



شبیه‌سازی عددی و بررسی سرعت و تغییر شکل حباب در کanal شیبدار با دو شیب متواالی به روش VOF-PLIC

محمد رضا انصاری^{۱*}، ابراهیم سلیمی^۲، بابک حبیب پور^۲، پویان ادبی^۳

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 ۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 *هران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳ mra_1330@modares.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، سرعت و تغییر شکل حباب هوا در مایع ساکن در شبیه‌سازی مختلف و متواالی ۵ تا ۹۰ درجه نسبت به افق بررسی شده است. به این منظور، جریان دوفازی آب-هوا با استفاده از روش جرم سیال شبیه‌سازی عددی شده است. برای ریدایی سطح مفترک دوفاز از روش بازسازی سطح مفترک تکمای خطی استفاده شده است. نیروی کشش سطحی با مدل نیروی سطحی پیوسته مدل سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بیشینه سرعت حباب در زاویه ۴۵ درجه می‌باشد که با نتایج محققان پیشین تطابق دارد. در ادامه، حرکت حباب در دو شیب متواالی در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. در محل تغییر شیب، بدليل حرکت مایع تحت نیروی گرانش، یک گردابه تشکیل می‌شود. این گردابه باعث تغییر شکل و سرعت حباب می‌شود. گردابه در تغییر شیب کم به زیاد، موجب بخشد نوک حباب و کاهش سرعت آن شده و در تغییر شیب زیاد به کم، موجب تیز شدن نوک حباب و افزایش سرعت آن می‌شود. بیشینه سرعت متوسط حرکت حباب در دو شیب متواالی با شیب اول ۶۰ و شیب دوم ۳۰ درجه به دست آمد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل	1392
دریافت: ۲۲ دی ۱۳۹۲	پذیرش: ۲۷ بهمن ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۰۶ مهر ۱۳۹۳	
کلید واژگان:	
شبیه‌سازی عددی	
حباب	
کanal شیبدار	
روش جرم سیال	

Numerical simulation and investigation of bubble velocity and deformation in inclined channel with two consecutive slopes using VOF-PLIC method

Mohammad Reza Ansari*, Ebrahim Salimi, Babak Habib pour, Pouyan Adibi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*P.O.B. 14115-143 Tehran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 12 January 2014
 Accepted 16 February 2014
 Available Online 28 September 2014

Keywords:
 Numerical Simulation
 Bubble
 Inclined Channel
 VOF Method

ABSTRACT

In the present article, velocity and deformation of an air bubble have been considered in quiescent liquid at different consecutive slopes from 5 to 90 degrees in respect to horizontal condition. To establish these purposes, air-water two-phase flow has been simulated numerically by using volume of fluid method. The two-phase flow interface has been traced by using Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) method. Surface tension force was estimated by Continuum Surface Force (CSF) model. The simulation results show that maximum bubble velocity occurred at 45 degrees which is in agreement with the previous researchers result. Simulation of bubble movement was also continued to two consecutive slopes at different angles. At slope deviation location, a vortex was generated due to liquid movement governed by gravity forces. This vortex changes the bubble velocity as well as bubble shape. This vortex also reduces the bubble velocity and changes the bubble nose shape from sharp to flatten at deviation from low to high slope values. However, at deviations from high to low slope values, the bubble nose becomes more sharpened in addition to bubble velocity increase. The maximum average velocity of bubble movement at two consecutive slopes was obtained during the condition that the first and second slopes were set to 60 and 30 degrees, respectively.

همجون افزایش بازیافت نفت^۱، راکتورهای قطره‌ای بستر^۲، ساختارهای یکپارچه^۳، کاربردهای پزشکی و میکروسیستم‌های حنک‌کننده الکترونیکی

- مقدمه

جریان صعود حباب در کanal پر شده از مایع کاربردهای وسیعی در صنایعی

1- Enhanced oil recovery
 2- Trickle-bed reactors
 3- Monolithic structures

Please cite this article using:

M. R. Ansari, E. Salimi, B. Habibpour, P. Adibi, Numerical simulation and investigation of bubble velocity and deformation in inclined channel with two consecutive slopes using VOF-PLIC method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 29-36, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

حباب‌ها به صورت عددی با روش لتبیس-بولتزمن⁶ سرعت بیشینه حباب را در شیب 45 درجه گزارش کردند که با نتیجه زوکوسکی مطابقت دارد. با توجه به تحقیقات پیشین روی دینامیک حباب دیده می‌شود که تمرکز بیشتر بر مدل‌سازی جریان حباب در لوله‌های تک شیب بوده است. در اکثر نتایج، زاویه 45 درجه به عنوان زاویه بحرانی به دست آمده است. از آنجا که در خطوط لوله صنعتی، شیب‌های متوازنی در مسیرهای فرآیندی وجود دارد، لذا در تحقیق حاضر، جریان حباب در دو شیب متوازن مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، کد حلگر معادلات ناپیر-استوکس و روش حجم سیال به زبان فرترن نوشته شده است. جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی، ابتدا سرعت حد حباب در شیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و زاویه بحرانی تعیین شده است. سپس کد برای شبیه‌سازی در دو شیب متوازن توسعه داده شده است.

2- شبیه‌سازی عددی

2-1- معادلات حاکم

در کار حاضر، از روش حجم سیال⁷ برای شبیه‌سازی جریان دوفازی حرکت حباب در مایع استفاده شده است. در این روش علاوه بر حل معادلات پیوستگی و مومنتوم، یک معادله جابه‌جاوی برای کسر حجمی فاز مایع در هر سلول محاسباتی حل می‌شود. معادلات مورد استفاده برای جریان تراکم ناپذیر لزج به صورت روابط زیر است [13]:

$$\text{معادله پیوستگی طبق رابطه (1):} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\text{معادله مومنتوم طبق رابطه (2):} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F_s + F_g \quad (2)$$

$$\text{معادله جابه‌جاوی کسر حجمی فاز مایع طبق رابطه (3):} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (CV) = 0 \quad (3)$$

$$\text{چگالی دوفاز طبق رابطه (4):} \quad (4)$$

$$\rho = C\rho_f + (1-C)\rho_g \quad (4)$$

$$\text{لزجت دوفاز طبق رابطه (5):} \quad (5)$$

$$\mu = C\mu_f + (1-C)\mu_g \quad (5)$$

کسر حجمی است که یک پارامتر اسکالر می‌باشد و مقدار بین 0 تا 1 را به خود اختصاص می‌دهد. سلول‌هایی با مقدار $C < 1$ سطح مشترک مایع و گاز را تشکیل می‌دهد. چگالی و لزجت برای معادله مومنتوم به ترتیب از روابط (4) و (5) بدست می‌آید.

