



تعیین و ارائه نقشه الگوهای جریان دوفازی گاز-مایع غیر همسو در لوله‌های عمودی بزرگ مقیاس

محسن زارعی¹، محمدرضا انصاری^{2*}، پیمان رستمی¹

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

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 شهریور 1395

پذیرش: 11 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

جریان دوفازی

جریان غیر همسو

نقشه الگوی جریان

جریان برگشتی

ناپایداری کلین-هلمهولتز

چکیده

در این پژوهش جریان دوفازی گاز-مایع غیر همسو در لوله‌های عمودی از پلکسی گلاس با قطرهای داخلی 60 mm، 80 mm و 110 mm و ارتفاع‌های یکسان 2 m در شرایط آدیاباتیک بررسی شده‌اند. تاکنون تعداد کمی از پژوهش‌های صورت گرفته در حیطه جریان‌های غیر همسو در لوله‌های با قطر بزرگ مقیاس انجام شده است. هوا از پایین به بالا و آب از بالا به پایین جریان دارد. محدوده سرعت‌های ظاهری هوا و آب برای لوله 60 mm به ترتیب 1.77-7.17 m/s و 0.05-0.11 m/s، برای لوله 80 mm به ترتیب 0.99-4.03 m/s و 0.03-0.09 m/s و برای لوله 110 mm به ترتیب 0.55-2.26 m/s و 0.01-0.05 m/s است. در کار حاضر علاوه بر جریان برگشتی، از رژیم‌های لخته‌ای، متلاطم و حلقوی می‌توان به‌عنوان رژیم‌های اصلی مشاهده شده در لوله‌ها نام برد. تلاش بر این بوده است که در ترسیم نقشه الگوهای جریان، عدم قطعیت تعیین مرزها به حداقل رسیده باشد. طبق آزمایش‌های صورت گرفته نتایج بیانگر این هستند که با افزایش قطر لوله، رژیم‌های لخته‌ای و حلقوی به تدریج محدوده‌های کوچک‌تری را در بر می‌گیرند، اما رژیم متلاطم محدوده قابل توجهی از نقشه الگوهای جریان را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین در مشاهدات صورت گرفته، نمونه‌هایی از ناپایداری کلین-هلمهولتز در لوله‌ها مشاهده شد. مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی این ناپایداری از توافقی خوبی برخوردار است. در انتها نیز صحت‌سنجی نقشه الگوهای به‌دست آمده تحت آزمایش‌های صورت گرفته، با نتایج تحلیلی صورت گرفت.

Identification of flow patterns maps for counter-current gas-liquid two-phase flow in large diameter tubes

Mohsen Zarei, Mohammad Reza Ansari*, Peyman Rostami

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 September 2016
Accepted 01 November 2016
Available Online 18 December 2016

Keywords:

Two-phase flow
Counter-current flow
Flow patterns map
Reverse flow
Kelvin – Helmholtz instability

ABSTRACT

In this research, counter-current gas-liquid two phase flow is investigated adiabatically in vertical Plexiglas tubes with internal diameters of 60 mm, 80 mm and 110 mm. All of the tubes have the same height of 2 m. So far, there have been few studies on counter-current flows in large diameter tubes. Water and air flow downward and upward through the tubes, respectively. Superficial velocities of air and water ranges are 1.77-7.17 m/s and 0.05-0.11 m/s for 60 mm tube, 0.99-4.03 m/s and 0.03-0.09 m/s for 80 mm tube and 0.55-2.26 m/s and 0.01-0.05 m/s for 110 mm tube. In addition to reverse flow, other main regimes can be observed as slug, churn and annular in the tubes. Our efforts in drawing the flow patterns map were aimed at minimizing uncertainties at the boundaries. Based on the obtained experimental results, slug and annular regimes gradually comprise smaller regions of the flow map as the tube diameter increases. However, churn regime contains larger area of the flow pattern maps. Moreover, Kelvin – Helmholtz instability is observed in tubes and experimental and analytical results represent appropriate consequences in comparison. Eventually, validation of experimental flow patterns map is accomplished by theoretical results.

1- مقدمه

جریان‌های دوفازی مایع-بخار و مایع-گاز به‌طور معمول در اغلب کاربردهای مهندسی مشاهده می‌شود. جریان این دو فاز می‌تواند به‌صورت همسو¹ و یا غیر همسو² باشد. جریان دوفازی غیر همسو درون لوله عمودی در برج‌های

خنک‌کن، رآکتورهای هسته‌ای، جاذب‌های ذرات و غیره کاربرد دارد. برخورد هوا به‌صورت غیر همسو با جریان آب، در برج‌های خنک‌کن با جریان هوای مخالف را می‌توان به‌عنوان یکی از مثال‌های بارز در این زمینه نام برد. عموماً در رژیم‌های جریان غیر همسو با افزایش پیوسته هر یک از فازها حالت طغیان³ به وجود می‌آید و راه ورود فاز دیگر مسدود می‌شود و جریان از حالت

³ Flooding

¹ Co -current

² Counter -current

Please cite this article using:

M. Zarei, M. R. Ansari, P. Rostami, Identification of flow patterns maps for counter-current gas-liquid two-phase flow in large diameter tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 433-444, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Zarei, M. R. Ansari, P. Rostami, Identification of flow patterns maps for counter-current gas-liquid two-phase flow in large diameter tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 433-444, 2016 (in Persian)

با زاویه‌های 0، 30 و 68 درجه نسبت به خط عمود قرار گرفت. نتایج بیانگر این بود که تفاوت قابل توجهی در داده‌های مربوط به طغیان بین آب و مایعات بسیار لزج وجود دارد. همچنین اثر لزجت مایع بر کسر حجمی گاز و الگوهای جریان مهم بود. بساگنی واینزولی [5] برای بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی ستون حباب در لوله‌ی عمودی و جریان غیر همسو، از چند روش آزمایشگاهی مختلف استفاده کرده و نتایج را با هم مقایسه نمودند. کسر حجمی مایع، حالت گذار رژیم جریان، توزیع سائز حباب و ویژگی‌های جریان محلی در لوله‌ای با ارتفاع 5.3 m و قطر داخلی 24 mm بررسی شد. آن‌ها داده‌های به‌دست آمده برای کسر حجمی آب و روابط همبستگی موجود را مقایسه کردند و رابطه‌ی همبستگی جدیدی را ارائه دادند.

از جمله فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه رسم نقشه الگوهای جریان دوفازی غیر همسو می‌توان به مدل ارائه شده توسط تایتل و بارنا [6] اشاره نمود. آن‌ها مدلی را برای افت فشار و الگوی جریان در لوله عمودی و برای جریان غیر همسو ارائه دادند و در مدل ارائه شده الگوی جریان را به دو ناحیه تقسیم کردند. در یک ناحیه احتمال تشکیل هیچ گونه رژیمی وجود ندارد و ناحیه‌ی دوم را به سه بخش تقسیم کردند؛ در بخش اول تنها امکان ایجاد رژیم حلقوی² وجود دارد، در بخش دوم رژیم‌های حلقوی و لخته‌ای³ قابل تشکیل هستند و در بخش سوم رژیم‌های حبابی⁴، لخته‌ای و حلقوی می‌توانند پدیدار شوند.

پیش‌تر به کاربرد لوله‌های بزرگ مقیاس در صنایع مختلف و اهمیت آن‌ها اشاره شده است. با این وجود در قیاس با لوله‌های کوچک مقیاس پژوهش‌های بسیار کمتری در این زمینه به انجام رسیده است. در دسترس نبودن تجهیزات آزمایشگاهی برای فراهم آوردن شرایط آزمایش مانند تأمین دبی فازها و همچنین ساخت سیستم آزمایشگاهی با ابعاد بزرگ، از جمله مشکلات انجام آزمایش در لوله‌های بزرگ مقیاس است. حسن و همکاران [7] مدلی بر مبنای دیدگاه شار رانشی⁵ را برای بررسی کسر حجمی در جریان‌های لخته‌ای و حبابی در جریان غیر همسو و لوله عمودی ارائه دادند. لوله‌ی مورد استفاده 5.5 m ارتفاع و 127 mm قطر داشت. آن‌ها معیار حالت گذرا بین دو رژیم لخته‌ای و حبابی را نیز ارائه کردند. همچنین با محاسبه‌ی کسر حجمی در دو رژیم نام برده، نشان دادند که سازگاری خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تئوری وجود دارد. یاماگوچی و یامازاکی [8] الگوهای جریان و کسر حجمی را برای جریان غیر همسو در لوله‌های عمودی به قطر 40 mm و 80 mm به‌دست آوردند. طبق گزارش ارائه شده توسط آن‌ها، رژیم حبابی در هر دو لوله فضای خیلی کمی را در بر می‌گیرد، درحالی‌که رژیم لخته‌ای بیش‌ترین نسبت از نقشه الگوهای جریان در محدوده‌ی عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد و با افزایش قطر لوله، محدوده‌ی این رژیم افزایش می‌یابد.

در برخی از تحقیقات انجام شده به بررسی تغییر پارامترها در لوله‌ها و تأثیر آن‌ها بر نقشه رژیم‌های جریان پرداخته شده است. تغییر قطر لوله از جمله پارامترهایی است که باعث ایجاد تغییرات زیادی در محدوده رژیم‌ها می‌شود. انصاری و همکاران [9]، رژیم‌های جریان را به صورت تجربی و در دو لوله عمودی با قطرهای داخلی 40 mm و 70 mm بررسی نمودند. آن‌ها آزمایش را در شرایط هم‌سو و رو به بالا انجام داده و الگوهای حبابی، لخته‌ای،

غیر همسو خارج می‌شود [1]. به همین دلیل محدودیت‌های مختلفی در جریان‌های غیر همسو وجود دارد. این نوع جریان‌ها در کانال‌های افقی تنها در جریان‌های لایه‌ای¹ یکنواخت یا لایه‌ای متلاطم ایجاد خواهد شد. در لوله‌های عمودی نیز تنها در حالتی که فاز مایع رو به پایین و فاز گاز رو به بالا جریان داشته باشد، جریان غیر همسو تشکیل می‌شود.

