



مطالعه تجربی هیدرودینامیک الگوی اسلاگ در لوله‌های عمودی رو به بالا

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 143-14115، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 فروردین 1394

پذیرش: 27 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 16 خرداد 1394

کلید واژگان:

جریان دوفازی

لوله عمودی

حباب تیلولر

اسلاگ مایع

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار هیدرودینامیکی الگوهای اسلاگ در لوله‌ای از جنس اکریلیک شفاف، به قطر داخلی 40 mm و طول 3/33m انجام شده‌است. برای انجام آزمایش‌ها از سیستم آزمایشگاهی عمودی ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس تهران استفاده شده است. به کمک تکنیک پردازش تصویر، فیلم‌های برداشت شده از ساختار جریان بررسی شده و مشخصه‌هایی همچون طول و سرعت میانگین حباب تیلولر و اسلاگ مایع بین آن‌ها به دست آمده است. همچنین مسیر میانگین حرکت دماغه حباب تیلولر در این قطر لوله نیز برای محدوده مشخصی از طول لوله استخراج شده است. بررسی نمودارهای چگالی احتمال به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش طول حباب تیلولر رابطه مستقیمی با طول اسلاگ مایع دارد و حباب‌های تیلولر با طول کوچک‌تر سرعت صعود بالاتری دارند. همچنین با توجه به نتایج حاصل، دماغه حباب از محدوده $\pm 20\%$ اطراف محور مرکزی لوله تجاوز نمی‌کند. رابطه‌ای تجربی بر اساس سرعت حرکت حباب تیلولر و مجموع سرعت‌های ظاهری فازها ارائه شده است که نشان می‌دهد رابطه معروف نیکلین برای این قطر لوله ناکارآمد است.

Experimental Study of Hydrodynamics of Slug Flow Pattern in Vertical Upward Pipes

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 15 April 2015

Accepted 17 May 2015

Available Online 06 June 2015

Keywords:

Two-phase flow

vertical pipe

Taylor bubble

Liquid slug

ABSTRACT

Present research has been done with the aim of investigating hydrodynamic behavior of slug flows in a transparent acrylic tube with inner diameter of 40 mm and height of 3.33 m. The vertical experimental system constructed in Two-Phase Flow lab in Tarbiat Modares University was used to perform the necessary experiments. By using image processing technique, recorded movies of flow structures were analyzed and some important characteristics of slug flow such as length and velocity of Taylor bubbles and liquid slugs between them were extracted. In addition, the average path line of Taylor bubble nose was computed in a proper range of the tube length. The acquired probability density functions show that there is a direct relationship between the increase of Taylor bubble length and the liquid slug length moving after it. Also, rising velocity of shorter Taylor bubbles is higher than the longer ones. Results show that bubble nose does not violate $\pm 20\%$ around the center line of the tube. An experimental correlation based on the Taylor bubble velocity and total superficial velocities of phases is presented which shows that the famous Nicklen correlation does not work well for this tube diameter.

1- مقدمه

شرایط جریان و خواص فیزیکی فازها، از دنباله آرام با چرخش‌های مشخص تا دنباله آشفته با چرخش‌های تصادفی و کوچک متغیر است [2]. به دلیل اهمیت زیاد هیدرودینامیک جریان اسلاگ در صنایع مختلف، تا به حال مطالعات زیادی در این زمینه توسط پژوهشگران مختلف انجام شده‌است که اغلب علاقه‌مند به اندازه‌گیری سرعت میانگین حباب تیلولر و مشخصات هندسی حباب تیلولر و اسلاگ مایع بین آن‌ها همچون طول آن‌ها هستند. در سال 1962 نیکلین و همکارانش رابطه‌ای را به‌صورت (1) برای محاسبه سرعت حباب تیلولر ارائه داد [3].

جریان اسلاگ در بسیاری از کاربردهای صنعتی و هندسی همانند ستون‌های تقطیر، واحدهای جذب گازی، راکتورهای هسته‌ای، لوله‌های انتقال گاز و نفت و بویلرهای بخار مشاهده می‌شود [1]. جریان اسلاگ اغلب توسط حباب‌های بزرگ تیلولر و تکه‌های مایع بین آن‌ها که حاوی حباب‌های کوچک گاز هستند مشخص می‌شود. در پشت حباب، جایی که تکه فیلم مایع بر اثر حرکت حباب تیلولر کشیده می‌شود، دنباله‌ای¹ از حباب ایجاد می‌شود که بر اساس

1- Wake

داشت. با بررسی‌های که توسط این محقق انجام گرفت، نیاز است که در مدل‌های جریان اسلاگ مشخصه‌های آماری جریان به جای مقادیر میانگین وارد شود. وی همچنین پیشنهاد کرد جهت بررسی در هم‌کنش دو حباب و مکانیزم به هم رسیدن آن‌ها، آزمایش‌های بیش‌تری انجام شود. در سال 2008، میور و همکارانش [11] طی پژوهشی الگوی اسلاگ را با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، در لوله‌هایی به قطرهای داخلی 32 mm و 52 mm مطالعه کردند. آن‌ها سرعت میانگین حباب، طول حباب تیلور و اسلاگ مایع بین حباب‌ها، سرعت به هم رسیدن حباب‌های تیلور را به دست آوردند و توزیع هر یک را بر اساس داده‌های موجود در نمودارهایی ارائه کردند و بر اساس تحلیل‌هایی که انجام دادند، نتیجه گرفتند که متغیرهایی هم‌چون قطر ستون مایع، سرعت‌های ظاهری هوا و آب، طول و سرعت حباب پیشرو تأثیری بر منحنی در هم‌کنش حباب- حباب نمی‌گذارد. پردازش تصویر به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند جهت تحلیل الگوهای جریان‌ی اساسی کار ونگ و گروه پژوهشی همکار وی قرار گرفت تا در سال 2014 طی پژوهش‌هایی با اهداف متفاوت [13،12] مطالعه جامعی بر روی هیدرودینامیک الگوی اسلاگ داشته باشند. این افراد سطح مقطع مستطیلی را برای کارهای خود انتخاب کردند و در هندسه‌هایی متفاوت منحنی‌های بر هم‌کنش حباب - حباب را استخراج کرده و با کارهای موجود مقایسه کردند. هم‌چنین با ارائه مدلی برای حرکت حباب‌ها، نتایج آزمایشگاهی خود را با نتایج مدل مقایسه کرده و هماهنگی بسیار خوبی را گزارش کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که سرعت حباب تیلور وابسته به طول اسلاگ مایع بالای آن است و بررسی‌های این افراد نشان می‌دهد که طول میانگین حباب تیلور و اسلاگ مایع بین حباب‌ها در طول کانال افزایش می‌یابند.

