



شبیه‌سازی سه‌بعدی رژیم جریان دوفازی اسلاگ در کانال افقی به روش حجم سیال

محمدرضا انصاری^{۱*}، ابراهیم سلیمی^۲، بابک حبیب پور^۳، پویان ادیبی^۳

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* mra_1330@modares.ac.ir، ۱۴۳-۱۴۱۵

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۱ دی ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۵ بهمن ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۱ شهریور ۱۳۹۳

کلید واژگان:

شبیه‌سازی عددی

جریان دوفازی

رژیم اسلاگ

روش حجم سیال

نرم افزار این فوم

در مقاله حاضر، رژیم جریان دوفازی اسلاگ در کانال افقی با مقطع مستطیلی به روش حجم سیال (VOF) شبیه‌سازی عددی شده است. معادلات بقای جرم و مومنتم و معادله جابه‌جایی کسر حجمی به همراه معادلات اغتشاشی SST $k-\omega$ در نرم‌افزار متن باز این فوم حل شده است. شبیه‌سازی‌ها مطابق با شرایط آزمایشگاهی در کانال با مقطع مستطیلی انجام شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، تشکیل ناپایداری‌ها براساس معیار کلون-هلمهولتز و تشکیل اسلاگ در حل سه‌بعدی مغشوش دیده می‌شود. در شبیه‌سازی و آزمایش، ارتفاع فاز مایع در کانال کمی افزایش می‌یابد و به سبب آن شرط ناپایداری کلون-هلمهولتز ارضا و با رشد ناپایداری‌ها در سطح مشترک، اسلاگ ایجاد می‌شود. با ایجاد اسلاگ و مسدود شدن مقطع کانال توسط فاز مایع، فشار پشت اسلاگ به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به دلیل گرادیان فشار بزرگ‌تر در ابتدای اسلاگ نسبت به انتهای آن، طول اسلاگ در امتداد کانال افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر، قادر به پیش‌بینی صحیح طول اسلاگ مطابق با آزمایش و مکان ایجاد آن با خطای ۲۲٪ بوده است. همچنین در مقایسه با تحقیق دیگران، نتایج عددی کار حاضر نشان‌دهنده بهبود و دقت بالاتر در پیش‌بینی جریان است.

Three dimensional simulation of slug two-phase flow regime in a horizontal channel using VOF method

Mohammad Reza Ansari*, Ebrahim Salimi, Babak Habibpour, Pouyan Adibi

1.2.3. Faculty 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 01 January 2014
Accepted 04 February 2014
Available Online 23 August 2014

Keywords:
Numerical Simulation
Two-phase Flow
Slug Regime
VOF Method
Open FOAM Software

ABSTRACT

In this article, two-phase slug flow is simulated numerically in a horizontal duct with rectangular cross-section using Volume Of Fluid (VOF) method. Conservation equations of mass, momentum and advection equation are solved in open source Open FOAM code accompanying $k-\omega$ SST turbulence equations. Simulation is conducted based on the experimental results in the duct with rectangular cross-section. The results shows, due to Kelvin-Helmholtz (K-H) instability criteria slug initiation forms in the air-water interface during three dimensional turbulence modeling. Water level was increased slightly at interface in both numerical simulation and experiment. This level increase satisfies the K-H instability to generate a slug at interface. During slug initiation, the pressure behind slug is increased significantly. Big pressure gradient at the beginning of the slug in compare to the end of it causes the slug length to be increased as propagate along the duct. The numerical simulation of present research is capable of predicting the slug length accurately in accordance with experiment; however, the slug position with 22% inaccuracy was obtained. Comparison of the results with the numerical and experimental results of other researchers confirms higher accuracy of flow prediction in the present work.

۱- مقدمه

مشخص کننده شکل سطح مشترک بین دوفاز است، صورت می‌گیرد و با تغییر اساسی در شکل سطح مشترک، گذار از یک الگوی جریان به الگوی دیگر رخ می‌دهد. هیدرودینامیک جریان، افت فشار، کسر حجمی هر فاز، مکانیزم های انتقال مومنتم، جرم، گرما و پایداری سیستم‌های انتقال جریان دوفاز تا حد زیادی از یک رژیم جریان به رژیم دیگر تغییر می‌کند. در نتیجه تعیین نوع رژیم جریان داخل کانال برای تحلیل مناسب جریان‌های دوفازی در کاربردهای مهندسی، به‌ویژه برای مقاصد طراحی خطوط انتقال جریان‌های

انتقال جریان دوفازی مایع و گاز در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند سکوهای نفتی، سیستم‌های تهویه مطبوع، مولدهای بخار هسته‌ای، خطوط انتقال نفت، گاز سیستم‌های سردساز، مبدل‌های حرارتی و... وجود دارد. جریان دوفازی داخل خط انتقال با توجه به پارامترهای مختلفی مانند شکل هندسی و جهت خطوط لوله، شدت جریان یا سرعت ظاهری هرکدام از فازها و یا شار حرارتی وارد بر لوله، در قالب رژیم‌های جریان مختلفی که در واقع

Please cite this article using:

M.R. Ansari, E. Salimi, B. Habibpour, P. Adibi, Three dimensional simulation of slug two-phase flow regime in a horizontal channel using VOF method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 176-182, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اسلاگ رادر کانال مستطیلی به طول ۸m و سطح مقطع $3 \times 10 \text{ cm}^2$ به صورت تجربی و عددی با استفاده نرم‌افزار انسیس CFX مورد بررسی قرار دادند. با توجه به این‌که عمده تحقیقات گذشته درخصوص جریان اسلاگ، تجربی است و شبیه‌سازی عددی برای درک فیزیک و پیش‌بینی شرایط این جریان، محدود بوده؛ بنابراین در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی عددی جریان اسلاگ در کانال افقی پرداخته شده است. بررسی دقیق شرایط ایجادکننده آغاز اسلاگ و پیشروی این جریان در طول کانال با استفاده از شبیه‌سازی سه-بعدی اغتشاشی و روش حجم سیال، از نوآوری‌های تحقیق حاضر است.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- معادلات حاکم

در کار حاضر برای شبیه‌سازی رژیم‌های جریان دوفازی در کانال از روش VOF استفاده شده است. در این روش علاوه بر حل معادلات پیوستگی و مومنتم، یک معادله جابه‌جایی برای کسر حجمی فاز مایع نیز در هر سلول محاسباتی حل می‌شود. معادلات مورد استفاده در این روش برای جریان تراکم-ناپذیر لزج روابط (۱) الی (۵) است [۱۱].

