق شده در ستون آب به روش عددی و آزمایشگاهی ۱۰۳ به دست آمده از حل عددی، رژیم بیضوی فرورفته دارند و انطباق خوبی میان نتایج و ناحیه به دست آمده از نمودار ملاحظه می شود و می تواند عملکرد صحیح حلگر را ضمانت کند.

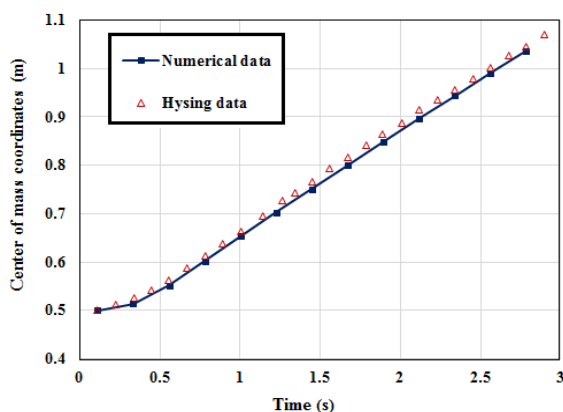


شکل ۸) مشخص کردن شرایط مسئله روی دیاگرام کیفیت

اعتبارسنجی با نتایج هایسینگ

برای مقایسه نتایج حاصل از حل عددی نمونه اعتبارسنجی با نتایج عددی هایسینگ و همکاران، لازم است نمودار صعود مرکز جرم حباب در طول زمان رسم و با نمودار هایسینگ [18] در یک دستگاه مختصات، مطابق شکل ۷، مقایسه شود (نمودار ۳).

همان گونه که در نمودار ۳ مشخص است، مطابقت خوبی میان مدل عددی و نتایج هایسینگ ملاحظه می شود که می تواند گواهی مجدد بر صحت عملکرد حلگر مورد استفاده باشد. در انتها لازم به ذکر است اگرچه در این بخش صحت عملکرد حلگر مورد استفاده به وضوح ثابت شد ولی برای بررسی صحت داده های حاصل از مدل سازی عددی، لازم است تا این داده ها با نتایج حاصل از آزمایش تجربی در همان شرایط مقایسه شوند که در بخش بعدی به آن پرداخته می شود.



نمودار ۳) مقایسه داده های مدل سازی عددی با نتایج هایسینگ

پارامترهای موجود در مطالعه عددی هایسینگ و همکاران بوده و اندیس ۱ و ۲ در این جدول، به ترتیب مربوط به فاز مایع و فاز گازی می باشند.

جدول ۳) پارامترهای مطالعه هایسینگ و همکاران [18]

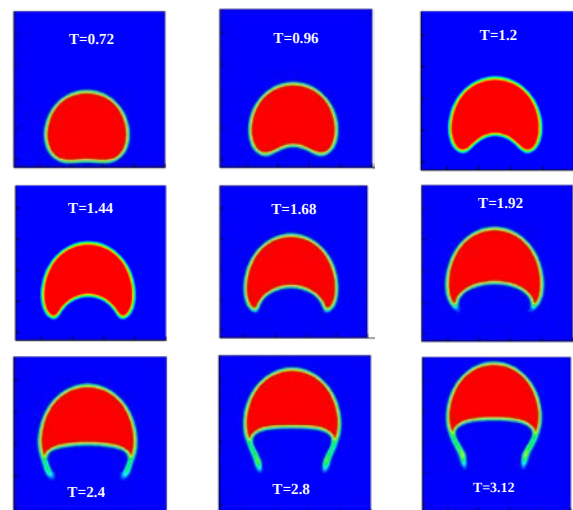
ρ_1	ρ_2	μ_1	μ_2	g	σ	Re	Eo
۱۰۰۰	۱	۱۰	۰/۱	۰/۹۸	۱/۹۶	۳۰	۱۲۵

جزئیات مدل اعتبارسنجی

دامنه تزریق در این مسئله یک ظرف مستطیل شکل به طول ۴ و عرض ۱ متر است. شبکه بندی این مخزن به صورت دو بعدی، انجام گرفته است. به گونه ای که طول آن به ۳۶۰ و عرض آن به ۹۰ قسمت، تقسیم شده است. تعداد المان های شبکه نیز در این نمونه برابر ۳۲/۴۰۰ است.