لوله‌های عمودی در محدوده قطر 40 mm، اغلب در بویلرها به ویژه بویلرهای از نوع درام‌دار با چرخش طبیعی و اجباری، انواع کندانسورها و قسمت‌های داخلی راکتورهای هسته‌ای فشار پائین به کار می‌روند.

در پژوهش حاضر با تمرکز بر ناحیه مربوط به الگوی جریان اسلاگ، نحوه تغییر مشخصه‌های طول و سرعت حباب‌های تیلور در لوله به قطر داخلی 40 mm مورد مطالعه قرار گرفته است که در پژوهش‌های پیشین اغلب قطرهای کوچک‌تر از این قطر بررسی شده‌اند. لازم به ذکر است که علم و آگاهی از نحوه‌ی رفتار حباب‌های تیلور با مشخصه‌های مختلف، برای انتخاب مناسب ناحیه ایمن‌کاری در صنایع مختلف می‌تواند بسیار سودمند باشد.

2- سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی عمودی ساخته شده در آزمایشگاه جریان‌های دوفازی دانشگاه تربیت مدرس تهران برای انجام این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم شامل هفت لوله با قطرهای مختلف است که به دلیل پیچیدگی سیستم، تنها مسیرهای انتقال هوا و آب آن به ترتیب در شکل‌های 1 و 2 نمایش داده شده‌اند. در این سیستم هوای مورد نیاز توسط یک کمپرسور با توان 45 kW تأمین می‌شود. فشار هوای خروجی از مخزن به کمک یک سیستم رگلاتور فشار تنظیم می‌شود و دمای آن بعد از عبور از یک سیستم خنک‌کاری 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 نقاط مختلفی بین مخزن کمپرسور و محفظه اختلاط

$$u_T = u_\infty + C(j_L + j_G) \quad (1)$$

که در آن u_∞ سرعت رانش¹ حباب در مایع ساکن، C ضریبی است که برای جریان مایع آشفته برابر با 1/2 و برای جریان مایع آرام کاملاً توسعه‌یافته برابر با 2 است. j_L و j_G به ترتیب سرعت‌های ظاهری مایع و گاز هستند. سرعت رانش حباب از رابطه (2) به دست می‌آید.

$$u_\infty = 0.35\sqrt{gD} \quad (2)$$

که در آن g شتاب گرانش و D قطر داخلی لوله هستند. جریان در مایع و در دنباله حباب می‌تواند آرام و یا آشفته باشد. لذا نیاز است که عدد رینولدز بر اساس مشخصه‌های جریان دو فازی تعریف و بر اساس آن‌ها معیاری بر آرام و یا آشفته بودن جریان در الگوی اسلاگ تعریف شوند. عدد رینولدز در ناحیه مایع (اسلاگ مایع بین حباب‌های تیلور) طبق رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$Re_{TP} = \frac{G_{TP}D}{\mu_{TP}} \quad (3)$$

که در آن G_{TP} ، سرعت جرمی مخلوط دوفازی، D قطر هیدرولیکی کانال و μ_{TP} لزجت دینامیکی مخلوط دو فازی هستند. G_{TP} و μ_{TP} به ترتیب از روابط (4) و (5) به دست می‌آیند [4].

$$G_{TP} = \rho_L j_L + \rho_G j_G \quad (4)$$

$$\mu_{TP} = \mu_L + \mu_G \quad (5)$$

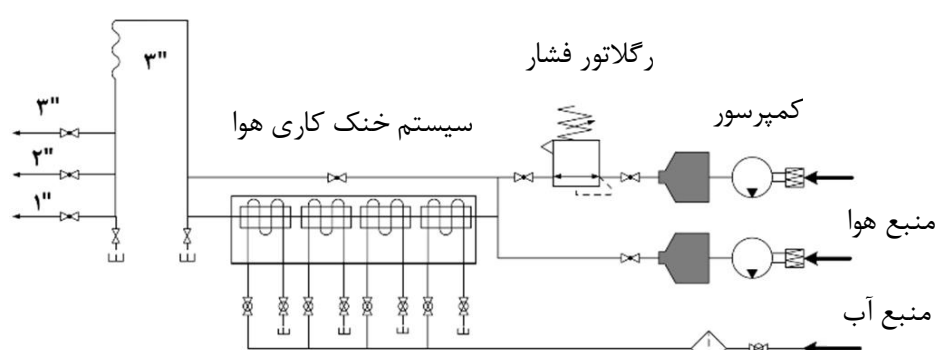
وانگ و همکارانش از تئوری ثابت کردند که اگر $Re_{TP} < 2483$ باشد، جریان مایع آرام است، لذا بر اساس عدد رینولدز بدست آمده برای اسلاگ مایع در الگوی اسلاگ می‌توان به آرام یا آشفته بودن رژیم در آن پی برد [5]. پینتو و همکارانش [6] رژیم‌های دنباله حباب تیلور را به سه دسته آرام، گذرا و آشفته تقسیم کردند و معیار آن را عدد رینولدز تعریف شده بر اساس سرعت نسبی حباب تیلور به سرعت فازها تعریف کردند که در رابطه (6) آمده است.

$$Re_{us} = \frac{u_s \rho_L D}{\mu_L} \quad (6)$$

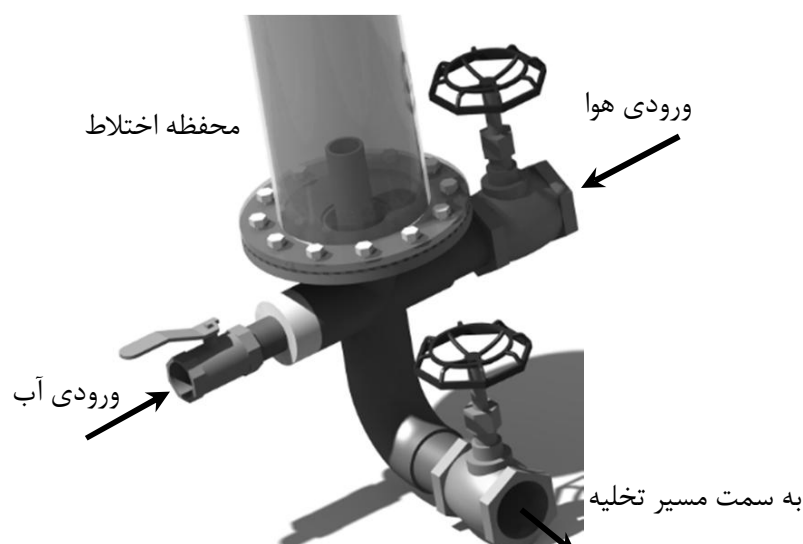
در این رابطه $u_s = u_T^{\text{exp}} - j_M$ است که در آن u_T^{exp} سرعت میانگین حباب تیلور از آزمایش است و j_M مجموع سرعت‌های ظاهری دو فاز است. پینتو [6] برای $Re_{us} > 525$ دنباله حباب تیلور را آشفته می‌داند.

