



بررسی تجربی الگوهای جریان دوفازی گاز - مایع در لوله‌های عمودی رو به بالا با قطر میانی

محمدرضا انصاری^{1*}، رضا آزادی²، سحر کیانی حق‌گو²

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

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

* تهران، صندوق پستی 14115-143، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اسفند 1393

پذیرش: 07 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 19 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

جریان دوفازی

لوله عمودی

نقشه الگوی جریان

شبه - حلقوی

چکیده

در پژوهش حاضر، جریان دوفازی در لوله‌های عمودی پلکسی گلاس به قطرهای داخلی 40 mm و 70 mm و در دو ارتفاع 1/73 m و 3/22 m در شرایط ادیاباتیکی مطالعه شده‌اند. برای این منظور یک سیستم آزمایشگاهی بزرگ مقیاس بر اساس استانداردهای موجود طراحی، ساخته و بهره‌برداری شده‌است. نقشه‌های الگوی جریان برای هر دو لوله ارائه شده و تأثیر قطر لوله و ارتفاع بر گذر بین الگوهای جریان بررسی شده‌اند. هوا و آب به عنوان سیال‌های کاری انتخاب شده‌اند و محدوده سرعت‌های ظاهری هوا و آب برای لوله 40 mm به ترتیب 9/654 m/s – 0/054 و 0/015 – 0/877 m/s و برای لوله 70 mm به ترتیب 20/44 m/s – 0/038 و 1/530 m/s – 0/036 است. با تغییر قطر لوله از 40 mm به 70 mm، محدوده مربوط به الگوی اسلاگ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نوع ورودی مورد استفاده در آزمایش‌ها «حلقوی» است که در نتیجه آن الگوی حبابی در سرعت‌های ظاهری کم آب در لوله 70 mm مشاهده نشد و فقط در سرعت‌های بالای آب، الگوی حبابی خود را نشان می‌داد. برای هر دو لوله، الگوهای جریان: حبابی، اسلاگ، متلاطم و حلقوی مشاهده شدند. با بررسی بیش‌تر و استفاده از تکنیک پردازش تصویر، الگوی حبابی در لوله 40 mm به سه الگوی فرعی پراکنده، آشفته و متراکم و الگوی اسلاگ به دو الگوی فرعی اسلاگ بزرگ و اسلاگ کوچک قابل تفکیک بودند. هم‌چنین الگوی شبه - حلقوی نیز به عنوان یک الگوی مستقل در لوله 70 mm مشاهده شد که در تحقیقات پیشین به دقت تحلیل و بررسی نشده است.

Experimental Investigation of Gas-Liquid Two-Phase Flow Regimes in Upward Co-Current Vertical Tubes with Intermediate Diameters

Mohammad Reza Ansari*, Reza Azadi, Sahar Kiani Haghgu

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 March 2015
Accepted 27 April 2015
Available Online 09 May 2015

Keywords:
Two-phase flow
vertical tube
flow pattern map
semi-annular

ABSTRACT

In the present research, two-phase flow is studied adiabatically in vertical plexiglass tubes with inner diameters of 40 mm and 70 mm at heights of 1.73 m and 3.22 m. For this reason a large scale experimental set-up has been designed, constructed and operated according to construction standards. Flow pattern maps are presented for both tubes and effect of diameter and height on the transition curves between flow patterns is investigated. Air and water are used as working fluids. Superficial velocities of air and water for 40 mm tube are 0.054-9.654 m/s and 0.015-0.877 m/s; and are 0.038-20.44 m/s and 0.036-1.530 m/s for 70 mm tube, respectively. By changing the tube diameter from 40 mm to 70 mm, slug pattern region shrinks considerably. Inlet is designed to be "annular" for which bubbly flow in 70 mm tube is not observed in low water superficial velocities. However, this pattern is observed in higher water and lower air superficial velocities. For both tubes, the main flow regimes observed are bubbly, slug, churn and annular. The results obtained using image processing technique show that bubbly regime in 40 mm can be divided into three sub-patterns called dispersed, agitated and agglomerated bubbly. In addition, two sub-patterns are recognized in slug regime as large slug and small slug. Also, semi-annular pattern is observed as an independent flow pattern in tube with inner diameter of 70 mm which has not been analyzed accurately up to now.

1- مقدمه

سیستم‌هایی که شامل جریان‌های دوفازی گاز- مایع هستند به طور گسترده‌ای در صنایعی همچون پتروشیمی، نیروگاه‌های هسته‌ای و خطوط انتقال نفت کاربرد دارند. در جریان‌های دوفازی گاز-مایع هم‌سو در لوله‌های عمودی، الگوها یا رژیم‌های جریان مختلفی ظاهر می‌شوند که مطالعه آن‌ها از

اهمیت زیادی برخوردار است. برای نمونه در الگوهای اسلاگ یا متلاطم¹، نوسان‌های زیاد فشار می‌تواند آسیب‌های زیادی به تجهیزات وارد نماید. لذا اولین گام در تحلیل یک جریان دوفازی شناسایی الگوی غالب در آن است. جریان‌های چندفازی می‌توانند ترکیب چندگانه سه فاز جامد، مایع و گاز

1- Churn

Please cite this article using:

M.R. Ansari, R. Azadi, S. Kiani Haghgu, 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. 383-392, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌شود، اما در لوله 150 mm چنین جریانی مشاهده نشد و به جای آن با افزایش دبی گاز، گذری تدریجی به جریان متلاطم انجام می‌گیرد. فوروکاوا و فوکانو [7] با هدف بررسی تأثیر لزجت مایع بر گذر بین الگوهای جریانی مختلف، آزمایش‌هایی را بر روی جریان دو فاز گاز-مایع در لوله عمودی به قطر داخلی 19/2 mm و طول 5/4 m انجام دادند. مایع‌های مورد استفاده شامل آب و محلول‌های گلیسرول⁵ در آب بودند که لزجتی در محدوده $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $14/7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ را ایجاد می‌کردند. این پژوهشگران الگوهای حبابی، اسلاگ، کف‌آلود⁶ و حلقوی را مشاهده و گذر بین آن‌ها را در نقشه های الگوی جریانی ارائه کردند. لوکاس و همکارانش [8] به بررسی نحوه توسعه الگوها و پارامترهای مهم جریان دوفازی در طول لوله عمودی به قطر داخلی 51/2 mm و طول 3 m پرداختند. آن‌ها جهت به دست آوردن کسر حجمی، از حسگر مش سیمی استفاده کرده‌اند که داده‌هایی غنی از کسر حجمی را در هر سطح مقطع و بر حسب زمان نیز می‌دهد. این پژوهشگران با استفاده از داده‌های به دست آمده برای ناحیه جریانی حبابی و اسلاگ، نتیجه گرفتند که جهت نیروی بالابرنده با توجه به اندازه حباب در جریان حبابی پراکنده عوض می‌شود. حنفی‌زاده و همکاران [9] مطالعه‌ای را بر روی مشخصه‌های جریان در یک لوله عمودی به قطر داخلی 50 mm و ارتفاع 6 m انجام دادند. محققان شش الگوی جریان متفاوت به نام‌های حبابی، حبابی - اسلاگ، اسلاگ کوچک، اسلاگ بزرگ، متلاطم و حلقوی را گزارش کرده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، آن‌ها الگوی اسلاگ را به عنوان مناسب‌ترین الگو برای عملکرد پمپ معرفی کردند. زائو و هو [10] روشی بهینه را ارائه کردند که در آن با استفاده از بررسی شدت اشعه‌های گاما می‌توان برخی از ویژگی‌های جریان در هر شرایطی را استخراج و تحلیل نمود. آن‌ها از لوله‌ای شفاف و از جنس اکریلیک به قطر داخلی 20 mm و طول m 2/8 به عنوان لوله آزمایش استفاده کردند. این پژوهشگران بر روی سه الگوی اصلی جریان در لوله‌های عمودی، حبابی، اسلاگ و حلقوی تمرکز کرده و با استفاده از تحلیل دامنه موج‌های دستگاه چگالی‌سنج اشعه گاما این الگوها را از هم تشخیص دادند. چن و همکارانش [11] با هدف ارتقاء انتقال گرما در جریان دوفازی در لوله عمودی رو به بالا با استفاده از استوانه‌ای ساخته شده از یک صفحه منفذدار مش‌بندی شده پژوهشی را به انجام رساندند. این نویسندگان توانستند الگوهای حبابی، اسلاگ، متلاطم، حلقوی و حلقوی باریک⁷ را در لوله خالی بدون سیلندر منفذدار مشاهده کنند که داده‌های مربوط به این الگوها (در حدود 70 داده) با نقشه‌های موجود در ادبیات فن تطابق خوبی داشت. لیو [12] افت فشار منفی را به عنوان پدیده‌ای جدید در جریان دوفازی در لوله‌های عمودی معرفی کرد. این پژوهشگر با تحلیل عدم قطعیت نشان داد که افت فشار اصطکاکی منفی نمی‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری باشد. او نشان داد عبارتی شبیه به عبارت نیروی شناوری وجود دارد که با در نظر گرفتن آن اتلاف انرژی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی در حالتی که افت‌های اصطکاکی فشار منفی هستند، مثبت می‌شوند، لذا قانون پایستاری انرژی ارضا می‌شود. گابریک و همکارانش [13] در لوله‌های عمودی با قطر داخلی 30 mm، الگوهای جریان دوفازی آب - نفت را مطالعه کردند. آن‌ها با بررسی نتایج فیلم‌برداری سرعت بالا، سه الگوی مختلف با نام‌های «فاز نفت غالب»، «ناحیه گذر» و «فاز آب غالب» را معرفی و نقشه الگوی جریان را ارائه کردند. لیو و همکارانش [14]، تأثیر شوینده‌ها را بر متغیرهایی همچون کسر تهی، افت فشار و نیروی پسا، در لوله‌ای به قطر داخلی

باشند که مطالعه هر ترکیب خاص برای موادی خاص زمینه بسیاری از تحقیقات در حوزه جریان‌های چندفازی بوده و هست. در این میان تفاوت بین مواد در جریان‌های دوفازی می‌تواند ناشی از نوع فاز و یا ترکیب شیمیایی آن‌ها باشد که منجر به پیچیده شدن دینامیک جریان‌های دوفازی می‌شود. این پدیده‌ها علاوه بر تمام مشکلات و سختی‌هایی که بررسی جریان تک‌فاز به همراه دارد، خود دارای مشخصه‌های خاص خود هستند که از میان آن‌ها می‌توان به پیچیدگی‌های توپولوژی مرز مشترک¹، مرزهای سیستم، انتقال مومنتوم، حرارت و جرم در مرز مشترک بین فازها اشاره کرد. لذا با توجه به پیچیدگی‌های اشاره شده، هنوز علم دوفازی وابستگی شدیدی به نتایج حاصل از مطالعات تجربی و روابط حاصل از آن‌ها دارد.