نیروی کشش سطحی F_s در معادله مومنتوم با استفاده از مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF)⁸ محاسبه می‌شود (رابطه 6). n و κ به ترتیب بردار نرمال سطح مشترک و انحنای سطح مشترک در هر سلول است (روابط 7 و 8). [14]

$$F_s = \sigma \kappa(x) n \quad (6)$$

$$n = \frac{\nabla C}{|\nabla C|} \quad (7)$$

$$\kappa(x) = \frac{1}{|n|} \left[\left(\frac{n}{|n|} \cdot \nabla \right) |n| - (\nabla \cdot n) \right] \quad (8)$$

6- Lattice Boltzmann method

7- Volume Of Fluid (VOF)

8- Continuum Surface Force (CSF)

دارد [1]. در ک مناسب از فیزیک صعود حباب ضروری است، به عنوان مثال حرکت حباب بر انتقال حرارت در فرآیندهای جوشش و افت ولتاژ در کاربردهای الکترولیتی تاثیر گذار است [2]. وجود و حرکت حباب در سیال مایع با توجه به نقش آن در اختلاط مایع به سبب حرکت حباب و گردابه ناشی از آن و همچنین نقش آن در انتقال حرارت داخل تجهیزات صنعتی حائز اهمیت است. روشن است که حرکت حباب در مایعات در جهت‌های غیرعمودی می‌تواند بر عملیات در انواع فرآیندها تاثیرگذار باشد. جهت طراحی مناسب تجهیزات در فرآیندها، نیاز به تعیین ویژگی‌های حرکت حباب در کانال شیب دار می‌باشد [3].

بررسی حرکت حباب در لوله و کانال شیب دار از دهه 1960 میلادی مورد تحقیق قرار گرفت. وايت و بدمور [4] در سال 1962 سرعت حرکت تک حباب هوا استوانه‌ای¹ را در سیالات گوناگونی در لوله با قطر 0/500 تا 3/87 سانتی‌متر مورد مطالعه قرار دادند. ایشان شیب کانال را یک پارامتر موثر بر سرعت حد حباب معرفی کردند. ایشان با بررسی اثر شیب در سرعت حد حباب برای شیب 0 تا 20 درجه نسبت به عمود دریافتند که با تغییر شیب از 0 تا 20 درجه نسبت به عمود، سرعت حد حباب افزایش می‌یابد.

اولین بررسی جامع از حرکت حباب در لوله‌های مایل توسط رانگ و والیس [5] در دامنه وسیعی از سیالات انجام شد. نتیجه این تحقیق معرفی زاویه 45 درجه به عنوان زاویه بحرانی سرعت حباب بود. زوکوسکی [6] با مطالعه رفتار حباب در داخل استون² و آب در لوله‌های شیب دار با قطر مختلف نشان داد که با افزایش شیب لوله از صفر تا 45 درجه، سرعت حباب افزایش می‌یابد و در ادامه با افزایش زاویه از 45 تا 90 درجه، سرعت حباب کاهش می‌یابد. در واقع زاویه 45 درجه یک زاویه بحرانی برای ایجاد بیشینه سرعت حباب می‌باشد. اسپدینگ و نگوین [7] با مطالعه تجربی صعود حباب در لوله با حجم‌های مختلف حباب، زاویه 35 درجه را زاویه بحرانی معرفی کردند. بنديکسن [8] با مطالعه تجربی حرکت حباب‌های طویل در جریان مایع ساکن، زاویه بحرانی را در محدوده 30 الی 45 درجه نسبت به افق به دست آورد. حسن و کبیر [9] با بررسی جریان دوفازی گاز و نفت به صورت تجربی و مدل تحلیلی، سرعت بحرانی حباب‌های تیلور³ را در زاویه حدود 50 درجه بدست آوردند. مکسورثی [10] حرکت حباب در زیر صفحه شیب دار را در رینولدزهای بالا مورد مطالعه قرار داد که نتایج آزمایشات او با نتایج زوکوسکی تطابق خوبی داشت. وی بیشینه سرعت حباب را در زاویه 50 درجه نسبت به افق گزارش داد. آلوز و همکاران [11] به صورت تجربی و تحلیلی سرعت حباب‌های کشیده شده⁵ در لوله را مطالعه کردند. نتایج تجربی آن‌ها با نتایج زوکوسکی و بنديکسن مطابقت داشت.

رادمن و همکاران [2] به صورت عددی با روش حجم سیال، جریان آب و هوای دشیب‌های 2 و 4 درجه نسبت به افق و ارتفاع مقطع کانال 12، 30 و 48 میلی‌متر بررسی کردند. ایشان نشان دادند که سرعت و شکل حباب به اندازه حباب و ارتفاع مقطع کانال بهشت وابسته است. همچنین سرعت و شکل حباب به زاویه شیب، ضرابب لزجت و کشش سطحی وابستگی کمتری دارد. کوک و بهنیا [12] به صورت تجربی و عددی، حرکت حباب‌ها در مایعات آب و اتیلن را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نیز زاویه 45 درجه را زاویه بحرانی به دست آوردند که منطبق بر نتایج زوکوسکی بود. آمایابور و لی [1] با بررسی

1- Single cylindrical air bubble

2- Acetone

3- Long bubbles

4- Taylor bubbles

5- Elongated bubbles

اگر $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4}$ باشد:
 برای وقتی که $0 \leq C \leq \frac{1}{2} \tan \alpha$ است، حالت اول انتخاب شود.
 برای وقتی که $\frac{1}{2} \tan \alpha \leq C \leq 1 - \frac{1}{2} \tan \alpha$ است، حالت دوم انتخاب شود.

برای وقتی که $1 - \frac{1}{2} \tan \alpha \leq C \leq 1$ است، حالت چهارم انتخاب شود.