با جریان یافتن فازهای مایع و گاز درون لوله، الگوهای جریان متنوعی به وجود می‌آید. اندرکنش‌های بین فازها باعث به وجود آمدن این الگوهای جریان مختلف می‌شود. عوامل اصلی تأثیرگذار بر الگوی جریان درون لوله شامل پارامترهای سیالاتی از قبیل دبی و جهت جریان هر یک از فازها، مشخصه‌های سیال‌ها و پارامترهای هندسی از آن‌جمله قطر لوله، شیب لوله، هندسه لوله و سایر موارد است. انتقال مومنتم بین دو فاز، انتقال حرارت و انتقال جرم در جریان دوفازی به‌شدت از الگوهای جریان تأثیر می‌پذیرند. بنابراین بررسی الگوهای جریان به منظور ایجاد عملکرد مناسب و تأمین ایمنی در طی فرایند و انجام عملیات در صنایع مختلف از قبیل پالایشگاه، پتروشیمی و غیره، امری ضروری است. با توجه به موارد بیان شده طبیعی است که تاکنون بررسی‌های بسیاری در زمینه الگوهای جریان دوفازی انجام شده باشد، با این حال اکثر بررسی‌های انجام شده به جریان‌های دوفازی هم-سو پرداخته شده است.

از یک نقطه نظر می‌توان بررسی‌های صورت گرفته در لوله‌ها را به دو دسته‌ی آزمایش‌های انجام شده در لوله‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس دسته‌بندی نمود. معیارهای مختلفی برای مقیاس بندی لوله‌ها ارائه شده است. تایتل و همکاران [2] لوله‌هایی را کوچک مقیاس می‌دانستند که شرط 1 را ارضا کنند:

$$d \leq \frac{19}{\rho_l} \sqrt{\frac{S(\rho_l - \rho_g)}{g}} \quad (1)$$

در رابطه (1)، d قطر داخلی لوله، S ضریب کشش سطحی بین دو فاز، g شتاب گرانشی و ρ_l و ρ_g به ترتیب چگالی فازهای مایع و گاز هستند. برای فاز مایع آب و فاز گاز هوا در شرایط محیط (دمای 25 درجه سانتی‌گراد و فشار 1 اتمسفر) ضریب کشش سطحی برابر با 0.072 N/m، چگالی آب برابر kg/m^3 997 و چگالی هوا دارای مقدار kg/m^3 1.184 هستند، لذا شرط به صورت $d \leq 5.15 \text{ cm}$ در می‌آید؛ به عبارتی لوله‌هایی با قطر داخلی کمتر از 50 mm جزو لوله‌های کوچک و لوله‌های با قطر بیش‌تر از 50 mm جزء لوله‌های بزرگ به شمار می‌آیند.

با توجه به اهمیت نقشه رژیم‌های جریان، تاکنون بررسی‌های گسترده‌ای در این حیطه به انجام رسیده است. اغلب این پژوهش‌ها در لوله‌هایی با مقیاس کوچک انجام شده است. چن و همکاران [3] تأثیر قطر لوله بر رژیم‌های جریان دوفازی در لوله‌های عمودی با قطرهای کوچک را بررسی کردند. آن‌ها آزمایش را بر روی لوله‌های با قطر داخلی 1.1، 2.01، 2.88 و 4.26 میلی-متر انجام دادند. جریان دوفازی به صورت هم‌سو و با حرکت رو به بالا جریان یافت. از R134a نیز به‌عنوان سیال عامل استفاده شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که قطر لوله‌ها تأثیر به‌سزایی در محدوده‌ی رژیم‌های مختلف در نقشه الگوهای جریان دارد. غیائیان و همکاران [4] رژیم‌های جریان، طغیان و کسر حجمی را برای جریان دوفازی در کانال‌های شیب‌دار و عمودی به‌صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌ها را در کانالی با ارتفاع 2 متر و قطر داخلی 1.9 سانتی‌متر و با هوا، آب معدنی، آب شیر و پارافین انجام دادند. لوله

² Annular³ Slug⁴ Bubbly⁵ Drift flux¹ Stratified

30-60 درجه نسبت به خط افق بوده است. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که کشش سطحی تأثیر به‌سزایی در پدیده‌ی طغیان دارد. اوزاکا و همکاران [15] اثرات پارامترهای مختلف مانند شیب لوله، طول لوله، قطر لوله و کشش سطحی سیال عامل را بر شروع طغیان در جریان‌های دوفازی غیر همسو در لوله‌های شیب‌دار را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها طغیان را با کمک ترکیبی از مشاهدات، اندازه‌گیری نرخ جریان مایع تخلیه شده و تغییرات زمانی مقدار مایع ملاحظه کردند و در نهایت برای پیش‌بینی سرعت گاز طغیان در لوله‌های شیب دار تحت دبی جرمی مشخص، یک رابطه‌ی همبستگی را پیشنهاد دادند.

روش‌های مختلفی برای شناسایی رژیم‌های جریان وجود دارد. استفاده از شبکه‌های عصبی² اخیراً با کاربرد فراوانی همراه بوده و به‌سرعت در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد. قوش و همکاران [16] با استفاده از پروب رسانایی و شبکه‌های عصبی الگوهای جریان را برای جریان دوفازی هوا-آب غیر همسو به دست آوردند. قطر داخلی لوله‌ی مورد بررسی 25.4 میلی‌متر بوده است. محدوده‌ی سرعت ظاهری هوا بین 0.19 متر بر ثانیه تا 5.26 متر بر ثانیه و محدوده‌های سرعت ظاهری آب بین 0.006 متر بر ثانیه تا 0.144 متر بر ثانیه بود. آن‌ها با استفاده از 159 داده مختلف که با تغییر سرعت‌های ظاهری هوا و آب به دست آمده بود، الگوی جریان را ترسیم کرده اند. الگوی جریان رسم شده شامل چهار رژیم لخته‌ای، متلاطم، حلقوی و طغیان بود. حنفی زاده و همکاران [17] رژیم‌های جریان را در یک لوله عمودی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش در لوله‌ای با قطر داخلی 5 mm، ارتفاع 6 m و به‌صورت جریان دوفازی همسو و رو به بالا³ انجام شده است. رژیم‌ها با تفسیر سیگنال‌های فشار و استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه شده‌اند. به‌منظور تشخیص اثر رژیم‌های جریان بر سیگنال‌های فشار، داده‌های مربوط به نوسان فشار و فشار میانگین در هر یک از رژیم‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آن‌ها ویژگی‌های فشار میانگین‌گیری شده را در چهار رژیم حبابی، کف آلود، لخته‌ای و حلقوی مورد بررسی قرار دادند و چند پارامتر فشار را ارائه نمودند. همچنین نشان داده شد که می‌توان از رفتار مختلف این پارامترها در تعیین رژیم‌های مختلف استفاده نمود.

استفاده از قطره به‌عنوان فاز مایع نیز بخش دیگری از تحقیقات را در بر می‌گیرد. میوا و همکاران [18]، محدودیت جریان‌های غیر همسو را برای گاز و قطره در لوله‌ای نسبتاً بزرگ به صورت تجربی و تحلیلی بررسی نمودند. آنها اندرکنش بین قطرات آب و گاز در لوله‌ای با قطر 30 cm در این پژوهش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحلیلی با اختلاف 20 درصد شرایط طغیان پیش آمده در نتایج تجربی را نشان داد. میچالسکی [19] پژوهشی در زمینه تغییرات توزیع اندازه‌ی قطره در دستگاه اسکرابر⁴ برای هر دو نوع سیستم جریان دوفازی همسو و غیر همسو انجام داد. طبق بیان نویسنده، سرپوش اسپری، قطره‌هایی به بزرگی 4.5 mm را تولید می‌کند که درون دستگاه به صورت رو به پایین⁵ حرکت می‌کند. همچنین گزارش شد که قطر میانگین قطره‌ها تحت تأثیر زاویه‌ی اسپری کردن و سرعت فاز گاز قرار می‌گیرد. وی همچنین نتیجه گرفت که توزیع اندازه‌ی قطره‌ها هنگامی که آن‌ها در طول سیستم به‌صورت رو به پایین در حال حرکت هستند، به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در لوله‌های عمودی تحت شرایط

متلاطم¹ و حلقوی را مشاهده کردند. آن‌ها متوجه شدند که با تغییر قطر لوله از 40 mm به 70 mm محدوده مربوط به الگوی لخته‌ای به طور چشم‌گیری کاهش یافته و همچنین الگوی شبه-حلقوی را نیز به‌عنوان یک الگوی مستقل در لوله با قطر 70 mm گزارش کردند. موزا و همکاران [10] تأثیر قطر بر روی فیلم مایع و طغیان را در لوله‌های با ابعاد 6، 7، 8 و 9 میلی‌متر بررسی کردند. برای این کار از آب و نفت سفید استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که قطر لوله توسعه جریان فیلم را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد آن‌ها مشاهده کردند که برای جریان مایع با رینولدز کمتر از 300، سرعت‌های بحرانی طغیان با افزایش دبی آب کاهش می‌یابد در حالی که در رینولدزهای بالاتر این روند معکوس شده و با افزایش دبی مایع سرعت بحرانی طغیان نیز افزایش می‌یابد.

قرار دادن وسایلی مانند سیم پیچ درون لوله‌ها به‌منظور افزایش انتقال حرارت در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود جلب کرده است. در این حالت تغییرات شکل گرفته در هیدروپنایمیک جریان حائز اهمیت می‌باشد. کیم و همکاران [11] الگوهای جریان، کسر حجمی و سرعت شروع لخته‌ها در جریان دوفازی غیر همسو درون لوله عمودی همراه با سیم پیچ را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها از چهار سیم پیچ با قطرهای گام‌های متفاوت استفاده نمودند. وجود سیم پیچ باعث ایجاد آشفتگی در جریان‌های مایع و گاز می‌شود به گونه‌ای که سرعت و حرکت لخته‌ها در لوله دارای سیم پیچ کاملاً متفاوت با لوله فاقد سیم پیچ است. نتیجه بررسی آن‌ها حاکی از این بود که سرعت شروع رژیم لخته‌ای در لوله دارای سیم پیچ بیشتر از لوله بدون سیم پیچ است. کسر حجمی گاز نیز در لوله دارای سیم پیچ و در سرعت ظاهری زیاد گاز، کمتر از مقدار آن در لوله بدون سیم پیچ است.