از نقطه نظر کاربردی شاید مشکل‌ترین موضوع در طراحی سیستم‌های دوفازی این است که معادلات انتقال جرم، مومنتوم و انرژی با تغییر هندسه اجزای جریان تغییر می‌کنند، برای مثال سطح مشترک بین فازها بسیار به تغییر هندسه جریان حساس است و در نتیجه هر تغییری در آن باعث تغییر در معادلات انتقال می‌شود. لذا یک هم‌گیری² دوجانبه بین سیال در هر فاز و هندسه جریان وجود دارد که این منجر به پیچیدگی زیادی در معادلات مربوط به جریان‌های دوفازی می‌شود [1]. در حالت کلی جریان‌های دوفازی می‌توانند بر اساس چندین ساختار توپولوژیکی مختلف جریان پیدا کنند که به هر یک از آن‌ها به اصطلاح الگو (رژیم) جریان گفته می‌شود [2]. گذر از یک الگو به الگوی دیگر به عوامل هندسی و فیزیکی سیال‌ها وابستگی شدیدی دارد و فرآیندی است که به آهستگی صورت می‌گیرد. تشخیص الگوهای جریانی و تعیین شرایط گذر بین آن‌ها، موضوعی است که همواره عده زیادی از پژوهشگران دوفازی را به خود علاقه‌مند کرده‌است، چرا که برای تعریف و گسترش هر رابطه‌ای در یک مدل دوفازی نیاز به فهم مکانیزم‌های فیزیکی موجود در جریان است که این مکانیزم‌ها به الگوی جریانی مربوط به آن وابسته است.

در حالت کلی جریان دو فاز در لوله‌های عمودی می‌تواند به صورت هم‌سو، غیر هم‌سو، رو به بالا یا رو به پایین باشد. با توجه به این‌که در پژوهش حاضر مطالعه بر روی لوله‌های عمودی با جریان هم‌سو و رو به بالا انجام شده است، لذا برخی از مهم‌ترین گزارش‌ها و پژوهش‌ها با این رویکرد بررسی شده‌اند. تایتل [3] و میشیما [4] از جمله پژوهشگرانی هستند که روابط تئوری ارائه شده توسط آن‌ها برای گذر بین الگوهای جریانی مختلف در لوله‌های با قطر کمتر از 50 mm، اغلب مبنای کارهای پژوهشی جدید قرار می‌گیرد. در این پژوهش، روابط تئوری تایتل [3] مورد استفاده قرار گرفته است. ماتسوی [5] پارامترهای آماری توزیع فشار همچون مقادیر میانگین، انحراف معیار استاندارد و ضریب عدم تقارن³ را به عنوان شناساگرهای الگوی جریان به کار برد و توانست به خوبی الگوهای جریانی را بدون مشاهده چشمی به سه دسته حبابی، اسلاگ و متلاطم تقسیم‌بندی نماید. چنگ و همکاران [6] با هدف مطالعه تأثیر قطر بر ساختار جریان دوفازی گاز-مایع در لوله‌های عمودی، آزمایش‌هایی را بر روی لوله‌هایی به قطر داخلی 28/9 mm و 150 mm انجام دادند. این محققان از پروب‌های دو سوزنی مقاومتی جهت بررسی توسعه اندازه حباب در راستای لوله استفاده کردند و از کسر حجمی-سنج آمپدانس⁴ جهت اندازه‌گیری کسر حجمی استفاده نمودند. در این پژوهش گزارش شده‌است که جریان اسلاگ در لوله کوچک دیده

1- Interface topology
2- Coupling
3- Skewness coefficient
4- Impedance Void Fraction Meter (IVFM)

5- Aqueous glycerol solutions
6- Froth
7- Wispy Annular

مشاهده نمی‌شود. پس با توجه به رابطه (1) و (2) می‌توان لوله‌ها را بر اساس قطر داخلی آن‌ها به سه دسته کلی: (1) لوله‌های کوچک ($D \leq 50$ mm)، (2) لوله‌های نیمه بزرگ ($50 \text{ mm} \leq D \leq 108$ mm) و (3) لوله‌های بزرگ ($D > 108$ mm) تقسیم کرد. قطرهای مورد استفاده در پژوهش حاضر در محدوده لوله‌های نیمه بزرگ قرار می‌گیرند.

با نظر به پژوهش‌های انجام گرفته در لوله‌های عمودی در سیستم‌های مختلف، مشاهده می‌شود که تغییرات اندک در عوامل مؤثر بر جریان از جمله قطر، ارتفاع، نوع سطح مقطع و نوع ورودی منجر به اثرات قابل توجه و متفاوتی در الگوهای جریان و رفتار مشخصه‌های مربوط به آن‌ها می‌شود. در پژوهش‌های انجام گرفته اغلب یک لوله با قطر ثابت و در ارتفاعی مشخص بررسی شده است.

در تحقیق حاضر، جریان دوفازی گاز-مایع در دو لوله به قطرهای مختلف و در ارتفاع‌های مختلف بررسی شده است.

پژوهش‌های موجود در این زمینه اغلب بر روی یک لوله با قطر کوچک و در ارتفاعی مشخص انجام گرفته‌اند، لذا هدف اصلی این مطالعه بررسی تأثیر قطر لوله و ارتفاع مورد بررسی بر نوع الگوهای جریان و نحوه توزیع آن‌ها، با تهیه نمودارهای جریان در لوله‌های عمودی با قطر میانی است که از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر است. همچنین به کمک تکنیک پردازش تصویر⁴ سعی شده است تا الگوهای جریان اصلی به زیر الگوهایی با رفتار متفاوت نیز تقسیم‌بندی شوند که در مطالعات پیشین این تقسیم‌بندی‌ها به ندرت مشاهده شده است.

2- سیستم آزمایشگاهی

طرح‌واره سیستم آزمایشگاهی عمودی ساخته شده در آزمایشگاه جریان‌های دوفازی دانشگاه تربیت مدرس در شکل 1 نشان داده شده است.

در حال حاضر در داخل کشور جز سیستم عمودی 6 m که حنفی‌زاده و همکاران [9] برای لوله 50 mm توسعه داده‌اند، سیستم آزمایشگاهی عمودی دوفازی دیگری گزارش نشده است که در مقایسه، سیستم طراحی شده حاضر دارای عملکردی چندگانه است و از هفت لوله با قطرهای مختلف تشکیل شده است که سیستمی با این مشخصات فنی در سطح دنیا نیز به ندرت مشاهده شده است. این سیستم طوری طراحی شده است که به راحتی بتوان مسیرهای هوا و آب را تغییر داد و بر حسب نیاز جریان‌های هم‌سو، غیرهم‌سو، رو به بالا یا رو به پایین را ایجاد کرد. در این سیستم هوای مورد نیاز توسط یک کمپرسور با توان 45 kW و بیشینه دبی 1400 m³/h تأمین می‌شود. فشار هوای خروجی از مخزن به کمک یک سیستم رگلاتور فشار تنظیم می‌شود و دمای آن بعد از عبور از یک سیستم خنک کاری از نوع مبدل پوسته و لوله‌ای تا دمای آب شهری تغییر می‌کند تا شرط تعادل دمایی بین دو فاز در طول لوله حفظ شود. با استفاده از سیستم اینورتر تعبیه شده، دور موتور کمپرسور کنترل می‌شود که به کمک آن می‌توان در حدود 5000 حالت مختلف از دبی‌های هوای کم تا زیاد را ایجاد کرد. در آزمایش‌هایی که دبی آب ثابت نگه داشته می‌شد، دبی هوا با گام 5 m³/h تغییر داده می‌شد. در نقاط مختلفی بین مخزن کمپرسور و محفظه اختلاط متغیرهای فشار، دما و دبی اندازه‌گیری می‌شوند.

سیال مایع کاری سیستم، آب شهری است که پس از عبور از فیلتر، تانک تعبیه شده در ارتفاع پایین را تا مقدار مشخصی پر می‌کند، سپس بر حسب نیاز توسط یکی از دو پمپ سانتریفیوژ دبی پایین یا دبی بالا، آب را به تانک در ارتفاع بالا منتقل می‌کند.

40 mm و ارتفاع 5/6 m مطالعه کردند. آن‌ها الگوهای حبابی، اسلاگ، متلاطم و حلقوی مه‌آلود را مشاهده کردند که بیش‌ترین افت کسر تهی ناشی از افزودن شوینده‌ها 88/6% و در جریان اسلاگ گزارش شده است.

عبدالقدیر و همکاران [15] به کمک حسگر سیمی مطالعه دقیقی بر روی توزیع فازها در لوله‌های عمودی انجام دادند و توانستند به کمک مشخصه‌های آماری توزیع‌ها الگوبندی مناسبی از جریان را ارائه دهند. تیان و همکارانش [16] به کمک پروب چهار حسگره در لوله‌ای به قطر داخلی 50/8 mm جریان دوفازی عمودی رو به بالا و رو به پایین را مطالعه کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، کسر تهی در دبی‌های کم رو به پایین، توزیع بیشینه مرکزی¹ از خود نشان می‌دهد، اما در این دبی‌ها، توزیع‌ها برای جریان رو به بالا بیشینه دیواره² است. آروپاردی و همکارانش بر روی الگوهای جریان در لوله‌ای به قطر 67 mm و طول 5 m آزمایش‌هایی را انجام دادند که طی آن به کمک نمودارهای چگالی احتمال کسر حجمی، مشخصه‌هایی همچون طول و فرکانس حباب تیلور را در الگوی اسلاگ استخراج کردند. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش این افراد، کسر تهی، سرعت حباب تیلور و طول بی‌بعد اسلاگ مایع با افزایش سرعت ظاهری گاز بیش‌تر می‌شوند [17].

در کل می‌توان گفت روابط بر مبنای تئوری برای لوله‌هایی با مقیاس کوچک و یا بزرگ گسترش پیدا کرده‌اند که تعریف مقیاس در هر حالت بر اساس معیاری است که به خواص فیزیکی جریان وابسته است. لوله‌هایی «کوچک مقیاس» نامیده می‌شوند که شرط رابطه (1) را ارضا کنند [3].