اعتبارسنجی با نمودار کیفیت

پس از حل مسئله با توجه به شرایط جدول ۲، رژیم شکلی حباب در حین صعود مطابق شکل ۷ به دست آمده است. از آنجایی که در این مسئله تاثیر کشش سطحی در شکل دهی به سطح مشترک دو فاز ناچیز است و عدد اتوس نسبتاً زیاد است، پیش بینی می شود که حباب نهایتاً به شکل محدب درمی آید که دو بخش کوچک از آن در حال جداشدن هستند. این شکل از حباب با توجه به نمودار گریس قابل انتظار است زیرا اعداد بی بعد در مورد شرایط این مسئله بین دو رژیم بیضوی فرورفته و دامنه ای است.



شکل ۷) تغییر شکل حباب در مسئله اعتبارسنجی

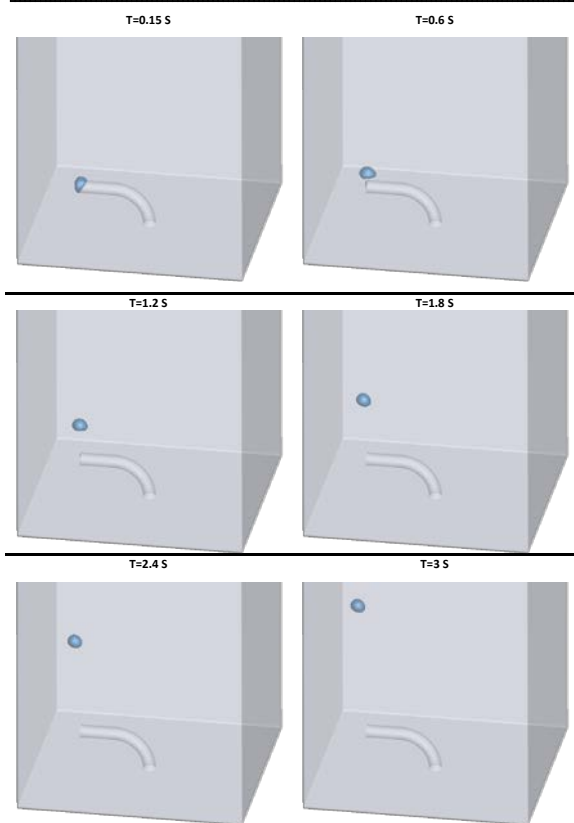
حال با توجه به اینکه در شرایط آزمایش عدد اتوس و رینولدز به ترتیب برابر ۱۲۵ و ۳۵ هستند (جدول ۲)، می توان محدوده آنها را در نمودار گریس، مشخص نمود. در این نمودار محور افقی عدد اتوس یا باند و محور عمودی عدد رینولدز بوده و ناحیه مربوط به شرایط مسئله مطابق شکل ۸ با مستطیل مشخص شده است.

با مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی (شکل ۷) و مقایسه آن با ناحیه به دست آمده در شکل ۸ مشاهده می شود که شکل های

۷- شرایط حاکم بر شبیه‌سازی عددی

شرایط فیزیکی حاکم بر مدل سه‌بعدی تزریق تک‌حباب، عبارت است از دبی ورودی ۲ لیتر بر دقیقه، معادل با ۴/۰۰۰۰ کیلوگرم بر ثانیه که در مدت ۲/۰ ثانیه و مطابق نمودار ۴ تزریق می‌شود. لازم به ذکر است شبیه‌سازی صعود تک‌حباب در مدت ۳ ثانیه انجام می‌شود.

از آنجایی که حل مسئله جریان دوفازی مطرح‌شده با مدل VOF منظور است، در محیط حلگر، مدل Multiphase VOF انتخاب شده است. همچنین جهت بهتر مشخص‌شدن مرز میان حباب گازی و سیال محیط از Interfacial Anti-Diffusion استفاده شده است. از آنجایی که در این مسئله نیروی جاذبه و نیروی کشش سطحی موثر است، برای دقیق‌تر شدن نتیجه شبیه‌سازی در تنظیمات VOF از Implicit Body Force استفاده شده است. برای لحاظ‌نمودن تاثیر تلاطم جریان نیز از مدل تلاطم $k - \epsilon$ استفاده شده است. در قسمت فازها مقدار کشش سطحی ۰/۰۷۲۸ (کشش سطحی میان آب و هوا) فرض شده است.



