مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 441-452

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی الگوهای جریان دوفازی گاز- مایع همسو رو به بالا در لوله‌های عمودی قطر بزرگ، به روش حجم سیال

سید یوسف عدل جو[1]، محمدرضا انصاری[2*]، محسن زارعی[1]، پیمان رستمی[1]

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

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

* تهران، صندوق‌پستی 14115-111، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 آذر 1395

پذیرش: 14 دی 1395

ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:

جریان دوفازی

لوله‌های عمودی

توزیع کسرحجمی

الگوهای جریان

مدل حجم سیال

چکیده

در مطالعه حاضر به بررسی الگوهای جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله عمودی به قطر داخلی 70 mm پرداخته شده است. سیال‌های دوفازی مورد مطالعه هوا و آب می‌باشند. شبیه‌سازی با نرم افزار متن‌باز اُپن‌فوم انجام شده و از روش تک‌سیالی برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است که در این روش سطح مشترک دوفاز با استفاده از مدل حجم سیال دنبال می‌شود. کارهای انجام شده تاکنون اکثرا به‌صورت آزمایشگاهی بوده و کارهای عددی انجام شده نیز بیشتر برای لوله‌های قطر کوچک بوده است. در شبیه‌سازی عددی انجام شده در کار حاضر، در ورودی سرعت فازهای گاز و مایع ثابت، در خروجی فشار ثابت و روی دیواره‌های لوله شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. تمرکز اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی الگوهای جریان مختلف، براساس تغییر سرعت ظاهری هوا و آب در ورودی لوله می‌باشد. همچنین نمودارهای توزیع چگالی فازها نیز به‌دست آمده‌اند که از بررسی رفتار این نمودارها می‌توان نوع الگوی جریان دوفازی درون لوله را تشخیص داد. محدوده سرعت‌های ظاهری هوا و آب در ورودی لوله مورد بررسی به ترتیب 0.01 – 15 m/s و 0.1 – 1.5 m/s می‌باشد. از تحلیل نتایج؛ چهار الگوی حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی و همچنین دو الگوی فرعی، شبه-حلقوی و حبابی کلاهکی به‌دست آمدند.

Numerical simulation of upward co-current gas-liquid two-phase flow in the vertical pipes of large diameter by volume of fluid method

Seyed Yousef Adljo, Mohammad Reza Ansari*, Mohsen Zarei, Peyman Rostami

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

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, email: mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 November 2016
Accepted 03 January 2017
Available Online 18 January 2017

Keywords:
Two-phase Flow
Vertical Pipes
volume Fraction Distribution
Flow Patterns
VOF Model

ABSTRACT

In the present study, flow regimes of co-current, air-water two-phase flow in a vertical tube with 70 mm internal diameter were investigated. Simulation was accomplished by open source software, OpenFOAM, and One Fluid model has been used to simulate two-phase flow, which in this model, the interface of two-phase flow has been followed by Volume of the Fluid model. Hitherto, most of the researchers conducted experimentally and the researchers in many of the numerical studies just investigated the small tubes. The simulation was investigated according to boundary conditions of the vertical tube. Air and water superficial velocities in inlet and pressure in outlet were constant. Moreover, a no-slip condition in the internal tube walls has been considered. The main purpose of this study is to identify the flow regimes based on the superficial velocities of air and water in the inlet. Moreover, the diagrams of density distributions of phases were obtained with respect to the behavior of each two-phase flow pattern which can be identified. Superficial velocity of air and water were in the range of 0.01-15 m/s and 0.1-1.5 m/s, respectively. By analysis of the results, bubbly, slug, churn and annular regimes as well as, semi-annular and Cap-Bubbly sub-regimes were observed.

1- مقدمه

جریان‌های دوفازی گاز- مایع درون لوله‌ها غالبا در فرایندهای صنعتی مختلف از جمله؛ صنعت نفت، هسته‌ای، پتروشیمی، نیروگاه‌ها، فرایند تبرید و ... مشاهده می‌شوند. این جریان‌ها همچنین در پدیده‌های طبیعی مانند؛ فرو ریختن یک قطره باران، تشکیل ابرها، امواج دریا و ... نیز اتفاق می‌افتند.

با توجه به کاربرد زیاد جریان‌های دوفازی درون لوله‌ها، پیش‌بینی الگوهای جریان در لوله‌ها، اهمیت زیادی در فرایند طراحی لوله دارد، زیرا رفتار جریان دوفازی (مانند افت فشار، ضرایب انتقال جرم و حرارت و ...) با تغییر الگوی جریان تغییرات زیادی می‌کند. بنابراین کارایی فرایندهای صنعتی مورد نظر وابستگی شدیدی به الگوهای جریان دارند [1].

در حالت کلی جریان‌های دوفازی می‌توانند براساس چندین ساختار توپولوژیکی جریان پیدا کنند که به هر یک از آن‌ها الگوی جریان گفته

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Y. Adljo, M. R. Ansari*, M. Zarei, P. Rostami, Numerical simulation of upward co-current gas-liquid two-phase flow in the vertical pipes of large diameter by volume of fluid method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 441-452, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

می‌شود [2]. هر یک از پژوهشگران در زمینه جریان‌های دوفازی براساس اهداف و امکانات موجود خود بر روی یک الگوی جریان یا پدیده خاصی متمرکز شده‌اند.

جهت لوله تاثیر قابل توجهی بر اثر متقابل بین نیروی شناوری، نیروی گرانش، نیروی اینرسی و نیروی کشش سطحی دارد که باعث تغییر در ساختار فیزیکی الگوهای جریان و درنهایت تغییر در مقدار کسر حجمی و افت فشار می‌شود [3]. براساس جهت لوله‌ها می‌توان گفت که جریان دوفازی درون لوله‌های افقی و عمودی کاربرد بیشتری دارند. در پژوهش حاضر الگوهای جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله‌های عمودی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در ادامه به معرفی مختصری از الگوهای مختلف جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله‌های عمودی پرداخته می‌شود. با توجه به سرعت فازهای گاز و مایع درون لوله عمودی الگوهای مختلفی به‌دست می‌آیند که به تعریف چهار الگوی رایج که معمولا مشاهده شده‌اند، اشاره می‌شود.

جریان حبابی[1]: در این الگوی جریان فاز مایع به‌صورت پیوسته و فاز گاز به‌صورت پراکنده (حباب‌های با اندازه‌های مختلف) درون مایع به طرف بالا حرکت می‌کند. سرعت فازها در این نوع جریان به دلیل اختلاف چگالی فازها متفاوت می‌باشد (شکل 1-a).

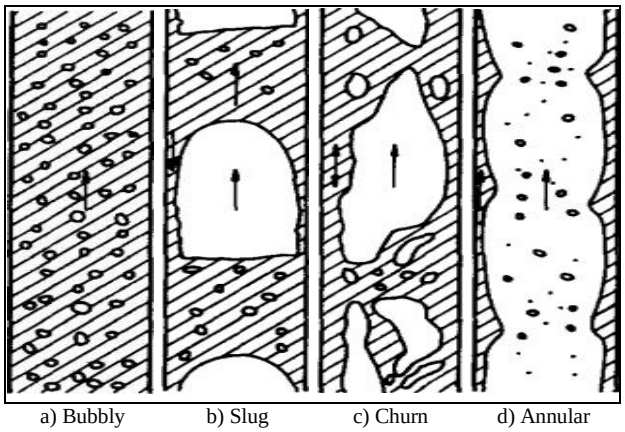
جریان لخته‌ای[2]: در جریان حبابی با افزایش سرعت فاز گاز تعداد حباب‌ها افزایش یافته و از برخورد و به هم پیوستن آن‌ها با یکدیگر حباب‌های بزرگتری به‌وجود می‌آیند که به آن‌ها حباب تیلور می‌گویند. این حباب‌ها در قسمت‌هایی از لوله تمام سطح مقطع لوله را اشغال می‌کنند. این الگوی جریان دارای افت فشار زیاد و همچنین از نظر فرآیندی با ایجاد سر و صداهای ناهنجار و آسیب‌دیدگی تجهیزات همراه است (شکل 1-b).

جریان متلاطم[3]: در جریان لخته‌ای با افزایش سرعت جریان توده‌های گاز شکسته شده و جریان ناپایدار و انتقالی بین دو جریان لخته‌ای و حلقوی شکل خواهد گرفت. در خطوط لوله جریان با قطر زیاد حرکت نوسانی مایع به سمت بالا و پایین رخ می‌دهد درحالی‌که در لوله‌های با قطر کوچک این حرکت نوسانی به وقوع نخواهد پیوست و حرکت انتقالی بین دو نوع جریان لخته‌ای و حلقوی بسیار گذرا خواهد بود (شکل 1-c).

جریان حلقوی[4]: در این الگوی جریان دو فاز گاز و مایع به‌صورت دو استوانه متداخل درون لوله جاری خواهند شد. این نوع جریان وقتی شکل خواهد گرفت که شدت جریان گاز بسیار بالا باشد. در این نوع رژیم فاز گاز به صورت پیوسته است و در مرکز لوله حرکت می کند در ضمن درون فاز پیوسته گاز تعدای قطره‌های مایع وجود دارد و مقداری مایع نیز به صورت فیلم مایع در اطراف دیواره لوله وجود دارد (شکل 1-d).

از نظر علم مهندسی یکی از دشواری‌های بزرگ طراحی در برخورد با جریان های چندفازی این موضوع است که نرخ‌های انتقال جرم، ممنتوم و انرژی کاملاً به توزیع هندسی فازهای جریان وابسته می‌باشد. به عنوان مثال هندسه جریان ممکن است شدیداً سطح فصل مشترک را برای تبادل جرم، ممنتوم و انرژی بین فازها تحت تاثیر قرار دهد. علاوه‌بر این، مولفه‌های جریان (سرعت، فشار، دما و...) در داخل هر فاز به طور واضح به توزیع هندسی فازها وابسته است [4].

بنابراین برای تامین بازدهی بالا در فرایندهای جریان دوفازی در صنعت نیاز به شناخت و بررسی دقیق الگوهای جریان دوفازی می‌باشد. درون



a) Bubbly b) Slug c) Churn d) Annular

Fig. 1 Co-current Two-Phase flow patterns in vertical pipes[6]

شکل 1 الگوهای جریان دوفازی همسو درون لوله‌های عمودی [5]

لوله‌های عمودی با توجه به جهت جریان فازها که به دو صورت همسو و غیرهمسو می‌باشد، الگوهای جریان مختلفی مشاهده می‌شود. در این پژوهش به بررسی جریان دوفازی هوا و آب به صورت همسو و از پایین به بالا، درون یک لوله عمودی پرداخته شده است.

در کل برای تشخیص الگوهای جریان دوفازی و گذر بین آن‌ها درون لوله ها سه روش وجود دارد که عبارتند از: 1- روش‌های ذهنی[5]: که اغلب براساس مشاهدات چشمی و تصویربرداری از پدیده‌های مختلف و استفاده از دستگاه‌ها و حسگرهای اندازه‌گیری انجام می‌شود، به‌عبارتی همان روش آزمایشگاهی می‌باشد. 2- روش‌های تئوری: در این روش‌ها، پژوهشگران سعی در استخراج روابطی دارند که بتوانند محدوده وسیع‌تری از شرایط جریانی را بدون نیاز داشتن به امکانات آزمایشگاهی تفسیر و گذر بین الگوهای جریان را پیش‌بینی کنند. 3- روش‌های شیءگرا[6]: این روش از الگوریتم‌ها و چارچوب‌هایی برای تشخیص استفاده می‌کند که دخالت درک ذهنی پژوهشگر در آن حداقل است و سیستم هوشمند کامپیوتری براساس اطلاعات دریافتی به الگوبندی می‌پردازد، به‌عبارتی روش شیءگرا همان روش عددی می‌باشد.