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

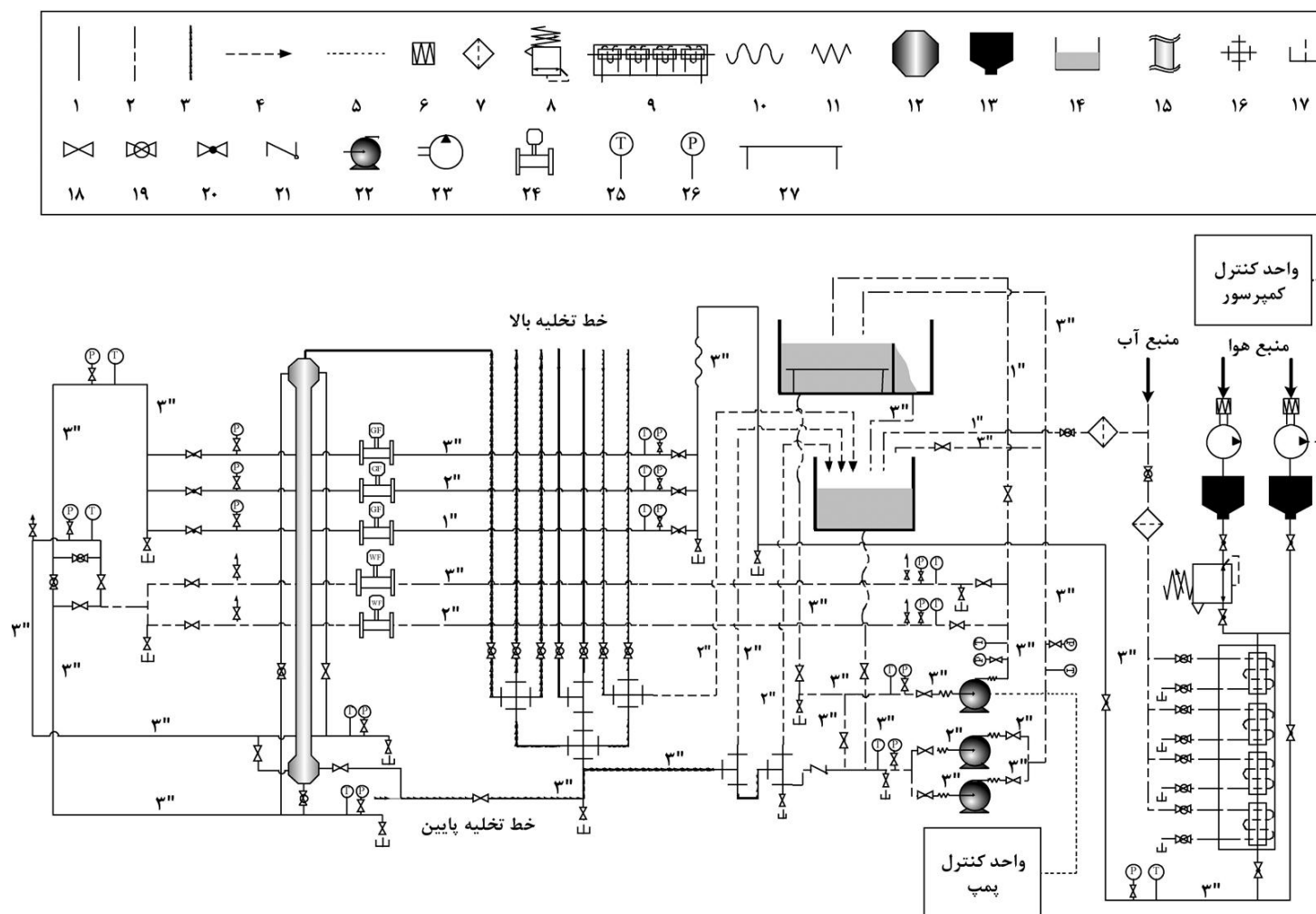
در رابطه (1)، D قطر داخلی لوله، σ ضریب کشش سطحی بین دو فاز، g شتاب گرانشی و ρ_L و ρ_G به ترتیب چگالی فازهای مایع و گاز هستند. برای فاز مایع آب و فاز گاز هوا در شرایط محیط (دمای 25 °C و فشار 1 atm) ضریب کشش سطحی برابر با 0/072 N/m، چگالی آب برابر 997 kg/m³ و چگالی هوا برابر با 1/184 kg/m³ هستند، لذا شرط به صورت $D \leq 5/15$ cm در می‌آید؛ به عبارتی بر اساس ایده تایتل [3]، لوله‌هایی با قطر داخلی کم‌تر از 50 mm جزو لوله‌های کوچک و لوله‌های با قطر بیش‌تر یا مساوی 50 mm جزو لوله‌های بزرگ به حساب می‌آیند.

ایسائو و مامورو [18] طی مطالعه‌ای بر روی جریان‌های دوفازی در لوله‌های عمودی گزارش کردند که حباب‌های تیلور که در لوله‌های کوچک مشاهده می‌شود، برای لوله‌هایی با اندازه قطر بیش‌تر از مقداری مشخص دیده نمی‌شود و دلیل این پدیده را ناپایدار شدن حباب‌های تیلور به هنگام رسیدن به قطری مشخص تعریف کرده‌اند. با رسیدن به این قطر بحرانی، حباب‌های تیلور قادر به ایجاد تکه‌های مایع در بین یکدیگر نخواهند بود و حباب‌های کلاهی³ با اندازه‌های مختلف خواهند ساخت. از آنجایی که متلاشی شدن حباب‌های تیلور بزرگ به دلیل ناپایداری تیلور رخ می‌دهد، این قطر بحرانی را بر اساس طول موج تیلور و به صورت زیر تعریف کردند:

$$D_H^* \equiv \frac{D_H}{\sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}}} \geq 40 \quad (2)$$

که در آن D_H قطر هیدرولیکی، D_H^* قطر بی‌بعد، σ ضریب کشش سطحی بین دو فاز، $\Delta\rho$ اختلاف بین چگالی دو فاز و g شتاب گرانش هستند. برای فاز مایع آب و فاز گاز هوا در شرایط محیط، شرط به صورت $D_H \leq 10/86$ cm در می‌آید؛ به عبارتی در لوله‌هایی با قطر بیش‌تر از 108 mm، حباب تیلوری

1- Core peak
2- Wall peak
3- Cap bubbly

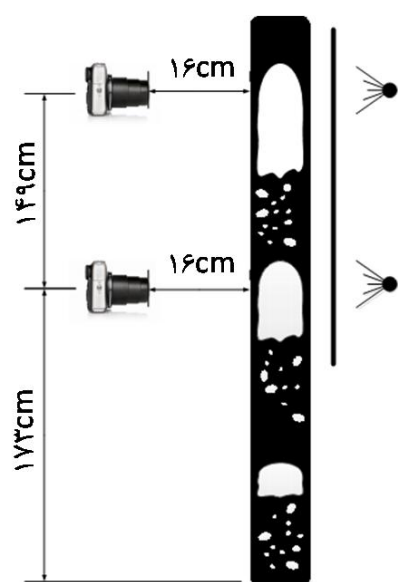


شکل 1 نقشه سیستم آزمایشگاهی عمودی: 1) خط هوا، 2) خط آب، 3) خط تخلیه، 4) خط فرار هوا/ونت، 5) خط الکتریکی، 6) فیلتر هوا، 7) فیلتر آب، 8) تنظیم کننده فشار، 9) سیستم سرمایش هوا، 10) لوله قابل انعطاف، 11) ضربه گیر، 12) مخزن اختلاط، 13) تانک هوا، 14) تانک آب، 15) لوله آزمایش، 16) چهار راه، 17) تخلیه (درین)، 18) شیر فلکه‌ای، 19) شیر سماوری، 20) شیر فلکه‌ای (هوا)، 21) شیر یک طرفه، 22) پمپ آب، 23) کمپرسور هوا، 24) فلومتر هوا / آب، 25) دماسنج، 26) فشارسنج، 27) حباب گیر

از مخلوط جدا می‌شود و آب دوباره به پمپ باز می‌گردد و این چرخه همین‌طور ادامه می‌یابد. برای اندازه‌گیری دما و فشار در نقاط مورد نظر در تمام سیستم دوفازی از گیج‌های دما و فشار با خطای کم‌تر از 1% مقیاس کامل استفاده شده‌است. بر حسب بازه مورد نظر از گیج‌های فشاری در محدوده میلی‌بار یا بار استفاده شده‌است. دبی‌های جریان هوا و آب به ترتیب با استفاده از فلومترهای ورتکسی و الکترومغناطیسی اندازه‌گیری می‌شوند که دبی‌سنج هوا دارای بیشینه خطای 1% و دبی‌سنج آب دارای بیشینه خطای 0/5% در مقیاس کامل هستند و بر اساس استاندارد [19] بیش‌ترین مقدار عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری برای دبی‌سنج‌های هوا و آب به ترتیب $\pm 0/48\%$ و $\pm 1/2\%$ هستند. فلومترهای هوا مجهز به حسگر اندازه‌گیری دما و فشار هستند که با اندازه‌گیری دما و فشار محیط، دبی‌ها را بر حسب نرمال متر مکعب در ساعت می‌دهند، لذا نتایج حاصل برای هر شرایط محیطی درست خواهند بود. برای ثبت ساختار جریان‌های دوفازی آب-هوا در سرعت‌های مختلف و به دست آوردن الگوهای جریانی، تصاویر با استفاده از دوربین‌های سرعت بالا ثبت می‌شوند. دوربین‌های کائو² با سرعت فیلم‌برداری 240 f/s برای این کار استفاده شده‌اند. با توجه به شکل 4، دوربین‌ها در دو ارتفاع متفاوت قرار داده شده و به صورت هم‌زمان و در هر آزمایش به مدت 30 ثانیه از ساختار جریان فیلم‌برداری می‌کنند که در این صورت با توجه به مقیاس زمانی فیزیک پدیده‌ها، زمان کافی برای ثبت ساختار جریان وجود خواهد داشت. نور سفید به 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 مثبتی بر افزایش کیفیت تصاویر ثبت‌شده دارد. اطلاعات مربوط به ثبت داده‌ها در جدول 1 آمده‌اند.

سرریزی در تانک بالا ایجاد شده است و مقدار آب اضافی را به تانک پایین منتقل می‌کند که در نتیجه آن هد آب ثابت می‌ماند و خطای اندازه‌گیری دبی را به حداقل می‌رساند. هم‌چنین حباب‌گیری در این تانک به‌کاررفته است که حتی حباب‌های ریز هوا نیز از آب گرفته شود تا خطای ناشی از حضور آن‌ها به حداقل برسد. تانکی که در ارتفاع بالا قرار دارد، تغذیه‌کننده اصلی فاز مایع سیستم است که این کار را از طریق یک پمپ سانتریفیوژ مجهز به سیستم اینورتر انجام می‌دهد که می‌تواند محدوده وسیعی از دبی‌های مختلف آب را پوشش دهد. در آزمایش‌هایی که دبی گاز ثابت نگه داشته می‌شد، دبی آب با گام $3 \text{ m}^3/\text{h}$ تغییر داده می‌شد. فشار، دما و دبی آب در نقاط متفاوتی قبل از ورود به محفظه اختلاط اندازه‌گیری می‌شوند. سیستم آزمایشگاهی قابلیت این را دارد که بر حسب نیاز آب یا هوا، از بالا یا پایین وارد محفظه اختلاط شوند که در این پژوهش آب و هوا، هر دو هم جهت و از پایین وارد لوله می‌شوند.