بارنیا و تایتل [7] مدلی ارائه کردند که توانایی محاسبه طول حباب تیلور و اسلاگ را در هر طولی از لوله داشت. این مدل توزیعی تصادفی در ورودی کانال فرض می‌کند و کاهش یا افزایش طول حباب را طی مدل‌سازی محاسبه می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده توسط این پژوهشگران، برای جریان اسلاگ کاملاً توسعه یافته، طول میانگین حباب تیلور در حدود 1/5 برابر کوچکترین طول پایدار حباب و بیشینه طول در حدود سه برابر کمترین طول پایای حباب است. وان هوت و همکارانش در سال 2001 و 2002 [9،8]، در کارهایی جداگانه و با استفاده از پروب‌های نوری مشخصه‌های هیدرودینامیکی حباب‌ها در الگوی اسلاگ را در دبی‌های مختلف هوا و آب، شیب‌ها و قطرهای مختلف مطالعه کردند و مدلی ساده جهت محاسبه طول حباب‌های تیلور ارائه کردند که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ایشان مدلی خوبی محسوب می‌شود. هم‌چنین این محققین از تکنیک پردازش تصویر نیز برای به دست آوردن مشخصه‌هایی از حباب هم‌چون طول حباب، طول اسلاگ مایع و سرعت حباب استفاده کردند. شیمر [10] در سال 2003 مروری بر کارهایی که تا سال 2002 در رابطه با هیدرودینامیک الگوی اسلاگ انجام شده بود،

1- Drift velocity



شکل 2 مسیر هوای سیستم



شکل 3 طرحواره محفظه اختلاط طراحی شده

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 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% 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 دارای بیشینه خطای 1% هستند و بر اساس استاندارد [14] 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 به‌دست آوردن الگوهای جریانی مختلف، تصاویر با استفاده از دوربین‌های سرعت بالا ثبت می‌شوند. دوربین‌های کائون² با سرعت فیلم‌برداری 240 f/s برای این کار استفاده شده‌اند. با توجه به شکل 5، 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. 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 ثبت شده دارد.

اغلب تصاویر به صورت ماتریس‌های دوبعدی نمایش داده می‌شوند که در آن هر آرایه دارای یک پیکسل در تصویر نمایش داده شده‌است. پیکسل از

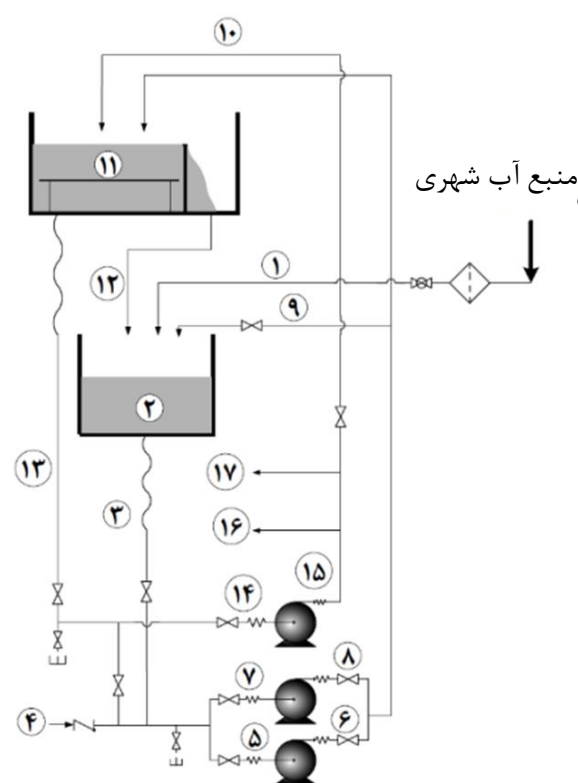
متغیرهای فشار، دما و دبی اندازه‌گیری می‌شوند.

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. 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 آن را به حداقل می‌رساند. هم‌چنین حباب‌گیری در این تانک به کار رفته است که توسط آن حتی حباب‌های ریز هوا نیز از آب گرفته می‌شود تا خطای ناشی از حضور آن‌ها در اندازه‌گیری‌ها به حداقل برسد.

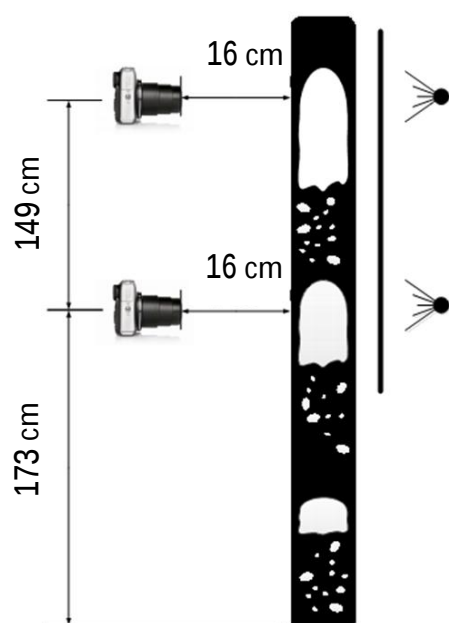
تانکی که در ارتفاع بالا قرار دارد، تغذیه کننده اصلی فاز مایع سیستم است که این کار را از طریق یک پمپ سانتریفیوژ مجهز به سیستم اینورتر انجام می‌دهد که می‌تواند محدوده وسیعی از دبی‌های مختلف آب را پوشش دهد. فشار، دما و دبی آب در نقاط متفاوتی قبل از ورود به محفظه اختلاط اندازه‌گیری می‌شوند. سیستم آزمایشگاهی قابلیت این را دارد که بر حسب نیاز آب یا هوا، از بالا یا پایین وارد محفظه اختلاط شوند. 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 3 نمایشی سه بعدی از محفظه اختلاط طراحی شده را نمایش می‌دهد که در این پژوهش، آب از مرکز و هوا از اطراف وارد آن شده و با هم مخلوط می‌شوند.