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتم:

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

معادله جابه‌جایی کسر حجمی:

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

چگالی دوفازی:

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

لزجت دوفازی:

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

در رابطه (۳)، یک پارامتر اسکالر و برابر کسر حجمی فاز مایع داخل سلول محاسباتی است و مقدار بین ۰ تا ۱ دارد. اگر سلول حاوی سیال مایع باشد $C=1$ و اگر حاوی سیال گاز باشد $C=0$ است. سلول‌هایی با مقدار $0 < C < 1$ سطح مشترک مایع و گاز را تشکیل می‌دهد. چگالی و لزجت برای معادله مومنتم به ترتیب از روابط (۴، ۵) به دست می‌آیند. در نرم‌افزار این فوم به رابطه (۳) یک ترم فشردگی مصنوعی نیز برای کاهش اثر نفوذ عددی در سطح مشترک اضافه شده است [۱۲]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (CV) + \nabla \cdot (C(1-C)V_r) = 0 \quad (6)$$

V_r یک میدان سرعت مناسب برای فشرده کردن سطح مشترک است و از رابطه (۷) به دست می‌آید که در آن مقدار C_r برای به دست آوردن بهتر سطح مشترک بین ۱ تا ۴ توصیه شده است [۱۳].

$$V_r = C_r \left| \nabla \frac{C}{\nabla C} \right| \quad (7)$$

نیروی کشش سطحی F_s در معادله مومنتم از رابطه (۸)، مدل نیروی سطحی پیوسته^۴ (CSF)، محاسبه می‌شود و در آن n و κ به ترتیب بردار نرمال سطح مشترک در هر سلول و انحنا سطح مشترک است که از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۴].

دوفازی بسیار حائز اهمیت است. رژیم جریان دوفازی اسلاگ در سرعت‌های بالای گاز رخ می‌دهد. با وقوع این رژیم به دلیل ماهیت متناوب آن، تغییرات زیادی در پروفیل فشار داخل کانال رخ می‌دهد که این مورد سبب تشدید خوردگی و خستگی کانال می‌شود؛ بنابراین توجه به صدمات ناشی از این رژیم در کاربردهای صنعتی، سعی بر پیش‌گیری از وقوع آن است و در صورت مشاهده آن در خط لوله از رشد آن جلوگیری می‌شود. محل حضور اسلاگ با افزایش فشار پشت اسلاگ و ایجاد ضربه و ارتعاش در سیستم شناسایی شده و تمهیدات لازم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مطالعه بر رژیم اسلاگ برای تشخیص مکان ایجاد و پیشروی آن در لوله حائز اهمیت است.

بیکر و همکاران [۱] نقشه جریانی برای جریان دوفازیداخل لوله ارائه دادند. کمیت‌های در نظر گرفته شده برای محوره‌های مختصات این نمودار امکان استفاده از آن را برای سیال‌های مختلفی فراهم می‌کرد. همچنین مندهین و همکاران [۲] نقشه جریانی برای جریان آب-هوا ارائه دادند. آن‌ها از سرعت‌های ظاهری فازها برای محوره‌های نمودار استفاده کردند. انصاری [۳] با مطالعه تجربی جریان اسلاگ در کانال مستطیلی به طول ۱۰m و سطح مقطع $5 \times 10 \text{ cm}^2$ ، بیان کرد که در سطح مشترک آب و هوا تعدادی امواج با طول موج کوتاه ایجاد می‌شود. یکی از این امواج با طول موج کوتاه رشد کرده و اسلاگی با طول موج بلند را ایجاد می‌کند. ایشان نتیجه گرفت که یک واحد موج اسلاگ از سه ناحیه اصلی تشکیل شده است. ادیبی و انصاری [۴] با مطالعه تجربی جریان اسلاگ در کانال مستطیلی به طول ۳۶m و سطح مقطع $5 \times 10 \text{ cm}^2$ ، آغاز اسلاگ را برای کسرهای حجمی مختلف ورودی آب و هوا به دست آوردند و نتیجه گرفتند که محل آغاز اسلاگ به سرعت‌های ظاهری ورودی کانال وابسته است.

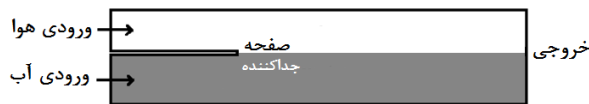
برای شبیه‌سازی عددی جریان اسلاگ در لوله، از مدل‌های دوفازی مختلفی استفاده می‌شود که هر کدام دارای مزایا و معایبی است. مدل دو-سیالی تک‌فشار و دوفشار با در نظر گرفتن معادله بقای جرم و مومنتم برای هر فاز به صورت جداگانه فیزیک حاکم بر جریان دوفازی را به خوبی مدل می‌کند ولی از معایب این مدل محدودیت یک‌بعدی بودن آن و مزیت آن هزینه محاسباتی کم آن است. استفاده از شبیه‌سازی اسلاگ با استفاده از معادلات ناویر استوکس و اضافه کردن یک معادله اسکالر جابه‌جایی کسر حجمی سیال روش دیگر است که حل معادله جابه‌جایی با روش‌های مختلف حجم سیال^۱، لول‌ست^۲ و ردیابی رویه‌جلا^۳ انجام می‌شود. در این روش‌ها برای دوفاز یک معادله بقای جرم و مومنتم با مشخصات مختلف سیال (چگالی و لزجت) حل می‌شود. در این میان، از روش حجم سیال به دلیل شبیه‌سازی دقیق تر سطح مشترک و حفظ بهتر بقای جرم، استقبال بیشتری می‌شود [۵]. انصاری و شکری [۶] آغاز و رشد اسلاگ را با مدل دوسیالی در کانال افقی به صورت یک بعدی مدل‌سازی کردند. انصاری و دارمی زاده [۷] آغاز و پیشروی اسلاگ در کانال افقی را با مدل دوسیال هیپربولیک به صورت یک بعدی بررسی کردند. شیر و همکاران [۸] رژیم‌های مختلف دوفازی در کانال افقی را به صورت آرام و سه‌بعدی به روش حجم سیال و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی کردند و رژیم‌های مختلف دوفازی و رژیم اسلاگ را به دست آوردند. هوهن [۹] با مطالعه تجربی جریان اسلاگ در کانال مستطیلی به طول ۸m و سطح مقطع $3 \times 10 \text{ cm}^2$ و شبیه‌سازی عددی اغتشاشی با استفاده نرم‌افزار انسیس CFX آغاز اسلاگ را به دست آورد. ولی و همکاران [۱۰] رژیم