آب و هوا در محفظه اختلاط با هم مخلوط شده و سپس وارد لوله اصلی می‌شوند. شکل 2 نمایی از محفظه اختلاط طراحی‌شده را نمایش می‌دهد که در این پژوهش، آب از مرکز و هوا از اطراف وارد آن شده و با هم مخلوط می‌شوند. لوله‌های مورد استفاده از جنس پلکسی‌گلاس شفاف انتخاب شده‌اند تا توانایی مشاهده و ثبت پدیده‌های درون آن ممکن شود. دو لوله به قطرهای داخلی 40 mm و 70 mm و طولی در حدود $3/4 \text{ m}$ برای این پژوهش انتخاب شده‌اند. مخلوط دوفازی هوا و آب بعد از عبور از لوله، از طریق مسیر تخلیه تعبیه شده در بالای سیستم وارد سیستم جدایش می‌شوند. این سیستم از سه قسمت متفاوت تشکیل شده است که در شکل 3 نمایش داده شده‌اند. قسمت اول از نوع انگشتی¹ طراحی شده است و مقدار زیادی از هوای مخلوط در این قسمت تخلیه می‌شود، سپس مخلوط به قسمت‌های دوم و سوم سیستم جدایش جریان می‌یابند که در نهایت تقریباً مقدار زیادی از هوا



شکل 4 نحوه نورپردازی و فیلم‌برداری از جریان

همچنین جهت به دست آوردن نقشه‌های الگوی جریان با دقت مناسب، آزمایش‌ها حداقل سه بار برای هر نقطه تکرار شده‌اند.

3-1-1- لوله 40 mm

برای این قطر از لوله الگوهای جریان اصلی مشاهده شدند که با بررسی بیش‌تر مشاهده می‌شود برخی از این الگوها به زیر الگوهایی نیز قابل تفکیک هستند.

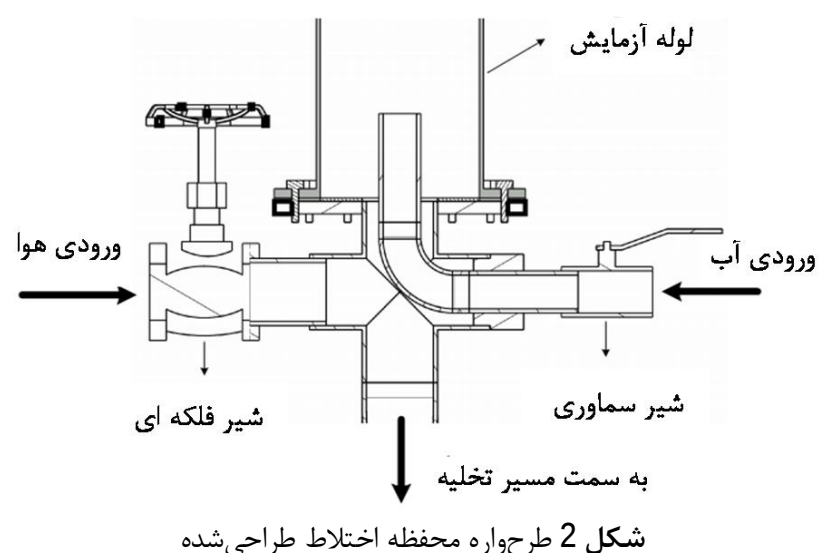
3-1-1- الگوهای اصلی جریان

ارتفاع لوله به قطر داخلی 40 mm از ورودی بالا تا خروجی آن برابر با 3/41 m است، دو محل با $L/D = 43/25$ و $L/D = 80/50$ به عنوان نقاط تصویربرداری انتخاب شده‌اند. در سیستم طراحی‌شده، بیشینه فشار ممکن برای هوا 800 mbar است. محدوده سرعت‌های ظاهری هوا و آب به ترتیب $0/054-9/654$ m/s و $0/015-0/877$ m/s انتخاب شده‌اند. تصویربرداری برای بیش از 180 شرایط جریانی مختلف انجام شده‌است و با توجه به نتایج حاصل، در حالت کلی الگوهای جریان اصلی شامل حبابی، اسلاگ، متلاطم و حلقوی برای هر دو ارتفاع مشاهده شدند که نمونه‌ای از تصاویر مربوط به آن‌ها در شکل 5 آمده است.

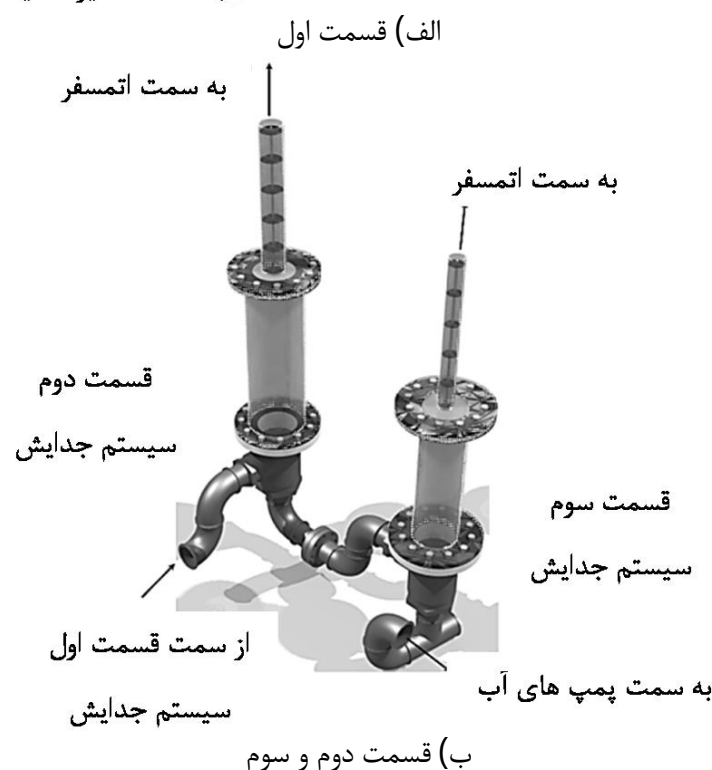
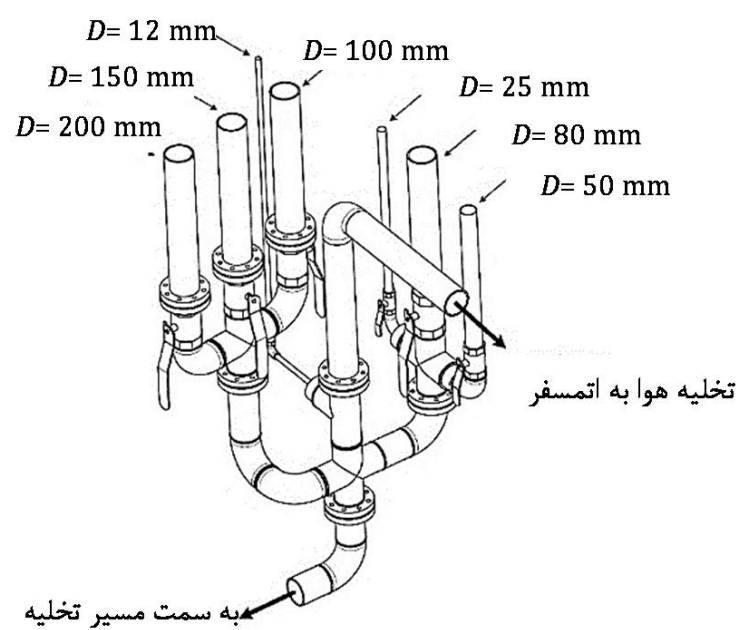
الگوی حبابی: در این الگو، فاز گازی (هوا) تقریباً به صورت یکنواخت و به شکل حباب‌های ریز گسسته در فضای پیوسته فاز مایع (آب) پخش شده‌اند. برخی از حباب‌های ریز به هم می‌پیوندند و حباب‌هایی با قطر بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند، برخی دیگر در اثر حرکت متلاشی می‌شوند و حباب‌های ریزتری را تشکیل می‌دهند.

الگوی اسلاگ: قسمت اعظم فاز گازی به شکل حباب‌های بزرگ با شکلی شبیه گلوله تفنگ در فاز مایع ایجاد می‌شوند که تقریباً تمام قطر لوله را اشغال می‌کنند و به نظر می‌رسد با سرعت ثابتی به سمت بالا حرکت می‌کنند. این حباب‌های بزرگ به «حباب‌های تیلور» نیز معروف هستند. حباب‌های تیلور توسط تکه‌های پیوسته‌ای از فاز مایع از یکدیگر جدا می‌شوند که اغلب این تکه‌ها حاوی حباب‌های کوچک گاز هستند. با دقت در فیلم‌های گرفته‌شده از ساختار جریان، مشاهده می‌شود که بین حباب‌های تیلور و دیواره لوله، قسمتی از فاز مایع به شکل فیلم نازکی به سمت پایین حرکت می‌کند.

الگوی متلاطم: الگوی متلاطم تا حدودی شبیه به الگوی اسلاگ است، اما اغتشاش و بی‌نظمی موجود در این الگو اصلی‌ترین تفاوت آن با الگوی اسلاگ است. در این الگو، بدنه حباب‌های تیلور اسلاگ شکل باریک‌تر می‌شوند و ساختار آن‌ها دچار اعوجاج می‌شود.



شکل 2 طرح‌واره محفظه اختلاط طراحی شده



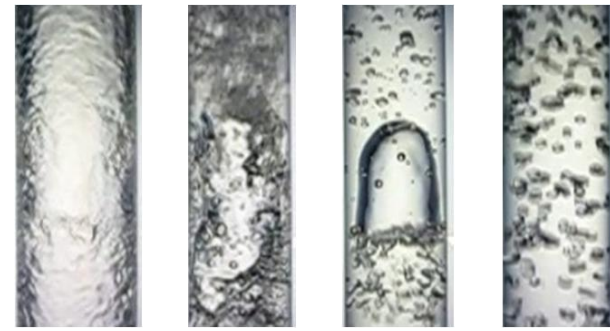
شکل 3 نمایی از سیستم جدایش سیستم آزمایشگاهی

جدول 1 اطلاعات مربوط به نحوه ثبت تصویری داده‌ها

سرعت فیلم‌برداری (f/s)	فاصله دوربین از ورودی (cm)	فاصله دوربین از دیواره لوله (cm)	مدت زمان فیلم‌برداری (s)
240	322-173	16	30

3- نتایج

هدف اصلی در پژوهش حاضر به دست آوردن الگوهای جریان در لوله‌هایی به قطرهای داخلی 40 mm و 70 mm و بررسی تأثیر قطر لوله بر مرزهای بین الگوهای مختلف است. لذا داده‌ها برای هر یک از لوله‌ها در دو ارتفاع متفاوت و به صورت هم‌زمان گرفته شده‌اند تا تأثیر ارتفاع بر گسترش الگوهای جریان نیز بررسی شوند.



الف) حبابی (ب) اسلاگ (ج) متلاطم (د) حلقوی

شکل 5 الگوهای جریان اصلی مشاهده شده برای لوله به قطر داخلی 40 mm

هم‌چنین پیوستگی اسلاگ مایع‌های بین حباب‌های تیلور به طور متناوب به دلیل افزایش غلظت فاز گاز در آن به هم می‌خورد، در این حالت و به صورت لحظه‌ای مایع به دلیل چگالی بیشتر به سمت پایین متمایل می‌شود و مسیر گاز را می‌بندد، اما سریع توسط فاز گاز به سمت بالا هل داده می‌شود. این الگوی جریان ماهیتی نوسانی دارد و جهت حرکت مایع در آن به طور متناوب در حال تغییر است.