گروهی از محققان، آزمایش‌ها را در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی شکل انجام داده‌اند. زاپک و کروگر [12] رژیم‌های جریان، افت فشار و طغیان را برای جریان دوفازی غیر همسو در کانال‌های عمودی و شیب‌دار با سطح مقطع مستطیلی به دست آوردند. ارتفاع بین 50 mm تا 150 mm و عرض کانال‌ها بین 10 mm تا 20 mm متغیر بود. از آب، متانول، پروپانول، هوا، آرگون، هلیوم و هیدروژن در این آزمایش استفاده شد. آن‌ها متوجه شدند که در زاویه‌های نزدیک به حالت افقی، امواج حلقوی تشکیل می‌شود، در زاویه‌های میانه، جریان‌های از نوع گردابه‌ای به‌وضوح مشاهده می‌شود و در حالت عمودی نیز جریان از نوع متلاطم همراه با مقداری جریان گردابه‌ای مشاهده می‌شود. شوجوان لیو و همکاران [13] تأثیر فاز گاز بر فیلم مایع در جریان غیر همسو را بررسی نمودند. آزمایش در کانالی با ابعاد $120 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 215 \text{ mm}$ و با شیب 45 درجه نسبت به افق صورت گرفت. مشاهده شد که دبی هر دو فاز آب و هوا تأثیر به‌سزایی بر عرض فیلم مایع دارند. عرض فیلم مایع با افزایش فاز گاز از صفر تا $3.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 25 درصد کاهش یافت، در حالی که در هنگام عدم حضور فاز گاز، با افزایش 6 برابری فاز مایع از $0.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ تا $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ این مقدار با افزایش 57 درصدی همراه بوده است. پدیده طغیان، تعداد قابل توجهی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه

جریان‌های غیر همسو را به خود اختصاص داده است. دیندارلیانتو و همکاران [14] اثرات کشش سطحی بر پدیده طغیان در جریان دوفازی غیر همسو در یک لوله شیب‌دار را بررسی کردند. آن‌ها بدون تغییر دادن سایر خواص آب و فقط با تغییر کشش سطحی نتایج آزمایشگاهی را به دست آوردند. لوله‌ی مورد بررسی دارای قطر داخلی 16 میلی‌متر، طول 1.1 متر و شیب‌های بین

² Neural networks

³ Upward

⁴ Scrubber

⁵ Downward

¹ Chum

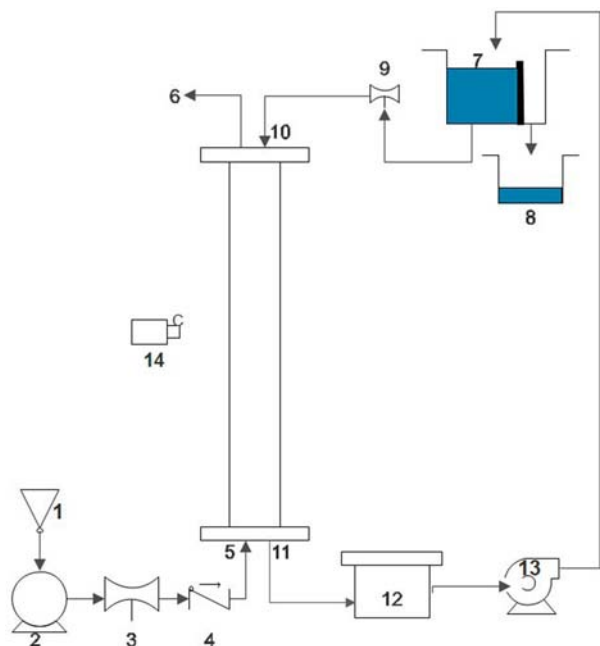


Fig. 1 Experimental apparatus. 1. Inverter 2. Compressor 3. Gas flow meter 4. Non-return valve 5. Air inlet 6. Air outlet 7. Water tank 8. Water tank 9. Water flow meter 10. Water inlet 11. Water outlet 12. Water collector tank 13. Water pump 14. Camera.

شکل 1 سیستم آزمایشگاهی 1. مبدل تنظیم کننده دور موتور 2. کمپرسور 3. دی-سنج گاز 4. شیر یک طرفه 5. ورودی هوا 6. خروجی هوا 7. مخزن آب شماره 1 8. مخزن آب شماره 2 9. دی-سنج آب 10. ورودی آب 11. خروجی آب 12. مخزن جمع‌آوری آب 13. پمپ آب 14. دوربین.

جریانی مختلف، از روش ثبت تصاویر با استفاده از دوربین کانن مدل شات SX220 HS پاور با سرعت فیلم‌برداری 240 f/s استفاده شده است. دوربین‌ها برای ثبت تصاویر در ارتفاع 50 cm تا 70 cm از سطح پایینی لوله تنظیم شده اند. همچنین نور سفید با فاصله مناسب از پشت لوله آزمایش به صفحاتی مات و سفید می‌تابد که این صفحات موجب پخش شدن نور به بخش وسیع‌تری از داخل لوله شده و منجر به متمرکز کردن لنز دوربین بر روی ساختار حباب‌ها می‌شود که تأثیر بسیار به‌سزایی بر افزایش کیفیت تصاویر ثبت شده دارد. در این سیستم آزمایشگاهی قبل از ورود گاز به لوله‌ی آزمایش، یک شیر یک طرفه نصب شده است که تا حد زیادی از نفوذ و برگشت آب در مسیر هوا جلوگیری می‌شود. هوا از طریق ورودی با قطر داخلی 25.4 mm و آب از طریق ورودی با قطر داخلی 12.7 mm وارد لوله‌ی آزمایش می‌شود.

3- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، به دست آوردن الگوهای جریان دوفازی غیر همسو در لوله‌های عمودی با قطرهای 60 mm، 80 mm و 110 mm و هم-چنین بررسی تأثیر قطر لوله بر مرزبندی الگوها است. در ابتدای آزمایش و قبل از جریان یافتن فاز گاز، آب جریان می‌یابد و بعد از پر شدن لوله تا ارتفاع 45 cm، فاز گاز نیز به لوله آزمایش جریان می‌یابد. این عمل به عنوان یکی از شرایط اولیه در تمامی آزمایش‌ها اعمال شده است و هدف از آن ایجاد شرایط توسعه یافته برای تشکیل الگوهای مختلف جریان است.

به منظور کاهش خطاهای آزمایشگاهی، هر یک از آزمایش‌ها 3 بار تکرار شده و سپس نتایج با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به خطای پائین دی-سنج‌ها

مختلف، مشاهده می‌شود که تغییرات در پارامترهای تأثیر گذار جریان مانند قطر، شیب، سرعت فازها و سایر موارد، منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رژیم‌ها و هیدرودینامیک جریان می‌شود. در اغلب پژوهش‌های صورت گرفته تنها از یک لوله با قطرهای کوچک استفاده شده است در حالی که لوله‌های با قطرهای بزرگ کاربرد زیادی را در صنایع مختلف دارا می‌باشند. در تحقیق حاضر از سه لوله با قطرهای بزرگ مقیاس استفاده شده است که علاوه بر مشاهده نقشه‌ای رژیم‌های جریان در هریک از لوله‌ها، تأثیر افزایش قطر بر نقشه رژیم‌ها و هیدرودینامیک جریان نیز مشاهده می‌شود.

2- سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی شامل سه لوله با طول یکسان 2 متر و قطرهای داخلی 60 mm، 80 mm و 110 mm است. با توجه به اینکه قطر لوله‌های غالب در صنعت در این محدوده است این مقادیر انتخاب گردید. علاوه بر این مطلب از مرور مقالات و گزارش‌های پیشین ملاحظه شد که نتایج یا کارهای انجام یافته در این محدوده قطر برای جریان‌های دوفازی غیر همسو نادر و کمیاب است. لذا بنا بر ضرورت، کار حاضر با قطرهای مذکور انجام گرفت. به‌منظور مشاهده رژیم‌های جریان دوفازی، لوله‌ها از جنس اکریلیک شفاف انتخاب شده‌اند تا رفتار رژیم‌ها به‌سادگی ملاحظه و تجزیه و تحلیل شود. برای تأمین دبی هوای مورد نیاز از یک کمپرسور با توان 45 kW استفاده شده است. جهت کنترل دبی هوا، این کمپرسور به یک سیستم اینورتر مجهز شده است که با تغییر فرکانس اینورتر می‌توان دبی هوا را با دقت بالا و در دامنه‌ای گسترده ایجاد نمود. برای ایمنی کمپرسور یک شیر اطمینان تعبیه شده است که در صورت رسیدن فشار به 1000 mbar عمل کرده و فشار هوا را در محدوده ایمن نگه می‌دارد.

برای ایجاد تعادل حرارتی بین دو فاز، هوا از یک مبدل پوسته-لوله که با آب شهری خنک‌کاری می‌شود، عبور کرده تا به دمای آب داخل لوله آزمایش برسد. از آب شهر نیز به عنوان فاز مایع در این آزمایش استفاده شده است. بدین منظور مطابق شکل 1 از دو مخزن استفاده می‌شود. سطح پایینی مخزن شماره 1 در ارتفاع 303 cm از سطح زمین قرار دارد. آب مورد نیاز برای انجام آزمایش از مخزن 1 (شماره 7) تأمین می‌گردد.

با توجه به این که ارتفاع آب و در نتیجه هد آب در حین انجام آزمایش تغییر می‌کند و باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود، از مخزن 2 (شماره 8) برای رفع این مشکل استفاده شده است، به‌طوری‌که بعد از اینکه آب در مخزن 1 به ارتفاع 32 cm رسید، آب اضافی از طریق مسیر تعبیه شده در این مخزن به مخزن 2 انتقال می‌یابد. آب خروجی از لوله نیز در یک مخزن جمع‌آوری شده و با استفاده از یک پمپ به مخزن 1 بازمی‌گردد.