ابتدا به مروری بر پیشینه کارهای آزمایشگاهی انجام شده برای جریان‌های دوفازی درون لوله‌های عمودی پرداخته می‌شود. یکلن و دیویدسون [6]، آزمایش‌هایی در یک لوله به قطر 26 mm، برای جریان دوفازی هوا و آب در حالت همسو انجام دادند. آن‌ها پنج الگوی جریان حبابی، لخته‌ای، شبه‌حلقوی، حلقوی و جریان مه‌آلود[7] را مشاهده کردند.

اشمیت و همکاران [7]، آزمایش‌های خود را برای مایعات با لزجت بالا و آب در لوله‌ای به قطر 54.5mm انجام داده‌اند که چهار الگوی جریان حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی را مشاهده کرده‌اند.

مایو و داکلر [8]، وجود الگوی جریان کف‌آلود درون لوله‌ای به قطر داخلی 50.6 mm عمودی را بررسی کرده و به چالش کشیدند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جریان کف‌آلود فقط حالت کشیده شده جریان لخته‌ای می‌باشد.

زیهو و همکاران [9]، با استفاده از اعمال توابع توزیع احتمال[8] روی سیگنال‌های پراب نوری، الگوهای جریان را در یک جریان دوفازی از هم تشخیص دادند. برای یک جریان دوفازی هوا و آب در یک لوله به قطر 50 mm چهار الگوی جریان حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی را مشاهده کردند.

انصاری و آزادی [10]، الگوهای جریان رو به بالا درون لوله‌های عمودی

[1] Bubbly
[2] Slug
[3] Churn
[4] Annular

[5] Subjective
[6] Objective
[7] mist flow
[8] probability density function

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

در حالت جریان موازی، برای جریان دوفازی هوا و آب را در قطرهای 40 mm و 70 mm بررسی کردند که برای لوله 40 mm الگوهای حبابی، لختهای، متلاطم و حلقوی و برای لوله 70 mm الگوهای حبابی، لختهای، متلاطم، شبه حلقوی و حلقوی شناسایی شدند.

اشلیگل و همکاران [11]، تغییرات کسرحجمی و الگوهای جریان را برای جریان دوفازی گاز- مایع رو به بالا درون لوله عمودی به قطر 150 mm، به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در لوله‌های قطر بزرگ حباب تیلور دیده نمی‌شود و رفتار جریان نسبت به لوله‌های کوچک مقیاس متفاوت است. در این تحقیق مقادیر کسرحجمی با استفاده امپدانس‌های[1] الکتریکی در چهار نقطه، در راستای محور لوله اندازه‌گیری شده‌اند. از تغییرات مربوط به سیگنال‌های کسرحجمی، با استفاده از تابع چگالی احتمال تجمعی[2] برای تشخیص الگوهای جریان استفاده شده است. آن‌ها از بررسی سیگنال‌های دریافتی توزیع احتمال چگالی فازها (کسرحجمی فازها)، نمودارهای تغییرات کسرحجمی مربوط به الگوهای حبابی، حبابی-کلاهکی(حباب تیلور کوچک) و متلاطم را مطابق "شکل 2" ارائه کردند. نمودارهای "شکل 2" با این فرض که مقدار کسرحجمی برای آب $\alpha=0$ و برای هوا $\alpha=1$ است، رسم شده‌اند.

از مرور ادبیات و تاریخچه الگوهای جریان دوفازی در لوله‌های عمودی، مشاهده می‌شود که روی تعریف تعداد الگوهای جریان عدم توافق وجود دارد. تعدادی از الگوهای جریان دوفازی مهم درون لوله‌های عمودی هنوز نهایی نشده است. برخی محققان فقط چهار الگوی جریان دوفازی را تشخیص داده‌اند، در حالی که بعضی دیگر بیش از هفت الگوی جریان دوفازی همسو به سمت بالا را درون لوله‌های عمودی مشاهده کرده‌اند. یک توافق کلی روی وجود الگوهای حبابی، لختهای و حلقوی وجود دارد، ولی در بیشتر مواقع الگوهای جریان دوفازی لختهای، متلاطم و کف‌آلود[3] با هم به‌عنوان الگوی لختهای یا متلاطم شناخته می‌شوند.

در ادامه به مروری بر پیشینه مطالعات تئوری انجام شده روی جریان‌های دوفازی پرداخته خواهد شد. در روش‌های تئوری، روابط برمبنای تئوری برای لوله‌هایی با مقیاس کوچک و یا بزرگ گسترش پیدا کرده‌اند که تعریف مقیاس در هر حالت براساس معیاری است که به خواص فیزیکی جریان وابسته است.

به‌طورکلی لوله‌ها را به دو دسته کوچک و بزرگ تقسیم‌بندی می‌کنند، که لوله‌هایی کوچک مقیاس نامیده می‌شوند که در رابطه (1) صدق کنند [12].

$$D \le \frac{19}{\rho_L}\sqrt{\frac{\sigma(\rho_L-\rho_G)}{g}} \qquad (1)$$

در رابطه (1)، D قطر داخلی لوله، σ ضریب کشش سطحی بین دو فاز، g شتاب گرانشی و ρ_L و ρ_G به‌ترتیب چگالی فازهای مایع و گاز هستند. برای فاز مایعِ آب و فاز گازِ هوا در شرایط محیط (دمای 25 °c و فشار 1 atm) ضریب کشش سطحی برابر با 0.072 N/m، چگالی آب برابر $997\ kg/m^3$ و چگالی هوا دارای مقدار $1.184\ kg/m^3$ می‌باشد، بنابراین برای جریان دوفازی هوا و آب لوله‌هایی با قطر داخلی کم‌تر از 50 mm جزء لوله‌های کوچک و لوله‌های با قطر بیش‌تر از 50 mm جزء لوله‌های بزرگ به حساب می‌آیند.

تایتل و همکارانش [12]، روابطی تئوری ارائه کردند که گذر بین این الگوها را پیش‌بینی می‌کنند. جهت صحت‌سنجی روابط، این پژوهشگران نتایج آزمایشگاهی خود را برای لوله‌های کوچک مقیاس به قطرهای داخلی 25 mm و 50 mm ارائه کردند که نتیجه کار آن‌ها به‌صورت چند رابطه ارائه شده است. منحنی‌گذر از الگوی حبابی به الگوی لختهای از رابطه (2) بدست می‌آید.

$$U_{SL} = 3U_{SG} - G.15\left[\frac{\sigma(\rho_L-\rho_G)g}{{\rho_L}^2}\right] \qquad (2)$$

که در آن U_{SL} و U_{SG} به ترتیب سرعت ظاهری فاز مایع و گاز هستند. آن‌ها برای گذر از الگوی لختهای به متلاطم رابطه (3) را پیشنهاد دادند.

$$\frac{L_E}{D} = 40.6\left[\frac{U_M}{\sqrt{gD}} + 0.22\right] \qquad (3)$$

در رابطه (3) U_M سرعت جریان دوفازی می‌باشد که برابر مجموع سرعت ظاهری فاز مایع و گاز است. و L_E نیز برابر طول ورودی در جریان متلاطم است، قبل از این‌که حباب تیلور پایداری در جریان پایین دست مشاهده شود.

و درنهایت گذر از الگوی متلاطم به حلقوی را با رابطه (4) پیش‌بینی کردند:

$$\frac{U_{SG}(\rho_G)^{1/2}}{(\sigma(\rho_L-\rho_G)g)^{1/4}} = 3.1 \qquad (4)$$

تایتل و همکارانش نتایج روابط تئوری خود را با نتایج آزمایشگاهی موجود برای جریان‌های دوفازی مقایسه کردند که نتایج روابط تئوری برای گذر از الگوی حبابی به لختهای و از الگوی لختهای به متلاطم با نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی ندارند، ولی رابطه گذر از الگوی متلاطم به حلقوی با نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی دارد.

تاکنون مروری بر پیشینه کارهای آزمایشگاهی و تئوری برای جریان‌های دوفازی انجام شد، در ادامه به چند مورد از کارهای عددی انجام شده در زمینه جریان‌های دوفازی اشاره خواهد شد.

دانگان ژنگ و همکاران [13]، خصوصیات هیدرودینامیک یک جریان دوفازی گاز- مایع را درون لوله عمودی به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند.

برای این شبیه‌سازی عددی از روش حجم سیال استفاده کرده‌اند. آن‌ها بیان کردند که خصوصیات هیدرودینامیکی یک جریان دوفازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر نیروهای اینرسی، ویسکوزیته و سطحی قرار می‌گیرند.

پیامانفیرا و همکارانش [14]، جریان حبابی دوفازی گاز- مایع را با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی[4] شبیه‌سازی کردند. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی رفتار جریان در حال جوشش در راکتورهای هسته‌ای بود. برای شبیه‌سازی این تحقیق از نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم استفاده شده است.

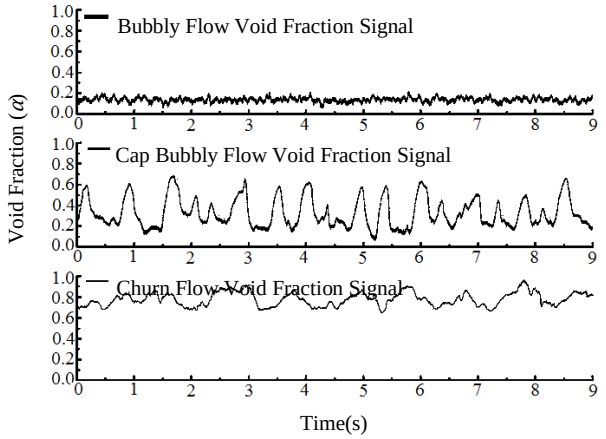


Fig. 2 Sample void fraction signals from impedance probe[20]

شکل 2 سیگنال‌های کسرحجمی حاصل از پراب امپدانسی [11]

[1] Impedance
[2] Cumulative Probability Density Function
[3] forth
[4] Eulerian-Lagrangian

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

انصاری و همکاران [15]، الگوی جریان دوفازی لخته‌ای را در کانالی افقی با مقطع مستطیلی به‌روش حجم سیال شبیه‌سازی کرده‌اند، که شبیه‌سازی مطابق با شرایط آزمایشگاهی انجام شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، تشکیل ناپایداری‌ها براساس معیار کلوین- هلمهولتز و تشکیل الگوی لخته‌ای در حل سه‌بعدی در حالت مغشوش دیده می‌شود. همچنین در این شبیه‌سازی مشاهده شد که با تشکیل الگوی لخته‌ای و مسدود شدن مقطع کانال توسط فاز مایع، فشار پشت حباب تیلور به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

پورایوسفی و همکارانش [16]، الگوهای جریان دوفازی درون لوله‌های عمودی را با استفاده از روش منطق فازی و الگوریتم ژنتیک بررسی کردند. و یکی از نتایج این کار این بود که مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ نسبت به سایر مدل‌های توربولانسی جواب دقیق‌تری می‌دهد.