و در غیر این صورت اگر $\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ باشد:

برای وقتی که $0 \leq C \leq \frac{1}{2} \cot \alpha$ است، حالت اول انتخاب شود.
 برای وقتی که $\frac{1}{2} \cot \alpha \leq C \leq 1 - \frac{1}{2} \cot \alpha$ است، حالت سوم انتخاب شود.

برای وقتی که $1 - \frac{1}{2} \cot \alpha \leq C \leq 1$ است، حالت چهارم انتخاب شود.
 رادمن [16] برای چهار حالت سطح مشترک، جدولی را برای محاسبه شارها ارائه داده است. بعد از محاسبه شار روی سطوح سلول‌ها، معادله جابه‌جاییتابع رنگ حل می‌شود. این معادله بهصورت روابط (13) تا (15) گسته‌سازی شده است.

$$\begin{aligned} C_{i,j}^{n+1} &= C_{i,j}^n \\ &- \frac{C_{i+1/2,j}^n u_{i+1/2,j}^n \Delta t - C_{i-1/2,j}^n u_{i-1/2,j}^n \Delta t}{\Delta x} \\ &- \frac{C_{i,j+1/2}^n v_{i,j+1/2}^n \Delta t - C_{i,j-1/2}^n v_{i,j-1/2}^n \Delta t}{\Delta y} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{i,j}^{n+1} &= C_{i,j}^n - \frac{F_{i+1/2,j}^n - F_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \\ &- \frac{F_{i,j+1/2}^n - F_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} \quad (14) \end{aligned}$$

$$F = UC \Delta t \quad (15)$$

سلول‌هایی که مقدار تابع رنگ در آن بزرگ‌تر از یک است به یک و سلوال‌هایی که مقدار تابع رنگ کمتر از صفر تغییر دارد به مقدار تغییر داده می‌شود. این عمل برای جلوگیری از به وجود آمدن ناپایداری عددی در سطح مشترک است [13].

در انتهای پس از حل معادله جابه‌جایی کسر حجمی، مقدار چگالی و لزجت دوفازی برای استفاده در معادلات ناویراستوکس از روابط 4 و 5 محاسبه می‌شود.

3-2- هندسه و شرایط مرزی

به منظور بررسی حرکت حباب در دوشیب متواالی، کانالی به طول 2 متر که 1 متر اول تحت گرانش g1 و 1 متر دوم تحت گرانش g2 قرار دارد، درنظر گرفته شده است (شکل 2). به عبارت دیگر، دو قسمت کانال، نشان‌دهنده دو شیب مختلف می‌باشد. این راهکار در مرجع [17] برای شیبیه‌سازی جریان دوفازی در سیستم لوله-رایزر³ از شیب صفر به شیب 90 درجه نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

برای بررسی حرکت حباب در دوشیب، زاویه شیب اول 5, 15, 30, 45, 60 درجه و زاویه شیب دوم 5, 15, 30, 45, 60, 75 درجه در نظر

3- Pipe-Riser system

2-2- روش VOF-PLIC

روش PLIC یک روش ردبایی سطح مشترک¹ است که معادله جابه‌جایی را به صورت صریح حل می‌کند. این روش اولین بار توسط یانگر [15] یک سال پس از روش حجم سیال دهنده-گیرنده² هرت و نیکوز [13] ارائه شد. اگرچه در سال‌های بعد بر همین مبنای روش‌های PLIC دیگر نیز معرفی شد ولی همچنان روش یانگر یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین روش‌های حجم سیال است.

در این روش، ابتدا شار روی صفحات سلول با روش بادسو مرتبه یک برای تمام سلول‌ها محاسبه می‌شود. در سلول‌های سطح مشترک، نیاز به بازسازی سطح مشترک است. برای به دست آوردن شکل سطح مشترک در سلول، زاویه سطح مشترک با افق به صورت رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{n_x}{n_y} \right) \quad (-\pi < \beta \leq \pi) \quad (9)$$

به منظور دسته‌بندی مناسب سطح مشترک‌های مختلف، زاویه آلفا به صورت رابطه (10) تعریف می‌شود که مقداری بین صفر تا $\frac{\pi}{2}$ دارد.

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - |\beta| & \text{for } (n_x \cdot n_y \geq 0) \\ |\beta| & \text{for } (n_x \cdot n_y \leq 0) \end{cases} \quad (10)$$

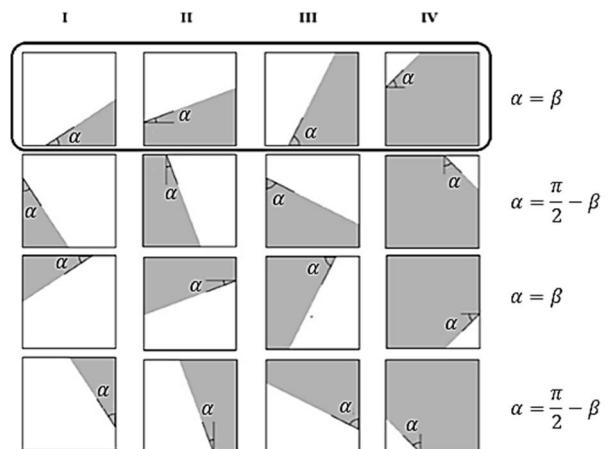
بردار نرمال سطح مشترک هر سلول از روابط (11) و (12) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} n_{i,j}^x &= -\frac{1}{\delta x} (C_{i+1,j+1} + 2C_{i+1,j} + C_{i+1,j-1} \\ &- C_{i-1,j+1} - 2C_{i-1,j} - C_{i-1,j-1}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} n_{i,j}^y &= -\frac{1}{\delta y} (C_{i+1,j+1} + 2C_{i,j+1} + C_{i-1,j+1} \\ &- C_{i+1,j-1} - 2C_{i,j-1} - C_{i-1,j-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

برای بازسازی سطح مشترک با خط مورب با توجه به زاویه آلفا محاسبه شده، چهار حالت به دست می‌آید (در اصل 16 حالت وجود دارد که با چرخاندن سلول به 4 حالت ختم می‌شود (شکل 1)).

با توجه به مقدار آلفا و مقدار تابع رنگ هر سلول، یکی از چهار حالت طبق الگوریتم زیر انتخاب می‌شود [16].