1- Volume Of Fluid (VOF)

2- Level set

3- Front tracking

4- Continuum surface force



شکل ۱ طرحواره مسئله



شکل ۲ بررسی استقلال حل از شبکه در راستای ارتفاع کانال (بالا به پایین: ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ شبکه در راستای ارتفاع کانال)

جدول ۱ ضرایب ثابت در معادلات اغتشاشی [۱۶]

$\sigma_{k1} = 0.85$	$\sigma_{k2} = 1.0$
$\sigma_{\omega1} = 0.5$	$\sigma_{\omega2} = 0.856$
$\beta_1 = 0.075$	$\beta_2 = 0.0828$
$\alpha_1 = 0.55$	$\alpha_2 = 0.44$
$a_1 = 0.31$	$\beta^* = 0.09$

شرایط اولیه انتخابی برای کسر حجمی هر فاز برابر ۰/۵ می‌باشد که آب در قسمت پایین کانال و هوا در بالای آن در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت‌های نخستین انتخابی در طول کانال برای هر فاز منطبق با سرعت ورودی هر کدام از فازهاست. شرط مرزی ورودی برای k و ω از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (19)$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_{\mu}^{0.25} I} \quad (20)$$

که شدت آشفتگی (I) و طول مقیاس آشفتگی (l) برای جریان توسعه یافته در لوله و کانال از روابط (۲۱) الی (۲۳) به‌دست می‌آید.

$$I = 0.16 \text{Re}^{-\frac{1}{8}} \quad (21)$$

$$l = 0.07L \quad (22)$$

$$C_{\mu} = 0.09 \quad (23)$$

۲-۳- استقلال حل از شبکه

برای بررسی استقلال حل از شبکه، کانورهای کسر حجمی در کانالی به طول ۴ متر با سطح مقطع مستطیلی به ابعاد $5 \times 10 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شده است. ابتدا تعداد شبکه در جهت طول کانال ثابت و برابر ۸۰۰ در نظر گرفته و شبکه در راستای ارتفاع کانال بررسی شده است (شکل ۲).

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که تعداد شبکه در راستای ارتفاع کانال، بر مکان ایجاد اسلاگ تأثیر چندانی ندارد. با ریزکردن شبکه، نوسانات عددی در سطح مشترک دوفاز کمتر شده و سطح مشترک دقیق‌تر به‌دست می‌آید. با توجه به نتایج، تعداد شبکه ۸۰ در راستای ارتفاع کانال انتخاب شد. سپس تغییر تعداد شبکه در راستای طول کانال بررسی شده است (شکل ۳). مشاهده می‌شود با ریزکردن شبکه در طول کانال، مکان ایجاد اسلاگ تغییر قابل توجهی می‌کند ولی با تغییر تعداد شبکه از ۸۰۰ به ۱۶۰۰ نتایج همگرا شده و تغییر چندانی نمی‌کند. در نتیجه با توجه به نتایج، تعداد شبکه ۸۰۰ در طول کانال انتخاب شده است.

$$F_s = \sigma k(x)n \quad (8)$$

$$n = \frac{\nabla C}{|\nabla C|} \quad (9)$$

$$k(x) = \nabla \cdot n \quad (10)$$

شبیه‌سازی دقیق سطح مشترک و پایداری روند حل مسئله، نیازمند عدد کورانت کوچک‌تر از $\frac{1}{3}$ و در پی آن گام زمانی بسیار کوچک [۱۵] و همچنین در حل معادلات از گام زمانی تطبیق‌پذیر استفاده شده است. به این صورت که در هر گام زمانی عدد کورانت محاسبه شده و در صورت تجاوز مقدار آن از حد تعیین شده، گام زمانی براساس آن کوچک‌تر انتخاب می‌شود. برای حل معادلات مومنتم و پیوستگی از روش پیمپل که در واقع ترکیبی از روش سیمپل و پیرومی باشد، استفاده شده است.