برای بررسی عددی جریان های دوفازی دو دیدگاه کلی اویلرین- اویلرین و اویلرین- لاگرانژین وجود دارد. در روش اویلرین مختصات مکان و زمان به‌صورت متغیرهای ناپیوسته در نظر گرفته می‌شوند و فاز پیوسته و فاز گسسته در جریان دوفازی به‌عنوان یک سیال پیوسته با خواص مشخص توصیف می‌شوند. اساس کار روش اویلرین این است که هر دو فاز جریان به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند، در این روش کسرحجمی هر فاز به‌دست می‌آید و معادله پیوستگی برای هر فاز حل می‌شود. از روش لاگرانژین زمانی استفاده می‌شود که رفتار یک ذره مدنظر باشد و مجموعه‌ای از ذرات مدنظر نیست [17]. در تحقیق حاضر، سیالات مورد بررسی، یعنی هوا و آب درون لوله عمودی به‌صورت فازهای پیوسته می‌باشند، بنابراین جریان دوفازی مورد مطالعه به‌صورت اویلرین در نظر گرفته می‌شود.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تعیین الگوهای جریان دوفازی گاز- مایع همسو درون لوله‌های عمودی با قطرهای مختلف انجام شده، که البته اکثر این مطالعات به‌صورت آزمایشگاهی بوده و کمتر به‌صورت عددی رفتار الگوهای جریان دوفازی درون لوله های عمودی قطر بزرگ، بررسی شده است. بیشتر پژوهش‌های عددی نیز در قطرهای پایین یا با تمرکز بر یک الگوی جریان بوده، البته در موارد اندکی نیز چند الگوی جریان شبیه‌سازی شده است [18]. در پژوهش حاضر مطالعه عددی برای لوله قطر بزرگ انجام شده و تمام الگوهای جریان شبیه‌سازی و بررسی شده‌اند. بنابراین یکی از جنبه‌های جدید کار حاضر این است، که همه الگوهای جریان به درستی شبیه‌سازی شده‌اند.

در کار حاضر پارامترهای مهم جریان (توزیع کسرحجمی فازها، افت فشار جریان دوفازی) در طی مسیر لوله اندازه‌گیری، رسم و تجزیه و تحلیل شده‌اند. از تحلیل داده‌های مربوط به کسرحجمی فازها در طول جریان، نمودارهای مربوط به توزیع چگالی فازها رسم شده‌اند، که با استفاده از بررسی تغییرات مربوط به نمودارهای توزیع چگالی (کسرحجمی) فازها، نوع الگوهای جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله قابل شناسایی هستند، که تاکنون این موضوع کمتر کار شده است. از دیگر نوآوری‌های کار حاضر این است که، بدون مشاهده جریان درون لوله، با اندازه‌گیری توزیع کسرحجمی در طول جریان، می‌توان نوع الگوی جریان درون لوله را تشخیص داد. بنابراین از آن‌جا که رفتار جریان (سرعت، فشار، دما و ...) به الگوی جریان بسیار وابسته است، با شناسایی الگوی جریان، می‌توان ایمنی سیستم حاوی جریان دوفازی را تامین کرد.

2- مدل سازی عددی

در تحقیق حاضر جریان دوفازی هوا و آب درون لوله‌ای عمودی به قطر 70 mm به‌صورت غیرقابل تراکم، هم‌دما و مخلوط نشدنی شبیه‌سازی شده است. از جمله مشکلات شبیه‌سازی جریان دوفازی وجود سطح مشترک بین دو فاز است. برای دنبال کردن سطح مشترک جریان‌های دوفازی، روش‌های حجم سیال[1]، لول ست[2] و ردیابی جلو[3] وجود دارند که هر سه روش برای سیالات تراکم‌ناپذیر فرمول‌بندی شده‌اند. در کار حاضر سطح مشترک دو فاز به روش حجم سال شبیه‌سازی می‌شود که از دلایل استفاده از این روش می‌توان به ساده‌تر بودن این روش نسبت به دیگر روش‌ها اشاره کرد. همچنین روش حجم سیال، بقای جرم را نسبت به دیگر روش‌ها بهتر حفظ می‌کند [19]. در ادامه، ابتدا معادلات حاکم بر جریان دوفازی و سپس هندسه جریان و شرایط مرزی مساله بیان شده‌اند.

2-1- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله عمودی استفاده شده است. مدل حجم سیال قابل استفاده برای مدل‌سازی دو یا چند سیال مخلوط نشدنی با حل یک مجموعه معادلات شامل معادله مومنتوم، پیوستگی و ردیابی سطح مشترک برای هر کدام از فازها در کل دامنه می‌باشد. پیش‌بینی حرکت حباب‌های بزرگ در یک مایع و ردیابی سطح مشترک جریان گاز- مایع در حالت پایا یا گذرا ، از کاربردهای اصلی روش حجم سیال می‌باشد. در این روش در هر سلول محاسباتی به ازای هر فاز که اضافه گردد، یک معادله جابه‌جایی کسر حجمی نیز اضافه می‌شود که مجموع کسر حجمی فازهای جریان در هر سلول محاسباتی برابر یک می‌باشد. معادلات استفاده شده در روش حجم سیال برای جریان دوفازی به ترتیب زیر می باشند.

معادله پیوستگی: با فرض عدم وجود چشمه[4] و انتقال جرم بین دو فاز گاز و مایع، معادله پیوستگی جریان به صورت رابطه (5) می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho v)=0 \tag{5}$$

که در آن ρ چگالی و v سرعت مخلوط سیال است. با فرض تراکم‌ناپذیر بودن فازها معادله پیوستگی به‌صورت رابطه (6) بازنویسی می‌شود [20].

$$\nabla\cdot v=0 \tag{6}$$

معادله‌ی مومنتوم به‌صورت رابطه (7) است [20].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu[\nabla\vec{v}+(\nabla\vec{v})^{T}])+\rho g+F_s \tag{7}$$

نیروی F_s که به‌عنوان جمله منبع به معادله مومنتوم اضافه شده، ناشی از کشش سطحی در سطح مشترک دوفاز است که با استفاده از قضیه دیورژانس[5] می‌توان آن را به‌عنوان نیروی حجمی و به‌صورت رابطه (8) تعریف می‌شود.

$$F_s=\sigma k\nabla\alpha \tag{8}$$

σ کشش سطحی روی سطح مشترک است که در جهت عمود بر سطح محاسبه می‌شود. k انحنای سطح مشترک است که به‌صورت رابطه (9) بیان می‌شود:

$$k=\nabla\cdot\left(\frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|}\right) \tag{9}$$

معادله بقای کسر حجمی نیز در مدل حجم سیال به صورت رابطه (10) است.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\nabla\cdot(v\alpha)=0 \tag{10}$$

[1] Volume Of Fluid(VOF)
[2] Level-Set
[3] Front-tracking
[4] Source term
[5] Divergence

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

خواص جریان دوفازی، مانند چگالی و لزجت مطابق رابطه (11) محاسبه می‌شوند.

$$\beta(x,t)=\beta_L\alpha+(1-\alpha)\beta_G \quad (11)$$

آلفا (α)[1] یک پارامتر اسکالر است که معرف کسرحجمی جریان دوفازی در هر سلول محاسباتی می‌باشد. اگر سلول فقط حاوی فاز مایع باشد $\alpha = 1$ و اگر فقط حاوی فاز گاز باشد $\alpha = 0$ است. همچنین اگر سلول حاوی سطح مشترک دو فاز باشد مقدار کسر حجمی $0 < \alpha < 1$ می‌باشد [21]. از آن‌جا که در کار حاضر مقدار $\alpha = 1$ مربوط به فاز مایع می‌باشد، بنابراین در ارائه نتایج منظور از آلفا، کسرحجمی فاز مایع می‌باشد.

با محاسبه عدد رینولدز دو فاز مایع و گاز در ورودی لوله می‌توان فهمید، که در اکثر الگوهای جریان مقدار آن از 2300 که مقدار بحرانی برای جریان درون لوله است، بیشتر می‌باشد. بنابراین جریان در اکثر مواقع مغشوش است که نیاز به استفاده از یک مدل توربولانسی می‌باشد. در این پژوهش به دلیل غیرچرخشی بودن جریان و این‌که در بعضی الگوها عدد رینولدز خیلی بزرگ می‌شود از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ استفاده شده است. همچنین مدل $k-\varepsilon$ معمولا برای جریان‌های اویلری و روش حجم سیال استفاده می‌شود [22,21].

حلگر استفاده شده برای مساله مورد مطالعه اینترفوم[2] می‌باشد، این حلگر جز حلگرهای جریان چندفازی در نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم می‌باشد که در آن انتقال حرارت و انتقال جرم در نظر گرفته نمی‌شود. در این حلگر از روش حجم سیال برای دنبال کردن سطح مشترک دوفاز استفاده می‌شود. با توجه به پایه و اساس نرم‌افزار اپن‌فوم؛ الگوریتم ردیابی سطح مشترک (مدل حجم سیال) در حلگر اینترفوم به عدد کورانت بسیار حساس است. بنابراین برای جریان‌های دوفازی طبق راهنمای نرم‌افزار توصیه می‌شود که مقدار عدد کورانت کمتر از 0.5 باشد، همچنین مطالعه کارهای گذشته، نشان می‌دهند که شبیه‌سازی دقیق سطح مشترک جریان دوفازی و پایداری روند حل مسئله، نیازمند عدد کورانت کوچکتر از 1/3 می‌باشد که در پی آن گام زمانی بسیار کوچک می‌شود [23]. در شبیه‌سازی حاضر عدد کورانت برابر 0.3 در نظر گرفته شده است.

عدد کورانت یک گروه بی‌بعد است که برای تنظیم کردن گام زمانی اسفاده می‌شود. مقدار عدد کورانت مطابق رابطه (12) محاسبه می‌شود که مقدار کم عدد کورانت، باعث می‌شود گام زمانی کوچک‌تر شود [24].

$$\mathrm{Co} = \frac{\Delta t|U|}{\Delta x} \quad (12)$$

که Δt گام زمانی و Δx اندازه سلول و U سرعت جریان در آن سلول می‌باشد.

در سرعت‌های بالا ورودی جریان گام زمانی خیلی کوچکتر می‌شود و این باعث می‌شود که زمان حل خیلی طولانی شود. در حلگر استفاده شده کوپلینگ بین سرعت و فشار با استفاده از روش پیمپل[3] حل می‌شود که روش پیمپل ترکیبی از روش سیمپل[4] و پیزو[5] می‌باشد [25]. الگوریتم پیمپل شامل دو حلقه داخلی و خارجی می‌باشد که در حلقه داخلی فقط معادله پیوستگی حل می‌شود درحالی که در حلقه خارجی همه معادلات جریان حل می‌شوند.

2-2- هندسه مساله و شرایط مرزی و اولیه

در کار حاضر هندسه جریان دوفازی هوا- آب درون لوله عمودی به قطر داخلی 70 mm، به‌صورت سه‌بعدی، در نرم‌افزار اپن‌فوم شبیه‌سازی شده است.

[1] Alpha
[2] InterFoam
[3] PIMPLE
[4] SIMPLE
[5] PISO

در هندسه مورد بررسی مطابق "شکل 3"، هوا و آب از ورودی‌های حلقوی شکل، (مشابه نمونه کار آزمایشگاهی انجام شده در دانشگاه تربیت مدرس [10]) وارد لوله می‌شوند. مقطع ورودی لوله طوری است که هوا از مرکز لوله به قطر 38 mm و اطراف آن آب وارد می‌شود.