لوله مورد استفاده از جنس اکریلیک شفاف انتخاب شده‌است تا توانایی مشاهده و ثبت پدیده‌های درون آن ممکن شود. لوله به قطر داخلی 40 mm و طولی در حدود 3/33 m برای این پژوهش انتخاب شده‌است. مخلوط دو فازي 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 4 نمایش داده شده‌اند.

قسمت اول از نوع انگشتی¹ طراحی شده است و مقدار زیادی از هوای



شکل 1 مسیر آب سیستم: 1) ورودی اول تانک 1، 2) تانک 1، 3) خروجی تانک 1، 4) مسیر آب جدا شده از هوا، 5) ورودی پمپ 1، 6) خروجی پمپ 1، 7) ورودی پمپ 2، 8) خروجی پمپ 2، 9) ورودی دوم تانک 1، 10) ورودی تانک 2، 11) تانک 2، 12) خروجی اول تانک 2، 13) خروجی دوم تانک 2، 14) ورودی پمپ 3، 15) خروجی پمپ 3، 16) مسیر 3 اینچ آب، 17) مسیر 2 اینچ آب سیستم



شکل 5 نحوه نورپردازی و فیلم برداری از جریان

طوری که هر پیکسل در تصویر خروجی ممکن است بر اساس یک مقایسه انجام شده بین پیکسل مربوطه و همسایگی آن دست‌خوش تغییر شود. با انتخاب اندازه و نحوه اتصال هر پیکسل به همسایگی، می‌توان فرآیند پردازشی طراحی کرد که نسبت به اجزای مشخصی داخل تصویر حساس باشد. اصلی‌ترین عملیات صورت گرفته در پردازش ریخت‌شناسی، اتساع و سایش هستند [17]. در این عملیات حالت هر پیکسل داده شده در تصویر خروجی با توجه به قانون اعمال شده به پیکسل مربوطه و همسایگی‌های آن در تصویر ورودی مشخص می‌شود [15].

در هر تصویر ممکن است به هر دلیلی اجزای بسیار کوچکی ظاهر شده باشند که تمایلی به حضور آن‌ها در تصویر نیست. این اجزای کوچک به عنوان اغتشاش تصویر شناخته می‌شوند که می‌توان با استفاده از فیلتر کردن این اغتشاش‌های کوچک را بدون تغییر در اجزای بزرگ‌تر از تصویر حذف کرد. در برخی جاها نیاز است که محلی از تصویر که به صورت نامناسبی در تصویر ایجاد شده‌است پر شود. عملیات پر کردن سوراخ کمک می‌کند تا در صورت نیاز جزئی از تصویر که حائز اهمیت است کیفیت خود را بازیابد.

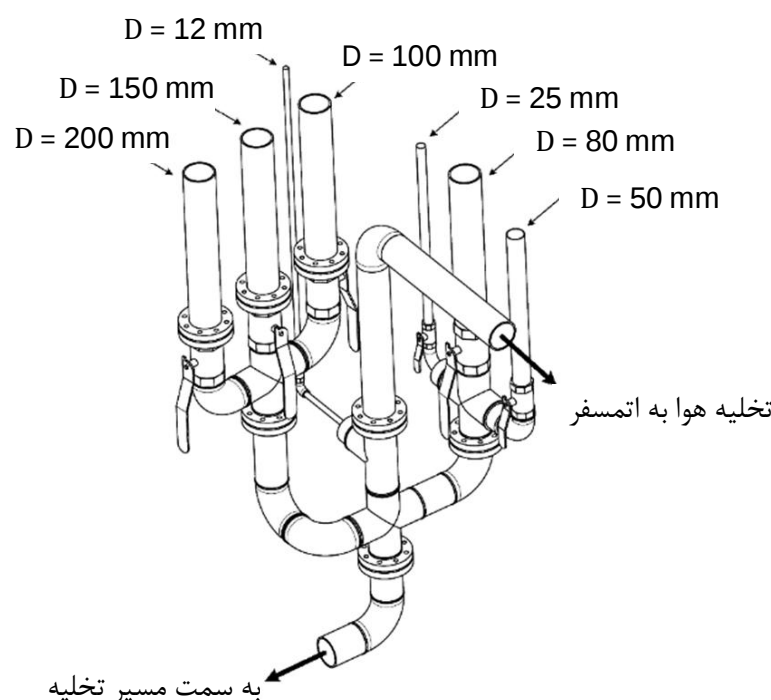
بعد از انجام پردازش‌های بالا، اجزای تصویر شناسایی می‌شوند و برخی از مشخصات آن‌ها همچون سطح، مرکز سطح و ابعاد آن استخراج می‌شوند. با استفاده از این نتایج می‌توان بزرگ‌ترین یا کوچک‌ترین اجزای تصویر را شناسایی و مشخص کرد و در صورت نیاز از آن‌ها برای فیلتر بیش‌تر تصویر استفاده نمود. برای نمونه در تحلیل سرعت حباب تیلور نیاز است که بزرگ‌ترین جزء سیستم شناسایی شده و سپس تمام اجزای کوچک‌تر از آن حذف شوند تا تصویر حاصل فقط شامل حباب تیلور که بزرگ‌ترین جزء شکل است باشد، سپس با دانستن پیکسل‌های مربوط به این جزء می‌توان موقعیت دقیق دنباله و دماغه حباب را شناسایی کرد.

تمامی این مراحل بر روی فریم‌های مورد نظر به دست آمده از فیلم‌های جریان انجام شده‌است و از آن‌ها برای سرعت‌سنجی و تشخیص الگوی جریان استفاده شده‌است. شکل 6 تغییرات ایجاد شده در تصویر اولیه تا رسیدن به تصویر مطلوب را مرحله به مرحله نمایش می‌دهد.