الگوی حلقوی: اصلی‌ترین مشخصه الگوی حلقوی، پیوستگی فاز گاز در طول لوله و در مرکز آن است. فاز مایع نیز گاهی به صورت فیلم مایع نوسانی و گاهی به صورت زنجیره‌ای از قطرات کوچک آب در مرکز هسته، به سمت بالا حرکت می‌کند.

3-1-2- الگوهای فرعی جریان¹

با تحلیل و بررسی دقیق‌تر فیلم‌ها و تصاویر حاصل از ساختار جریان در لوله با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، الگوهای جریان حبابی و اسلاگ به الگوهای فرعی با جزئیات بیشتری نیز تقسیم‌بندی شدند. در الگوی حبابی، بر حسب تعداد حباب‌های کوچک، ابعاد و چگونگی پخش شدن آن‌ها در فاز مایع، سه دسته متفاوت از حباب‌ها در محدوده سرعت‌های مورد بررسی مشاهده شدند که حبابی پراکنده، حبابی مغشوش و حبابی متراکم نام‌گذاری شدند. نمونه‌ای از تصویر الگوی حبابی پراکنده شناسایی شده در شکل 6 الف نمایش داده شده است. در این الگو، حباب‌های هوا به صورت پراکنده در فاز مایع پخش شده‌اند، به طوری که به ندرت به هم می‌رسند یا متلاشی می‌شوند و اغلب دارای ابعاد برابر هستند و با سرعتی یکنواخت به سمت بالا حرکت می‌کنند. تفاوت اصلی بین الگوی حبابی پراکنده و حبابی آشفته را می‌توان در نحوه حرکت حباب‌ها دانست. همان‌طور که در شکل 6 ب مشخص است، در این الگوی جریان به دلیل سرعت بالای فاز مایع و آشفته‌گی آن، حباب‌ها به صورت نامنظم و با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند، اما فرصت به هم پیوستن و تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر را پیدا نمی‌کنند و حتی اگر به هم بپیوندند، انرژی توربولانسی فاز مایع، حباب ایجادشده را سریع متلاشی می‌کند و اجازه ایجاد حباب‌های بزرگ‌تر را نمی‌دهد. در الگوی جریان حبابی متراکم، حباب‌های ریز فرصت بیشتری برای به هم پیوستن و ایجاد حباب‌های بزرگ‌تر پیدا می‌کنند، در نتیجه در مکان‌های مشخصی در تمام محدوده جریان متراکم می‌شوند و سعی در جذب حباب‌های کوچک‌تر بیشتری دارند، اما فاز مایع تا اندازه مشخصی اجازه رشد به این حباب‌ها را می‌دهد و بعد از مدتی تجمع آن‌ها را متلاشی می‌کند. شکل 6 ج، نمایی از این الگوی جریانی را نمایش می‌دهد.

با استفاده از تکنیک پردازش تصویر می‌توان حباب‌های هوا را شناسایی و ابعاد آن‌ها را مشخص کرد. در جدول 2 نسبت قطر میانگین حباب‌ها به قطر لوله و نسبت سطح اشغال شده توسط فاز گاز به فاز مایع در محدوده تصویر

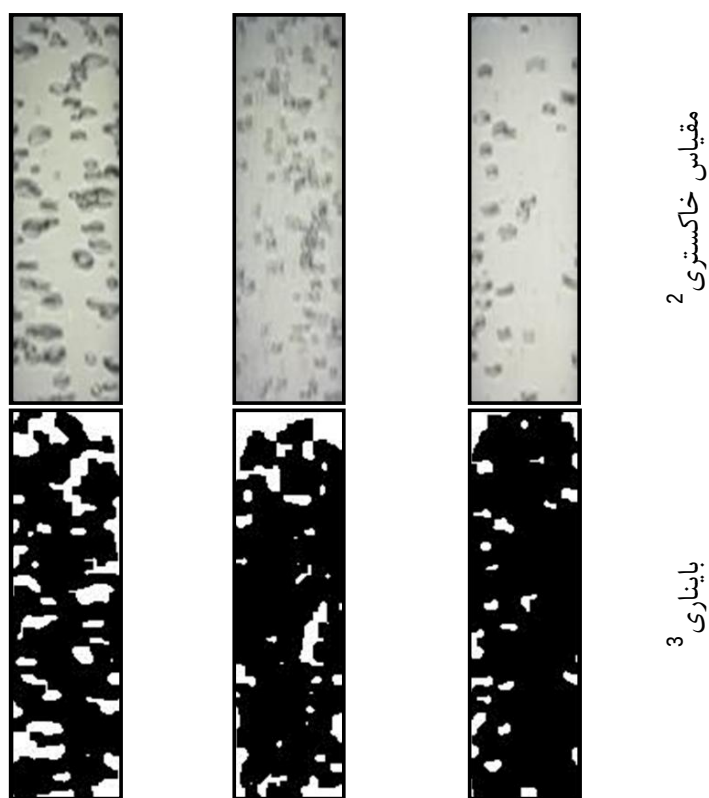
گرفته شده ارائه شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حباب‌هایی که در زیر الگوی پراکنده در حال حرکت هستند، قطری به بزرگی 12% قطر لوله دارند، حال آن که در زیر الگوی متراکم، قطر حباب‌ها تا حدود یک‌سوم قطر لوله نیز رشد می‌کنند. سطحی که فاز گاز از کل تصویر به خود اختصاص می‌دهد در زیر الگوی متراکم بیش از همه و در حدود 0/017 از کل سطح است، حال آن که فاز گاز در زیر الگوی مغشوش 0/014 از کل سطح تصویر را به خود اختصاص داده است.

اصلی‌ترین مشخصه الگوی جریان اسلاگ، حضور حباب‌های بزرگ تیلور در آن است که با طول‌های مختلفی خود را نشان می‌دهند. بر حسب طول این حباب‌ها و سرعت فازها، طول تکه‌های مایع بین آن‌ها نیز متفاوت است، لذا می‌توان بر اساس طول حباب‌های تیلور، الگوی اسلاگ را به دو دسته بزرگ و کوچک تقسیم کرد. بر اساس بررسی و تحلیل تصاویر و فیلم‌های گرفته شده از ساختار جریان در این الگو، جریانی که در آن طول حباب‌های تیلور بیش از قطر لوله باشد، «الگوی اسلاگ بزرگ» و اگر طول حباب تیلور بزرگ‌تر از نصف قطر و کم‌تر یا برابر با آن باشد، «الگوی اسلاگ کوچک» نامیده می‌شود.

در الگوی اسلاگ کوچک، حباب‌های تیلور با قطری برابر قطر لوله و یا کم‌تر از آن حرکت می‌کنند. این حباب‌ها اغلب دارای دماغه‌ای کروی و متقارن هستند که تقریباً در طول لوله در حول محور مرکزی آن حرکت می‌کند.

نام الگوی حبابی	نسبت قطر میانگین حباب‌ها به قطر لوله	نسبت سطح گاز به مایع در تصاویر
پراکنده	0/12	0/011
مغشوش	0/25	0/015
متراکم	0/31	0/018



الف) حبابی پراکنده (ب) حبابی آشفته (ج) حبابی متراکم

شکل 6 انواع الگوهای جریان حبابی در لوله عمودی به قطر داخلی 40 mm

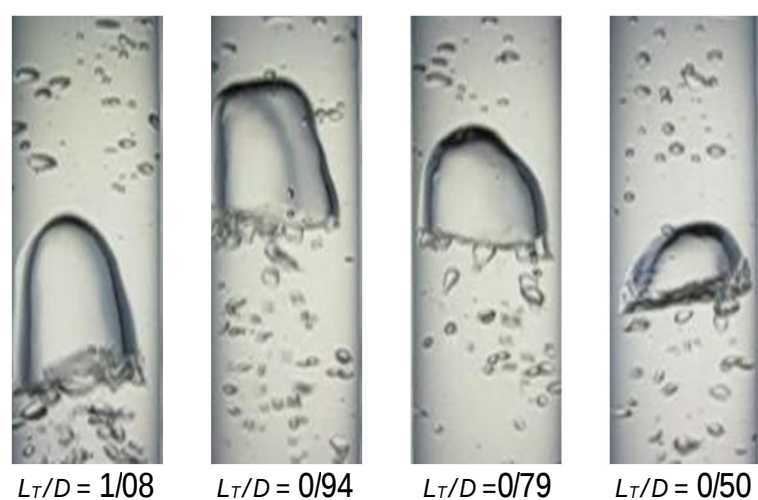
2- GrayScale

3- Binary

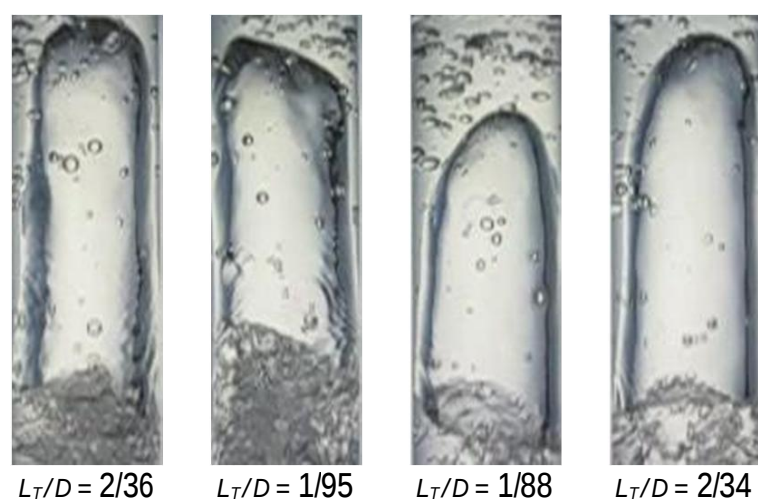
1- Sub-patterns

گفت در این ارتفاع تئوری تایتل بهتر از تئوری میشیما می‌تواند گذر بین الگوها را پیش‌بینی کند، اما گذر از الگوی اسلاگ به متلاطم در این ارتفاع توسط تئوری تایتل نیز درست پیش‌بینی نمی‌شود. دلیل این عدم تطابق‌ها را می‌توان در چند مورد دید؛ تئوری میشیما برای جریان کاملاً توسعه‌یافته گسترش یافته است، لذا برای ارتفاع‌های پایین کارایی نخواهد داشت. در این ارتفاع ممکن است نوع ورودی و تأثیر آن بر الگوی جریان هنوز از بین نرفته باشد و خود را در قالب الگوهای متفاوت نشان دهد.