با محاسبه عدد رینولدز آب و هوا در ابتدای کانال مشخص شد که جریان دوفاز مغشوش است. معادلات توربولانسی SST $k-\omega$ (روابط ۱۱-۱۷) برای جریان حل می‌شود [۱۶].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (V_k) - \nabla \cdot \left[\left(\nu + \sigma_k \nu_T \right) \nabla k \right] = P_k - \beta^* k \omega \quad (11)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (V \omega) - \nabla \cdot \left[\left(\nu + \sigma_{\omega} \nu_T \right) \nabla \omega \right] = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (12)$$

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (13)$$

$$P_k = \min(\tau \cdot \nabla V, 10 \beta^* k \omega) \quad (14)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\} \quad (15)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (16)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right) \quad (17)$$

که ضرایب ثابت σ_k ، σ_{ω} ، β و α از ترکیبی از ضرایب ثابت دو مدل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (18)$$

که ضرایب ثابت در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- هندسه مسئله و شرایط مرزی و اولیه

طرح‌واره دوبعدی کانال مورد شبیه‌سازی همراه با صفحه جداکننده دو فاز در مقطع ورودی کانال، مطابق با شرایط آزمایشگاهی [۴ و ۹]، در شکل ۱ نشان داده شده است. برای ورودی کانال از شرط مرزی سرعت ثابت برای فازها و در خروجی کانال با توجه به این‌که سیالات به محیط تخلیه می‌شوند، از شرط مرزی فشار ثابت استفاده شده است. برای دیواره کانال و صفحه جداکننده دو فاز نیز شرط مرزی دیواره با قید عدم لغزش سیال بر آن، در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی ورودی کانال دو رویکرد وجود دارد. رویکرد اول، در ورودی در سطح مشترک آب و هوا یک اغتشاش به‌صورت پله یا موج سینوسی ایجاد شود و با شبیه‌سازی اغتشاش رشد کرده و اسلاگ ایجاد شود. رویکرد دوم، در ابتدا دوفاز توسط صفحه جداکننده از یکدیگر جدا وارد شوند و هنگامی که دوفاز با یکدیگر تماس یافتند ناپایداری‌های فیزیکی موجود در مسئله بوجود آمده و رشد کنند و اسلاگ ایجاد شود. در کار حاضر، رویکرد دوم با صفحه جداکننده به طول ۰/۵ متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی شد.

هوهن [۹] با انجام آزمایش جریان دوفازی آب-هوا در یک کانال مستطیلی به طول ۸ متر، ارتفاع ۰/۱ متر و عرض ۰/۰۳ متر به بررسی جریان اسلاگ پرداخت. همچنین به کمک نرم‌افزار انسیس CFX با مدل‌سازی چند سیالی اویلری-اویلری، جریان اسلاگ را به‌صورت سه‌بعدی و با مدل توربولانسی SST $k-\omega$ شبیه‌سازی کرد. کانال سه‌بعدی با ۱/۲ میلیون سلول و مقدار گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفت. سرعت ظاهری هوا ۵ متر بر ثانیه و آب ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفت. مقدار شدت آشفتگی جریان در ورودی برابر ۵ درصد در نظر گرفت. آشفتگی‌هایی در سیستم آب و هوا اعم از کمپرسور، پمپ، زانویی‌ها و شیرهای موجود در مسیر وجود دارد و با توجه به عدم شبیه‌سازی آن، مقداری خطا در شبیه‌سازی نسبت به آزمایش به‌وجود می‌آید [۹]. در این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن یک صفحه جداکننده در ورودی، آب و هوا جداگانه وارد کانال شده و پس از آن با یکدیگر اندرکنش می‌یابند. مکان ایجاد اسلاگ را در آزمایش در فاصله دو متری از ورودی کانال و در شبیه‌سازی در فاصله ۴/۴ متری از ورودی به‌دست آورد که دارای ۱۲۰ درصد خطا است (شکل ۴-الف و ۴-ب).

در کار حاضر، کانال مطابق با آزمایش هوهن [۹] و با استفاده از مدل VOF و مدل اغتشاشی SST $k-\omega$ در فضای سه بعدی شبیه‌سازی شده‌است. مقدار آشفتگی جریان در ورودی کانال از معادلات ۱۹-۲۳ برای ورودی آب و هوا به‌دست آمد. ابتدا شبیه‌سازی کانال به طول ۸ متر با استفاده از رایانه با پردازنده موازی ۲/۸ گیگاهرتز اینتل، حافظه موقت ۶ گیگابایت، در مدت زمان ۲ ثانیه انجام گرفته است. زمان اجرا، ۱۹ روز بوده است.

با شبیه‌سازی ۴ متر ابتدای کانال و به صورت متقارن در راستای عمق کانال، شبکه محاسباتی چهار برابر کوچک‌تر شد و نتایج به‌دست آمده نیز با نتایج کانال ۸ متر منطبق بود. در این شبیه‌سازی عددی از گام زمانی متغیر با عدد کورانت ۰/۲۵ استفاده شد که گام زمانی حدود 1×10^{-5} ثانیه به‌دست آمد. مکان ایجاد اسلاگ در فاصله ۳/۱ متری از ورودی کانال به‌دست آمد که نسبت به آزمایش ۵۵ درصد خطا دارد. (شکل ۴-ج)

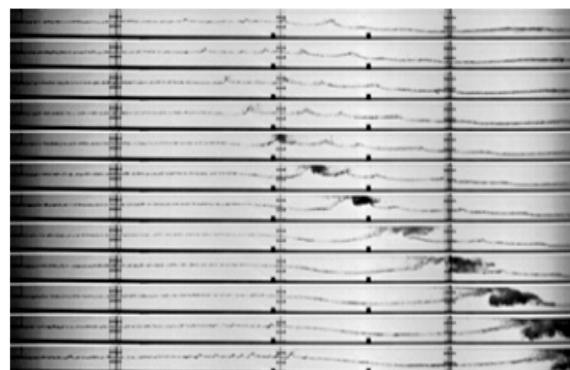
در شکل ۴ مشاهده می‌شود که بر سطح مشترک آب و هوا ناپایداری‌های کلوین هلمهولتز رشد کرده و اسلاگ ایجاد می‌شود. ناپایداری کلوین-هلمهولتز با ارضا رابطه (۲۴) رشد می‌کند [۲۰]:

$$u_g - u_l > \left[\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} g h_g \right]^{0.5} \quad (24)$$