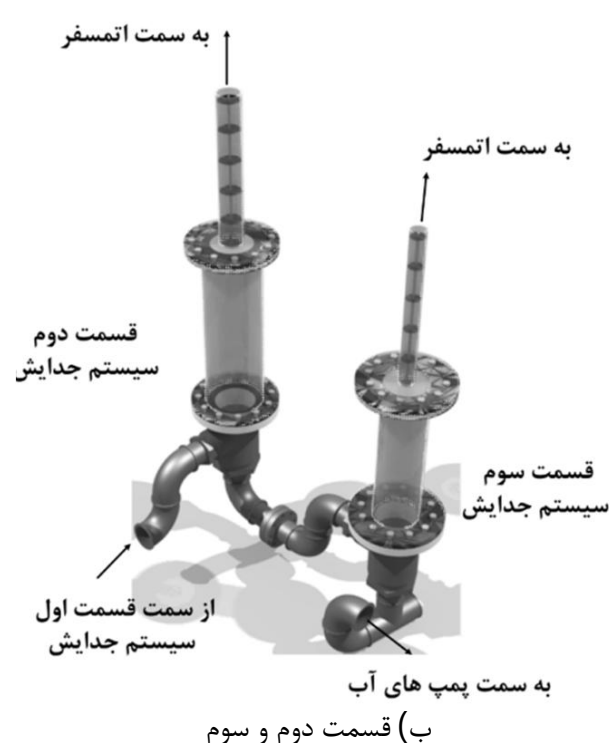
با حفظ حباب تیلور به‌عنوان بزرگ‌ترین جزء تصویر در هر فریم می‌توان سرعت صعود حباب را به دست آورد. شکل 7 تاریخچه صعود حباب را نشان می‌دهد که سطر اول آن تصاویر رنگی گرفته از جریان و سطر دوم آن تصاویر بایناری پردازش شده هستند.

3- نتایج

ساختار پیچیده جریان اسلاگ را می‌توان بر اساس یک سری از واحدهایی



الف) قسمت اول



ب) قسمت دوم و سوم

شکل 4 نمایی از سیستم جدایش سیستم آزمایشگاهی

المان تصویری استخراج می‌شود و اغلب یک تک نقطه را در صفحه رایانه نشان می‌دهد [15]. تصاویر به دست آمده از فیلم‌های مرتبط با این پژوهش همگی رنگی¹ و با ابعاد 240 پیکسل در 320 پیکسل هستند. در هر تصویر جزئی مشخص حائز اهمیت است، لذا برای به دست آوردن آن نیاز به حذف برخی از سایر اجزای کم اهمیت‌تر از تصویر است.

هر تصویر رنگی از سه زیر ماتریس تشکیل شده‌است که هر یک نشانگر شدت پیکسل رنگ قرمز، سبز و آبی نقاط مختلف تصویر است. این تصویر را می‌توان به تصویر مقیاس خاکستری² تبدیل کرد که در آن تصویر با یک ماتریس دوبعدی نمایش داده می‌شود.

برای نمونه مقادیر از نوع یونیت³ 8 در بازه [0, 255] تغییر می‌کنند. در نهایت با انتخاب آستانه⁴ مناسب و تبدیل تصویر مقیاس خاکستری به تصویر بایناری⁵، هر آرایه مقدار صفر یا یک را به خود اختصاص می‌دهد [16].

در ریخت‌شناسی⁶، یک المان ساختاری⁷ به تصویر اعمال می‌شود به

- 1- True-color (RGB)
- 2- Grayscale
- 3- Unit 8
- 4- Threshold
- 5- Binary
- 6- Morphology
- 7- Structuring Element

شامل تاریخچه حرکت بیش از 40 حباب تیلور باشد. این تصاویر پردازش شده و مشخصات مربوط به هر یک ذخیره می‌شود تا به کمک آن‌ها هیدرودینامیک جریان مورد مطالعه قرار بگیرد.

3-1- نحوه سرعت سنجی و محاسبه طول

با استفاده از تکنیک پردازش تصویر می‌توان سرعت‌های میانگین حباب تیلور را با گام زمانی مربوط به سرعت دوربین به دست‌آورد. دوربین مورد استفاده سرعتی برابر با 240 f/s دارد، لذا گام زمانی بین دو فریم متوالی برابر با $4/16 \times 10^{-3} \text{s}$ خواهد بود که گام زمانی مناسبی جهت محاسبه سرعت حباب است. با توجه به شکل 8 روند محاسبه سرعت حباب تیلور به این صورت است که مبدأ مختصات دوبعدی در گوشه سمت چپ تصویر قرار داده می‌شود، سپس کم‌ترین و بیش‌ترین ارتفاعی که بتوان در آن دماغه حباب را مشاهده کرد، در تصویر علامت‌گذاری می‌شود که در شکل 8 با Z_1 و Z_2 مشخص شده‌اند، بعد فریمی از تصویر که در آن دماغه حباب به ارتفاع Z_1 و Z_2 می‌رسند ذخیره می‌شود (f_1 و f_2)؛ در نهایت از رابطه (7) سرعت میانگین حباب محاسبه می‌شود. در این رابطه، λ ضریبی است که برابر است با نسبت قطر بیرونی واقعی لوله به تعداد پیکسل قطر بیرونی لوله در تصویر و dt فاصله زمانی بین دو فریم متوالی است که در این پژوهش برابر با $4/16 \times 10^{-3} \text{s}$ است.

$$u_T^{\text{exp}} = \frac{\lambda}{dt} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{f_2 - f_1} \right) \quad (7)$$