در شکل 2 نمایی از سیستم آزمایشگاهی نمایش داده شده است. در جدول 1 نیز اجزای اصلی تشکیل دهنده‌ی سیستم آزمایشگاهی به همراه برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها ذکر شده است. دی-های جریان هوا و آب به‌ترتیب با استفاده از دی-سنج‌های ورتکسی کرون مدل اوپتی سورل 4070c و الکترومغناطیسی کرون مدل اوپتی فلاکس 1000 اندازه‌گیری می‌شوند که دی-سنج هوا دارای بیشینه خطای 1 درصد مقدار خواندن در حداکثر دبی عبوری و دی-سنج آب نیز دارای بیشینه خطای 0.5 درصد در مقدار خواندن هستند. دی-سنج هوا به حسگر اندازه‌گیری دما و فشار مجهز است و با اندازه-گیری دما و فشار محیط، دبی‌ها را محاسبه می‌کند، بنابراین نتایج حاصل تحت هر شرایط محیطی صحیح و دقیق خواهند بود. برای ثبت ساختار جریان‌های دوفازی آب-هوا در سرعت‌های مختلف و به دست آوردن الگوهای

به تدریج با افزایش سرعت ظاهری هوا الگوهای لخته‌ای، متلاطم، حلقوی و طغیان مشاهده شدند. با توجه به پیچیدگی‌های جریان‌های دوفازی و به‌ویژه جریان‌های غیر همسو، در رسم الگوهای جریان تلاش بر این بوده است که رژیم غالب به‌عنوان رژیم مورد نظر انتخاب شود. به‌منظور نمایش دقیق‌تر نقشه الگوها و ناحیه‌ی گذار الگوهای مختلف، در برخی نقاط هر دو رژیم غالب نمایش داده شده‌اند. در شکل 3 نمونه‌ای از تصاویر ثبت شده برای رژیم‌های مختلف آمده است.

رژیم لخته‌ای: رژیم لخته‌ای اولین رژیمی است که مشاهده می‌شود. در این رژیم، مقداری آب که حاوی تعداد زیادی حباب کوچک است و در حال دنبال کردن حباب تیلور هستند، ملاحظه شد. حباب تیلور مشاهده شده در این لوله به صورت یک گنبد چتری شکل گازی است که نمونه‌ای از آن در شکل 3-a نشان داده شده است. با افزایش سرعت ظاهری گاز در سرعت ظاهری ثابت آب، طول حباب‌های تیلور بسیار بیشتر می‌شود. هم‌چنین با افزایش سرعت ظاهری آب در سرعت ظاهری ثابت گاز، محدوده‌ی رژیم لخته‌ای کاهش می‌یابد که این اتفاق در اثر افزایش آب و در نتیجه افزایش فشار بر حباب‌های تیلور روی می‌دهد.

رژیم متلاطم: در رژیم لخته‌ای با افزایش سرعت فاز گاز، حباب‌های تیلور شکسته شده و جریان ناپایدار و انتقالی بین دو جریان لخته‌ای و حلقوی شکل خواهد گرفت. در این رژیم، هوا تحت تأثیر مومنتم خود آب را به سمت بالا می‌راند و آب هم پس از بالا رفتن به دلیل چگالی بالایی که نسبت به هوا دارد به قسمت‌های پایین لوله باز می‌گردد که باعث می‌شود در این جریان حرکت-های نوسانی به سمت بالا و پایین رخ دهد (شکل 3-b).

متلاطم - حلقوی: در این وضعیت ترکیبی از هر دو رژیم متلاطم و حلقوی مشاهده شده است. در یک بازه‌ی زمانی جریان به شدت آشفته و نوسانی بوده و پس از خروج بیشتر آب از لوله، جریان از این حالت خارج شده و برای مدتی به جریان حلقوی تغییر حالت می‌دهد. با انباشته شدن دوباره آب این وضعیت تکرار می‌شود (شکل 3-c).

رژیم حلقوی: در این جریان در اثر افزایش سرعت گاز، این فاز به تنهایی در وسط لوله جریان می‌یابد و تنها لایه‌ای از آب در اطراف لوله قرار دارد و شکلی مانند یک استوانه‌ی تو خالی را ایجاد می‌کند. جریان حلقوی به عنوان



Fig. 2 A view of experimental apparatus.

شکل 2 نمایشی از سیستم آزمایشگاهی

جدول 1 اجزای اصلی تشکیل دهنده سیستم آزمایشگاهی

Table 1 The main parts of constituting experimental apparatus

اجزا	ویژگی‌ها
دبی سنج هوا	بیشینه خطای 1 درصد مقدار خواندن
دبی سنج آب	بیشینه خطای 0.5 درصد مقدار خواندن
لوله	تعداد: 3 جنس: اکریلیک شفاف قطر: 110 mm, 80 mm, 60 mm
کمپرسور	توان: 45 kw
دوربین	سرعت فیلم‌برداری: 240 f/s

نتایج بدست آمده چندان تفاوتی با هم نداشت. برای نمایش الگوهای جریان به صورت گرافیکی، نیاز است که این الگوها به عنوان تابعی از نرخ‌های جریان آب و هوا رسم شود. ساده‌ترین روش برای ایجاد یک نقشه الگوی جریان، تعیین منطقه هر الگوی جریان با سرعت ظاهری جریان گاز (J_g) و سرعت ظاهری جریان مایع (J_l) و سپس ایجاد ارتباط بین آن‌ها به عنوان محورهای افقی و عمودی است.

در نقشه‌های الگوی جریان پیشنهاد شده توسط محققان مختلف، هماهنگی چندانی در مورد خطوط انتقال بین الگوهای جریان و نرخ‌های جریان این الگوها وجود ندارد و بین محققان نظرات و دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد. از این رو مرز بین رژیم‌ها معمولاً به صورت خط نشان داده نمی‌شود بلکه یک ناحیه عریض بین رژیم‌ها است که این منطقه گذر و انتقال رژیم‌ها یا محدوده اختلاف نظر بین محققین اهل فن است. این امر به علت این واقعیت است که این نقشه‌ها به شدت به مشاهده مستقیم، شرایط عملکردی، جهت‌گیری و قطر لوله وابسته هستند. تمامی این عوامل می‌تواند در ایجاد نقشه‌های الگوی جریان مختلف نقش داشته باشد. بنابراین، نیاز است که چنین نقشه‌هایی با تخمین محدوده واقعی انتقال الگوی جریان و بسیار با دقت ایجاد شوند.

3-1- نتایج مربوط به لوله 60 mm

برای این لوله $L/d = 33.33$ بوده و آزمایش برای 52 حالت متناظر با سرعت‌های ظاهری فازها انجام شده است. محدوده‌ی سرعت ظاهری آب بین $0.05-0.11$ m/s و محدوده‌ی سرعت ظاهری هوا بین $1.77-7.17$ m/s می‌باشد. در نقاط با سرعت‌های ظاهری کم هوا، هیچ گونه الگوی جریان دوفازی تشکیل نشد که این امر به دلیل فشار ستون آب و جلوگیری از ورود هوا بود.



Fig. 3 Flow patterns in tube with inner diameter of 60 mm a) slug, b) churn, c) churn-annular, d) annular, e) reverse flow

شکل 3 الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر داخلی 60 mm (a) لخته‌ای، (b) متلاطم، (c) متلاطم - حلقوی، (d) حلقوی، (e) جریان برگشتی



Fig. 4 Binary Images of Flow patterns in tube with inner diameter of 60 mm

شکل 4 تصاویر باینری الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر داخلی 60 mm

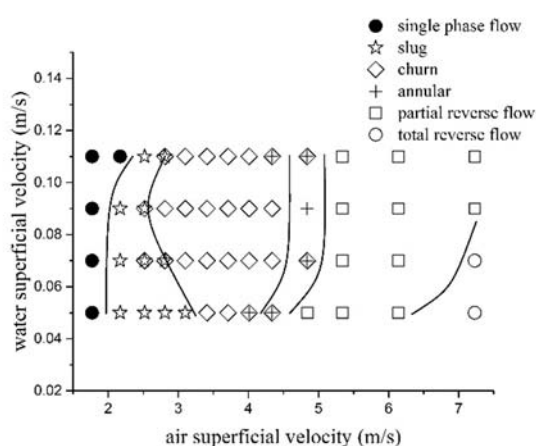


Fig. 5 Flow patterns map for tube with inner diameter of 60 mm with 52 flow conditions

شکل 5 نقشه الگوهای جریان برای لوله با قطر داخلی 60 mm و 52 شرایط آزمایشی

رژیم حلقوی: اندکی افزایش محدوده و تا حدودی تاخیر در آغاز رژیم حلقوی قابل مشاهده است. در واقع افزایش محدوده ناشی از ناتوانی فاز گاز در راندن آب و تشکیل جریان برگشتی نسبت به لوله 60 mm است که در نتیجه آن بخشی از نقاط متناظر با جریان برگشتی جزئی در لوله کوچک‌تر، در شرایط فعلی به رژیم حلقوی تغییر یافته است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، محدوده رژیم متلاطم با مقداری گسترش همراه بوده که باعث به تأخیر افتادن شروع رژیم حلقوی است (شکل 6-d).

جریان برگشتی: در مقایسه با لوله 60 mm، جریان برگشتی تغییرات نسبتاً زیادی را در محدوده خود متحمل شده است. با توجه به این نکته می‌توان به تأثیر به‌سزای قطر لوله بر روی جریان برگشتی و شروع طغیان پی برد. جریان برگشتی مشاهده شده در راندن کامل آب به خارج از لوله ناتوان بوده و تعادل ناشی از اندرکنش بین مومنتم گاز و نیروی جاذبه‌ی مایع در سطح مقطعی از لوله اتفاق می‌افتد (شکل 6-e). الگوهای جریان مشاهده در لوله 80 mm، با استفاده از روش پردازش تصویر به تصاویر باینری تبدیل شده و در شکل 7 نمایش داده شده است. نقشه الگوهای جریان نیز برای این لوله در شکل 8 نمایش داده شده است.

3-3- نتایج مربوط به لوله 110 mm

برای این لوله $L/d = 18.18$ بوده و آزمایش برای 52 حالت انجام شده است.

یک هسته‌ی گازی تعریف می‌شود که با لایه پیوسته مایع مجاور لوله احاطه شده است (شکل 3-d).

جریان برگشتی¹: در این حالت سرعت هوا بسیار بیشتر از سرعت آب است و بنابراین در مقطعی از لوله، هوا از سرازیر شدن آب جلوگیری کرده و آب را به سمت بالا می‌راند. در این وضعیت جریان از حالت غیر همسو خارج شده و به جریان همسو و رو به بالا تبدیل می‌شود. به پدیده‌ی جریان برگشتی، اصطلاحاً طغیان نیز گفته می‌شود (شکل 3-e).

جریان برگشتی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: 1- جریان برگشتی جزئی 2- جریان برگشتی کلی.

جریان برگشتی جزئی: به ازای مقادیر بالای سرعت گاز، بخشی از مایع در مسیر حرکت فاز گاز جریان می‌یابد در حالی که باقیمانده‌ی آب هنوز در مسیر اولیه‌ی خود در حال حرکت است.