در حالت اولیه، لوله پر از آب در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه انتخابی کسرحجمی در ورودی لوله برای هوا و آب به‌ترتیب برابر $\alpha_G = 0.2947$ و $\alpha_L = 0.7053$ می باشد. شرایط مرزی مساله روی مرزهای مختلف جریان مطابق جدول 1 معرفی شده‌اند.

شرایط مرزی برای مدل توربولانسی در ورودی برای شدت توربولانسی[6] (I)، انرژی جنبشی ناشی از اغتشاش[7] (K) و انرژی تلفاتی[8] (ε) جریان به ترتیب از روابط (13)، (14) و (15) به‌دست می‌آیند.

$$I = \frac{0.16}{(\mathrm{Re}^{1/8})} \quad (13)$$

$$K = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{{c_{\mu}}^{0.75}k^{1.5}}{\mathrm{mixingLenght}} \quad (15)$$

در روابط (13) و (14)، Re معرف عدد رینولدز دوفازی و c_{μ} ثابت تجربی است که مقدار آن برابر 0.09 می‌باشد. در رابطه (15) مخرج کسر معرف طول اختلاطی است. در جریان داخل لوله معمولا طول اختلاطی در حدود 7% قطر هیدرولیکی لوله در نظر گرفته می‌شود و از طریق رابطه (16) به‌دست می‌آید.

$$\mathrm{mixingLenght} = 0.07 \times D_h \quad ; \quad D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (16)$$

که A سطح مقطع تر شده و P_w محیط تر شده است.

3-2- شبکه‌بندی هندسه جریان و استقلال حل از شبکه

برای به‌دست آوردن الگوهای جریان دوفازی و بررسی رفتار جریان، نیاز به شبکه‌بندی مناسب هندسه جریان هست، طوری‌که تغییرات سطح مشترک دو فاز را به خوبی نشان دهد و در هر ناحیه الگوی موردنظر را پیش‌بینی کند. شبکه‌بندی هندسه لوله مورد مطالعه در کار حاضر، مطابق "شکل 4" نمایش داده شده است.

جهت بررسی استقلال حل از شبکه و پیدا کردن تعداد سلول‌های بهینه مورد نیاز، چهار شبکه به تعداد 116250، 235000، 465000 و 930000 که

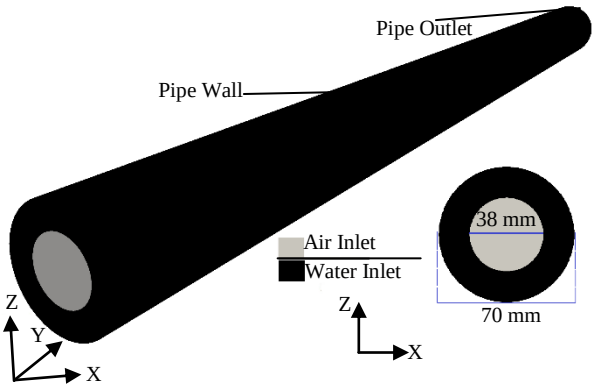


Fig 3 Geometry of pipe which has been studied in the present work

شکل 3 هندسه لوله مورد بررسی در کار حاضر

[6] Turbulence intensity
[7] Turbulence kinetic energy
[8] Energy losses

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

جدول 1 شرایط مرزی مختلف روی مرزهای جریان درون لوله

Table 1 Different boundary conditions on the boundaries of the pipe

	سرعت (m/s)	فشار (Pa)	کسر حجمی
ورودی هوا	مقدار ثابت	گرادیان ثابت	مقدار ثابت
ورودی آب	مقدار ثابت	گرادیان ثابت	مقدار ثابت
دیواره لوله	مقدار صفر	گرادیان صفر	گرادیان صفر
خروجی	مقدار داخل جریان	فشار اتمسفر	گرادیان صفر

در هر مرحله تعداد مش‌ها به‌صورت تصاعدی 2 برابر شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. مطابق "شکل 5" کانتورهای کسر حجمی نشان می‌دهند که شبکه‌های 465000 و 930000 به خوبی، ناپایداری‌های کلوین هلمولتز در سطح مشترک دو فاز را پیش‌بینی می‌کنند که در حالت واقعی، در کارهای آزمایشگاهی جریان دوفازی نیز این ناپایداری‌ها وجود دارند. همچنین مطابق "شکل 6" با ریز کردن شبکه از 465000 به 930000 نمودارهای کسرحجمی تغییر چندانی ندارند. از آن‌جا که مقدار عدد کورانت کوچک است، اگر اندازه سلول‌ها نیز خیلی کوچک شود، گام زمانی مساله نیز بسیار کوچک می‌شود که باعث می‌شود هزینه محاسباتی بسیار زیاد شود و زمان اجرای برنامه بسیار طولانی گردد، بنابراین جهت بهینه‌سازی زمانی و هزینه محاسباتی، شبکه با تعداد 465000 سلول به‌عنوان شبکه بهینه برای ادامه حل انتخاب شده است.

2-4- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

برای مشاهده الگوهای مختلف جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله مورد مطالعه، شبیه‌سازی عددی انجام شده برای سرعت‌های ظاهری مختلف هوا و آب انجام شده است. از روی "شکل 7"، حدود 100 نقطه شبیه‌سازی شدند و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند تا الگوهای مختلف مشاهده شوند که در تحقیق حاضر نتایج مربوط به تعداد نقاط محدود و مشخص از نقشه الگوی جریان، به‌طوری که همه الگوهای جریان مشاهده شوند، ارائه می‌گردند. سرعت‌های انتخاب شده ورودی هوا و آب برای کار حاضر، مطابق "شکل 7" از روی نقشه الگوی جریان به‌دست آمده در کار آزمایشگاهی مشابه [10]، نشان داده شده‌اند.

جهت بررسی اعتبار شبیه‌سازی عددی انجام شده، نتایج الگوهای مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود برای لوله مشابه به قطر 70 mm و نوع ورودی یکسان، مقایسه شده‌اند. مطابق "شکل 8" نتایج آزمایشگاهی بدست آمده توسط انصاری و همکارن [10]، برای الگوهای جریان دوفازی هوا و آب در یک لوله به قطر 70 mm با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر برای لوله‌ای با قطر مشابه مقایسه شده‌اند. تشابه بین الگوهای جریان به‌دست آمده در شبیه‌سازی حاضر، با الگوهای به‌دست آمده از کار آزمایشگاهی، می‌تواند صحت‌سنجی خوبی برای کار عددی حاضر باشد.

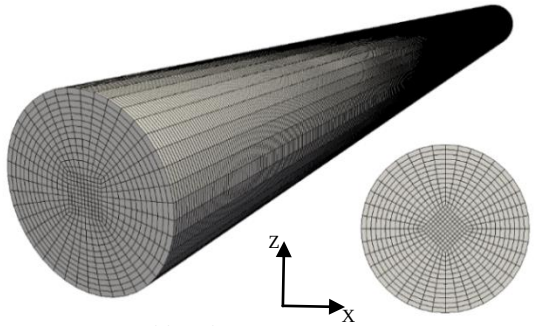
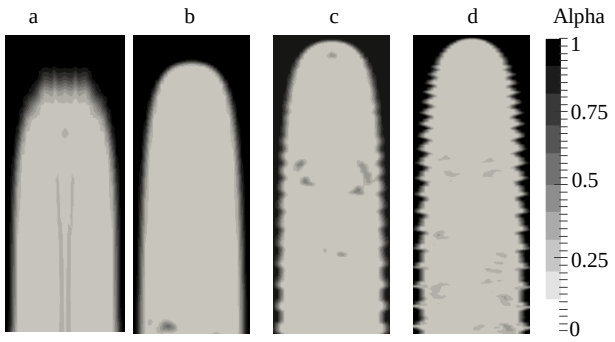


Fig 4 Grid geometry of flow field

شکل 4 شبکه‌بندی هندسه جریان



a)Grid-116250 b)Grid_232500 c)Grid_465000 d)Grid_930000

Fig. 5 Grid independency considering contours

شکل 5 کانتورهای بررسی استقلال حل از شبکه

3- نتایج و بحث

تاکنون مطالعات زیادی روی جریان‌های دوفازی گاز- مایع درون لوله‌ها انجام شده است که اکثر کارهای انجام شده درون لوله‌های عمودی به‌صورت آزمایشگاهی و در لوله‌های قطر کوچک می‌باشند. مرور ادبیات جریان دوفازی نشان می‌دهد که کمتر به‌صورت عددی همه الگوهای مختلف جریان دوفازی درون لوله‌های عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش هوا و آب به‌عنوان دو فاز گاز و مایع فرض شده‌اند و به‌صورت همسو از پایین به بالا وارد لوله می‌شوند. محدوده سرعت های ظاهری بررسی شده در ورودی لوله برای هوا و آب به‌ترتیب برابر 15 m/s - 0.015 و 1.5 m/s – 0.1 می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد برای لوله‌ای به قطر 70 mm محدوده‌ای که الگوی لخته‌ای مشاهده می‌شود بسیار کم است و همچنین الگوی حبابی ریز فقط در سرعت‌های بالای فاز آب دیده می‌شود که این نتیجه در کار آزمایشگاهی در لوله با قطر مشابه نیز دیده شده است.

برای به‌دست آوردن نتایج از رایانه‌ای با 8 پردازنده موازی 2.8 گیگاهرتز استفاده شده است. در این شبیه‌سازی عددی، گام زمانی متغیر با عدد کورانت، سایز شبکه و سرعت جریان می‌باشد که مقدار آن حدود 5×10^{-6} s می‌باشد.

چون مقدار گام زمانی بسیار کوچک است، زمان اجرای بعضی از نتایج

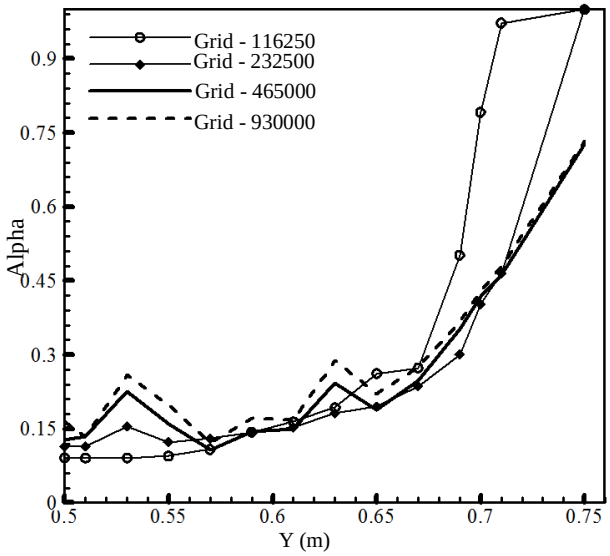


Fig. 6 Grid independency considering diagrams

شکل 6 نمودارهای بررسی استقلال حل از شبکه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