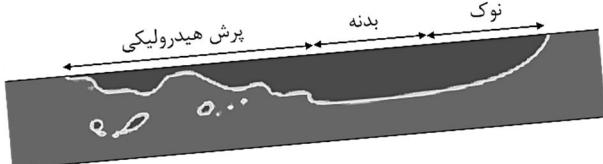
شکل 1- حالات‌های بازسازی سطح مشترک در روش PLIC

1- Interface tracking
2- Donor Acceptor

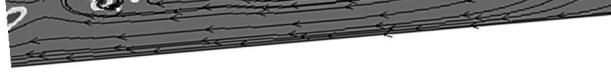
در شکل 5 اجزا حباب تیلور در زمان 2 ثانیه برای کanal به طول 1 متر و ارتفاع 0/05 متر با شبیه 5 درجه رسم شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، حباب در شبیه کanal سه قسمت نوک¹، بدن² و پرش هیدرولیکی³ تشکیل شده است. حباب تیلور در کanal با توجه به نیروی شناوری وارد بر آن در کanal حرکت کرده و ابتدای آن گولهای شکل می‌شود. تقریباً در مرکز آن، قطر حباب و به عبارتی دیگر ضخامت فیلم مایع مجاور حباب ثابت می‌ماند که این قسمت بندۀ حباب نام دارد. در انتهای حباب با توجه به سرعت آب مجاور حباب به سمت پایین یک پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. در این بخش، امکان جدایش حباب‌های کوچک از حباب تیلور وجود دارد.

در شکل 6 خطوط جریان فازهای آب و هوای نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطوط جریان داخل حباب تیلور در طول کanal به سمت بالا حرکت کرده و با یک چرخش در جلوی حباب، در فیلم مایع به سمت پایین کanal حرکت می‌کند. در پشت حباب و در پرش هیدرولیکی به دلیل وجود گرداب، چرخش مشاهده می‌شود. طرحواره این پدیده در شکل 7 نشان داده شده است.

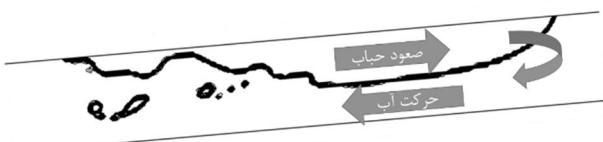
در شکل 6 مبدأ مختصات بر روی کanal قرار دارد و در حقیقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای ناظر بیرونی کanal می‌باشد. به منظور مشاهده چرخش جریان داخل حباب تیلور بایستی مبدأ مختصات بر روی حباب باشد. از این رو مولفه سرعت حباب در طول کanal از سرعت حد حباب در هر لحظه از زمان، کم می‌شود [18]. با اینکار بردارهای سرعت نسبت به حباب محاسبه می‌شود. به بیان دیگر حباب ثابت است و مایع به طرف آن حرکت می‌کند. در شکل 8 با تغییر مبدأ مختصات از کanal به حباب، خطوط جریان رسم شده است. مشاهده می‌شود که آب به سمت پایین حرکت کرده و خطوط جریان آب بر سطح حباب مماس شده است. خطوط جریان داخل حباب، چرخش هوا را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل 5 اجزا تشکیل‌دهنده حباب تیلور در شبیه 5 درجه



شکل 6 خطوط جریان برای حرکت حباب تیلور در کanal شبیه دار



شکل 7 طرحواره حرکت آب و هوای صعود حباب تیلور در کanal شبیه دار

1- Nose
2- Body
3- Hydraulic jump

گرفته شده است که جمعاً 42 حالت مورد بررسی قرار گرفته است. شرط مرزی دیواره، شرط عدم لغزش برای تمام مرزها می‌باشد. در لحظه صفر، یک حباب به شکل اولیه مستطیلی در سمت چپ میدان درنظر گرفته شده است.

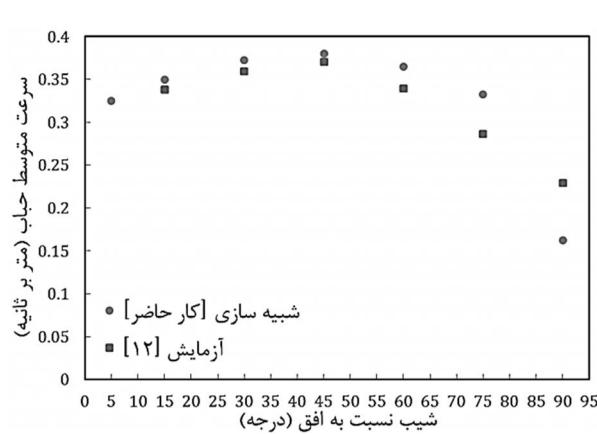
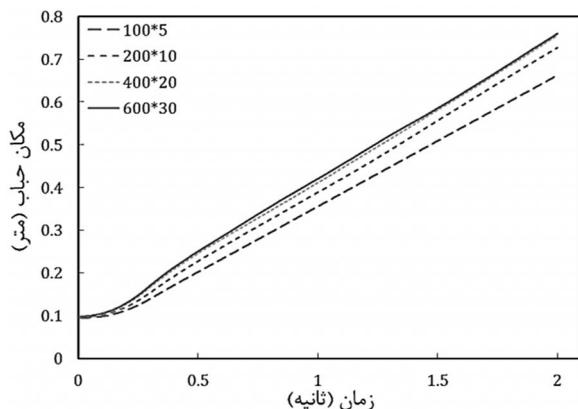
4-4- استقلال حل از شبکه