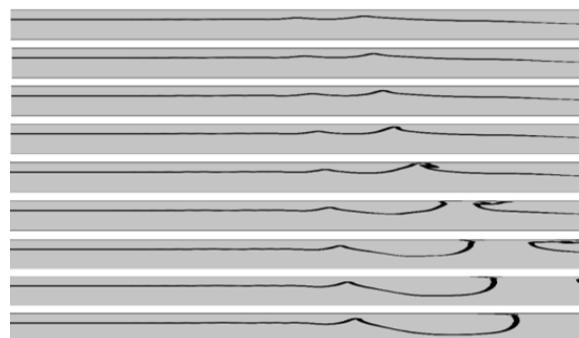
با توجه به سرعت‌های ورودی کانال عبارت سمت چپ معادله (۲۴) برابر ۸ متر بر ثانیه است و با چگالی ۹۹۸/۲ کیلوگرم بر متر مکعب آب، چگالی ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب هوا، شتاب گرانش ۹/۸۰۶ متر بر مجذور ثانیه و ارتفاع فاز گاز ۰/۰۵ متر عبارت سمت راست معادله (۲۴) برابر ۱۹/۹۸ است که این شرط ارضا نمی‌شود؛ بنابراین ناپایداری‌ها رشد نمی‌کند. در شبیه‌سازی با توجه به فیزیک مسئله برای این‌که این شرط ارضا شود یک بالا آمدگی در ابتدای کانال بعد از صفحه جداکننده رخ می‌دهد و این پدیده موجب کاهش ارتفاع فاز گاز و کوچک شدن عبارت سمت راست معادله (۲۴) و همچنین افزایش سرعت فاز گاز و کاهش سرعت فاز مایع با تغییر در مقدار کسر حجمی دوفاز و در نتیجه افزایش مقدار عبارت سمت چپ معادله (۲۴) می‌شود که به موجب این اتفاق شرط ناپایداری کلوین-هلمهولتز ارضا می‌شود و با رشد ناپایداری‌های فیزیکی، اسلاگ ایجاد می‌شود. این پدیده در شکل ۵ نشان داده شده است که h_1 ارتفاع آب در شرایط نخستین برابر ۰/۰۵ متر



شکل ۳ بررسی استقلال حل از شبکه در راستای طول کانال (بالا به پایین: ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ شبکه در راستای طول کانال)



(الف)



(ب)



(ج)

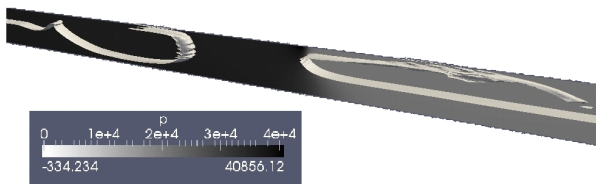
شکل ۴ آغاز و رشد اسلاگ در کانال (الف: آزمایش هوهن [۹] $\Delta t = 50\text{ms}$ ، ب: شبیه‌سازی کار حاضر $\Delta t = 10\text{ms}$ ، ج: شبیه‌سازی هوهن [۹])



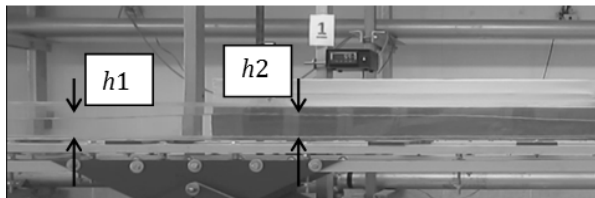
شکل ۵ پدیده بالا آمدگی سطح آب و ارضا ناپایداری کلوین-هلمهولتز

۳- نتایج و بحث

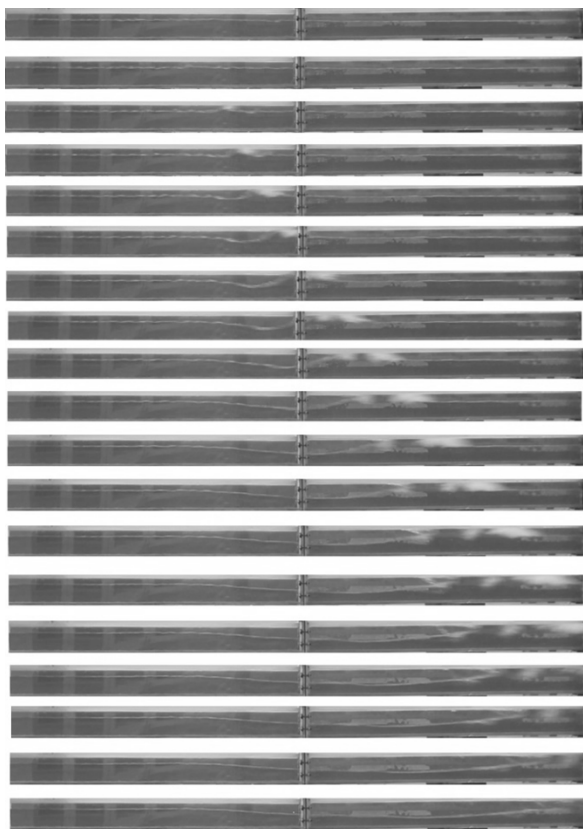
برخی از محققین علی‌رغم مغشوش بودن جریان داخل لوله، شبیه‌سازی عددی آرام را انجام می‌دهند [۸، ۱۸، ۱۹]؛ ولی برای مطالعه دقیق پدیده اسلاگ نیاز است که شبیه‌سازی براساس فیزیک حاکم بر مسئله انجام گیرد؛ بنابراین با توجه به عدد رینولدز بالا، جریان به‌صورت سه‌بعدی و مغشوش



شکل ۸ کانتورهای فشارنسیبی در اسلاگ (Pa)



شکل ۹ بالا آمدگی سطح آب در فاصله دو متری ابتدای کانال [۴]

شکل ۱۰ آغاز و رشد اسلاگ در کانال ($\Delta t = 33\text{ms}$) [۴]

در شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی مغشوش در فاصله ۱/۸ متر تا ۴/۲ متر از ورودی کانال نشان داده شده است که اسلاگ در فاصله ۲/۲ متر از ورودی تشکیل می‌شود که دارای ۲۲ درصد خطا است. برای مشاهده بهتر شرایط ایجاد شده در جریان اسلاگ، سطح مشترک سه‌بعدی آب و هوا در زمان تشکیل و پیشروی اسلاگ در شکل ۱۲ رسم شده است. مشاهده می‌شود که آب در جریان اسلاگ، سطح بالایی کانال را کاملاً تر و مقطع کانال را مسدود کرده است.