شکل ۹) نحوه صعود حباب در مخزن



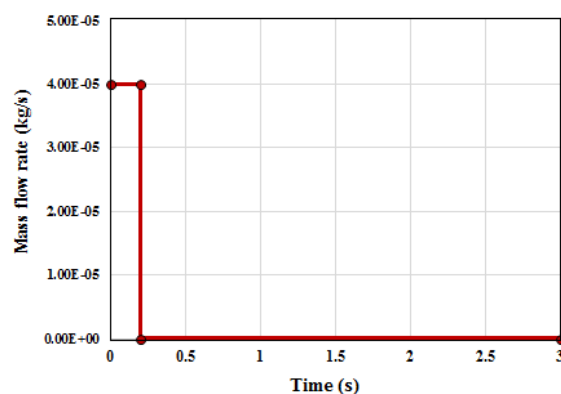
Shape of numerical simulation



spherical cap regime

شکل ۱۰) مقایسه شکل حباب به‌دست‌آمده با رژیم کپسول کروی

با در نظر گرفتن رژیم شکلی به‌دست‌آمده، شایسته است که نتایج شبیه‌سازی عددی با تصاویر به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی، مقایسه شود. بدین منظور شرایطی مطابق مدل‌سازی عددی ایجاد و تک‌حباب در مخزن آزمایشگاهی، تزریق و تصاویر به‌دست‌آمده مطابق شکل ۱۱ با نتایج عددی مقایسه می‌شود. از آنجایی که روند صعود تک‌حباب تقریباً سیر ثابتی دارد، به مقایسه ۴ تصویر کلی در زمان‌های متفاوت اکتفا می‌شود. جهت ایجاد وضوح کامل در تصاویر مدل آزمایشگاهی، یک کد تفکیک طیف رنگ در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است و کیفیت تصاویر مدل تجربی مطابق شکل ۱۱، بهینه و قابل تشخیص شده است.



نمودار ۴) نمودار تزریق دبی جرمی

۸- مقایسه نتایج عددی و تجربی

پس از اعمال شرایط، در شکل ۹، نمودار ایزوسورفیس‌های فازی با مقدار ۵/۰ مشهود است. سطوح تراز فازی با مقدار ۵/۰، مکان هندسی نقاطی از فضا هستند که در زمان واحد مقدار فاز (کسر حجمی) آنها ۵/۰ است و برای تجسم شکل کلی حباب به‌کار می‌روند. جهت اعتبارسنجی رژیم شکلی به‌دست‌آمده، لازم است تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نمودار کلیت مقایسه شود. برای به‌دست‌آوردن رژیم شکلی از نمودار گریس لازم است تا اعداد بی‌بعد رینولدز و باند محاسبه شود. مقدار محاسبه‌شده برای این اعداد به ترتیب برابر ۱۲۶۱۸ و ۸۷ است. با مراجعه به نمودار کلیت رژیم، کپسول کروی برای حبابی با اعداد بی‌بعد ذکر شده به‌دست می‌آید. در شکل ۱۰، مقایسه‌ای میان رژیم شکلی عددی و شکل حباب کپسول کروی (ارائه‌شده توسط کلیت) به‌صورت نزدیک انجام گرفته است.

بنا به شکل ۱۰، مطابقت خوبی میان دو رژیم شکلی ارائه‌شده، ملاحظه می‌شود که این موضوع صحت عملکرد رژیم به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی را تایید می‌کند.