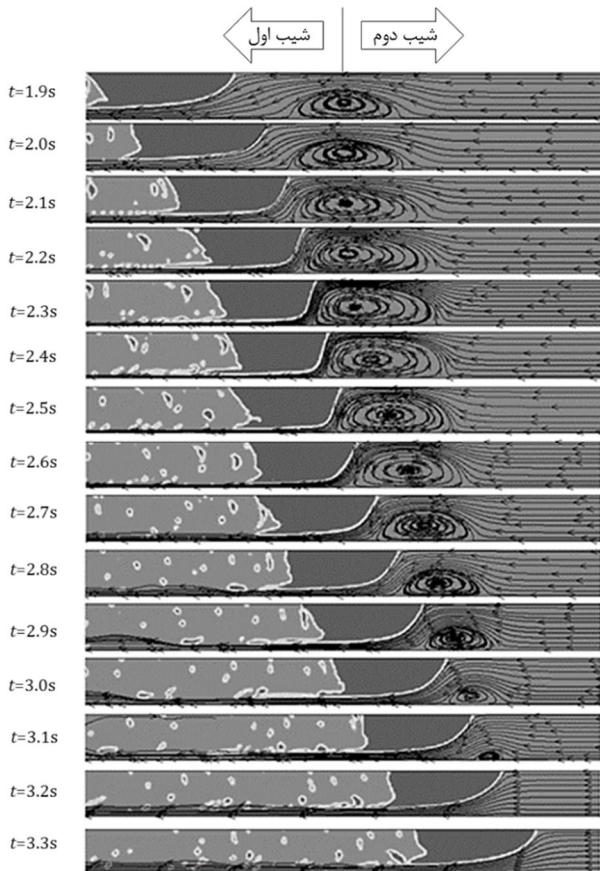
به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، مکان صعود حباب بر حسب زمان برای شبیه 5 درجه در شکل 3 رسم شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، شبکه 400 در 20 انتخاب می‌شود.

3- نتایج و بحث

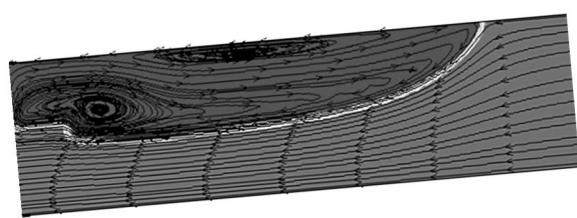
3-1- سرعت حباب در تک شبیه

ابتدا برای راست آزمایی، سرعت متوسط صعود حباب برای شبیه‌های مختلف با نتایج آزمایش که در مرجع [12] ارائه شده مقایسه می‌شود (شکل 4). سرعت حباب با افزایش شبیه از 0 تا 45 درجه افزایش و سپس با افزایش شبیه از 45 تا 90 درجه کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی نیز همین رفتار برای حباب در شبیه مشاهده می‌شود.





شکل 10 حرکت حباب از شب 60 به 75 درجه و تشکیل گردابه در سطح پایین کanal



شکل 8 خطوط جریان برای حرکت حباب تیلور در کanal شبیدار

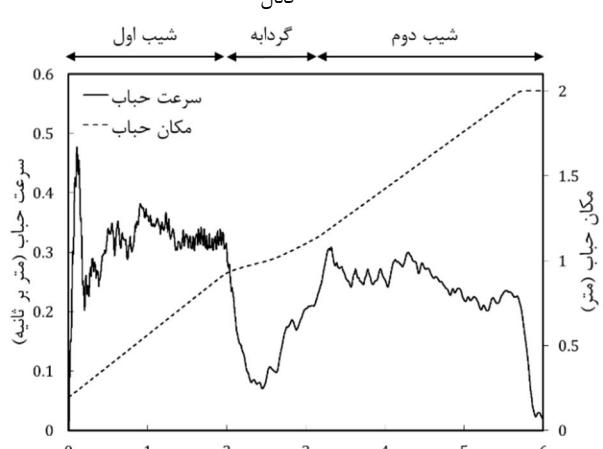
3-2- بررسی حرکت حباب از شب کم به زیاد

طرحواره حرکت حباب از شب کم به زیاد در شکل 9 رسم شده است. در این هندسه به علت حرکت حباب به سمت بالا تحت نیروی شناوری و درجهت مقابل آن حرکت آب به سمت پایین تحت نیروی گرانش، در محل زانوی یک گردابه در سطح پایینی کanal تشکیل می‌شود. چرخش گردابه پاد ساعت‌گرد می‌باشد که این به دلیل حرکت آب از بالای گردابه و به سمت پایین کanal است.

با توجه به چرخش پاد ساعت‌گرد گردابه، هنگام عبور حباب از شب کم به زیاد، گردابه نقش مانع در مقابل حرکت حباب خواهد داشت. بنابراین گردابه باعث پخت شدن نوک حباب و کاهش سرعت آن می‌شود. به عنوان نمونه حرکت حباب از شب 60 به 75 درجه در زمان‌های مختلف و در مکان 0/7 تا 1/2 متري کanal در شکل 10 رسم شده است.

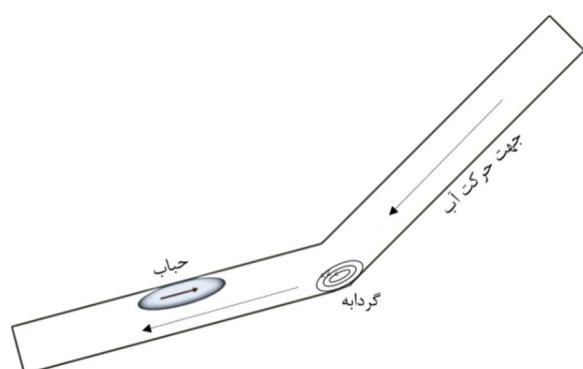
همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان 1/9 ثانیه حباب در شب 60 درجه است. در این زمان یک گردابه در مکان 1 متر در سطح پایین کanal با چرخش پاد ساعت‌گرد ایجاد شده است. با نزدیک شدن حباب به گردابه، شکل حباب پخت شده و طول آن کاهش می‌پابد. سپس حباب با هل دادن گردابه به سمت بالا حرکت خود را ادامه می‌دهد (زمان 2/5 تا 2/1 ثانیه). گردابه کم به داخل شب دوم هل داده شده و توسط حرکت حباب مض محل می‌شود (زمان 2/6 تا 3/1 ثانیه).

در شکل 11 مکان و سرعت مرکز جرم حباب بر حسب زمان در شب‌های اول و دوم به ترتیب 60 و 75 درجه رسم شده است. مشاهده می‌شود در مکان 1 متر در محل گردابه یک کمینه سرعت در نمودار سرعت حباب رخ می‌دهد. تأثیر شب دوم بر اندازه گردابه تشکیل شده در شکل 12 دیده می‌شود. در این شکل، گردابه تشکیل شده در زمان 2 ثانیه و مکان 0/8 تا 1/2 متر برای شب اول 15 درجه و شب دوم 5 تا 90 درجه رسم شده است. می‌توان گفت گردابه تشکیل شده، با افزایش اختلاف دو شب، بزرگ‌تر می‌شود.