جریان برگشتی کلی: به ازای مقادیر بالاتر سرعت گاز، تمامی فاز آب به سمت بالا رانده می‌شود. بنابراین تغییر رژیم به جریان برگشتی کلی باعث ایجاد وضعیتی می‌شود که هیچ مایعی به پایین لوله انتقال نمی‌یابد و به همین دلیل گذار به این رژیم اغلب، نقطه نفوذ مایع صفر² نامیده می‌شود.

لخته‌ای - متلاطم: تحت این شرایط ابتدا جریان لخته‌ای حاکم است اما به تدریج با افزایش فاز مایع، فشار وارد بر رژیم لخته‌ای زیاد شده و حباب‌های تیلولر شکسته و جریان به متلاطم تبدیل می‌شود. به دلیل این که در طی زمان آزمایش هر دو رژیم لخته‌ای و متلاطم رژیم‌های غالب بودند، در نقطه‌های مورد نظر ترکیبی از هر دو رژیم بیان شده است.

الگوهای جریان مشاهده در لوله 60 mm، با استفاده از روش پردازش تصویر به تصاویر باینری تبدیل شده و در شکل 4 نمایش داده شده است. نقشه الگوهای جریان نیز برای این لوله در شکل 5 نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که مطابق شکل 5، در سرعت‌های بسیار پایین گاز، هوا توانایی نفوذ به درون فاز مایع را نداشته و رژیم به‌صورت تک فاز باقی می‌ماند.

3-2- نتایج مربوط به لوله 80 mm

برای این لوله $L/d = 25$ بوده و آزمایش برای 52 حالت انجام شده است. محدوده‌ی سرعت ظاهری آب بین 0.03-0.09 m/s و محدوده‌ی سرعت ظاهری هوا بین 0.99-4.03 m/s می‌باشد. الگوهای مشاهده شده در این حالت شامل الگوهای اصلی لخته‌ای، متلاطم، حلقوی، و جریان برگشتی و همچنین شامل الگوهای فرعی لخته‌ای-متلاطم و متلاطم-حلقوی می‌باشد.

رژیم لخته‌ای: محدوده‌ی رژیم لخته‌ای نسبت به لوله 60 mm مقداری کمتر شده و همچنین حباب‌های تیلولر مشاهده شده نسبتاً سرعت کمتر و اندازه‌ی کوچک تری دارند. افزایش حجم فاز آب و فشار ناشی از آن دلیل این تغییرات است (شکل 6-a).

رژیم متلاطم: در این ناحیه که حد فاصل بین رژیم لخته‌ای و حلقوی است، محدوده‌ی بزرگ تری را نسبت به لوله 60 mm در بر گرفته است. از یک سو با توجه به از هم پاشیدن سریع تر حباب‌های تیلولر، بخشی از رژیم لخته‌ای در لوله‌ی کوچک تر به جریان متلاطم تبدیل شده است و از سوی دیگر با افزایش حجم آب درون لوله، هوا قدرت کمتری برای نفوذ به مرکز لوله دارد و بخشی از رژیم حلقوی نیز در این لوله با رژیم متلاطم جایگزین شده است (شکل 6-b).

¹ Reverse flow

² Zero liquid penetration point

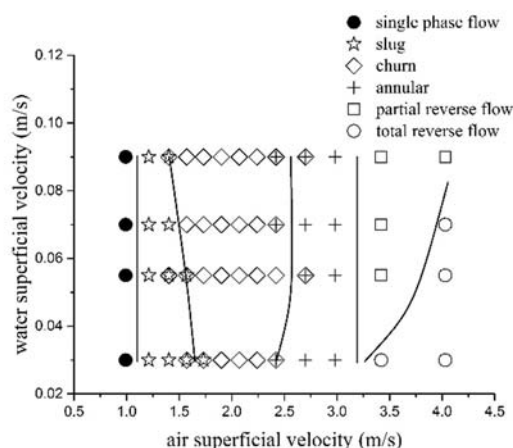


Fig. 8 Flow patterns map for tube with inner diameter of 80 mm with 52 flow conditions

شکل 8 نقشه الگوهای جریان برای لوله با قطر داخلی 80 mm و 52 شرایط آزمایشی

رژیم متلاطم: مطابق نقشه ی الگوهای به دست آمده در شکل 9 رژیم متلاطم به تنهایی بیش از 60 درصد از داده‌های آزمایش را در بر گرفته است. این امر بیانگر کاهش توان گاز در غلبه بر اینرسی مایع، در محدوده ی نمایش داده شده است. علاوه بر این می توان نوسان‌های شدید را به عنوان یکی دیگر از تفاوت‌های رژیم متلاطم در این لوله در قیاس با لوله‌های کوچک تر بیان کرد (شکل 9-b).

رژیم حلقوی: رژیم حلقوی محدوده ی کوچک‌تری را نسبت به لوله‌های قبلی در بر گرفته است. عمده ی این محدوده نیز همراه با رژیم متلاطم مشاهده شده است. در این حالت فیلم نازک اطراف لوله مقادیر نسبتاً بزرگ-تری را داراست (شکل 9-c).

الگوهای جریان مشاهده شده در لوله 110 mm، با استفاده از روش پردازش تصویر به تصاویر باینری تبدیل شده و در شکل 10 نمایش داده شده است. نقشه الگوهای جریان نیز برای این لوله در شکل 11 نمایش داده شده است. در شکل 12 نیز تصاویری از حباب تیپور در هر سه لوله و در شرایطی که دبی هوا 35 m³/hour و دبی آب 3.0 L/s است، آورده شده است.

4-3- ناپایداری کلون - هلمهولتز

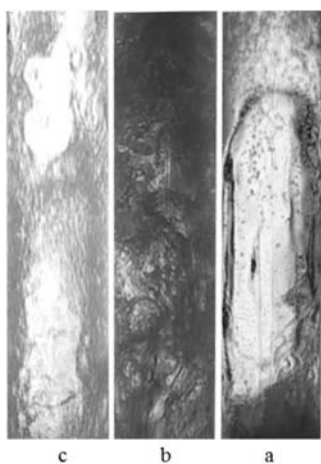


Fig. 9 Flow patterns in tube with inner diameter of 110 mm a) slug, b) churn, c) annular

شکل 9 الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر داخلی 110 mm (a) لخته‌ای، (b) متلاطم، (c) حلقوی



Fig. 6 Flow patterns in tube with inner diameter of 80 mm a) slug, b) churn, c) churn-annular, d) annular, e) reverse flow

شکل 6 الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر داخلی 80 mm (a) لخته‌ای، (b) متلاطم، (c) متلاطم - حلقوی، (d) حلقوی، (e) جریان برگشتی

محدوده ی سرعت ظاهری آب بین 0.55-2.26 m/s و محدوده ی سرعت ظاهری هوا بین 0.01-0.05 m/s می‌باشد. الگوهای مشاهده شده در این حالت شامل الگوهای اصلی لخته‌ای، متلاطم و حلقوی و همچنین شامل الگوهای فرعی لخته‌ای - متلاطم و متلاطم - حلقوی می‌باشد. با انتخاب لوله با قطر بزرگ تر 110 mm برای بخش سوم آزمایش، تأثیر قطر بر روی الگوهای جریان بسیار ملموس تر مشاهده گردید. لازم به ذکر است که در این لوله و در محدوده ی سرعت‌های آزمایش شده، جریان برگشتی مشاهده نگردید. ایجاد جریان برگشتی در این لوله و تحت شرایط اولیه یکسان نیازمند محدوده ی سرعت ظاهری بالایی برای فاز هواست.

رژیم لخته‌ای: با توجه به حجم بالای آب درون لوله که شرایط اولیه فشاری ثابتی را برای ورود گاز به درون لوله ایجاد می‌کند، رژیم لخته‌ای به سختی تشکیل می‌شود و محدوده ی رژیم لخته‌ای نسبت به لوله‌های 60 mm و 80 mm بسیار کاهش یافته است. همچنین حباب‌های تیپور ایجاد شده طول بسیار کمتر و سرعت پایین‌تری دارند (شکل 9-a). به دلیل اینرسی بالای آبی که در مسیر حباب با آن برخورد می‌کند، ناپایداری‌هایی در حرکت حباب‌های تیپور مشاهده شده و باعث ایجاد آشفتگی‌های زیادی در جریان شده که باعث کوتاه شدن عمر رژیم لخته‌ای و تبدیل سریع این رژیم به رژیم متلاطم می‌شود. در نتیجه در اکثر ناحیه‌هایی که حباب تیپور مشاهده شده، رژیم به عنوان لخته‌ای - متلاطم نامیده شده است.



Fig. 7 Binary Images of Flow patterns in tube with inner diameter of 80 mm

شکل 7 تصاویر باینری الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر داخلی 80 mm

یک مقدار بحرانی باشد. در این حالت اگر اغتشاش کوچکی در فصل مشترک ایجاد شود، رژیم جریان دوفازی تغییر می‌کند.

در حین انجام آزمایش و در رژیم حلقوی در قسمت‌های خاصی از لوله‌ها، ناپایداری‌هایی مشاهده شد. این ناپایداری‌ها به صورت موج‌هایی با طول موج خاص بودند. به دلیل اهمیت ناپایداری کلون-هلمهولتز، در این بخش از مقاله به محاسبه و تحلیل آن پرداخته شده است.

با توجه به معادله پیوستگی، با افزایش سرعت یک فاز، سرعت فاز دیگر کاهش می‌یابد. با تغییر میدان سرعت، میدان فشار نیز تغییر می‌یابد که این مورد به اثر برنولی معروف است. ناپایداری کلون - هلمهولتز مشاهده شده در هر یک از لوله‌ها در شکل 13 نمایش داده شده است. رابطه (2) بیان می‌کند که اغتشاشات ایجاد شده در جریان با طول موج بزرگ‌تر از مقدار بحرانی λ_c ناپایدار خواهند بود [20].

$$\lambda_c = \frac{2\pi S(\rho_l + \rho_g)}{\rho_l \rho_g (\Delta u)^2} \quad (2)$$

که در رابطه بالا λ_c طول موج بحرانی، S کشش سطحی، ρ_l و ρ_g همچنین ρ_l و ρ_g نیز به ترتیب چگالی‌های فاز مایع و گاز و Δu بیانگر اختلاف سرعت فازها از یکدیگر است. با انجام دو فرض $\rho_l \gg \rho_g$ و $\Delta u \approx j_G$ رابطه (2) به رابطه (3) تبدیل می‌شود [20].

$$\lambda_c = \frac{2\pi S}{\rho_g (j_G)^2} \quad (3)$$

کشش سطحی و چگالی گاز در دمای 15 درجه $S = 73.5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ و $\rho_g = 1.225 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. طول موج‌های بحرانی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی و همچنین مقدار خطای بین این نتایج در جدول 2 نشان داده شده است.