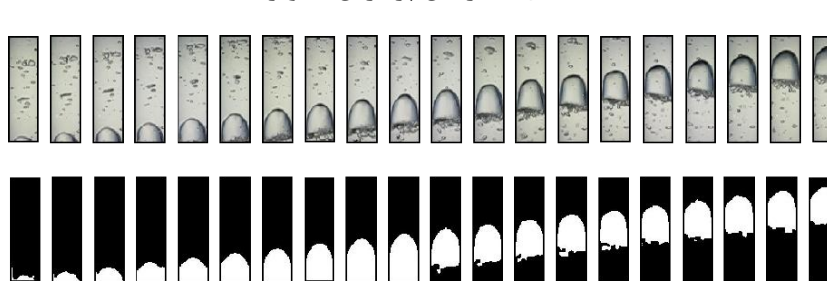
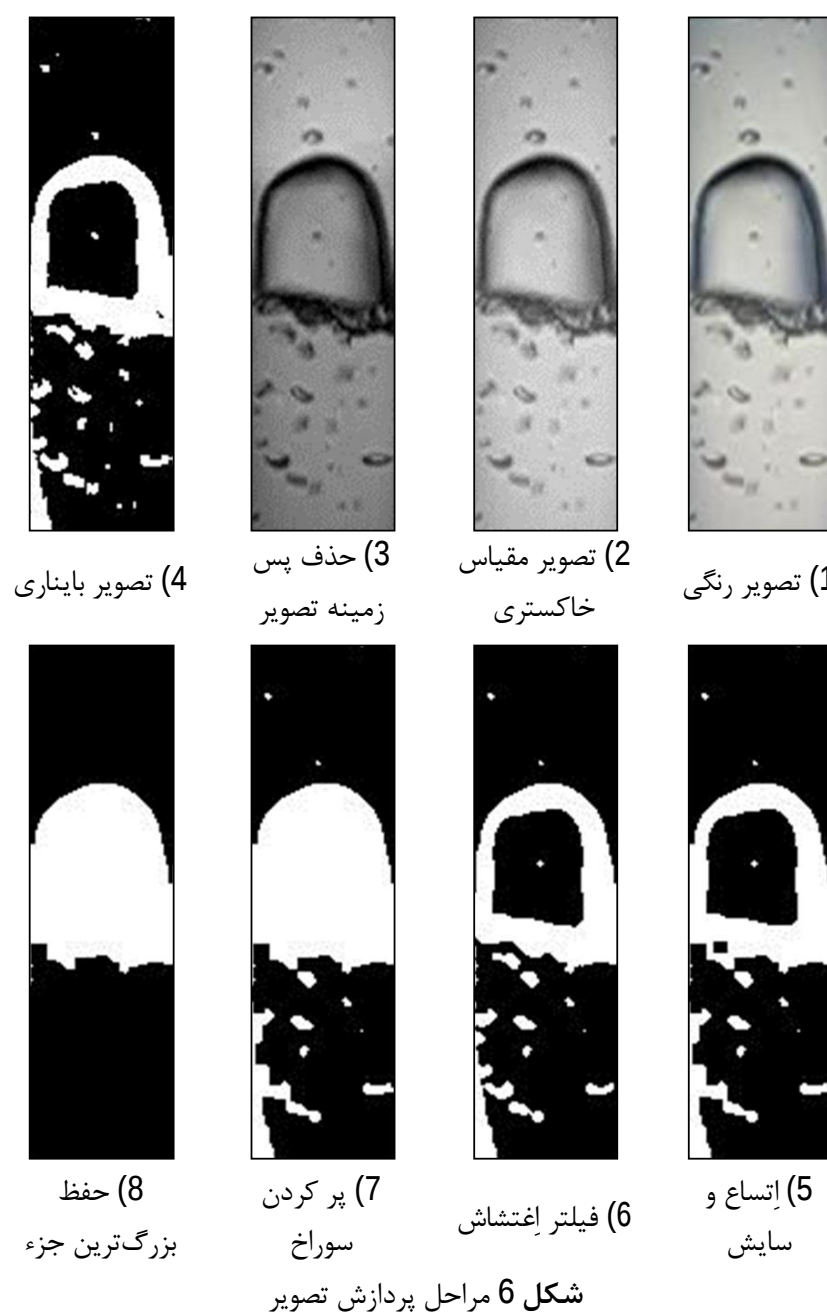
برای حالت‌های بررسی شده در این تحقیق، محدوده تصویربرداری لوله (در حدود سه برابر قطر لوله) طوری انتخاب شده‌است که دماغه و دنباله تمامی حباب‌ها در فریم‌هایی مشخص در چهارچوب مورد نظر قرار گیرند، لذا به کمک پردازش تصویر می‌توان طول حباب را نیز محاسبه کرد. جهت محاسبه طول اسلاگ مایع بین دو حباب متوالی، فرض می‌شود که این اسلاگ مایع با سرعتی برابر با سرعت دماغه حباب تیلور پیشرو حرکت می‌کند، سپس ارتفاعی معین مشخص می‌شود (Z_3 در شکل 8) و فریم‌هایی که در آن دنباله حباب پیشرو و دماغه حباب پسرو از آن عبور می‌کنند ذخیره می‌شود. در نهایت کافی است سرعت حباب تیلور پیشرو در فاصله زمانی بین این دو فریم در هم ضرب شوند تا طول اسلاگ مایع به دست آید.

3-2- مسیر حرکت حباب

اغلب در شبیه‌سازی حرکت حباب‌های بزرگ تیلور، فرض می‌شود که حباب ساختار متقارن خود را حفظ می‌کند و در نتیجه دماغه حباب تقریباً روی محور مرکزی لوله حرکت می‌کند. اما واقعیت رفتار حباب متفاوت از این گفتار است. توربولانس و نیروهای وارده بر حباب منجر به تغییر محلی ساختار حباب می‌شوند و مسیر حرکت آن را در طول لوله تغییر می‌دهند. جهت به دست آوردن مسیر حرکت حباب از داده‌های آزمایشگاهی، دماغه آن به عنوان نقطه‌ای انتخاب شد که حرکت آن تعقیب می‌شود. با تحلیل و بررسی فیلم‌ها و تصاویر به دست آمده در حالت‌های مختلف و برای حباب‌های با طول‌های متفاوت در نهایت نمودار متوسط‌گیری شده

جدول 1 حالت‌های مورد بررسی در الگوی اسلاگ

حالت	j_L (m/s)	j_G (m/s)	Re_{TP}	Re_{US}	رژیم فاز	رژیم
					مایع	دنباله
(الف)	0/026	0/086	1146/3	22952	آرام	آشفته
(ب)	0/056	0/120	2460/7	22792	آشفته	آشفته
(ج)	0/015	0/076	648/7	21237	آرام	آشفته

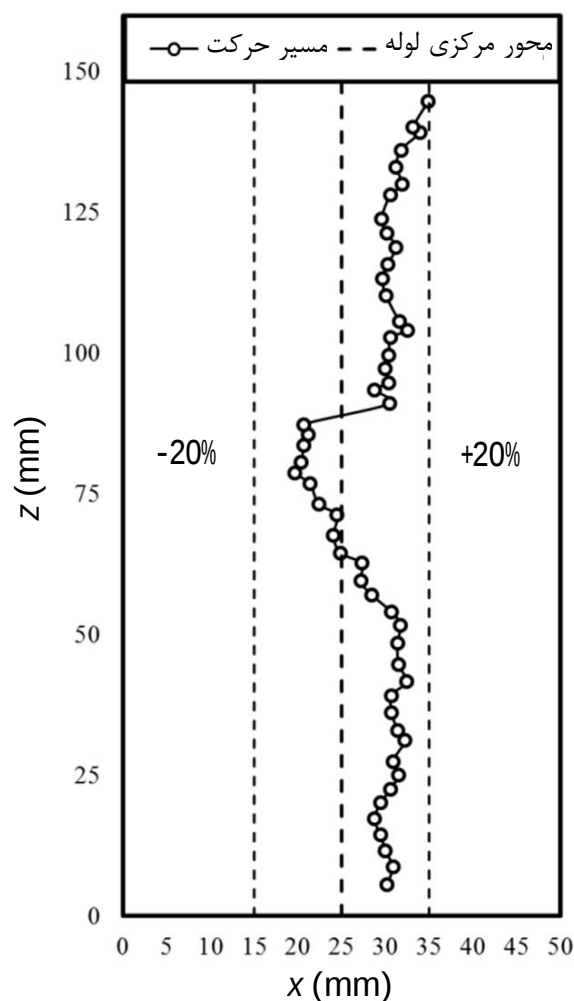


شکل 7 تاریخچه صعود حباب تیلور. سطر اول: تصاویر رنگی، سطر دوم: تصاویر بایناری بعد از پردازش.