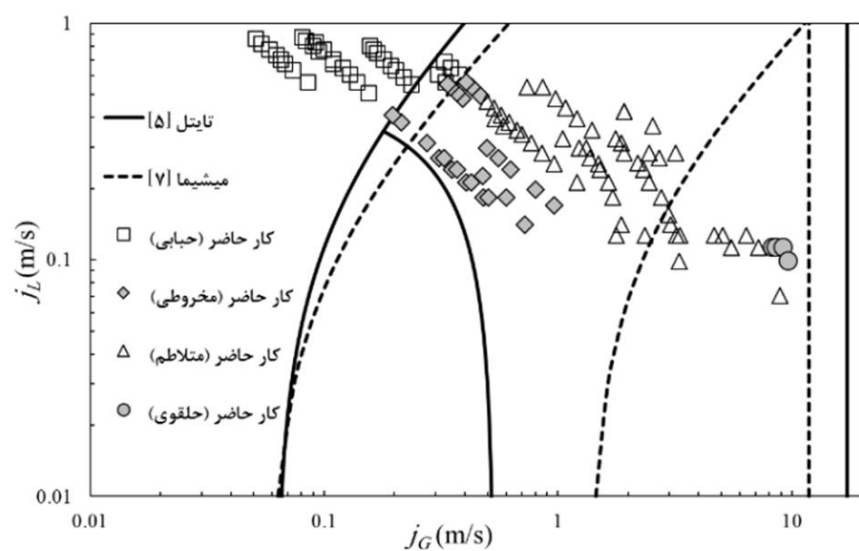
آزمایش‌ها در ارتفاع $3/22\text{ m}$ لوله نیز انجام شدند و الگوبندی جریان بر اساس مشاهدات چشمی و تحلیل تصاویر مربوط به آن‌ها نیز انجام شد. شکل 11 نشان‌دهنده نقشه الگوی جریان در این ارتفاع است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تئوری تایتل بهتر از میشیما گذر بین الگوها را پیش‌بینی می‌کند. گذر از الگوی اسلاگ به متلاطم در این ارتفاع در نزدیکی‌های منحنی تاتیل رخ می‌دهد و ناحیه مربوط به الگوی حلقوی نسبت به پیش‌بینی تاتیل در سرعت‌های ظاهری پایین‌تر گاز اتفاق می‌افتد. تئوری میشیما قابلیت پیش‌بینی الگوها در این ارتفاع را نیز ندارد.



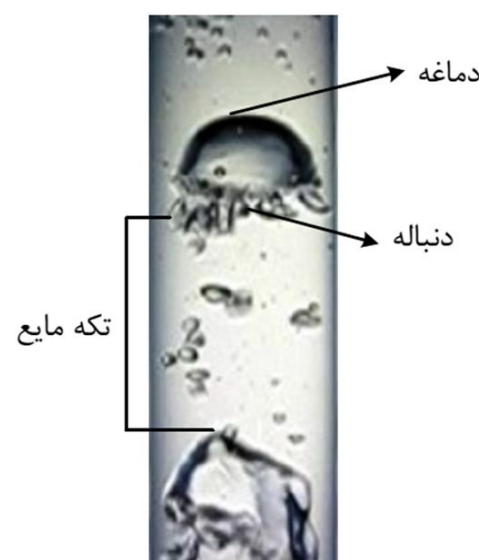
شکل 8 نسبت طول به قطرهای مختلف حباب تیلور در الگوی اسلاگ کوچک



شکل 9 نسبت طول به قطرهای مختلف حباب تیلور در الگوی اسلاگ بزرگ



شکل 10 نقشه الگوی جریان برای لوله 40 mm در $L/D = 43/25$



شکل 7 ساختار حباب تیلور در الگوی اسلاگ کوچک

در دنباله این حباب‌ها، به دلیل ویک ایجادشده از حرکت سریع حباب، گردابه‌هایی ایجاد می‌شود. در دنباله حباب‌های تیلور کوچک، تکه‌هایی پیوسته از مایع ایجاد می‌شوند که خود دارای حباب‌های کوچک هوا هستند، لذا خود تکه‌های مایع به صورت محلی در الگوی حبابی قرار دارند. شکل 7 نمایشی از دماغه، دنباله و اسلاگ مایع در الگوی اسلاگ کوچک را نمایش می‌دهد.

چند نمونه از حالت‌های مختلف الگوی اسلاگ کوچک در شکل 8 مشاهده می‌شود که نسبت طول به قطر در همه آن‌ها کم‌تر یا در حدود یک است. در بررسی‌ها و مشاهدات انجام شده، برای نسبت طول به قطرهای کمتر از $0/5$ ، حباب‌ها مشخصه‌های اصلی حباب تیلور (دماغه کروی و قطری در حدود قطر لوله) را نداشتند، لذا نمی‌توان آن‌ها را در این الگو جای داد. حباب‌های تیلور در الگوی اسلاگ بزرگ دارای طولی بیش از قطر لوله هستند و طوری حرکت می‌کنند که دماغه آن‌ها مسیری یکنواخت را طی نمی‌کند و در طول حرکت در راستای لوله، نسبت به محور مرکزی لوله کمی منحرف می‌شود.

شکل 9 نمونه‌ای از حباب‌های تیلور بزرگ مقیاس که در الگوی اسلاگ بزرگ ایجاد می‌شوند را نمایش می‌دهد. با دقت در تصاویر می‌توان دریافت که ویک ایجادشده در پشت دنباله این حباب‌ها قوی‌تر از حباب‌های تیلور کوچک‌تر است که منجر به آشفتگی زیاد در اسلاگ مایعی می‌شود که در دنباله حباب و با سرعتی تقریباً برابر با دنباله حباب در حال حرکت است. همچنین به دلیل بلند بودن طول حباب، بدنه آن در هنگام حرکت دچار تغییر شکل‌هایی می‌شود که تشدید آن منجر به هم ریختن ساختار حباب می‌شود و آن را به سمت گذر به الگوی متلاطم می‌کشاند.

3-1-3- نقشه‌های الگوی جریان

شکل 10 نقشه الگوی جریان در ارتفاع $1/73\text{ m}$ را در مقایسه با منحنی‌های گذر جریان ارائه شده توسط میشیما [3] و تایتل [2] نشان می‌دهد. در این ارتفاع، گذر از الگوی حبابی به اسلاگ تا حد قابل قبولی توسط منحنی‌های تایتل و ایشی قابل پیش‌بینی است، اما با افزایش سرعت فازها و رسیدن به الگوی اسلاگ، نقاط به دست آمده در محدوده معرفی‌شده توسط تایتل قرار نمی‌گیرند، اما محدوده معرفی‌شده توسط میشیما این نقاط را در بر می‌گیرند. با بیش‌تر شدن سرعت و رسیدن به الگوی متلاطم، نقاط به دست آمده کاملاً در محدوده الگوی اسلاگ تاتیل قرار می‌گیرند، اما میشیما این محدوده را مختص به الگوی اسلاگ می‌داند.

منطقه به دست آمده برای الگوی حلقوی در تحقیق حاضر، نسبت به تئوری تایتل و میشیما، در سرعت‌های ظاهری کمتر هوا رخ می‌دهد و به خط گذر از الگوی متلاطم به حلقوی میشیما نزدیک‌تر است. در نهایت می‌توان

صورت حباب‌های پراکنده در فاز پیوسته مایع که با سرعت بالایی به سمت بالا حرکت می‌کند، جریان می‌یابند.

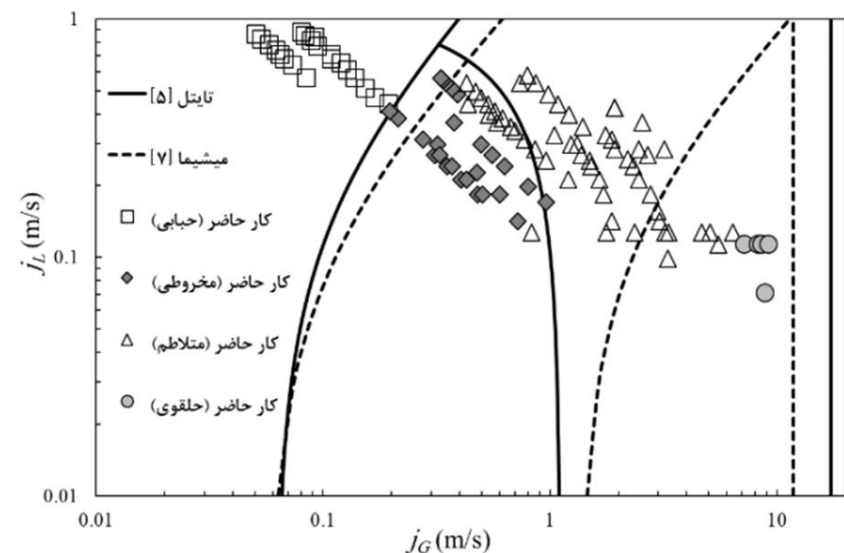
با دقت در فیلم‌های موجود از ساختار جریان در این شرایط جریانی، مشاهده می‌شود که گه‌گاه برخی از این حباب‌های ریز سعی در پیوستن به یکدیگر و تشکیل گروهی بزرگ‌تر از حباب‌ها را دارند، اما فاز مایع (آب) سریع مانع از این اتصال می‌شود و با وارد کردن نیرو آن‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند. الگوی اسلاگ: همان‌طور که در شکل 12 ب مشاهده می‌شود، بر خلاف لوله 40 mm که در آن دو نوع متفاوت از حباب‌های تیلور (بزرگ و کوچک) مشاهده شدند، در لوله 70 mm حباب‌های تیلور ظاهر شده دارای طول‌های متوسطی هستند و نمی‌توانند طول خود را از حد مشخصی بیش‌تر کنند. حباب تمایل دارد که در راستای شعاعی قطر لوله را اشغال کند، از طرفی علاقه به افزایش طول باعث می‌شود در آن واحد حباب در دو راستای شعاعی و محوری کشیده شود که این منجر به ناپایداری‌های شدیدی در ساختار بدنه حباب می‌شود و اعوجاج زیادی در آن تولید می‌کند که اغلب منجر به از هم پاشیدن حباب تیلور و گذر به الگوی متلاطم می‌شود.

در این الگوی جریانی، حباب‌های تیلور مشاهده شده ناپایدارتر و با نوسان‌های بیش‌تری روی بدنه حرکت می‌کنند و اسلاگ مایع بین حباب‌های متوالی آشفتگی بیش‌تری دارند و چگالی حباب‌های ریز موجود در آن‌ها به مراتب بیش‌تر از مقادیر مشابه در الگوی اسلاگ مربوط به لوله 40 mm است.

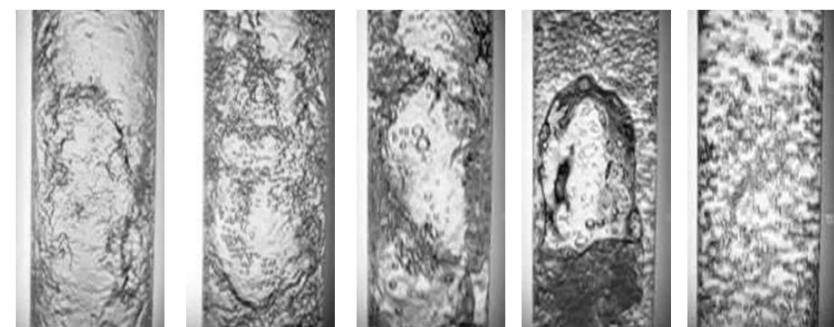
الگوی متلاطم: الگوی دیگر مشاهده شده، الگوی متلاطم است که با افزایش سرعت ظاهری هوا و با گذر از الگوی اسلاگ ایجاد می‌شود. آشفتگی و اختلاط بین دو فاز در این الگو زیاد است و دیگر حباب‌های تیلور با ساختار منظم و مشخص ظاهر نمی‌شوند. در این الگو، مرز مشترک بین دو فاز رفتاری غیرقابل پیش‌بینی از خود نشان می‌دهد و هر جا که فاز مایع تلاش می‌کند تا پیوستگی خود را باز یابد، هوا با سرعت زیاد از راه می‌رسد و با وارد کردن نیرو هر پُل یا لایه نازکی را که مایع در راستای شعاعی ایجاد می‌کند، متلاشی می‌کند. شکل 12 ج نمونه‌ای از این الگوی جریان را نشان می‌دهد.