4- محاسبه عدم قطعیت

هدف اصلی از انجام یک اندازه‌گیری، تعیین مقدار یک کمیت مشخص، یعنی مقدار اندازه‌گیری شونده است. به دلیل خطاهای ایجاد شده در طی فرایند اندازه‌گیری، مقدار اندازه‌گیری شونده را نمی‌توان تعیین کرد و تنها می‌توان تخمینی برای مقدار اندازه‌گیری شونده به دست آورد. این تخمین زمانی کامل است که با یک بیان درباره‌ی عدم قطعیت، ارائه شود.

با در نظر گرفتن خطاهای اندازه‌گیری موجود در جدول 3، نیاز است که با محاسبه‌ی عدم قطعیت سرعت‌های ظاهری آب و هوا در شرایط آزمایش، دقت نقشه‌های الگوهای جریان ارائه شده در لوله‌ها ارزیابی گردد. سرعت‌های ظاهری فازهای آب و هوا از رابطه (4)، به دست می‌آیند [21]:

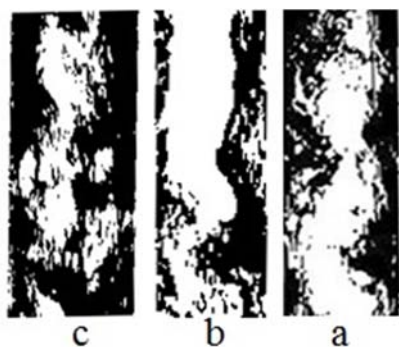


Fig. 13 examples of Kelvin- Helmholtz instability in tubes with a) 60 mm, b) 80 mm and c) 110 mm diameter

شکل 13 نمونه‌هایی از ناپایداری کلون-هلمهولتز در لوله با قطر (a) 60 mm، (b) 80 mm و (c) 110 mm



Fig. 10 Binary Images of Flow patterns in tube with inner diameter of 110 mm

شکل 10 تصاویر باینری الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر داخلی 110 mm

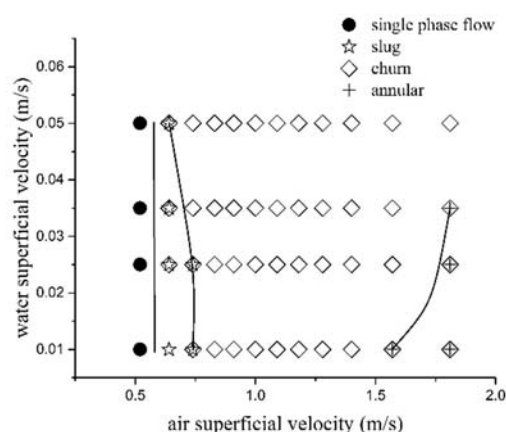


Fig. 11 Flow patterns map for tube with inner diameter of 110 mm with 52 flow conditions

شکل 11 نقشه الگوهای جریان برای لوله با قطر داخلی 110 mm و 52 شرایط آزمایشی

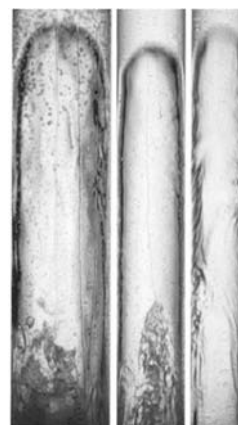


Fig. 12 Comparison of Taylor bubble in tubes with same flow rates of air and water

شکل 12 مقایسه حباب تیلور در دبی‌های یکسان آب و هوا در لوله‌ها

ناپایداری کلون-هلمهولتز یکی از ناپایداری‌های مشاهده شده در جریان‌های دوفازی است. این ناپایداری در لوله‌های افقی، در رژیم لایه‌ای و در لوله‌های عمودی، در رژیم حلقوی رخ می‌دهد. ناپایداری کلون - هلمهولتز در جریان‌های دوفازی لایه‌ای هنگامی اتفاق می‌افتد که سرعت نسبی دو فاز بیشتر از

جدول 3 عدم قطعیت تجهیزات آزمایش

Table 3 Uncertainty of experimental measuring devices		
وسيله اندازه‌گیری	عدم قطعیت اندازه‌گیری	محدوده اندازه‌گیری
دبی‌سنج هوا	$\pm 1\%$	10.2-114 m ³ /hour
دبی‌سنج آب	$\pm 0.5\%$	0-5.46 m ³ /hour
کولیس	$\pm 0.01\text{mm}$	0-150 mm

شدید وضوح این مقادیر می‌شود و به‌ناچار داده‌های هر یک از لوله‌ها در نموداری مجزا ترسیم به‌منظور مقایسه در یک شکل به نمایش گذاشته شده اند. جدول‌های 4 و 5 به ترتیب میانگین عدم قطعیت‌های سرعت‌های ظاهری هوا و آب در هر لوله را به نمایش گذاشته‌اند. درصد خطا نیز بر مبنای مقایسه‌ی این مقادیر با میانگین سرعت‌های ظاهری متناظر با آن‌ها محاسبه شده و در این جدول‌ها بیان شده است. نتایج بیانگر درصد پایین عدم قطعیت‌های آزمایش است که با توجه به صحت بالای تجهیزات اندازه‌گیری، امری مشهود به‌نظر می‌رسد.

1-4- معیار تعداد تکرارهای آزمایش

انجام آزمایش‌های مکرر، از جمله روش‌های افزایش‌دهنده‌ی دقت نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌باشد. سطح اطمینان²، معیاری است که با استفاده از آن می‌توان تعداد تکرار آزمایش‌ها را برای دستیابی به دقت مطلوب کنترل نمود. با در نظر گرفتن این نکته که هدف این پژوهش دسته‌بندی و ارائه الگوهای جریان است، سطح اطمینان 95 درصد جهت دست یافتن به اهداف این پژوهش، مقداری ایده‌آل است.

با استفاده از رابطه (6) می‌توان به این مقدار از سطح اطمینان دست یافت [21]:

$$\alpha = \frac{t\omega}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

در رابطه فوق، n تعداد تکرار آزمایش‌ها، t مقداری متناظر با سطح اطمینان مورد نظر است و بر اساس $n = 3$ و سطح اطمینان 95 درصد برابر با 4.303 می‌شود. α نیز عدم قطعیت حاصل از تکرار آزمایش‌ها می‌باشد. با جای‌گذاری مقادیر ω از جدول‌های 4 و 5، عدم قطعیت ناشی از سه بار تکرار آزمایش برای سرعت‌های ظاهری هوا و آب به‌دست آمده که این مقادیر در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 4 میانگین و درصد عدم قطعیت سرعت ظاهری هوا در لوله‌های مختلف

Table 4 Average and percentage uncertainty of air superficial velocity in tubes		
قطر داخلی لوله (mm)	میانگین عدم قطعیت اندازه‌گیری	عدم قطعیت (%)
60	0.04	1
80	0.02	0.9
110	0.01	0.94

جدول 5 میانگین و درصد عدم قطعیت سرعت ظاهری آب در لوله‌های مختلف

Table 5 Average and percentage uncertainty of water superficial velocity in tube		
قطر داخلی لوله (mm)	میانگین عدم قطعیت اندازه‌گیری	عدم قطعیت (%)
60	5.5×10^{-4}	0.47
80	2.5×10^{-4}	0.41
110	1.4×10^{-4}	0.46

² Level of confidence

$$j = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (4)$$

در این رابطه، Q دبی فازها و d قطر داخلی لوله آزمایش است. سپس عدم قطعیت سرعت‌های ظاهری آب و هوا در هر سه لوله و در تمامی نقاط آزمایش با استفاده از رابطه (5) به‌دست می‌آید [21]:

$$\omega_j = \left[\left(\frac{\partial j}{\partial Q} \omega_Q \right)^2 + \left(\frac{\partial j}{\partial d} \omega_d \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

در رابطه بیان شده ω_j عدم قطعیت مقدار اندازه‌گیری شده است. ω_Q و ω_d نیز به‌ترتیب عدم قطعیت دبی‌سنج‌ها و قطر لوله است که مقدار آن‌ها در جدول 3 گزارش شده است. مقدار عدم قطعیت‌های محاسبه شده برای هوا و آب به ترتیب در شکل‌های 14 و 15 نمایش داده شده است. در شکل‌های مذکور، عدم قطعیت هر یک از سرعت‌ها به‌صورت یک نوار خط¹ بر روی داده مورد نظر رسم شده است. به‌دلیل کم بودن مقادیر خطاهای محاسبه شده و همچنین تفاوت در محدوده‌ی سرعت‌های ظاهری در لوله‌های مختلف، نمایش مقادیر مورد نظر برای تمامی لوله‌ها، در یک نمودار منجر به کاهش

جدول 2 مقایسه طول موج تحلیلی و آزمایشگاهی ناپایداری کلین-هلمهولتز

Table 2 Comparison of analytical and experimental wavelengths of Kelvin – Helmholtz instability

قطر داخلی لوله سرعت ظاهری (mm)	گاز (m/s)	آزمایشگاهی (mm)	طول موج (mm)	طول موج تحلیلی خطای نسبی (%)
60	3.7	45	27.5	38.9
80	2.3	88.6	71.2	19.6
110	1.85	95	110	13.6