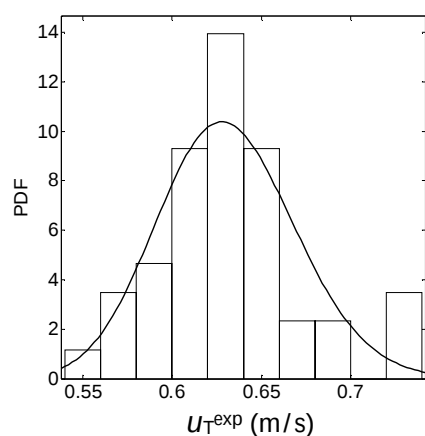
تفسیر کرد که هر یک شامل یک حباب تیلور با یک فیلم مایع در اطراف آن و تکه‌ای از مایع پشت حباب تیلور است. پیش‌روی جریان اسلاگ در طول یک لوله به شدت وابسته به سرعت‌های نسبی بین حباب‌های تیلور متوالی است، لذا مطالعه مشخصه‌های این جریان جهت درک بهتر پدیده‌های موجود در الگوی اسلاگ لازم به نظر می‌رسد. در این پژوهش الگوی اسلاگ در لوله به قطر داخلی 40 mm بررسی و هیدرودینامیک جریان به کمک تکنیک پردازش تصویر مطالعه شده است.

جریان اسلاگ در لوله 40 mm برای سه حالت با سرعت‌های ظاهری هوا و آب متفاوت در نظر گرفته شده‌است. بر اساس روابط اشاره شده در مقدمه، عدد رینولدز مربوط به هر حالت نیز محاسبه و در جدول 1 آمده‌اند. برای تمام حالت‌ها دنباله حباب آشفته است و در حالت‌های (الف) و (ج) اسلاگ مایع بین حباب‌ها آرام و در حالت (ب) این قسمت‌ها آشفته هستند.

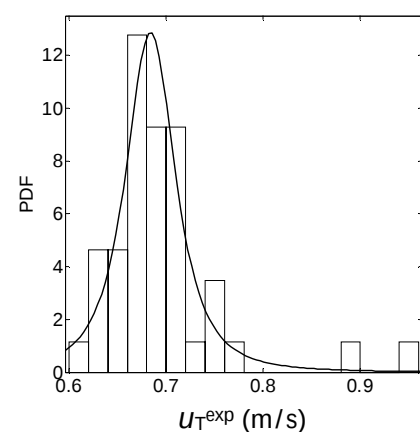
برای هر حالت فیلمی 30 ثانیه‌ای از ساختار جریان با سرعت 240 f/s ضبط شده‌است که معادل با 7200 فریم تصویر است که از بین آن‌ها بیش از 3000 فریم برای مطالعه هر حالت انتخاب شده‌است، به طوری که هر یک



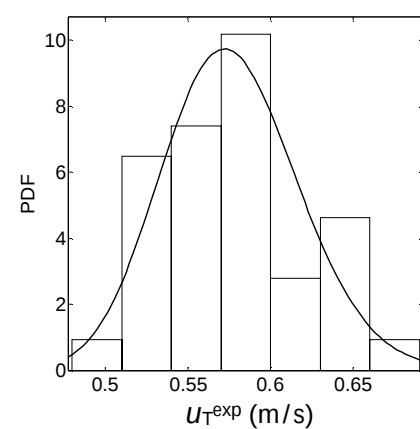
شکل 9 نمودار مسیر حرکت متوسط‌گیری شده دماغه حباب تیلور



حالت (الف)

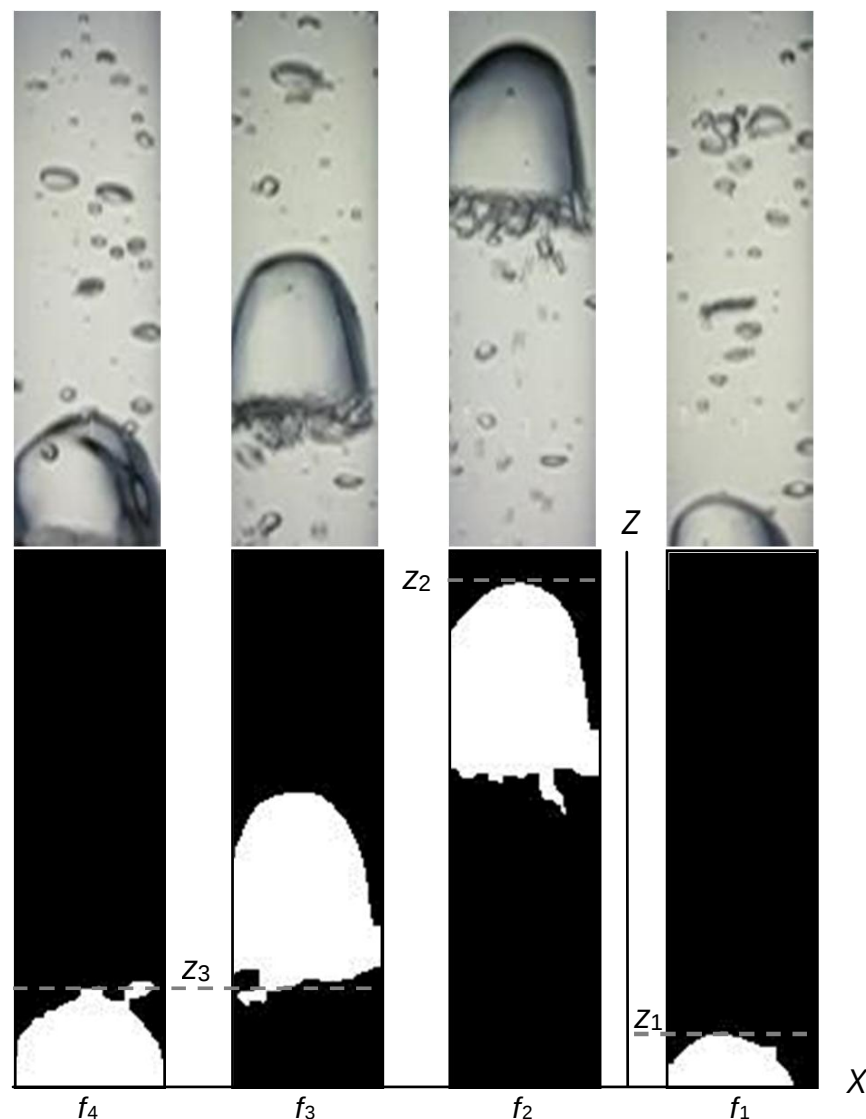


حالت (ب)