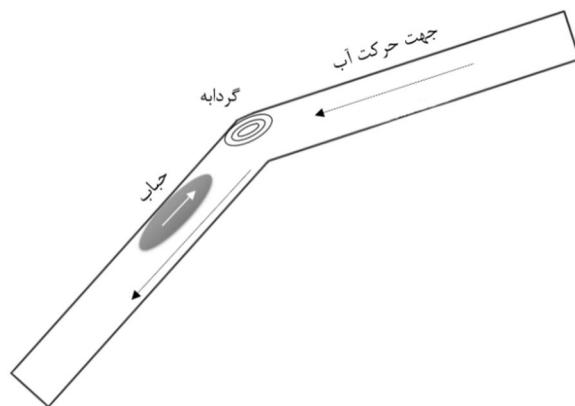


شکل 11 نمودار مکان و سرعت مرکز جرم حباب بر حسب زمان از شب 60 به 75 درجه

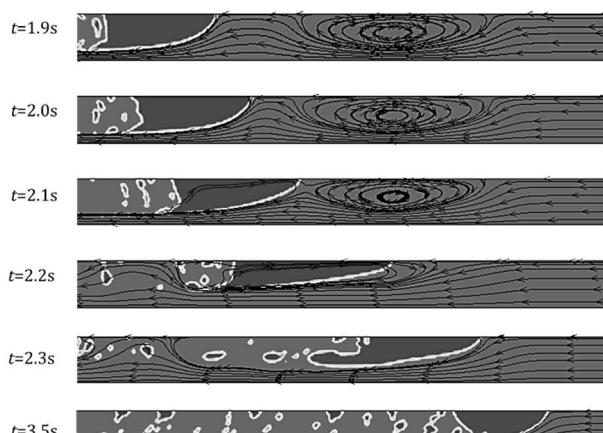
شکل نوک حباب در زمان 2 ثانیه هنگام عبور حباب از شب 15 درجه به 45، 60، 75 و 90 درجه رسم شده است (شکل 13). مشاهده می‌شود با افزایش شب دوم، نوک حباب پخت شده است. پدیده حاضر به این دلیل است که با افزایش شب دوم، گردابه تشکیل شده بزرگ‌تر بوده و مانع قوی‌تری در مقابل حرکت حباب محاسبه می‌شود. در زوایای شب دوم 15، 30 و 45 درجه بدليل کوچک بودن گردابه، نوک حباب تغییر زیادی نکرده است.



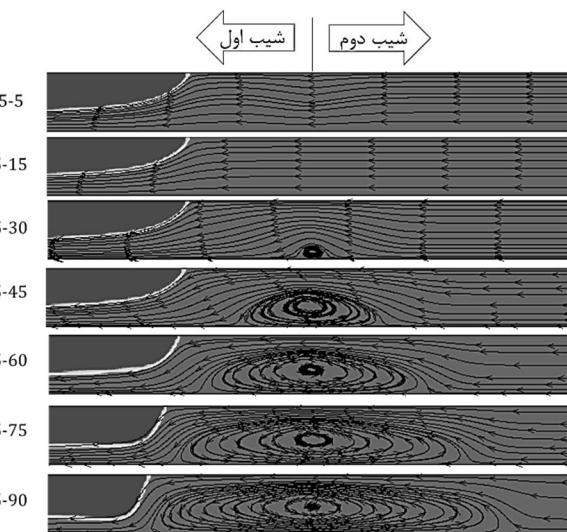
شکل 9 طرحواره حرکت حباب از شب کم به زیاد و تشکیل گردابه در سطح پایینی کanal



شکل 14 طرحواره حرکت حباب از شبیه زیاد به کم و تشکیل گردابه در سطح فوقانی کanal



شکل 15 حرکت حباب از شبیه 75 به 45 درجه و تشکیل گردابه در سطح فوقانی کanal



شکل 12 گردابه تشکیل شده در شبیه اول 15 درجه و شبیه‌های دوم مختلف، $t=2s$



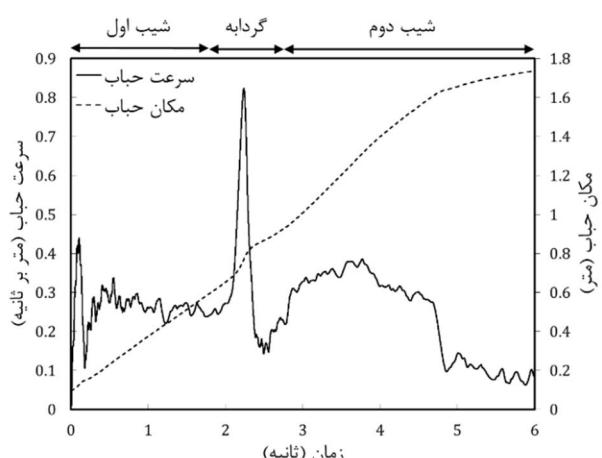
شکل 13 شکل نوک حباب، شبیه اول 15 درجه و شبیه‌های دوم 45 تا 90 درجه

-3- بررسی حرکت حباب از شبیه زیاد به کم
طرحواره حرکت حباب از شبیه زیاد به کم در شکل 14 رسم شده است. در تغییر شبیه از زیاد به کم، در محل زانویی به علت حرکت حباب به سمت بالا تحت نیروی شناوری و در جهت مقابل آن حرکت آب به سمت پایین تحت نیروی گرانش، یک گردابه در سطح بالای کanal تشکیل می‌شود. بدلیل حرکت آب از پایین گردابه به سمت پایین کanal، جهت چرخش گردابه، ساعتگرد می‌باشد.

در این هندسه، هنگام عبور از شبیه زیاد به کم به این دلیل که چرخش ساعتگرد گردابه در جهت حرکت حباب می‌باشد، با نزدیک شدن حباب به گردابه، گردابه حباب را به درون خود کشیده و موجب تیز شدن نوک حباب و افزایش سرعت آن می‌شود.