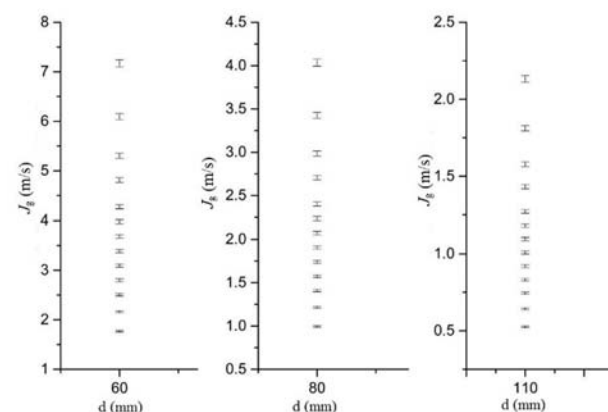


Fig. 14 Uncertainty of air superficial velocities in tubes

شکل 14 عدم قطعیت سرعت‌های ظاهری هوا در لوله‌های مختلف

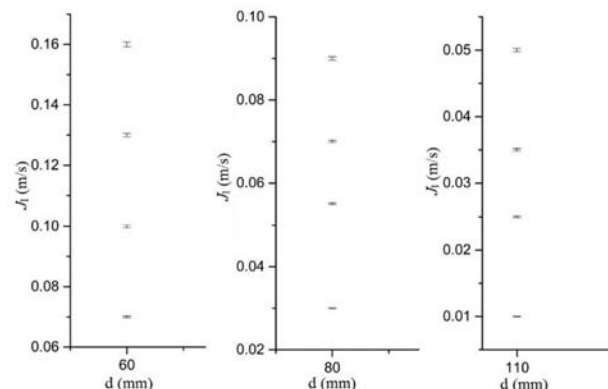


Fig. 15 Uncertainty of water superficial velocities in tubes

شکل 15 عدم قطعیت سرعت‌های ظاهری آب در لوله‌های مختلف

¹ Error bar

$$\frac{\delta}{d} = B \left[\frac{\mu_l^2}{d^3 g (\rho_l - \rho_g) \rho_l} \right]^p \left[\frac{4 \rho_l U_f d}{\mu_l} \right]^q \quad (11)$$

که در این رابطه برای جریان آشفته B، p و q به ترتیب مقادیر 0.00448، 5/6 و 3/2 را دارا می‌باشند.

$$j_g - j_l = \frac{4 \frac{\delta}{d} U_f - 0.35 \sqrt{gd} (1 - 4 \frac{\delta}{d})}{0.2 - 4.8 \frac{\delta}{d}} \quad (12)$$

همان‌طور که در رابطه 10 مشاهده می‌شود، در رسم مرز d، فقط سرعت ظاهری آب به‌عنوان عامل محدود کننده رژیم لخته‌ای عمل می‌کند. به منظور شرکت دادن سرعت ظاهری گاز در تعیین محدوده رژیم لخته‌ای، از رابطه 13 استفاده شده و مرز e ترسیم می‌شود [6].

$$j_g - j_l = \frac{\left\{ C_w [gd \Delta \rho]^{\frac{1}{4}} - \left[4(\delta/d) U_f \rho_l^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right\}^2}{1.2(1 - 4(\delta/d)) \rho_g^{\frac{1}{2}}} - 0.292 \sqrt{gd} \quad (13)$$

در این رابطه $C_w \approx 1$ می‌باشد. در شکل 16 ناحیه‌هایی که در آن‌ها امکان وجود رژیم لخته‌ای وجود دارد با حرف S نمایش داده شده‌اند. همچنین نواحی بین رژیم لخته‌ای و مرز طغیان نیز تنها امکان وجود رژیم حلقوی وجود دارد. سایر ناحیه‌هایی که امکان وجود رژیم حلقوی وجود دارد، با حرف A نمایش داده شده است.

برای پیش بینی طغیان روابط همبستگی فراوانی ارائه شده است. دو مورد از مهم‌ترین این روابط در زیر بیان شده است:

- روابط همبستگی با استفاده از سرعت‌های ظاهری بدون بعد، که توسط والیس¹ ارائه شده است.
 - روابط همبستگی بر مبنای عدد کوتاتلادزه².
- بر اساس رابطه والیس [22]:

$$j_g^{\frac{1}{2}} + m j_l^{\frac{1}{2}} = C_w \quad (14)$$

که j_g^* و j_l^* به ترتیب در روابط (15) و (16) بیان شده‌اند [22]:

$$j_g^* = j_g \left(\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g)gd} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$j_l^* = j_l \left(\frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_g)gd} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

و m و C_w ثابت‌های تجربی هستند که به شرایط هندسی مساله وابسته بوده و مقادیری در حدود یک را دارا می‌باشند [22].

رابطه دیگری که بسیار مورد توجه قرار گرفته است، با استفاده از اعداد بی بعد کوتاتلادزه بیان می‌شود [23]:

$$K_g^{\frac{1}{2}} + K_l^{\frac{1}{2}} = C_k \quad (17)$$

که $C_k = \sqrt{3.2}$ و K_g و K_l به ترتیب در روابط 18 و 19 بیان شده‌اند [23]:

$$K_g = j_g \left[\frac{\rho_g^2}{gS(\rho_l - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

$$K_l = j_l \left[\frac{\rho_l^2}{gS(\rho_l - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

از جمله مهم‌ترین تفاوت‌های روابط (14) و (17)، می‌توان از تأثیر قطر لوله در رابطه (14) برخلاف رابطه (17) نام برد. البته در قطر 50 mm این روابط از سازگاری بسیار مناسبی با یکدیگر برخوردارند [24]. بررسی‌های مختلف بیانگر این هستند که در شرایط آزمایش با اعداد باند³ (رابطه 20) کوچک (کوچک‌تر از 10) رابطه (14) و در اعداد باند بزرگ رابطه (17) از دقت بالاتری

جدول 6 عدم قطعیت محاسبه شده از تکرار آزمایش‌ها

Table 6 Uncertainties calculated from repetition of experiments

عدم قطعیت سرعت ظاهری هوا (m/s)	عدم قطعیت سرعت ظاهری آب (m/s)	قطر داخلی لوله (mm)
± 0.09	$\pm 10^{-3}$	60
± 0.02	$\pm 6 \times 10^{-4}$	80
± 0.02	$\pm 3 \times 10^{-4}$	110

5- صحت سنجی نتایج

تایتل و بارنا [6] روابطی را برای ترسیم نقشه الگوهای جریان غیر همسو پیشنهاد دادند. آن‌ها مرزهایی را برای رژیم‌های مختلف تعریف کردند. با اعمال شرایط آزمایش حاضر در این روابط نقشه محدوده رژیم‌های جریان برای لوله با قطر 60 mm مطابق شکل 16 رسم گردید. بر این اساس، مرز b با استفاده از رابطه (7) رسم می‌شود. رژیم حبابی تنها در نقاط زیر این مرز قابلیت تشکیل دارد.

$$j_l = j_g + U_0 - \sqrt{4j_g U_0} \quad (7)$$

با در نظر گرفتن این نکته که در مقادیر کسر حجمی بیش از 0.3 حباب‌ها به هم پیوسته و حباب تیلور را تشکیل می‌دهند، جریان حبابی می‌بایست با در نظر گرفتن این محدودیت رسم شود و در نتیجه مرز c تعریف می‌شود [6]. بدین منظور از رابطه (8) استفاده می‌شود [11]:

$$0.3j_l + 0.7j_g = 0.21U_0 \quad (8)$$

در رابطه (8)، U_0 بیانگر سرعت صعود حباب‌های بزرگ است و به‌صورت رابطه (9) اعمال می‌شود.

$$U_0 = 1.53 \left[\frac{g \Delta \rho S}{\rho_l^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

در شکل 16 ناحیه‌هایی که امکان وجود رژیم‌های حبابی و لخته‌ای در آن‌ها وجود دارد به ترتیب با حرف‌های B و S نشان داده شده است. مرز d، رژیم لخته‌ای را از رژیم حلقوی جدا می‌سازد. این مرز توسط رابطه (10) ترسیم می‌شود [6].

$$j_l = 4 \frac{\delta}{d} U_f \quad (10)$$

که در رابطه 10، U_f بیانگر سرعت فیلم مایع جاری بین حباب تیلور و دیواره لوله و δ نیز ضخامت فیلم مایع است. برای به‌دست آوردن مقادیر U_f و δ از حل روابط (11) و (12) با استفاده از تکرار استفاده می‌شود [6].

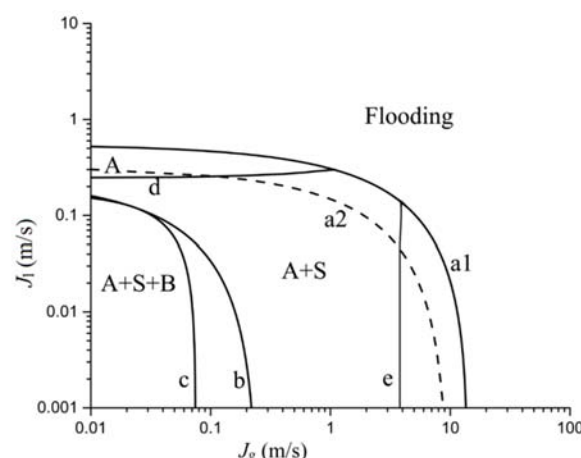


Fig. 16 Flow patterns map, based on Taitel and Barnea [6] equations (A: annular, B: bubbly, S: slug)

شکل 16 نقشه الگوهای جریان بر اساس روابط تایتل و بارنا [6] (A: رژیم حلقوی، B: رژیم حبابی، S: رژیم لخته‌ای)

¹ Wallis

² Kutateladze

³ Bond number

برخورد دارند [23].

عدد باند برای لوله با قطر 60 mm برابر با 21.9 می‌باشد بنابراین از رابطه کوتاتلازه استفاده می‌شود. مرز طغیان با استفاده از رابطه کوتاتلازه (رابطه 17) به صورت مرز a1 در شکل 16 نمایش داده شده است.

$$Bo = d[g(\rho_l - \rho_g)/S]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

تین و چانگ [23] با استفاده از عدد باند اثر قطر را در رابطه کوتاتلازه اعمال کرده و رابطه (21) را ارائه نمودند:

$$K_g^{\frac{1}{2}} + K_l^{\frac{1}{2}} = \sqrt{3.2} \tanh(0.5Bo^{\frac{1}{4}}) \quad (21)$$

مرز طغیان با استفاده از رابطه تین و چانگ به عنوان مرز a2 در شکل 16 نمایش داده شده است. به ازای سرعت‌های ظاهری هوا و آب بیشتر از مرزهای a1 و یا a2، رژیم طغیان بر مساله حاکم می‌شود.