در شکل ۱۳ فشار در طول کانال در فاصله ۰/۱ متر از سقف کانال در زمان‌های مختلف در لحظه تشکیل اسلاگ رسم شده است. مشاهده می‌شود که در هر زمان فشار پشت اسلاگ بیشتر از فشار جلو آن است و یک تغییر فشار در مکان اسلاگ رخ داده است و با پیشروی در زمان فشار پشت اسلاگ افزایش می‌یابد و تا حدود ۰/۶۵ اتمسفر می‌رسد.

است و h_2 ارتفاع آب در زمان ۱/۹ ثانیه برابر ۰/۰۷ متر و سرعت هوا و آب به ترتیب ۱۷/۱ متر بر ثانیه و ۱/۴ متر بر ثانیه است.

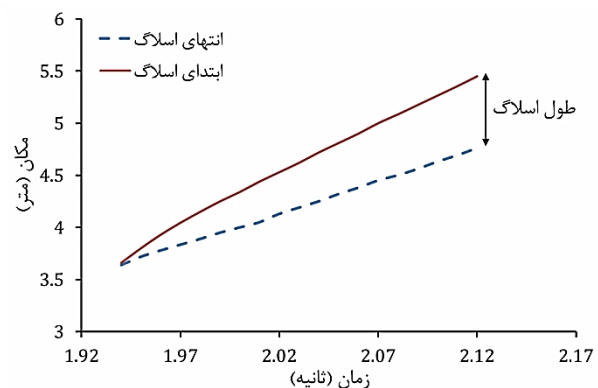
در شکل ۶ بردارهای سرعت در پدیده اسلاگ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در کار حاضر، دو عامل مؤثر در افزایش طول اسلاگ در کانال افقی مشاهده شد. عامل اول، با توجه به بردارهای سرعت مشخص شده با دایره سمت راست در شکل ۶، سبب افزایش طول اسلاگ می‌شود به این ترتیب که فاز مایع از کف کانال به سمت بالا حرکت می‌کند و توده فاز مایع به بالای کانال آمده و طول اسلاگ را افزایش می‌دهد. همچنین بردارهای سرعت در انتهای اسلاگ (دایره سمت چپ در شکل ۶) به سمت پایین متمایل است که این علاوه بر هل دادن آب توسط هوا به سمت جلو، موجب هل دادن آب پشت اسلاگ به سمت کف کانال می‌شود و با اینکار طول اسلاگ کوچک‌تر می‌شود. که سهم افزایش اسلاگ توسط عامل اول بیشتر است. این مورد را می‌توان با رسم مکان ابتدا و انتهای اسلاگ در حال پیشروی نشان داد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود شیب منحنی و در نتیجه سرعت پیشروی ابتدای اسلاگ بیشتر از انتهای آن است.

این نتیجه را می‌توان با مشاهده کانتور فشار نسبی در ناحیه اسلاگ (شکل ۸) نیز بررسی کرد. به طوری که ابتدای اسلاگ گرادین فشار بیشتری نسبت به انتهای اسلاگ وجود دارد و این گرادین شدیدتر سبب حرکت سریع‌تر ابتدای اسلاگ نسبت به انتهای آن شده و این مورد با جاروب مایع جلوی اسلاگ سبب افزایش طول آن می‌شود.

در ادامه، جریان اسلاگ در کانال مستطیلی افقی با سرعت‌های ظاهری ورودی هوا و آب به ترتیب ۵/۷ متر بر ثانیه و ۰/۵۵ متر بر ثانیه و کسر حجمی ۰/۵، شبیه‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی، از نتایج تجربی آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است [۴]. طول کانال ۳۶ متر، ارتفاع ۰/۱ متر و عرض ۰/۰۵ متر است. براساس مشاهدات صورت گرفته، سطح آب در قسمت ورودی کانال کمی بالا می‌آید (شکل ۹) که این مورد سبب افزایش سرعت هوا و تشکیل ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و در نهایت ایجاد اسلاگ در منطقه‌ای که آب بالا آمده می‌شود. شکل ۱۰ تصویر مربوط به کانال در فاصله ۰/۸ متر تا ۳/۲ متر از ورودی کانال را نشان می‌دهد. که محل تشکیل اسلاگ در فاصله ۱/۸ متری از ورودی کانال است و با توجه به شکل با پیشروی اسلاگ طول آن بزرگ‌تر می‌شود.