الگوی شبه - حلقوی و حلقوی: با افزایش بیش‌تر سرعت ظاهری هوا، الگوی متلاطم با مشخصه‌های توصیف‌شده جای خود را به الگوی دیگری می‌دهد که در آن قسمت اعظم فاز مایع بر روی دیواره‌های لوله حرکت می‌کنند و هسته مرکزی لوله را فاز گاز اشغال می‌کند، اما نوع حرکت فاز مایع بر روی دیواره و رفتار فیزیکی آن در محدوده مشخصی از سرعت‌های ظاهری بالای هوا دو الگوی متفاوت را القا می‌کند: الگوی شبه - حلقوی و حلقوی. در الگوی شبه - حلقوی، فاز مایع بر روی دیواره لوله و به سمت بالا حرکت می‌کند و مرکز لوله نیز پر از هوایی است که گاهی زنجیره‌ای از قطرات کوچک را با خود حمل می‌کند.

فیلم‌های مایع به صورت تکه‌تکه و جدا از هم روی دیواره حرکت می‌کنند و گاهی تکه پایینی سرعت گرفته، خود را به تکه بالایی می‌رساند و به آن وصل شده، موجب ضخیم‌تر شدن این فیلم نازک می‌شود، چندین بار که این اتفاق رخ می‌دهد، فیلم حاصل تا حدی سنگین می‌شود که دیگر مومنتوم وارد شده از طرف هوا قادر به هل دادن آن به سمت بالا نیست و در نتیجه فیلم ضخیم تولید شده به صورت لحظه‌ای به سمت پایین ریزش می‌کند، در هنگام ریزش، فیلم کشیده شده و سپس پاره می‌شود، در این حین هوا نیز با مومنتومی که وارد می‌کند، این پارگی را تقویت می‌کند و در نهایت منجر به متلاشی شدن فیلم مایع می‌شود و تکه‌های حاصل را با خود به سمت بالا می‌برد که تاریخچه این پدیده در شکل 13 آمده است. این ویژگی اصلی‌ترین تفاوت بین الگوی شبه - حلقوی و حلقوی است و در تمام طول لوله رخ می‌دهد و نمی‌توان آن را پدیده‌ای گذرا تلقی کرد، چرا که محدوده قابل



شکل 11 نقشه الگوی جریان برای لوله 40 mm در $L/D = 80/50$



شکل 12 الگوهای جریان در لوله عمودی به قطر داخلی 70 mm

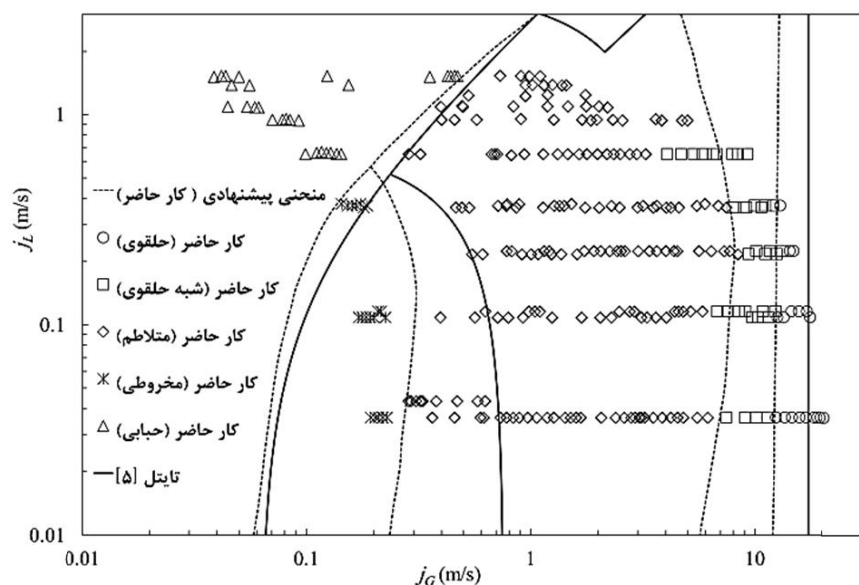
جز چند شرایط جریانی محدود، الگوهای جریان و گذر بین آن‌ها در دو ارتفاع مختلف بسیار شبیه به هم بودند، به طوری که عملاً می‌توان تأثیر ارتفاع بر الگوهای جریان در لوله به این قطر را ناچیز دانست (حداقل تا ارتفاع مورد بررسی در این پژوهش).

3-2- لوله 70 mm

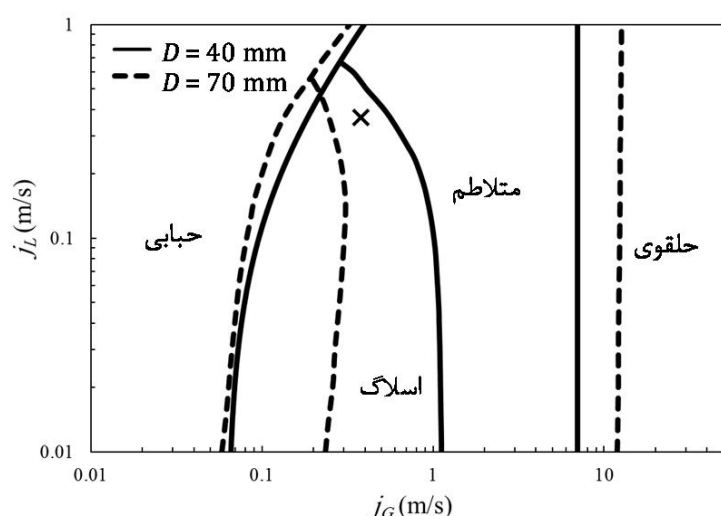
3-2-1- الگوهای جریان

بیش از 300 نقطه با دبی‌های مختلف هوا و آب داده برداری شدند که با تحلیل فیلم‌های به دست آمده از آن، پنج الگوی جریان با نام‌های حبابی، اسلاگ، متلاطم، شبه - حلقوی و حلقوی شناسایی و مشاهده شدند. محدوده سرعت‌های ظاهری مورد بررسی برای هوا و آب به ترتیب $0/036-1/530$ m/s و $0/038-20/44$ m/s در نظر گرفته شده‌اند. جهت بررسی تأثیر ارتفاع بر گذر بین الگوهای جریانی مختلف در این قطر لوله، داده‌ها در دو مکان متفاوت $L/D = 46$ و $L/D = 24/7$ به دست آمدند، اما با بررسی دقیق نتایج حاصل، تفاوت خاصی در الگوهای جریانی مشاهده‌شده در دو ارتفاع و در دبی‌های مشخص هوا و آب دیده نشد و می‌توان گفت در ارتفاع‌های مورد بررسی در این لوله، ارتفاع تأثیر خاصی بر گذر بین الگوهای مختلف ندارد، لذا در ادامه تمام نتایج مربوط به لوله به قطر داخلی 70 mm در ارتفاع $3/22$ m گزارش می‌شوند. تصویری نمونه از هر الگوی جریان مشاهده‌شده در لوله به قطر داخلی 70 mm در سرعت‌های ظاهری مختلف در شکل 12 آمده است.

الگوی حبابی: اگر سرعت ظاهری آب بر روی مقداری مشخص ثابت شود، در سرعت‌های ظاهری پایین هوا، این الگو ظاهر می‌شود و به صورت حباب‌های کوچک و ریز در سرتاسر محدوده جریان پخش می‌شود. نسبت قطر متوسط این حباب‌ها به قطر لوله اصلی بسیار کم است. به دلیل نوع ورودی انتخابی در این پژوهش، هوا به هنگام ورود به لوله اصلی، به صورت حباب‌های بزرگ نامنظم وارد می‌شود، اما در سرعت‌های ظاهری بالای آب، به دلیل انرژی توربولانسی بالای آن، این پیوستگی در هوای ورودی در همان ارتفاع‌های پایین کاملاً از بین می‌رود و به عبارتی فاز گاز کاملاً از هم می‌پاشد و به



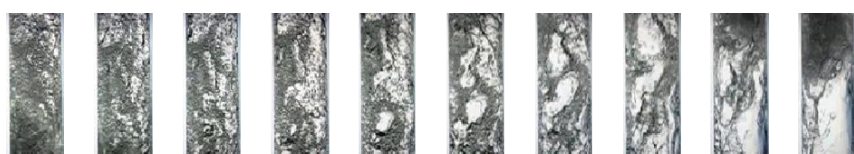
شکل 14 نقشه الگوی جریان برای لوله به قطر داخلی 70 mm در $L/D=46$



شکل 15 مقایسه نقشه‌های الگوی جریان به دست آمده برای لوله به قطر داخلی 70 mm و 40 mm



الف) لوله 40 mm



ب) لوله 70 mm

شکل 16 الگوی جریان در فریم‌های متوالی برای دو لوله به قطر داخلی 40 mm و 70 mm در ارتفاع 3/22 m برای $j_G = 0/379$ m/s و $j_L = 0/368$ m/s

در محدوده مورد بررسی سرعت‌ها، در هر دو لوله الگوی متلاطم سطح بیش‌تری از نقشه را به خود اختصاص داده است که این مقدار برای لوله با قطر 70 mm بیش‌تر است. با مقایسه خط گذر از الگوی متلاطم به حلقوی در هر دو لوله، این گذر در لوله با قطر 40 mm در سرعت‌های ظاهری هوای کم‌تری رخ می‌دهد. جهت مقایسه ساختار جریان در سرعت‌های ظاهری برابر، فریم‌های متوالی از فیلم مربوط به نقطه‌ای که در نمودار شکل 15 با علامت ضربدر مشخص شده است، برای دو لوله در شکل 16 نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در سرعت‌های ظاهری برابر، الگوی حاکم در لوله 40 mm اسلاگ و در الگوی 70 mm متلاطم است.

4- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های مربوط به پژوهش حاضر در سیستم دوفازی عمودی ساخته شده در آزمایشگاه جریان‌های دوفازی دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شده است. این سیستم به لحاظ نوع عملکرد چندگانه و مشخصه‌های سیالاتی با

توجهی را شامل می‌شود و مشخصه‌هایی متفاوت از الگوی متلاطم دارد. این ویژگی‌ها در الگوی حلقوی نیز مشاهده نمی‌شود و فیلم‌های نازک مایع توانایی به هم پیوستن و ایجاد چنین فیزیکی را ندارند.