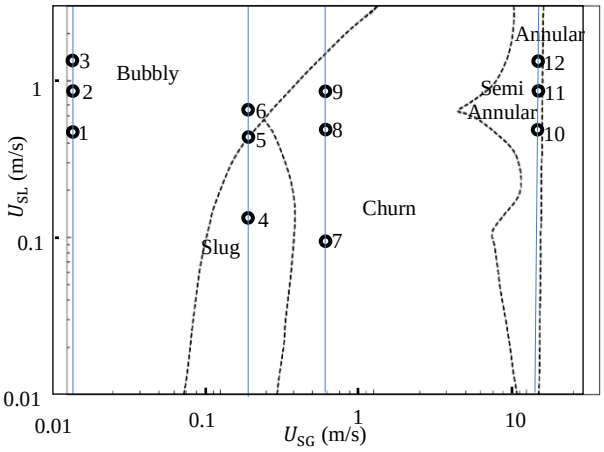


Fig. 7 Flow map pattern obtained from experimental work for air and water two-Phase flow in vertical pipe with diameter of 70mm[10]

شکل 7 نقشه الگوی جریان به‌دست آمده از کار آزمایشگاهی برای جریان دوفازی هوا و آب درون لوله عمودی به قطر 70mm [10]

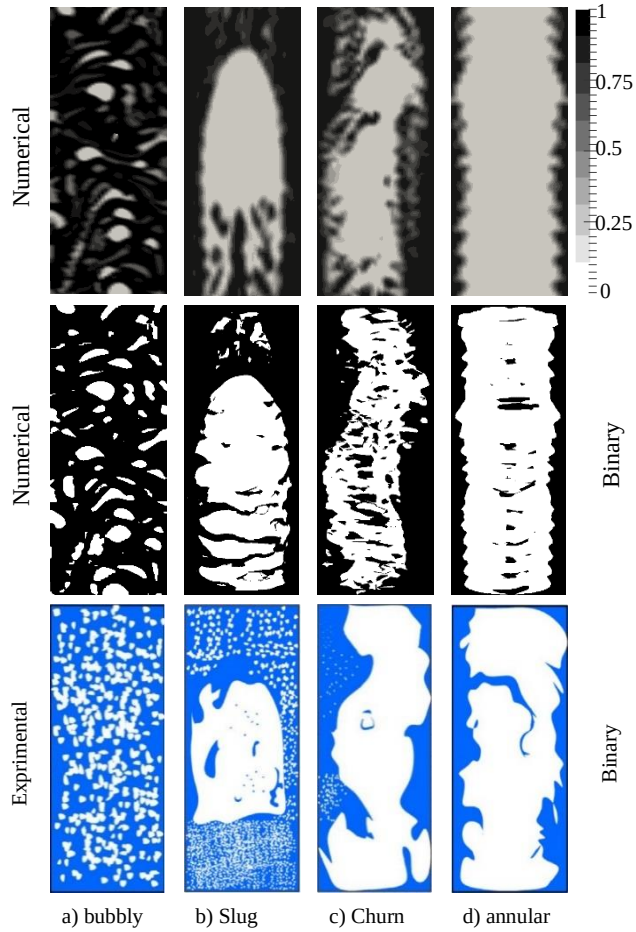


Fig. 8 Comparison between results of present study and experimental results[10] in 70mm

شکل 8 مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج تجربی [10] برای قطر 70 mm

به‌دست آمده بیشتر از یک هفته بوده است.

برای به‌دست آوردن الگوهای جریان از حل عددی در کار حاضر، اجرای برنامه عددی تا زمانی ادامه می‌یابد که ابتدا کل آبی که در حالت اولیه درون لوله بوده تخلیه شود، سپس حل ادامه داده می‌شود تا جریان به حالت پایدار برسد؛ یعنی الگوی جریان مشاهده شده به‌طور تکراری در طول لوله مشاهده شود. از تحلیل نتایج کار انجام شده چهار الگوی اصلی حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی به‌دست آمده‌اند. همچنین بعضی الگوهای جریان فرعی مثل؛ حبابی کلاهکی[1] و شبه حلقوی[2] نیز مشاهده شدند.

الگوی حبابی: برای به‌دست آوردن الگوهای مختلف حبابی سرعت ورودی هوا بسیار کم در نظر گرفته شده که با افزایش سرعت آب در ورودی لوله، انواع حباب‌ها با اندازه‌های مختلف مشاهده می‌شوند. در سرعت‌های پایین ورودی هوا اگر سرعت ورودی آب بالا باشد به‌دلیل انرژی توربولانسی زیاد ناشی از آب، پیوستگی هوا در همان ابتدای ورودی لوله از بین می‌رود و به صورت حباب‌های ریز درون آب به سمت بالا حرکت می‌کنند. اگر سرعت آب خیلی زیاد باشد، باعث می‌شود که اندازه حباب‌ها کوچکتر شوند. همچنین به دلیل نوع ورودی هندسه جریان که هوا از مرکز لوله و آب از اطراف آن به صورت حلقوی وارد لوله می‌شوند، وقتی سرعت هوا خیلی کم و سرعت آب به نسبت زیاد باشد، باعث می‌شود که حباب‌ها بیشتر در مرکز لوله به سمت بالا حرکت کنند و در نزدیکی دیواره‌های لوله حبابی دیده نشود.

از روی نقشه الگوی جریان (شکل 7)؛ نقاط 1، 2 و 3 برای بررسی الگوی حبابی انتخاب شده‌اند. در سرعت‌های ورودی خیلی کم برای هوا، وقتی سرعت آب کم باشد، حباب‌های کلاهکی شکل با سایز بزرگ تشکیل می‌شوند (شکل 9-a). با فرض ثابت بودن سرعت هوا اگر سرعت آب زیاد شود حباب‌ها کلاهکی با اندازه کوچک در لوله مشاهده می‌شوند (شکل 9-b). اگر سرعت آب خیلی زیاد شود، به‌دلیل انرژی توربولانسی ناشی از آب، از تشکیل حباب‌های بزرگ جلوگیری می‌کند و حباب‌های با اندازه کوچک تشکیل می‌شوند (شکل 9-c).

با استفاده از برنامه آنالیز تصویر توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب، اندازه قطر متوسط حباب‌ها و نسبت قطر حباب‌ها به قطر لوله برای الگوهای مختلف حبابی در "شکل 9" محاسبه شده است و نتایج آن در جدول 2 ارائه شده‌اند.

نمودارهای تغییرات کسرحجمی فازها برای الگوهای جریان‌حبابی مطابق "شکل 10" رسم شده‌اند که نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن سرعت هوا در ناحیه حبابی، با افزایش سرعت آب، مقدار کسرحجمی فاز مایع افزایش می‌یابد، یعنی بیشتر مقطع لوله را آب در بر می‌گیرد. همچنین هرچه اندازه حباب‌ها کوچکتر می‌شود تغییرات نمودار کسر حجمی در طول لوله نیز کمتر می‌شود.

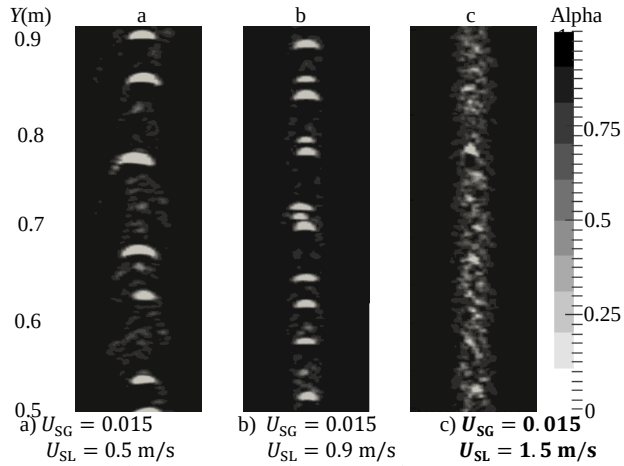


Fig 9 Volume fraction contours of the Bubbly flow patterns

شکل 9 کانتورهای کسر حجمی الگوهای جریان حبابی

[1] Cap Bubbly
[2] Semi Annular

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

الگوی لخته‌ای: با افزایش سرعت هوا در ورودی، حباب‌های کوچک هوا به هم متصل می‌شوند و حباب بزرگتری را می‌سازند که گاهی حباب‌ها به اندازه‌ای بزرگ می‌شوند که کل مقطع لوله را در بر می‌گیرند، به این حباب‌ها، حباب تیلور می‌گویند. در لوله 70 mm به‌دلیل این‌که جزء لوله‌های قطر بزرگ به شمار می‌رود الگوی لخته‌ای به سختی دیده می‌شود و اگر مشاهده شود نیز پایدار نیست. حباب‌های تیلور بزرگ به صورت پیوسته ایجاد نمی‌شوند، زیرا ناپایداری‌های شدیدی در سطح مشترک این حباب‌ها با آب ایجاد می‌شود که باعث از هم گسستن آن‌ها و گذر به الگوی متلاطم می‌شود.

از روی نقشه الگوی جریان(شکل 7)؛ نقاط 4، 5 و 6 جهت بررسی الگوی لخته‌ای انتخاب شده‌اند. برای مشاهده این الگو، سرعت هوا ثابت فرض شده که با افزایش سرعت آب، حباب‌های تیلور با اندازه‌های مختلف بدست آمده‌اند.

مطابق "شکل 11-a" سرعت آب را کم در نظر گرفته که حباب‌های تیلور با اندازه بزرگتری تشکیل می‌شوند، البته تعداد حباب‌های تیلور کمتری مشاهده می‌شوند. مطابق "شکل 11-b" با افزایش سرعت آب تعداد حباب تیلور بیشتری با اندازه کوچکتر مشاهده می‌شوند. مطابق "شکل 11-c" با افزایش بیشتر سرعت آب، الگوی جریان از ناحیه لخته‌ای خارج می‌شود، البته همچنان حباب‌های تیلور با اندازه‌های کوچکتر مشاهده می‌شوند که چون سرعت آب نسبت به هوا بیشتر شده باعث از هم گسستگی حباب های بزرگ تیلور می‌شود و حباب‌های تیلور کوچک با سطح مشترکی ناپایدارتر ایجاد می‌شوند.

نمودارهای تغییرات کسر حجمی برای الگوهای جریان لخته‌ای مطابق "شکل 12" رسم شده‌اند که نشان می‌دهد با افزایش سرعت آب در ورودی، مقدار کسر حجمی فاز مایع افزایش می‌یابد؛ یعنی مقدار آب در طول لوله بیشتر می‌شود. همچنین تغییرات نمودار کسر حجمی در طول جریان لخته‌ای بسیار بیشتر از الگوی جریان حبابی می‌باشد زیرا جریان ناپایدارتر شده است و سطح مشترک تغییرات بیشتری دارد. در این الگو مقدار هوای بیشتری در طول لوله مشاهده می‌شود که به همین دلیل مقدار کسر حجمی در الگوی جریان لخته‌ای نسبت به الگوی حبابی کمتر می‌شود.

الگوی متلاطم: در الگوی لخته‌ای اگر سرعت هوا را زیاد کنیم سطح مشترک حباب تیلور ناپایدار می‌شود و با گذر از الگوی لخته‌ای، وارد ناحیه متلاطم می‌شود. در الگوی متلاطم آشفتگی بین هوا و آب زیاد است و این باعث می‌شود که حباب با ساختار منظم تشکیل نشود. در این الگو چون سرعت هوا زیاد شده از پیوستگی فاز مایع جلوگیری می‌کند و اگر لایه‌ای پیوسته از آب تشکیل شود، با وارد کردن نیرو به این لایه آب باعث متلاشی شدن آن می‌شود.