به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده، نقشه الگوهای جریان لوله 60 mm در آزمایش حاضر با نقشه الگوهای جریان به دست آمده توسط روابط تحلیلی (شکل 16) در مقیاس لگاریتمی مقایسه شده و در شکل 17 به نمایش گذاشته شده است. به منظور وضوح بیشتر، بر روی بخشی از نقشه بزرگ نمایی صورت گرفته است. همان طور که مشاهده می‌شود تشکیل ناحیه رژیم‌ها در قیاس با روابط تحلیلی، روندی قابل قبول را به نمایش می‌گذارد اما به دلیل خطای زیاد روابط تحلیلی، امکان انجام مقایسه‌ای با دقت بالا به خصوص در

قطرهای بزرگ‌تر وجود ندارد. عدم تعیین ناحیه متلاطم در روابط ارائه شده توسط تایتل و بارنثا [6]، شرایط خاص هر آزمایش تجربی، تشکیل نشدن رژیم حبابی به دلیل شرایط اولیه آزمایش و روابط مختلف برای تعیین مرز رژیم طغیان از جمله مشکلات موجود در راستای مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی است.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش برای یافتن الگوهای جریان دوفازی غیر همسو در لوله‌های عمودی صورت گرفته است. با وجود اهمیت جریان‌های غیر همسو، در اغلب مطالعات پیشین به بررسی جریان‌های همسو پرداخته شده است. اغلب پژوهش‌های پیشین در زمینه جریان‌های غیر همسو در لوله‌هایی با قطرهای با مقیاس کوچک انجام شده است که در این پژوهش تلاش بر این بوده که با آزمایش بر روی لوله‌های با ابعاد متوسط و بزرگ، فعالیتی نو در این

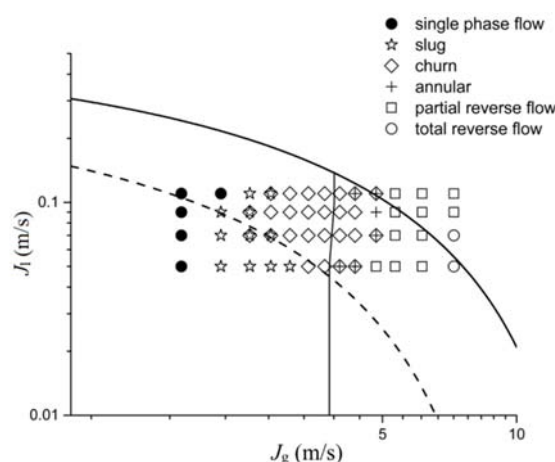


Fig. 17 Comparison of Experimental and Theoretical counter-current flow patterns maps

شکل 17 مقایسه نقشه‌های الگوهای جریان آزمایشگاهی و تئوری.

زمینه صورت بگیرد و کمبود نتایج موجود را از بین برده و اطلاعات را ارتقا دهد. هم چنین با فراهم آوردن تجهیزات مناسب جهت ساخت سیکل دوفازی غیر همسو، سرعت‌های ظاهری در محدوده‌های وسیعی ایجاد شده است. با توجه به موارد بیان شده و هم چنین تعداد بالای داده‌های استخراج شده در هر لوله ثبت تمامی رژیم‌های جریان قابل مشاهده در طی آزمایش، امید است که فعالیت جامعی در حیطه مورد نظر صورت گرفته باشد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

- 1- چهار رژیم اصلی لخته‌ای، متلاطم، حلقوی و جریان برگشتی در طی انجام آزمایش مشاهده شد.
- 2- با توجه به وجود عدم قطعیت فراوان در نام‌گذاری الگوهای جریان، تعیین نقشه جریان به‌ویژه در مرز بین رژیم‌ها با دقت بسیار زیادی صورت گرفته است.
- 3- نقشه‌های رژیم جریان نشان داد با افزایش قطر لوله‌ها، رژیم متلاطم محدوده‌ی بزرگی از نقشه الگوهای جریان را در بر می‌گیرد.
- 4- جریان برگشتی به عنوان عامل محدود کننده در جریان‌های غیر همسو در محدوده سرعت‌های ظاهری نمایش داده شده صرفاً در لوله‌های 60 mm و 80 mm مشاهده شد.
- 5- جریان برگشتی به هر دو صورت جزئی و کلی مشاهده شد که در هر دو حالت فرایند اسپری شدن قطرات در بالای لوله‌ها به وضوح قابل مشاهده بود.
- 6- طول و سرعت حباب‌های تیلور در لوله 110 mm کاهش محسوسی نسبت به لوله‌های کوچک‌تر داشت.
- 7- ناپایداری کلون-هلمهولتز در رژیم حلقوی و در هر سه لوله مشاهده شد و طول موج‌های بحرانی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه و ارائه گردید.

7- فهرست علائم

B	ثابت تجربی
Bo	عدد باند
C_k	ثابت تجربی معادله کوتاتلازه
C_w	ثابت تجربی معادله والیس
d	قطر داخلی لوله (m)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
hour	ساعت
j	سرعت ظاهری (ms^{-1})
j^*	سرعت ظاهری بی بعد معادله والیس
K	عدد کوتاتلازه
L	ارتفاع لوله (m)
Lit	لیتر
m	ثابت تجربی معادله والیس
n	تعداد تکرار آزمایش‌ها
p	ثابت تجربی
q	ثابت تجربی
Q	دبی (m^3s^{-1})
R134a	تترا فلئورواتان
S	تنش سطحی (Nm^{-1})
t	ضریب سطح اطمینان
u	سرعت (ms^{-1})

- [9] M. R. Ansari, R. Azadi, S. Kiani Haghighi, Experimental investigation of gas-liquid two-phase flow regimes in upward co-current vertical tubes with intermediate diameters, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 9, 2015.
- [10] A. A. Mouza, S. V. Paras, A. J. Karabelas, The influence of small tube diameter on falling film and flooding phenomena, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 8, pp. 20, 2002.
- [11] H. Y. Kim, S. Koyama, W. Matsumoto, Flow pattern and flow characteristics for counter-current two-phase flow in a vertical round tube with wire-coil inserts, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 12, pp. 18, 2001.
- [12] A. Zapke, D. G. Kroger, Countercurrent gas-liquid flow in inclined and vertical ducts — I: Flow patterns, pressure drop characteristics and flooding, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 26, No. 9, pp. 16, 2000.
- [13] Sh. Luo, H. Li, W. Fei, Y. Wang, Effect of counter current gas phase on liquid film, *Frontiers of Chemical Engineering in China*, Vol. 3, No. 2, pp. 135-137, 2009.
- [14] Deendarlianto, A. Ousaka, A. Kariyasaki, T. Fukano, Investigation of liquid film behavior at the onset of flooding during adiabatic counter-current air-water two-phase flow in an inclined pipe, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, No. 21, pp. 2281-2294, 2005.
- [15] A. Ousaka, Deendarlianto, A. Kariyasaki, T. Fukano, Prediction of flooding gas velocity in gas-liquid counter-current two-phase flow in inclined pipes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, No. 12, pp. 1282-1292, 2006.
- [16] S. Ghosh, D. K. Pratihari, B. Maiti, P. K. Das, Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas-liquid two-phase flow, *Chemical Engineering Science*, Vol. 84, No. 1, pp. 417-436, 2012.
- [17] P. Hanafizadeh, J. Eshraghi, A. Taklifi, S. Ghanbarzadeh, Experimental identification of flow regimes in gas-liquid two phase flow in a vertical pipe, *Meccanica*, Vol. 51, No. 8, pp. 1771-1782, 2015.
- [18] Sh. Miwaa, Y. Liu, T. Hibikia, M. Ishii, Y. Kondoh, N. Ukaic, K. Tanimoto, Experimental study of counter-current gas-droplet flow limitation in a 30 cm pipe, *Chemical Engineering Science*, Vol. 92, No. 1, pp. 12, 2013.
- [19] A. Michalski, Development of droplet size distribution in FGD spray towers, *Atomization Sprays*, Vol. 10, No. 2, pp. 105-119, 2000.
- [20] C. E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*, pp. 192-195, New York: Cambridge University Press, 2005.
- [21] J. P. Holman, *Experimental methods for engineers*, 8th edition, pp. 60-163, New York: McGraw-Hill, 2008.
- [22] M. Ghiaasiaan, *Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniature Systems*, 1st Edition, pp. 233-234, Cambridge University Press, 2008.
- [23] C. L. Tien, K. S. Chung, Entrainment Limits in Heat Pipes, *AIAA Journal*, Vol. 17, No. 6, pp. 643-646, 1979.
- [24] A. T. S. Jayanti, G. F. Hewitt, Theoretical investigation of the diameter effect on flooding in countercurrent flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 2, pp. 307-324, 1996.

U_0 سرعت صعود حباب (ms^{-1})

علائم یونانی

α عدم قطعیت ناشی از تکرار آزمایش
 δ ضخامت فیلم مایع (m)
 λ_C طول موج بحرانی (m)
 μ لزجت دینامیکی (Pas)
 ρ چگالی (kgm^{-3})
 ω عدم قطعیت اندازه‌گیری

زیر نویس‌ها

d قطر داخلی
 g گاز
 J سرعت ظاهری
 l مایع
 Q دبی

8- مراجع

- [1] S. Z. Rouhani, M. S. Sohal, Two-phase flow patterns: A review of research results, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 11, No. 3, pp. 40, 1983.
- [2] Y. 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.
- [3] L. Chen, Y. S. Tian, T. G. Karayiannis, The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 21-22, pp. 4220-4230, 2006.
- [4] S. M. Ghiaasiaan, X. Wu, D. L. Sadowski, S. I. Abdel-Khalik, Hydrodynamic characteristics of counter-current two-phase flow in vertical and inclined channels: Effects of liquid properties, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 23, No. 6, pp. 20, 1997.
- [5] G. Besagni, F. Inzoli, Comprehensive experimental investigation of counter-current bubble column hydrodynamics: Holdup, flow regime transition, bubble size distributions and local flow properties, *Chemical Engineering Science*, Vol. 146, No. 1, pp. 259-290, 2016.
- [6] Y. Taitel, D. Barnea, Counter current gas-liquid vertical flow, model for flow pattern and pressure drop, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 9, No. 6, pp. 10, 1983.
- [7] A. R. Hasan, C. S. Kabir, S. Srinivasan, Countercurrent bubble and slug flows in a vertical system, *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No. 16, pp. 7, 1994.
- [8] K. Yamaguchi, Y. Yamazaki, Characteristics of counter current gasliquid two-phase flow in vertical tubes, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 19, No. 12, pp. 11, 1982.