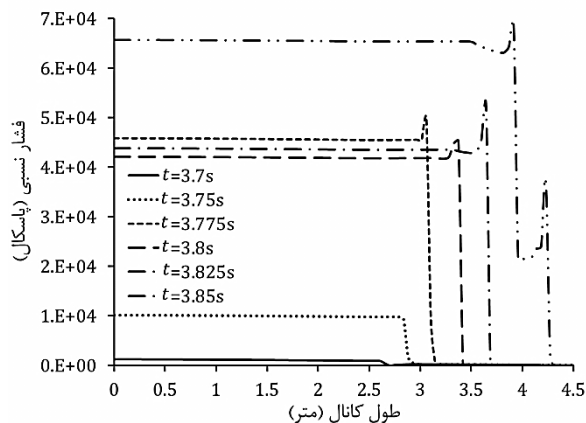


شکل ۶ بردارهای سرعت مایع و گاز در اسلاگ

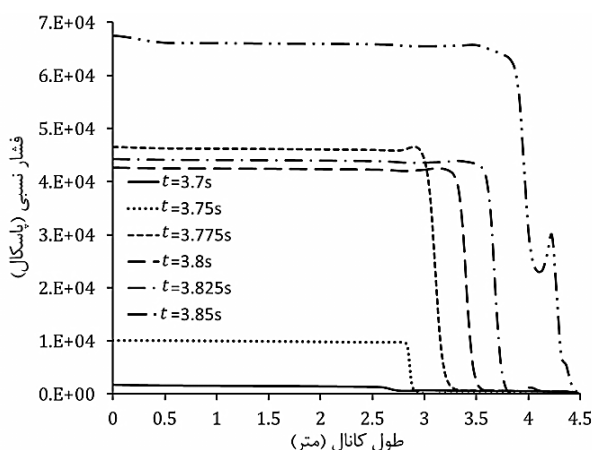


شکل ۷ نمودار مکان ابتدا و انتهای اسلاگ

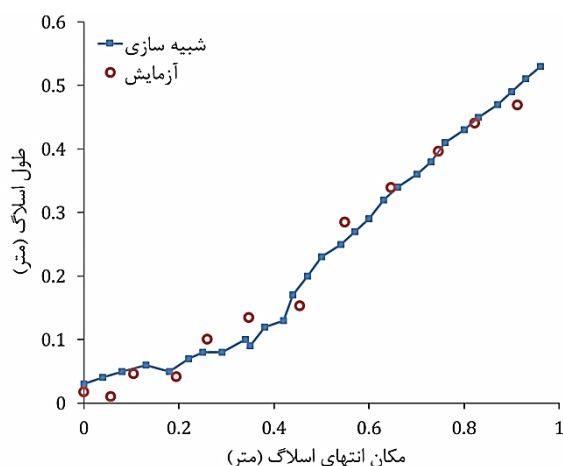
مکان ایجاد اسلاگ نمایان نمی‌شود و صرفاً تغییرات طول اسلاگ بررسی می‌گردد. بدین ترتیب که مبدا محور افقی، نشان‌دهنده محل تشکیل اسلاگ در آزمایش و شبیه‌سازی است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، با تشکیل اسلاگ و پیشروی آن در امتداد کانال، طول اسلاگ افزایش یافته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایش دارد.



شکل ۱۳ نمودار فشار نسبی در هنگام ایجاد اسلاگ در فاصله ۰/۰۱ متر از سقف کانال



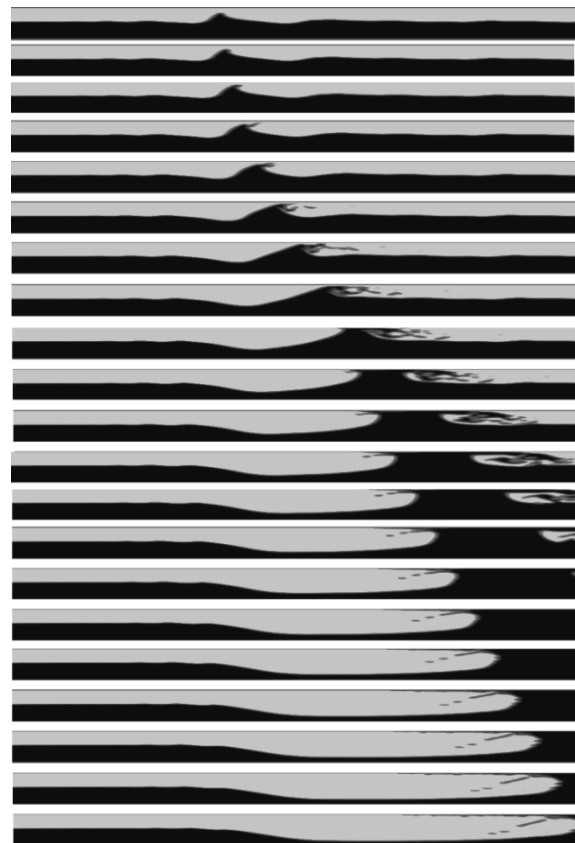
شکل ۱۴ نمودار فشار نسبی در هنگام ایجاد اسلاگ در فاصله ۰/۰۱ متر از کف کانال



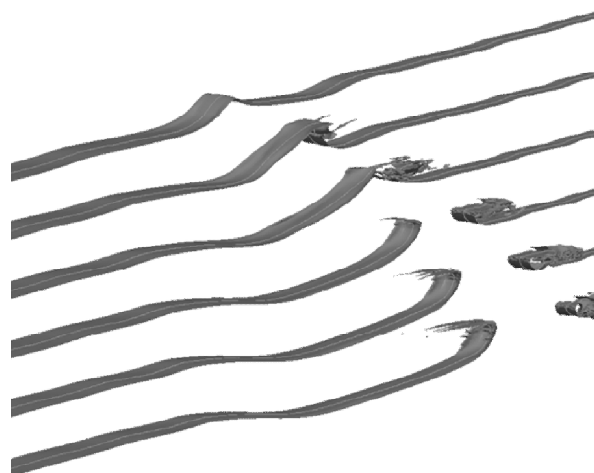
شکل ۱۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش [۴] طول اسلاگ برحسب مکان انتهایی اسلاگ

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، رژیم جریان دوفازی اسلاگ در کانال افقی با مقطع مستطیلی به روش حجم سیال (VOF) در فضای سه‌بعدی و با مدل اغتشاشی $k-\omega$ SST



شکل ۱۱ کانتورهای دوبعدی آغاز و رشد اسلاگ در فاصله ۱/۸ متر تا ۴/۲ متر از ورودی کانال ($\Delta t = 10ms$)



شکل ۱۲ سطح مشترک سه بعدی آب و هوا در آغاز و رشد اسلاگ در فاصله ۱/۸ متر تا ۴/۲ متر از ورودی کانال