3-2-2- نقشه الگوهای جریان

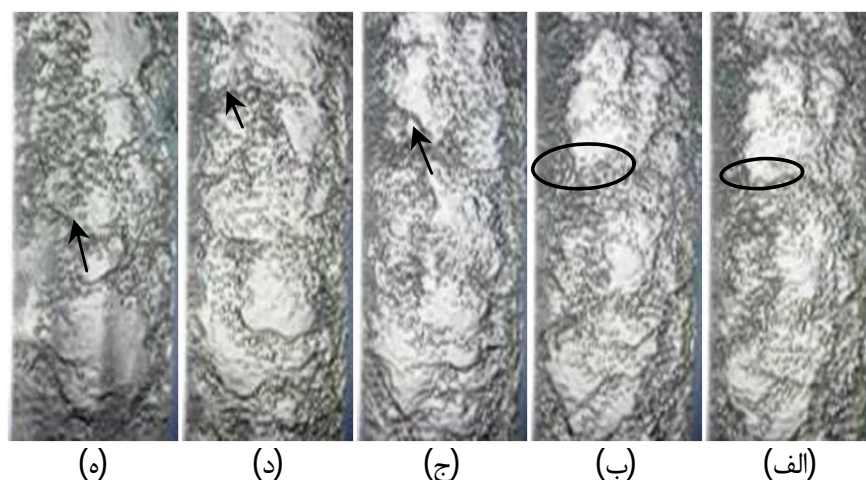
نقشه الگوی جریان بر اساس سرعت‌های ظاهری هوا و آب که به ترتیب محورهای افقی و عمودی نمودار را تشکیل می‌دهند در شکل 14 ارائه شده است. برای به دست آوردن الگوی جریان در این لوله، در هر سری از آزمایش‌ها دبی آب روی مقدار ثابتی نگه داشته می‌شد و سپس دبی هوا با گام‌های مناسبی تغییر داده می‌شد. برای هر نقطه نیز ساختار جریان به مدت 30s با سرعت 240 f/s فیلم‌برداری شده است. برای مقایسه الگوبندی به دست آمده با کارهای محققان دیگر، منحنی‌های گذر بین الگوهای مختلف، مربوط به کار تایتل [3] نیز در شکل 14 ارائه شده‌اند، اما الگوبندی پیشنهادی میشیما و ایشی [4] به دلیل عدم تطابق مناسب در نمودار ارائه نشده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته، در پژوهش حاضر نسبت به تئوری تایتل [3]، گذر از الگوی حبابی به اسلاگ در سرعت‌های ظاهری پایین‌تر رخ می‌دهد. تفاوت اصلی بین نقشه به دست آمده و کارهای تئوری، در مرز گذر بین الگوی اسلاگ و متلاطم است که در کار حاضر، محدوده مربوط به الگوی اسلاگ منطقه کوچک‌تری را پوشش می‌دهد. در نقشه حاضر، الگوی شبه - حلقوی نیز به عنوان یک الگوی مستقل، بخشی از نمودار را در بر می‌گیرد که در کارهای دیگر محققان این محدوده اغلب جزو الگوی متلاطم یا حلقوی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین گذر از الگوی متلاطم به شبه - حلقوی و از آن به الگوی حلقوی در سرعت‌های ظاهری هوای کم‌تری نسبت به پیش‌بینی تایتل رخ می‌دهد. منحنی‌های پیشنهادی در تحقیق حاضر که در شکل 14 با خط‌چین مشخص شده است، تجربی و بر مبنای مشاهدات و بررسی‌های انجام گرفته رسم شده است.

3-3- مقایسه نقشه‌های الگوی جریان لوله 40 mm و 70 mm

برای بررسی اثر قطر لوله بر منحنی‌های گذر بین الگوهای جریان مختلف، منحنی‌های به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی برای دو لوله مورد بررسی در ارتفاع 3/22 m در شکل 15 آمده است.

با افزایش قطر لوله، گذر از الگوی حبابی به اسلاگ تقریباً در سرعت‌های ظاهری برابر رخ می‌دهد و جابه‌جایی خاصی در منحنی ایجاد نمی‌شود. اما همان‌طوری که در شکل 15 مشاهده می‌شود، محدوده مربوط به الگوی اسلاگ با افزایش قطر لوله به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد و گذر از الگوی اسلاگ به متلاطم در لوله 70 mm در سرعت‌های ظاهری هوای پایین‌تری رخ می‌دهد.



شکل 17 تاریخچه الگوی شبه - حلقوی: الف) به هم پیوستن فیلم‌های نازک روی دیواره، ب) ایجاد فیلم‌های ضخیم، ج) ریزش فیلم ضخیم، د) متلاشی شدن فیلم مایع، ه) انتقال فیلم‌های پاره شده به سمت بالا توسط هوا

محدوده بزرگتر نسبت به سایر مشخصات آزمایشگاه‌های موجود گزارش شده در ایران و جهان دارای جایگاه مناسبی است.

در پژوهش‌های صورت گرفته قبلی، اغلب نتایج بر روی یک قطر لوله کوچک، در ارتفاعی مشخص و برای محدوده دبی‌های پایین انجام شده است، لذا در این پژوهش با استفاده از داده‌های به دست‌آمده الگوهای جریانی مختلف در دو لوله به قطرهای میانی شناسایی و نقشه‌های الگوی جریان برای هر یک در ارتفاع‌های مختلف و محدوده دبی‌های بزرگ‌تر، ارائه و تأثیر قطر و ارتفاع بر گذر بین الگوهای مختلف بررسی شده‌اند. هم‌چنین به کمک تکنیک پردازش تصویر، چندین الگوی فرعی جریان نیز در لوله‌ها شناسایی و معرفی شده‌اند که در کارهای پیشین به ندرت مشاهده شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

- بر اساس میزان تراکم حباب‌ها، الگوی حبابی در لوله 40 mm را می‌توان به سه الگوی فرعی حبابی پراکنده، حبابی آشفته و حبابی متراکم تقسیم کرد.
- بر اساس طول حباب تیلور، الگوی اسلاگ در لوله 40 mm را می‌توان به دو الگوی فرعی اسلاگ بزرگ و کوچک تقسیم نمود.
- به دلیل نوع ورودی مورد استفاده در آزمایش‌ها، الگوی حبابی در سرعت‌های کم آب در لوله 70 mm مشاهده نمی‌شود و فقط در سرعت‌های بالا این الگو ظاهر می‌شود. لذا تأثیر نوع ورودی در این لوله مشهودتر از لوله 40 mm است.
- الگوی شبه - حلقوی به عنوان الگوی مستقل در لوله 70 mm شناسایی شده‌است که دارای رفتاری متفاوت از الگوی حلقوی است.
- نقشه‌های به دست آمده برای هر دو لوله، با منحنی‌های گذر حاصل از مدل تایتل [3] تطابق بهتری را نشان می‌دهند.
- در هر دو لوله با قطرهای متفاوت، با تغییر ارتفاع مورد بررسی از 1/73 m به 3/22 m تغییر محسوسی در گذر بین الگوهای جریانی متفاوت مشاهده نشد.
- با مقایسه نقشه‌های به دست آمده برای هر دو لوله، مشاهده می‌شود تغییر قطر لوله تأثیر زیادی بر منحنی گذر از الگوی حبابی به اسلاگ ندارد.
- با تغییر قطر لوله از 40 mm به 70mm، محدوده الگوی اسلاگ به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد و جای خود را به الگوی متلاطم می‌دهد. هم‌چنین گذر از الگوی متلاطم به الگوی حلقوی نیز با افزایش قطر لوله در سرعت‌های ظاهری هوای بالاتری اتفاق می‌افتد.

5- فهرست علائم

D	قطر (m)
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
j	سرعت ظاهری (ms^{-1})
L	طول (m)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	ضریب کشش سطحی (Nm^{-1})
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
Δ	تغییرات متغیر

بالانویس‌ها

* مربوط به قطر بحرانی

زیرنویس‌ها	
G	فاز گاز
H	هیدرولیکی
L	فاز مایع
T	مربوط به حباب تیلور

6- مراجع

- [1] A. Prosperetti, G. Tryggvason, *Computational methods for multiphase flow*, Cambridge University Press, 2007.
- [2] C. E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*, pp. 155-195, California, 2003.
- [3] 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
- [4] M. Kaichiro, M. Ishii, Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, pp. 723-737, 1984.
- [5] G. Matsui, Automatic identification of flow regimes in vertical two-phase flow using differential pressure fluctuations, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 95, No. 0, pp. 221-231, 1986.
- [6] H. Cheng, J. H. Hills, B. J. Azzopardi, A study of the bubble-to-slug transition in vertical gas-liquid flow in columns of different diameter, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 24, No. 3, pp. 431-452, 1998.
- [7] T. Furukawa, T. Fukano, Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 6, pp. 1109-1126, 2001.
- [8] D. Lucas, E. Krepper, H. M. Prasser, Development of co-current air-water flow in a vertical pipe, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, No. 12, pp. 1304-1328, 2005.
- [9] P. Hanafizadeh, S. Ghanbarzadeh, M. H. Saidi, Visual technique for detection of gas-liquid two-phase flow regime in the airlift pump, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 327-335, 2011.
- [10] Y. Zhao, Q. Bi, R. Hu, Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of gas-liquid two-phase flow in vertical upward pipes using the gamma densitometer, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 60, No. 1-2, pp. 398-410, 2013.
- [11] H. Chen, J. Xu, J. Xie, F. Xing, Z. Li, Modulated flow patterns for vertical upflow by the phase separation concept, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, No. 0, pp. 297-307, 2014.
- [12] L. Liu, The phenomenon of negative frictional pressure drop in vertical two-phase flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 45, No. 0, pp. 72-80, 2014.
- [13] K. Mydlarz-Gabryk, M. Pietrzak, L. Troniewski, Study on oil-water two-phase upflow in vertical pipes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 117, No. 0, pp. 28-36, 2014.
- [14] L. Liu, X. Li, L. Tong, Y. Liu, Effect of surfactant additive on vertical two-phase flow, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 115, No. 0, pp. 1-10, 2014.
- [15] M. Abdulkadir, V. Hernandez-Perez, I. S. Lowndes, B. J. Azzopardi, E. T. Brantson, Detailed analysis of phase distributions in a vertical riser using wire mesh sensor (WMS), *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 59, No. 0, pp. 32-42, 2014.
- [16] D. Tian, C. Yan, L. Sun, P. Tong, G. Liu, Comparison of local interfacial characteristics between vertical upward and downward two-phase flows using a four-sensor optical probe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 77, No. 0, pp. 1183-1196, 2014.
- [17] B. J. Azzopardi, H. K. Do, A. Azzi, V. Hernandez Perez, Characteristics of air/water slug flow in an intermediate diameter pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 60, No. 0, pp. 1-8, 2015.
- [18] K. Isao, I. Mamoru, Drift flux model for large diameter pipe and new correlation for pool void fraction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 9, pp. 1927-1939, 1987.
- [19] X. Wang, L. Guo, X. Zhang, An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 11-12, pp. 2439-2443, 2007.