از روی نقشه الگوی جریان (شکل 7)؛ نقاط 7، 8 و 9 برای بررسی الگوی متلاطم انتخاب شده‌اند. مطابق "شکل 13-a" سرعت هوا به نسبت آب زیاد

جدول 2 مشخصه‌های هندسی حباب‌ها در الگوهای مختلف حبابی

Table 2 The geometrical parameters of bubbles in different bubbly patterns

سرعت الگوی حبابی	میانگین قطر حباب‌ها (mm)	نسبت میانگین قطر حباب‌ها به قطر لوله
الف) $U_{SG} = 0.015\text{m/s}$ $U_{SL} = 0.5\ \text{m/s}$	12.5	0.18
ب) $U_{SG} = 0.015\text{m/s}$ $U_{SL} = 0.9\ \text{m/s}$	8.2	0.12
ج) $U_{SG} = 0.015\text{m/s}$ $U_{SL} = 1.5\ \text{m/s}$	3.7	0.05

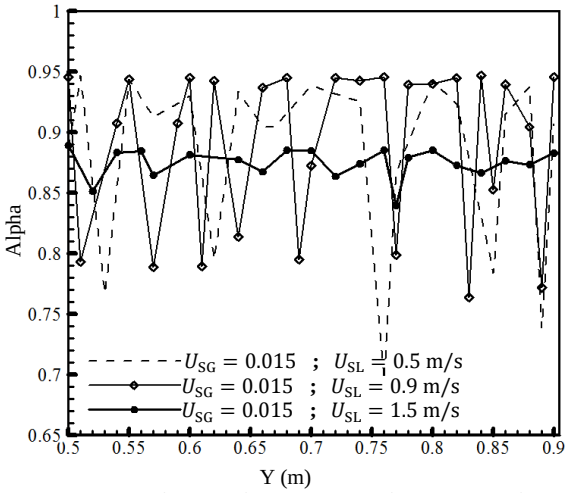


Fig. 10 Diagrams of volume fraction changes for the Bubbly flow patterns

شکل 10 نمودارهای تغییرات کسر حجمی برای الگوهای جریان حبابی

شده که باعث می‌شود از پیوستگی فیلم مایع جلوگیری کند و الگوی جریان غیرمنظمی را ایجاد می‌کند. در ادامه مطابق "شکل 13-b" سرعت آب زیاد شده که باعث می‌شود پیوستگی فاز مایع بیشتر شود و البته ناپایداری سطح مشترک دوفاز نیز زیاد می‌شود. وقتی سرعت آب بیشتر از هوا شود، مطابق "شکل 13-c" آب به‌صورت فیلم مایع پیوسته، بیشتر در کنار دیواره لوله و هوا با شکل نامنظم و با سطح مشترکی بسیار آشفته در مرکز لوله به سمت بالا حرکت می‌کند.

نمودارهای تغییرات کسرحجمی برای الگوهای جریان متلاطم مطابق "شکل 14" رسم شده‌اند، مشاهده می‌شود که مقادیر کسرحجمی فاز مایع نسبت به الگوی جریان لخته‌ای کمتر شده‌اند، زیرا در الگوی جریان متلاطم مقدار بیشتری هوا نسبت به الگوی جریان لخته‌ای در طول لوله مشاهده می‌شود. الگوی جریان متلاطم شکل منظمی ندارد و با زمان تغییرات بسیار زیادی دارد، به‌طوری‌که بیشترین تغییرات نمودار کسر حجمی مربوط به این الگوی جریان می‌باشد. همچنین در الگوی جریان متلاطم مشاهده می‌شود که هرچه سرعت آب بیشتر شود، ناپایداری سطح مشترک هوا و آب نیز بیشتر می‌شود.

الگوی حلقوی و شبه-حلقوی: در الگوی متلاطم اگر سرعت هوا زیاد

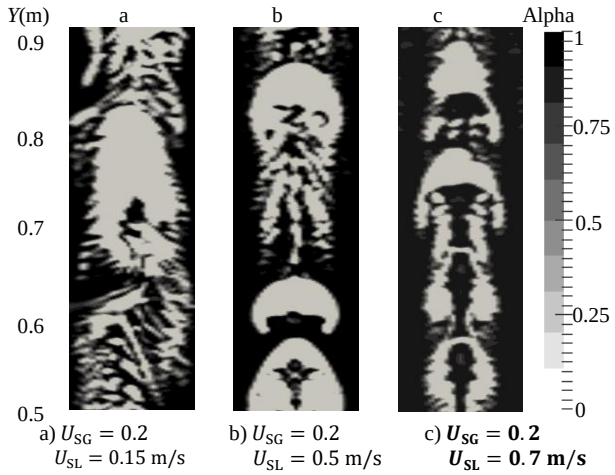


Fig. 11 Volume fraction contours of the Slug flow patterns

شکل 11 کانتورهای کسر حجمی الگوهای جریان لخته‌ای

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

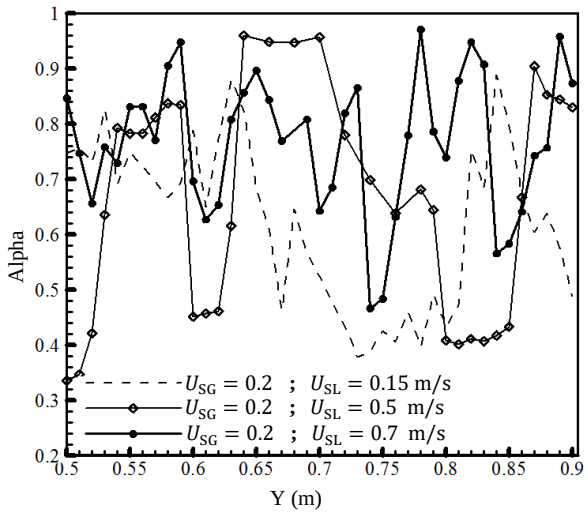
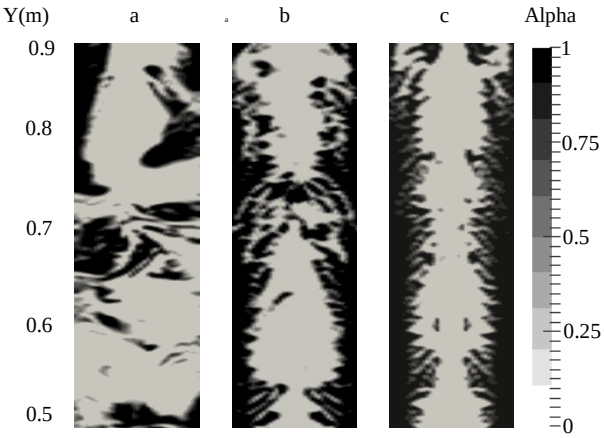


Fig. 12 Diagrams of volume fraction changes for the Slug flow patterns

شکل 12 نمودارهای تغییرات کسر حجمی الگوهای جریان لخته‌ای

شود، باعث می‌شود ساختار منظم‌تری تشکیل شود و جریان دوفازی با گذر از الگوی متلاطم، وارد ناحیه شبه- حلقوی یا حلقوی شود. وقتی سرعت هوا در ورودی لوله خیلی زیاد شود، به‌دلیل نوع ورودی جریان که هوا از وسط مقطع لوله و آب از اطراف آن وارد می‌شوند، بنابراین در سرعت‌های خیلی زیاد هوا، دو الگوی جریان حلقوی و شبه- حلقوی مشاهده می‌شود. در این الگوهای جریان سطح مشترک دوفاز نسبت به الگوی جریان متلاطم، شکل منظم‌تر و پایدارتری دارد.

از روی نقشه الگوی جریان (شکل 7)؛ نقاط 10، 11 و 12 برای بررسی الگوی حلقوی و شبه-حلقوی انتخاب شده‌اند. مطابق "شکل 15-a" در سرعت‌های بالای هوا، وقتی سرعت آب نسبتا کم باشد، الگوی جریان شبه‌حلقوی مشاهده می‌شود که هوا بیشتر مقطع لوله را در بر گرفته است و آب به‌صورت تکه‌های کوچک و گسسته فیلم مایع یا قطره‌های مایع روی دیواره لوله و درون فاز گاز، جریان دارد. اگر سرعت آب زیاد شود مطابق "شکل 15-b" مشاهده می‌شود که قطرات مایع به هم می‌رسند و فیلم‌های گسسته مایع بزرگتر را تشکیل می‌دهند و گاهی این فیلم‌های مایع سنگین می‌شوند که ممکن است به سمت پایین سقوط کنند، البته چون سرعت هوا



a) $U_{SG} = 0.6$, $U_{SL} = 0.1$m/s b) $U_{SG} = 0.6$, $U_{SL} = 0.5$ m/s c) $\boldsymbol{U_{SG} = 0.6}$, $\boldsymbol{U_{SL} = 0.9}$ **m/s**

Fig. 13 Volume fraction contours of the Churn flow patterns

شکل 13 کانتورهای کسر حجمی الگوهای جریان متلاطم

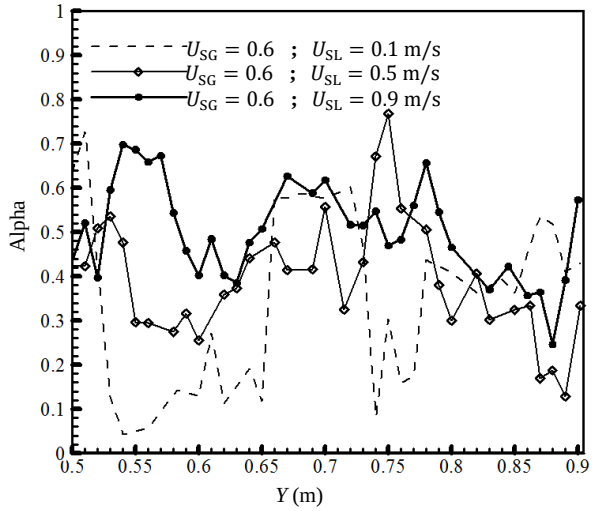


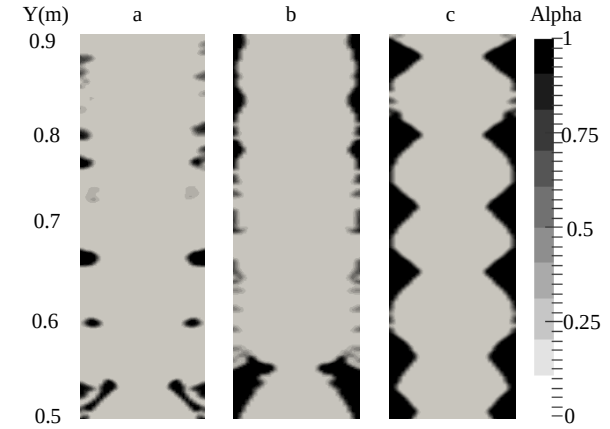
Fig. 14 Diagrams of volume fraction changes for the Churn flow patterns

شکل 14 نمودارهای تغییرات کسر حجمی برای الگوهای جریان متلاطم

زیاد است دوباره این فیلم‌های مایع را به سمت بالا هل می‌دهد. در نهایت مطابق "شکل 15-c" مشاهده می‌شود که در سرعت‌های بسیار زیاد هوا، اگر سرعت آب نیز زیاد باشد، فیلم مایع به صورت پیوسته در کنار دیواره لوله و هوا در هسته مرکزی لوله به صورت پیوسته به سمت بالا حرکت می‌کنند که به این الگوی جریان حلقوی می‌گویند.