۹- جمع‌بندی

در این پژوهش، ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی تجربی و عددی با دو مسئله معروف *کلیفت* و *هایسینگ* راستی‌آزمایی شد که نشان از صحت نتایج این پژوهش داشت. همچنین رژیم شکلی صعود حباب در مدل آزمایشگاهی با استفاده از یک کد تفکیک طیف رنگ در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و بین رژیم شکلی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از مشاهدات تجربی تطابق خوبی مشاهده شد. بنابراین با استفاده از مدل عددی و تجربی حاضر می‌توان به شبیه‌سازی رفتارهای جریان‌های دو فاز بین حباب تزریق‌شده هوا به درون آب پرداخت. این موضوع در صنایع وابسته جهت پیش‌بینی وضعیت صعود حباب درون سیستم‌هایی مانند دی‌اریتور و کندانسور تماس مستقیم اهمیت بسزایی خواهد داشت.

فهرست علائم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
E_o	عدد اتوس-باند
Mo	عدد مورتن
Re	عدد رینولدز
U	سرعت (ms^{-1})
F	نیرو (N)
علائم یونانی	
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
γ	کسر حجمی
σ	کشش سطحی (Nm^{-2})
زیرنویس‌ها	
L	مربوط به فاز مایع
g	مربوط به فاز گازی

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از همکاران و خدمات پژوهشگرده جریان و انتقال حرارت چند فازی دانشگاه شهید بهشتی تقدیر و تشکر نمایند. ضمناً در تهیه این مقاله از خدمات سامانه رایانش موازی دانشگاه شهید بهشتی (سرمد) استفاده شده است.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

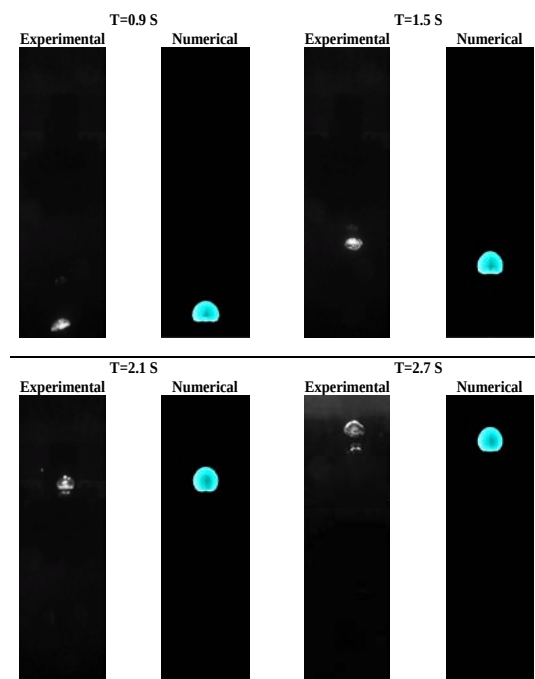
سهم نویسندگان: علی جهانگیری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۱۷٪)؛ سهند مجیدی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۱۷٪)؛ خسرو روشندل (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۱۷٪)؛ داریوش برزویی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۱۷٪)؛ سیدفرحان موسویان (نویسنده پنجم)، پژوهشگر کمکی (۱۷٪)؛ میلاد ناجی‌رنجبر (نویسنده ششم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

منابع مالی: هزینه پژوهش از محل اعتبار ویژه پژوهش تأمین شده است.

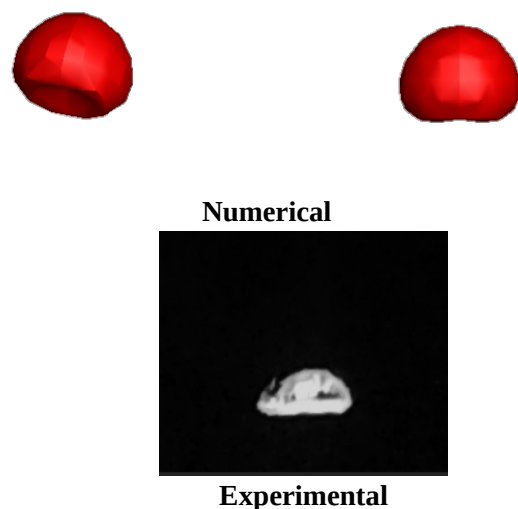
مطابق روند شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، رژیم شکلی حباب با شرایط ذکرشده در حین صعود ثابت بوده و حباب شکل کپسول کروی خود را در حین صعود حفظ می‌کند.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر موضوع در شکل ۱۲، مقایسه‌ای میان رژیم شکلی عددی به‌دست‌آمده و شکل حباب تجربی به‌صورت نزدیک انجام گرفته‌است.