به عنوان نمونه حرکت حباب از شبیه 75 به 45 درجه در زمان‌های مختلف و در مکان $1/2$ تا $1/2$ متری کanal در شکل 15 رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان $1/9$ ثانیه حباب در شبیه 75 درجه است. در این زمان یک گردابه در مکان 1 متر در سطح فوقانی کanal با چرخش ساعتگرد ایجاد شده است. با صعود حباب در زمان $2/1$ ثانیه حباب به گردابه می‌رسد. مشاهده می‌شود که در اینجا حباب به درون گردابه کشیده شده است. در زمان $2/2$ ثانیه حباب کاملاً به درون گردابه کشیده شده و تیزشیدگی نوک حباب به خوبی قابل مشاهده است. در زمان $3/3$ ثانیه حباب از شبیه 75 به 45 وارد می‌شود. در زمان $3/5$ ثانیه حباب در شبیه 45 درجه در حال صعود می‌باشد.

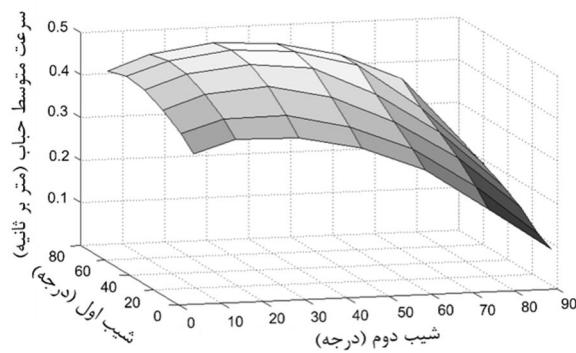
در شکل 16 مکان و سرعت مرکز جرم حباب بر حسب زمان در شبیه‌های اول و دوم به ترتیب 75 و 45 درجه رسم شده است. مشاهده می‌شود در مکان 1 متر در محل گردابه یک بیشینه سرعت در نمودار سرعت حباب رخ می‌دهد که مطابق با آن در نمودار مکان مرکز جرم حباب نیز افزایش سرعت مشاهده می‌شود.



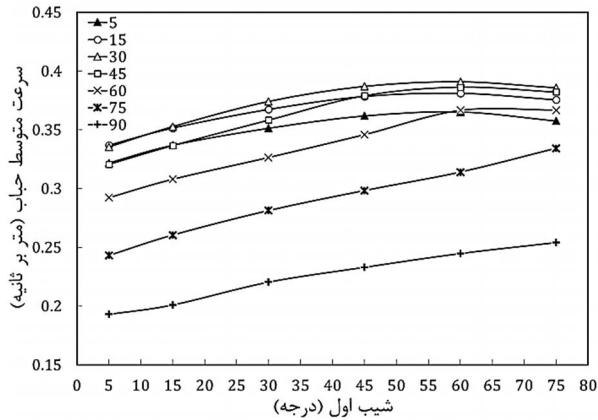
شکل 16 نمودار مکان و سرعت مرکز جرم حباب بر حسب زمان از شبیه 75 به 45 درجه

3-4- سرعت بیشینه حباب در دو شبیه متواالی

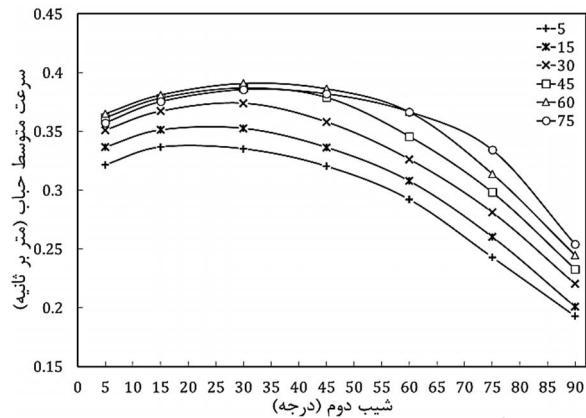
در قسمت 1-3 با شبیه‌سازی حرکت حباب در کanal شبیدار با زوایای مختلف، سرعت بیشینه حباب در زاویه 45 درجه بدست آمد. در حرکت حباب در دو شبیه متواالی، انتظار می‌رود در شبیه‌های اول و دوم به ترتیب 45 و 45 درجه بیشینه سرعت رخ دهد. اما با رسم سرعت متوسط حباب در



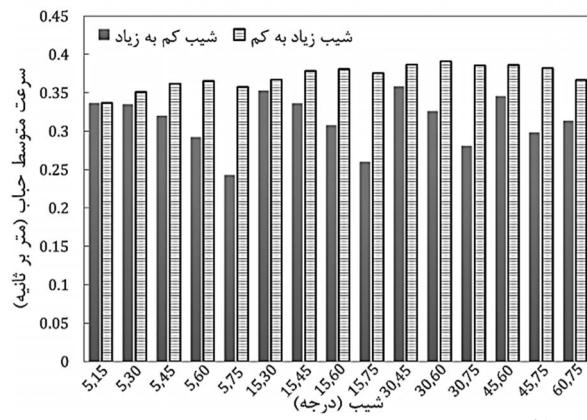
شکل ۱۷ نمودار سرعت متوسط حباب در دو شیب بر حسب شیب اول و دوم



شکل ۱۸ نمودار سرعت متوسط حباب در کanal با دو شیب بر حسب شیب اول



شکل ۱۹ نمودار سرعت متوسط حباب در دو شیب بر حسب شیب دوم



شکل ۲۰ نمودار میله‌ای سرعت متوسط حباب در دو شیب متواالی برای شیب‌های مختلف در دو حالت شیب زیاد به کم و شیب کم به زیاد

حالت مورد بررسی، مشاهده می‌شود که بیشینه سرعت در حالت شیب اول ۶۰ و شیب دوم ۳۰ درجه رخ می‌دهد (شکل ۱۷). این پدیده به دلیل نقش گردابه در زانویی کanal رخ می‌دهد. همان‌طور که پیش از این بیان شد؛ در تغییر شیب کanal از زیاد به کم، گردابه ایجاد شده موجب سرعت گرفتن حباب می‌شود.

در شکل ۱۸ نمودار سرعت متوسط حباب در دو شیب بر حسب زاویه شیب اول رسم شده است. هر منحنی نشان‌دهنده شیب دوم ثابت می‌باشد. زمانی که شیب دوم ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه باشد، سرعت حباب نسبت مستقیم با شیب اول دارد. در چهار شیب دوم (۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) سرعت حباب در شیب اول ۶۰ درجه بیشینه است. همچنین مشاهده می‌شود بیشینه سرعت حباب در تمام زوایای شیب اول هنگامی است که شیب دوم ۳۰ درجه باشد.