نمودارهای تغییرات کسر حجمی برای الگوهای جریان حلقوی و شبه‌حلقوی مطابق "شکل 16" رسم شده‌اند. با فرض ثابت بودن سرعت هوا، با افزایش سرعت آب، مقدار کسر حجمی فاز مایع افزایش می‌یابد، زیرا فیلم‌های مایع پیوسته تشکیل می‌شود و مقدار آب درون لوله بیشتر می‌شود. همچنین بازه تغییرات کسرحجمی مربوط به هر الگوی جریان را مشاهده کرد. هدف این است که نمودارهای توزیع کسرحجمی فازهای جریان دوفازی (گاز و مایع)، برای الگوهای متداول حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی مطابق "شکل 17" به‌دست آورده شوند، سپس از تحلیل رفتار این نمودارها، بدون مشاهده جریان درون لوله، بتوان نوع الگوی جریان دوفازی را تشخیص داد.

در جریان‌های دوفازی درون لوله به ازای تغییر سرعت فازها در ورودی



a) $U_{SG} = 11$, $U_{SL} = 0.5$ m/s b) $U_{SG} = 11$, $U_{SL} = 0.9$ m/s c) $\boldsymbol{U_{SG} = 11}$, $\boldsymbol{U_{SL} = 1.5}$ **m/s**

Fig. 15 Volume fraction contours of the Annular and Semi-Annular flow patterns

شکل 15 کانتورهای کسر حجمی الگوهای جریان حلقوی و شبه-حلقوی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

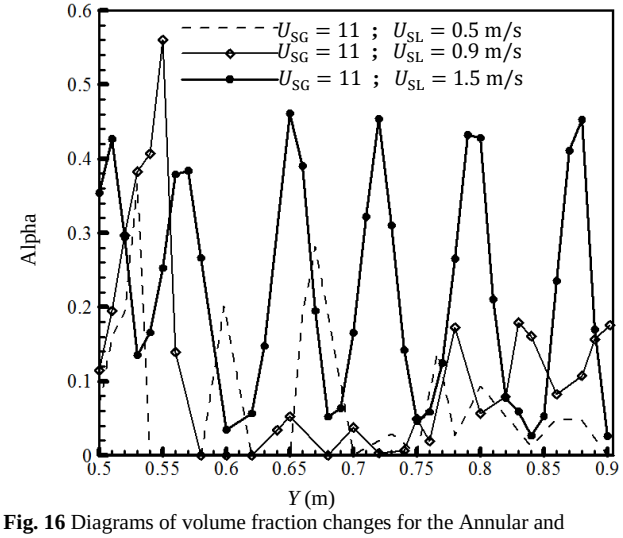


Fig. 16 Diagrams of volume fraction changes for the Annular and Semi-Annular flow patterns

شکل 16 نمودارهای تغییرات کسر حجمی برای الگوهای جریان حلقوی و شبه‌حلقوی

لوله، الگوهای جریان مختلفی ایجاد می‌شوند که همیشه همه‌ی الگوهای جریان، هدف محقق نیستند. بلکه هدف محقق، یک الگوی معین (مانند حبابی) می‌باشد که باید تشخیص داده شود. حال اگر جریان درون لوله قابل مشاهده نباشد، آن‌گاه یکی از روش‌های تشخیص الگوهای جریان، بررسی توزیع کسرحجمی فازها در طول جریان می‌باشد.

مطابق "شکل 17"، مقادیر توزیع کسرحجمی فازها بین 0 و 1 است که مقدار 1 به معنی این است که فقط فاز مایع وجود دارد و مقدار 0 یعنی فقط فاز گاز وجود دارد. بازه و میزان تغییرات توزیع چگالی فازها (کسرحجمی فازها) برای الگوهای جریان مختلف، متفاوت می‌باشد. مثلا اگر مشاهده شود که محدوده تغییرات کسرحجمی فازها در طی جریان بسیار کم است و مقادیر کسرحجمی به 1 نزدیک باشند (بیشتر مقطع لوله آب باشد)، آنگاه می‌توان نتیجه گرفت که الگوی جریان درون لوله حبابی است (شکل 17-a). اگر محدوده تغییرات کسرحجمی در طول جریان از مقداری بیشتر نشود و حدودا بین 0 تا 0.5 باشد و نمودار کسرحجمی به‌صورت سیکل‌های منظم تکرار شوند، نشان می‌دهد که بیشتر مقطع لوله هوا می‌باشد، که می‌توان نتیجه گرفت جریان دوفازی مورد بررسی در این حالت، الگوی حلقوی را نشان می‌دهد (شکل 17-d).

بنابراین می‌توان گفت که با داشتن نمودار توزیع چگالی فازها در طول جریان دوفازی، بدون مشاهده جریان درون لوله، نوع الگوی برخی جریان‌ها و رفتار آن‌ها قابل پیش‌بینی است. این نتیجه در صنایع مختلف نفت، هسته‌ای و ... که جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله‌های غیرشفاف (فلزی) جریان دارد، کاربرد دارد. بنابراین با اندازه‌گیری توزیع چگالی فازها (کسرحجمی فازها) در طی جریان، می‌توان تشخیص داد که جریان دوفازی در کدام الگوی جریان قرار دارد که باعث پیش‌بینی رفتار جریان و تامین ایمنی سیستم می‌شود.

در ادامه مطابق "شکل 18" نمودار تغییرات فشار اصلاح شده برای چهار الگوی حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی رسم شده‌اند.

فشار اصلاح شده برابر اختلاف فشار کل و فشار هیدرواستاتیک در هر نقطه از جریان می‌باشد که با استفاده از رابطه (17) به‌دست می‌آید.

$$P\text{-}rgh = p - \rho gh \qquad (17)$$

که p فشار کل، ρ چگالی دوفازی و h ارتفاع لوله است.

همان‌طور که در "شکل 18" مشاهده می‌شود، نمودار افت فشار اصلاح

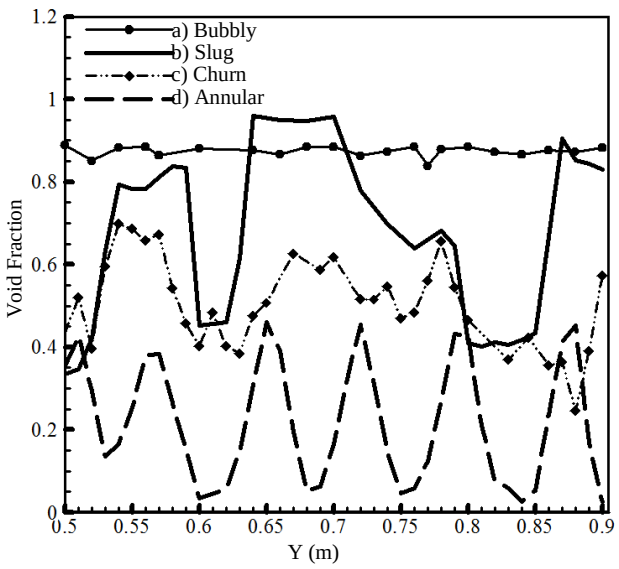


Fig. 17 Diagrams of the distribution of the volume fraction, for different flow patterns

شکل 17 نمودارهای توزیع کسرحجمی فازها، برای الگوهای مختلف

شده برای الگوی حبابی (مربوط به شکل 9-c)، تغییرات بسیار کمی دارد، زیرا تغییرات جریان در طی الگوی حبابی بسیار اندک می‌باشد. در الگوی لخته‌ای (مربوط به شکل 11-b)، ناحیه‌هایی که حباب تیلور وجود دارد فشار کمتری نسبت به پشت آن دارند که ناشی از اختلاف چگالی و بسته شدن مسیر جریان توسط حباب تیلور است. در الگوی متلاطم (مربوط به شکل13-b)، نیز به‌علت اغتشاش شدید جریان و تغییرات زیاد کسرحجمی در طول جریان، نمودار فشار نیز مطابق انتظار دارای تغییرات زیادی می‌باشد. در الگوی حلقوی (مربوط به شکل 15-c)، چون سرعت فازها نسبت به سایر الگوهای جریان بالاتر است، جریان فشار و افت‌فشار بیشتری نسبت به دیگر الگوها دارد.

در نهایت مطابق "شکل 19"، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی کار حاضر برای سرعت‌های ورودی مختلف هوا و آب، با نقشه الگوی جریان به‌دست آمده در آزمایشگاه توسط انصاری و همکاران [10] برای لوله با قطر مشابه، مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که الگوهای به‌دست آمده از

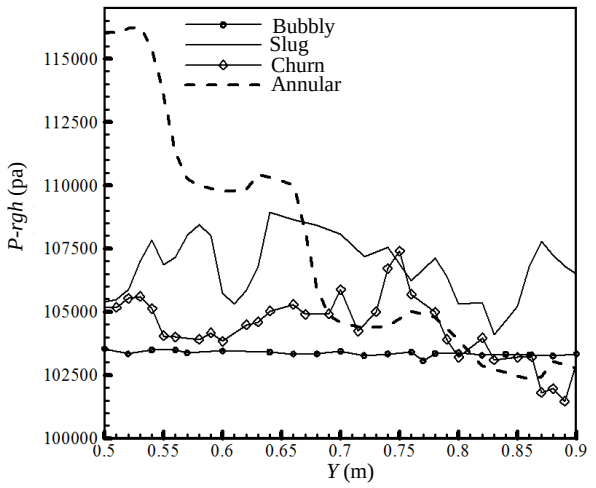


Fig 18 Diagrams of modified pressure changes for different flow patterns

شکل 18 نمودارهای تغییرات فشار اصلاح شده برای الگوهای مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند، بنابراین برنامه عددی به خوبی الگوهای جریان مختلف را پیش‌بینی می‌کند.

مطابق "شکل 19"، نتایج به‌دست آمده در کار حاضر برای الگوهای حبابی، اسلاگ و متلاطم با نتایج به‌دست آمده از کار آزمایشگاهی مشابه، مطابقت خوبی دارند. تفاوت اصلی بین نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی در محدوده الگوهای حلقوی و شبه‌حلقوی است. در کار حاضر زمانی که سرعت ورودی هوا زیاد باشد، اگر سرعت ورودی آب نیز زیاد باشد الگوی حلقوی مشاهده می‌شود؛ یعنی هوا در مرکز لوله و آب از کنار دیواره به‌صورت فیلم پیوسته به سمت بالا حرکت می‌کنند. در حالی‌که در سرعت‌های زیاد ورودی هوا، اگر سرعت ورودی آب کم باشد، الگوی شبه-حلقوی مشاهده می‌شود؛ یعنی آب به‌صورت قطرات یا فیلم‌های کوچک و گسسته مایع روی دیواره لوله یا درون فاز گاز (هوا) به‌سمت بالا حرکت می‌کند.