با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده در شکل ۱۰ و شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت رژیم به‌دست‌آمده از نمودار کلیفت (رژیم کپسول کروی) با رژیم شکلی حباب شبیه‌سازی‌شده و رژیم شکلی حباب آزمایشگاهی در شرایط یکسان، کاملاً انطباق دارد و این موضوع اعتبار حل عددی را اثبات می‌کند.



شکل ۱۱) مقایسه صعود حباب عددی با آزمایشگاهی



شکل ۱۲) مقایسه بین شکل حباب آزمایشگاهی با شکل حباب عددی

- Ansari MR. Numerical simulation of bubble impact and movement alongside to the inclined plate with VOF method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(10):329-340. [Persian]
- 11- Ansari MR, Salimi E, Habibpour B, Adibi P. Numerical simulation and investigation of bubble velocity and deformation in inclined channel with two consecutive slopes using VOF-PLIC method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(11):29-36. [Persian]
- 12- Hadidi A, Nimvari ME, Ansari M. Simulation of oblique coalescence of a pair of bubbles using Level Set method. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(2):331-341. [Persian]
- 13- Balcázar N, Lehmkuhl O, Jofre L, Rigola J, Oliva A. A coupled volume-of-fluid/level-set method for simulation of two-phase flows on unstructured meshes. *Computers & Fluids*. 2016;124:12-29.
- 14- Larimi MM, Ramiar A. Two-dimensional bubble rising through quiescent and non-quiescent fluid: Influence on heat transfer and flow behavior. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;131:58-71.
- 15- Wang Ch, Cai J. Numerical simulation of bubble rising behavior in liquid LBE using diffuse interface method. *Nuclear Engineering and Design*. 2018;340:219-228.
- 16- Niethammer M, Brenn G, Marschall H, Bothe D. An extended volume of fluid method and its application to single bubbles rising in a viscoelastic liquid. *Journal of Computational Physics*. 2019;387:326-355.
- 17- Berberović E, Van Hinsberg NP, Jakirlić S, Roisman IV, Tropea C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E*. 2009;79(3):036306.
- 18- Hysing S, Turek S, Kuzmin D, Parolini N, Burman E, Ganesan S, et al. Quantitative benchmark computations of two-dimensional bubble dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2009;60(11):1259-1288.
- 1- Clift R, Grace JR, Weber ME. Bubbles, drops, and particles. Chelmsford: Courier Corporation; 2005.
- 2- Jahangiri A, Biglari M. Investigation of transport phenomena in a vapour film formed in contact between hot metallic sphere and water. *Journal of Mechanics*. 2014;30(4):423-433.
- 3- Jahangiri A. Modeling the growth of a vapor film formed in contact between a hot metal sphere and water in pressure vessels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2019;233(2):184-194.
- 4- Bonometti T, Magnaudet J. An interface-capturing method for incompressible two-phase flows. Validation and application to bubble dynamics. *International Journal of Multiphase Flow*. 2007;33(2):109-133.
- 5- Jahangiri A, Biglari M. The stability of vapor film immersed in superfluid helium on the surface of the hot ball. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2016;230(6):433-439.
- 6- Krishna R, Van Baten JM. Simulating the rise characteristics of gas bubbles in liquids using CFD. *Chemical Engineering & Technology*. 2001;24(4):427-430.
- 7- Clarke NN, Rezkallah KS. A study of drift velocity in bubbly two-phase flow under microgravity conditions. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001;27(9):1533-1554.
- 8- Van Sint Annaland M, Deen NG, Kuipers JAM. Numerical simulation of gas bubbles behaviour using a three-dimensional volume of fluid method. *Chemical Engineering Science*. 2005;60(11):2999-3011.
- 9- Bhaga D, Weber ME. Bubbles in viscous liquids: Shapes, wakes and velocities. *Journal of Fluid Mechanics*. 1981;105:61-85.
- 10- Khodadadi S, Sam Khaniani N, Gorji M, Domiri Ganji D,