در شکل ۱۴ فشار در طول کانال در فاصله ۰/۰۱ متر از کف کانال جایی که فاز مایع وجود دارد در لحظه تشکیل اسلاگ رسم شده است. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود با پیشروی اسلاگ فشار پشت اسلاگ افزایش می‌یابد. با توجه به این که در انتهای کانال، جریان دوفازی به اتمسفر تخلیه می‌شود همواره در قسمت مقابل اسلاگ فشار اتمسفر حاکم می‌باشد در حالی که پس از تشکیل اسلاگ و مسدود شدن مقطع کانال، هوا در پشت اسلاگ فشرده شده و فشار این ناحیه افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۵ طول اسلاگ برحسب مکان انتهایی اسلاگ برای آزمایش [۴] و شبیه‌سازی حاضر رسم شده است. با گزارش نتایج به این صورت خطای

شبیه‌سازی عددی شده است. دو مشخصه مهم جریان اسلاگ یعنی مکان تشکیل و طول آن، مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست آمده، برای شبیه‌سازی اسلاگ و پدیدار شدن ناپایداری‌ها براساس معیار کلون-هلمهولتز نیاز به حل سه‌بعدی مغشوش است. برای رشد ناپایداری‌ها در سطح مشترک دوفاز، سطح آب در ابتدای کانال بالا می‌آید و به موجب آن اسلاگ ایجاد می‌شود. مقدار خطای مکان ایجاد اسلاگ در شبیه‌سازی نسبت به آزمایش [۴]، ۲۲ درصد به‌دست آمد. همچنین مکان آغاز اسلاگ نسبت به آزمایش [۹] با خطای ۵۵٪ پیش‌بینی شد درحالی‌که این خطا در کار عددی [۹] برابر ۱۲۰٪ گزارش شده‌است. طول اسلاگ نسبت به مکان انتهای اسلاگ حاصل از شبیه‌سازی عددی، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی [۴] دارد.

زیرنویس‌ها

g	گاز
l	مایع

۶- مراجع

- [1] O. Baker, Simultaneous flow of oil and gas, *Oil & Gas Journal*, Vol. 53, pp. 185-195, 1954.
- [2] J.M. Mandhane, G.A. Gregory., K. Aziz, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537-553, 1974.
- [3] M. R. Ansari, *Slug mechanism in horizontal duct and simulation based on one-dimensional two-fluid dynamics*, Ph.D. Thesis, Tsukuba University, Japan, 1989.
- [4] P. Adibi, M.R. Ansari, Experimental Investigation of Slug Initiation to Upstream Conditions of Two Phases in Long Horizontal Channels in Two Fluid Flows, *Modares Mechanical Engineering*, In Press. (In Persian)
- [5] M. Rudman, Volume-tracking methods for interfacial flow calculations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 24, pp. 671-691, 1997.
- [6] M.R. Ansari, V. shokri, Numerical modeling of slug flow initiation in a horizontal channels using a two-fluid model, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, pp. 145-155, 2011.
- [7] M. R. Ansari, A. Daramizadeh, Numerical modeling of two-phase slug flow in horizontal and inclined channels using hyperbolic two fluid model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 34-47, 2012. (In Persian)
- [8] S. C.K. De Schepper, G. J. Heynderic kx, G. B. Marin, CFD modeling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by the Baker chart, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, pp. 349-357, 2008.
- [9] T. Hohne, Experiments and numerical simulations of horizontal two-phase flow regimes, In *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Australia, 2009.
- [10] C. Vallee, T. Hohne, H.M. Prasser, T. Suhnel, Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 637-646, 2008.
- [11] C.W. Hirt and B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- [12] H. G. Weller, A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow, Tech. Rep. TR/HGW/07, *OpenCFD Ltd*, 2006.
- [13] M. Worner, Numerical modeling of multiphase flows in microfluidics and micro process engineering: a review of methods and applications, *Microfluidics and Nano fluidics*, Vol. 12, No. 6, pp. 841-886, 2012.
- [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] V. R. Gopala, B. G.M. van Wachem, Volume of fluid methods for immiscible-fluid and free-surface flows, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 141, pp. 204-221, 2008.
- [16] F. R. Menter, M. Kuntz and R. Langtry, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, edited by K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, *Begell House Inc*, pp. 625-632, 2003.
- [17] ANSYS FLUENT User's Guide, ANSYS, Inc, Release 14.0, November 2011.
- [18] L. Guang-yao, W. Jing, J. Zhi-hani, Experimental and numerical investigations on horizontal oil-gas flow, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 19, No. 6, pp. 683-689, 2007.
- [19] A. Parvareh, M. Rahimi, A. Alizadehdakhal, A.A. Alsairafi, CFD and ERT investigations on two-phase flow regimes in vertical and horizontal tubes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 304-311, 2010.
- [20] L. M. Milne-Thomson. *Theoretical Hydrodynamics*. MacMillan, New York, 1963.

۵- علائم

C	کسر حجمی مایع
CD_{ko}	تابع مدل اغتشاشی
F_1	تابع ترکیبی اول
F_2	تابع ترکیبی دوم
F_g	نیروی گرانش (N)
F_s	نیروی کشش سطحی (N)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
h_g	ارتفاع فاز گاز (m)
I	شدت آشفتنگی
k	انرژی جنبشی آشفتنگی (m^2/s^2)
L	قطر هیدرلیکی (m)
l	طول مقیاس آشفتنگی (m)
n	بردار نرمال سطح مشترک
P	فشار (Pa)
P_k	جمله منبع انرژی جنبشی آشفتنگی (m^2/s^3)
Re	عدد رینولدز
S	اندازه‌گیری ثابت از نرخ کرنش
t	زمان (s)
U	مقدار سرعت در ورودی کانال (m/s)
u	سرعت (m/s)
V	بردار سرعت (m/s)
y	فاصله از نزدیک‌ترین دیوار (m)

علائم یونانی

$\kappa(x)$	انحنای سطح مشترک
μ	لزجت سیال ($kg/m.s$)
ν	لزجت سینماتیکی سیال (m^2/s)
ν_T	لزجت سینماتیکی آشفتنگی ($kg/m.s$)
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
σ	ضریب کشش سطحی (N/m^3)
τ	تنش برشی (Pa)
ω	فرکانس آشفتنگی (1/s)