از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی کار حاضر با الگوهای به‌دست آمده در کار آزمایشگاهی مشابه، می‌توان نتیجه گرفت، که در بیشتر از 80% سرعت‌های انتخاب شده برای فاز گاز و مایع، مطابقت خوبی بین الگوهای جریان کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاضر مشاهده می‌شود. بنابراین خطا کار حاضر نسبت به کار آزمایشگاهی را می‌توان کمتر از 20% درصد در نظر گرفت. که برای شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی این خطا، خطای قابل قبولی است.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، جریان دوفازی گاز-مایع، همسو رو به بالا، درون لوله عمودی به قطر 70 mm به‌صورت سه‌بعدی به روش حجم سیال، با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم شبیه‌سازی عددی شده است. جریان مورد مطالعه در کار حاضر هوا و آب می‌باشند که هدف اصلی بیشتر مطالعه رفتار الگوهای جریان مختلف، پیش‌بینی نوع الگوی جریان با توجه به نمودارهای توزیع کسرحجمی و درنهایت مقایسه الگوهای جریان به‌دست آمده از شبیه‌سازی حاضر با نقشه الگوی جریان کار آزمایشگاهی مشابه، می‌باشد. از نتایج مهم این شبیه‌سازی عددی می‌توان به چند مورد به‌صورت مختصر به‌شرح زیر اشاره کرد:

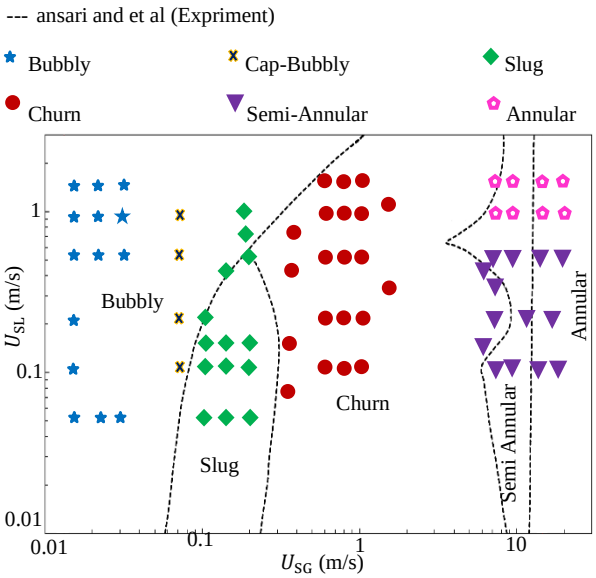


Fig 19 Comparison of ansari and et al Flow map pattern's[10], with present numerical simulation results

شکل 19 مقایسه نقشه الگوی جریان انصاری و همکاران [10]، با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی کار حاضر

1- در کار عددی انجام شده در تحقیق حاضر، همه پارمترهای جریان دوفازی (مانند فشار، سرعت، کسرحجمی و...) در طول جریان و هر مقطع دلخواه از جریان درون لوله قابل اندازه گیری است. بنابراین با داشتن تغییرات پارمترهای جریان، به‌راحتی می‌توان رفتار هر الگوی جریان را بررسی و تحلیل کرد، در حالی که در کارهای آزمایشگاهی به‌دلیل هزینه‌های بالا، متغیرهای جریان دوفازی در طی مسیر جریان قابل اندازه‌گیری نیستند.

2- در شبیه‌سازی کار حاضر مطابق انتظار، چهار الگوی جریان اصلی حبابی، لخته‌ای، متلاطم و حلقوی به‌دست آورده شدند. همچنین دو الگوی فرعی حبابی کلاهکی و شبه-حلقوی نیز مشاهده شدند.

3- نمودارهای مربوط به تغییرات کسر حجمی و فشار برای الگوهای جریان مختلف، در طول جریان به‌دست آورده شدند و رسم و تحلیل گردیدند.

4- از تحلیل نمودارهای توزیع کسرحجمی فازها برای الگوهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به بازه تغییرات کسرحجمی و میزان تغییرات آن‌ها، نوع الگوی جریانی مانند حبابی یا حلقوی به‌راحتی قابل تشخیص است.

5- از بررسی و تحلیل نمودارهای توزیع کسرحجمی فازها، مشاهده شد که برای الگوی حبابی، مقادیر کسرحجمی فازها به 1 نزدیکتر است، یعنی احتمال وجود فاز مایع در مقطع لوله نسبت به فاز گاز بیشتر است. در حالی که در الگوی حلقوی، مقادیر کسرحجمی فازها به 0 نزدیکتر است، یعنی احتمال وجود فاز گاز در مقطع لوله نسبت به فاز مایع بیشتر است.

6- الگوی حبابی ریز در شرایطی که سرعت ورودی فاز گاز کم و سرعت ورودی فاز مایع زیاد باشد، قابل مشاهده است. در سرعت‌های کم آب حباب‌های کلاهکی با اندازه‌های بزرگتر نسبت به حباب‌های ریز، به‌دست آمده‌اند.

7- در کار حاضر قطر لوله 70 mm می‌باشد که چون قطر لوله بزرگ است، بعضی از الگوهای جریان مانند لخته‌ای به‌خوبی مشاهده نمی‌شود و جریان دوفازی سریع وارد الگوی متلاطم می‌شود.

8- با افزایش سرعت ورودی هوا مشاهده شده است که تغییرات سطح مشترک دوفاز بیشتر شده و جریان نیز ناپایداتر می‌شود، به‌طوری که در الگوی جریان لخته‌ای و متلاطم، تغییرات پارامترهای جریان (مثل کسر حجمی و فشار) در طول لوله زیاد است.

9- وقتی سرعت ورودی هوا خیلی زیاد باشد، جریان دوفازی وارد ناحیه حلقوی می‌شود. در الگوی حلقوی تغییرات جریان و ناپایداری‌های سطح مشترک، نسبت به الگوهای لخته‌ای و متلاطم کمتر شده است. به‌طوری‌که هوا در هسته لوله و آب به‌صورت فیلم مایع کنار دیواره به سمت بالا حرکت می‌کند.

10- در الگوی حبابی تغییرات فشار بسیار کم است، زیرا تغییرات جریان در این الگو کم است، درحالی‌که در الگوهای لخته‌ای و متلاطم چون تغییرات فصل مشترک دوفاز زیاد است، جریان ناپایدارتر شده و میزان تغییرات فشار نیز بیشتر شده است.

11- در الگوی جریان حلقوی چون سرعت فازها نسبت به الگوهای دیگر خیلی بیشتر است، بنابراین فشار در ورودی جریان نسبت به بقیه الگوهای جریان بیشتر است. همچنین در این الگوی جریان افت فشار در طول لوله نیز نسبت به دیگر الگوهای جریان بیشتر شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]

12- مقایسه الگوهای جریان به‌دست آمده از کار حاضر با نقشه الگوی جریان به‌دست آمده از کار آزمایشگاهی مشابه [10]، نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی به‌خوبی الگوهای جریان دوفازی گاز- مایع همسو رو به بالا درون لوله عمودی را پیش‌بینی می‌کند.

5- فهرست علائم

Co	عدد کورانت
D	قطر داخلی لوله (m)
F	نیرو (kgm^1s^{-2})
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
I	شدت اغتشاش
j	سرعت ظاهری (ms^{-1})
k	انحنای سطح مشترک
K	انرژی جنبشی آشفتگی (m^2s^{-2})
L	ارتفاع لوله (m)
p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
$p-rgh$	فشار اصلاح شده ($kgm^{-1}s^{-2}$)
v	سرعت مخلوط دو فاز (ms^{-1})
t	زمان (s)

علائم یونانی

α	کسر حجمی
β	خواص جریان دوفازی
Δ	اختلاف
ε	انرژی اتلافی ناشی از آشفتگی (m^2s^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	ضریب کشش سطحی (Nm^{-1})

زیرنویس‌ها

G	گاز
h	هیدرولیک
L	مایع
M	مقدار کل
S	ظاهری
s	منبع

6- مراجع

[1] S. F. Ali, H. Yeung. Two-phase flow patterns in large diameter vertical pipes, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp.105-116, 2014.

[2] C. E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*, pp. 7.163-7.173, California: Cambridge university press, 2005.

[3] A. J. Ghajar, S. M. Bhagwat, Gas-Liquid Two Phase Flow Phenomenon in Near Horizontal Upward and Downward Inclined Pipe Orientations, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 8,No. 6, pp.1091-1105, 2014.

[4] J. R. Thome, *Engineering databook III*, 1st Edition, pp. 12.1-12.11, USA: Wolverine Tube Inc, 2004.

[5] K. W. McQuillan, P. B. Whalley, Flow patterns in vertical two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 11, No. 2, pp. 161-175, 1985.

[6] D. J. Nicklin, J. F. Davidson, The onset of instability in two-phase slug flow, *Proceedings of the Symposium on Two-phase Fluid* Taitel, *Flow, Institution of Mechanical Engineers*, London, Paper, No. 4, 1962.

[7] J. Schmidt, H. Giesbrecht, C. Van Der GELD, Phase and velocity distributions in vertically upward high-viscosity two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, No. 4, pp. 363- 374, 2008.

[8] Z. Mao, A. Dukler, The myth of churn flow?, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 2, pp. 377-383, 1993.

[9] H. Zhihua, Y. Yanhua, L. Lei, Z. Fangde, Local flow regime transition criteria of gas-liquid two-phase flow in vertical upward tube with a horizontal rod, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 442-449, 2006.

[10] M. R. Ansari, R. Azadi, Effect of diameter and axial location on upward gas–liquid two-phase flow patterns in intermediate-scale vertical tubes, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 94, No. 1, pp. 530-540, 2016.

[11] J. P. Schlegel, P. Sawant, S. Paranjape, B. Ozar, T. Hibiki, M. Ishii, Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, No. 12, pp. 2864-2874, 2009.

[12] Taitel, D. Bornea, A. E. Dukler, Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, *AIChE Journal*, Vol. 26, No. 3, pp. 345-354, 1980.

[13] D. Zheng, X. He, D. Che, CFD simulations of hydrodynamic characteristics in a gas–liquid vertical upward slug flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 21, pp. 4151-4165, 2007.

[14] C. Pena-Monferrera, J. L. Munoz-Coboa, G. Monrós-Andreub, R. Martinez-Cuencab, S. Chivab, An Eulerian-Lagrangian open source solver for bubbly flow in vertical pipes, *40 Annual Meeting of Spanish Nuclear Society Conference*, Valencia, Spain, Oct 2014.

[15] 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. 1, pp. 176-182, 2014.(in Persainفارسی)

[16] S. Pouryoussefi, and Y. Zhang, Identification of two-phase water air flow patterns in a vertical pipe using fuzzy logic and genetic algorithm, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 85, No. 1, PP. 195-206, 2015.

[17] M. Wörner, *A compact introduction to the numerical modeling of multiphase flows, Report* Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6932, Germany, 2003.

[18] D. Dakshinamoorthy, Y. Dai, M. Agrawal, CFD Modeling of Bubbly, Slug and Annular Flow Regimes in Vertical Pipelines, *Offshore Technology Conference*, Houston: Texas, USA, May 6–9, 2013.

[19] S. Márquez-Damián, *An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces*, PhD Thesis, Universidad Nacional Del Litoral, 2013.

[20] O. Ubbink, *Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interfaces*, Ph.D. thesis, University of London, London, 1997.

[21] P. Hanafizadeh, M. Moezzi, M. H. Saidi, Simulation of gas-liquid two phase flow in upriser pipe of gas-lift systems, *Energy Equipment and Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 25-42, 2014.

[22] B. E. Launder, D. B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*, 1st Edition, pp. 30-65, London; New York : Academic Press, 1972.

[23] V. R. Gopala, B. G. van Wachem, Volume of fluid methods for immiscible-fluid and free-surface flows, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 141, No. 1, pp. 204-221, 2008.

[24] M. Awad, Y. Muzychka, Two-phase flow modeling in microchannels and minichannels, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 31, No. 13, pp. 1023-1033, 2010.

[25] L. Chen, J. Zang, A. Hillis, G. Morgan, A. Plummer, Numerical investigation of wave–structure interaction using OpenFOAM, *Ocean Engineering*, Vol. 88, No. 1, pp. 91-109, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.49.9]