در شکل ۱۹ نمودار سرعت متوسط حباب در دو شیب بر حسب زاویه شیب دوم رسم شده است. هر منحنی نشان‌دهنده شیب اول ثابت می‌باشد. در تمام زوایای شیب اول، کمینه سرعت هنگامی است که شیب دوم ۹۰ درجه باشد. سرعت حباب در شیب اول ۵ و ۱۵ درجه وقتی بیشینه است که زاویه شیب دوم ۱۵ درجه باشد. سرعت حباب در شیب اول ۳۰ درجه باشد. در هر دو شکل ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود که بیشینه سرعت مربوط به دو شیب برای حالت شیب اول ۶۰ و شیب دوم ۳۰ درجه می‌باشد.

در شکل ۲۰ سرعت متوسط دو شیب برای شیب‌های مختلف در دو حالت شیب کم به زیاد و شیب زیاد به کم رسم شده است. محور افقی مربوط به ترکیب دو شیب متواالی می‌باشد. به عنوان مثال، برای ترکیب شیب ۵ و ۷۵ درجه، سرعت متوسط حباب در حالت تغییر شیب از ۵ به ۷۵ کمتر از تغییر شیب از ۷۵ به ۵ درجه می‌باشد. بنابراین در تمام شیب‌ها، سرعت حباب در حالتی که تغییر شیب از زیاد به کم باشد بیشتر از حالتی است که تغییر شیب از کم به زیاد باشد. دلیل این رخداد با توجه به نتایج بیان شده، مربوط به تشکیل گردابه در بین دو شیب است. با تغییر شیب از زیاد به کم، گردابه موجب سرعت یافتن حباب و در حالت تغییر شیب از کم به زیاد، گردابه موجب کاهش سرعت حباب می‌شود.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، با استفاده از روش حجم سیال، حرکت حباب در کanal شیب‌دار با شیب‌های مختلف و متواالی بررسی شد. زاویه بحرانی شیب کanal در حالت تک شیب ۴۵ درجه به دست آمد که با نتایج محققان پیشین مطابقت دارد. زاویه بحرانی برای دو شیب متواالی، زاویه اول ۶۰ و زاویه دوم ۳۰ درجه به دست آمد. در دو شیب متواالی به دلیل یک گردابه در محل تغییر شیب رخ می‌دهد. حباب در حالت شیب کم به زیاد دچار کاهش سرعت در محل تغییر شیب شده و نوک حباب پخ می‌شود. در حالی که سرعت حباب در حالت شیب زیاد به کم افزایش می‌یابد. در کanal با دو شیب متواالی، سرعت متوسط حباب در حالت شیب زیاد به کم، همواره بیشتر از شیب کم به زیاد است.

6- مراجع

- [1] L. Amaya-Bower, T. Lee, Numerical simulation of single bubble rising in vertical and inclined square channel using lattice boltzmann method, *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, pp. 935–952, 2011.
- [2] M. J. Rudman, H. M. Blackburn, J. Merrell, Bubble rise in an inclined channel, *International Conference on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation*, Melbourne, Australia, pp. 307-312, 1997.
- [3] C. C. Manerl, N. Zuber, An experimental study of plane bubbles rising at inclination, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 623-645, 1974.
- [4] E. T. White, R. H. Beardmore, The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 17, pp. 351-361, 1962.
- [5] D. E. Runge, G. B. Wallis, *The Rise Velocity of Cylindrical Bubbles in Inclined Tubes*, AEC Report, No. NYO-3114-8, 1965.
- [6] E. E. Zukoski, Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on the motion of long bubbles in closed tubes, *Journal of Fluid Mechanic*, Vol. 25, pp. 821-837, 1966.
- [7] P. L. Spedding, V. T. Nguyen, Bubble rise and liquid content in horizontal and inclined tubes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 33, pp. 987-994, 1978.
- [8] H. K. Bendiksen, An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 467-483, 1984.
- [9] A. R. Hasan, C. S. Kabir, *Predicting Multiphase Flow Behavior in a Deviated Well*, SPEPE 474, November 1988.
- [10] T. Maxworthy, Bubble rise under an inclined plate, *Journal of Fluid Mechanic*, Vol. 229, pp. 659-674, 1991.
- [11] I. N. Alves, O. Shoham, Y. Taitel, Drift velocity of elongated bubbles in inclined pipes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 48, pp. 3063-3070, 1993.
- [12] M. Cook, M. Behnia, Bubble motion during inclined intermittent flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, No. 5, pp. 543-551, 2001.
- [13] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume Of Fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- [14] J. U. Brackbill, D. B. Kothe and C. Zemach, A continuum method for modelling surface tension, *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, pp. 335-354, 1992.
- [15] D. L. Youngs, Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion, K. W. Morton and M. J. Baines (eds), *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Academic press, New York, pp. 273-285, 1982.
- [16] M. Rudman, Volume-tracking methods for interfacial flow calculations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 24, pp. 671-691, 1997.
- [17] M. O. Bay, *Development of Transient One-Dimensional Solver for Severe Slugging Simulation*, Master Thesis, Oil and Gas Technology, Aalborg University Esbjerg, Denmark, 2008.
- [18] M. R. Ansari, M. E. Nimvari, Bubble viscosity effect on internal circulation within the bubble rising due to buoyancy using the level set method, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, pp. 2770-2778, 2011.

5- علایم

C کسر حجمی مایع

 F_g نیروی گرانش (N) F_s نیروی کشنش سطحی (N) g شتاب گرانش (m/s^2)

n بردار نرمال سطح مشترک

 P فشار (Pa) t زمان (s)U مقدار سرعت (m/s)v سرعت افقی (m/s)w سرعت (m/s)x سرعت عمودی (m/s)

علایم یوتانی

 α زاویه سطح مشترک دوفاز در روش PLIC (rad) β زاویه سطح مشترک دوفاز با افق (rad)

X انحنای سطح مشترک (X)

 μ لزجت سیال ($kg/m.s$) ρ چگالی سیال (kg/m^3) σ ضربی کشنش سطحی (N/m^3)

بالاتویس‌ها

n ام زمان

x راستای افقی

y راستای عمودی

z زیرنویس‌ها

g گاز

i سلول ام

j سلول زام

l مایع