حالت (ج)

شکل 10 نمودارهای تابع چگالی احتمال سرعت‌های متوسط حباب‌های تیلور



شکل 8 نحوه محاسبه سرعت و طول حباب تیلور به کمک تکنیک پردازش تصویر

مسیر حرکت عرضی دماغه حباب بر حسب مکان محوری آن به دست آمد که در شکل 9 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حباب اغلب در نزدیکی‌های سمت راست محور مرکزی لوله حرکت می‌کند و فقط در قسمتی از مسیر، محل دماغه حباب کاملاً به سمت مخالف کشیده شده‌است. با بررسی نمودار بدست آمده می‌توان مشاهده کرد که حباب در حالتی که بیش‌ترین انحراف را نسبت به محور مرکزی لوله دارد نیز از محدوده $\pm 20\%$ محور مرکزی لوله تجاوز نمی‌کند.

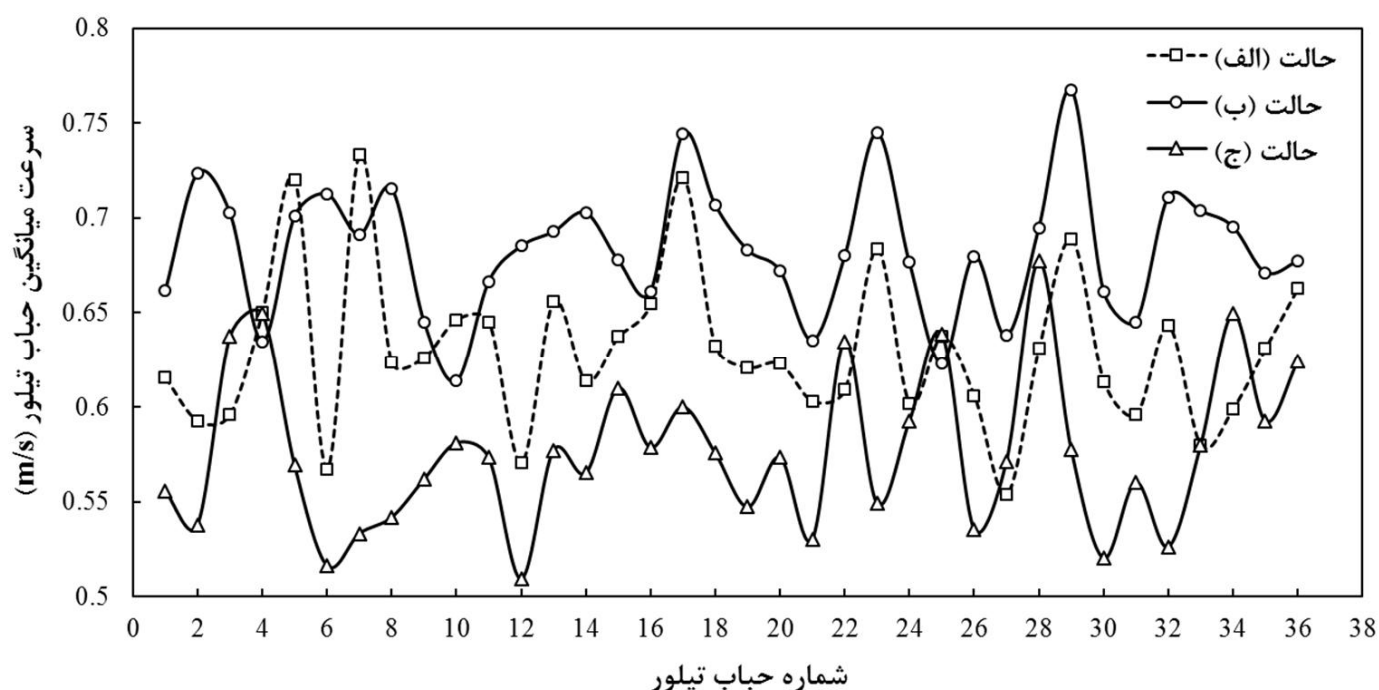
3-3- سرعت میانگین حباب تیلور

با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت قبل، می‌توان سرعت میانگین حباب تیلور را برای هر حالت بدست آورد. جهت شناسایی محتمل‌ترین سرعت میانگین مربوط به هر حالت، نمودارهای تابع چگالی احتمال آن‌ها رسم و در شکل 10 نمایش داده شده‌است. بر روی هر یک از نمودارها با استفاده از تابع لگاریتم- نرمال¹ برازش انجام شده‌است که در نمودارها با منحنی پیوسته مشخص شده‌است.

سرعت‌های میانگین مربوط به 36 حباب تیلور مختلف در سه حالت اشاره شده در شکل 11 آمده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت‌های میانگین حباب‌های تیلور در حالت (ب) بیش‌تر از حالت (الف) و سرعت حالت (الف) بیش‌تر از حالت (ج) است.

بر اساس نمودارهای چگالی احتمال، محتمل‌ترین سرعت متوسط مربوط به هر حالت استخراج شده و در جدول 2 آمده است. مشاهده می‌شود که حباب‌های تیلور در حالت (ب) بیش‌ترین سرعت را نسبت به دو حالت دیگر دارد. در این حالت سرعت ظاهری هوا نیز نسبت به دو حالت دیگر بیش‌تر است.

1- Logarithm Normal Function



شکل 11 تغییرات سرعت میانگین حباب‌های تیلور در سه شرایط جریانی متفاوت

3-4- طول متوسط حباب تیلور و اسلاگ مایع

با روش اشاره شده در قسمت قبلی، طول متوسط بیش از 40 حباب تیلور و اسلاگ مایع در هر حالت به دست آمد که برای استخراج این توزیع، در هر حالت بیش از 3000 فریم تصویر پردازش و مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 12، نمودارهای توزیع طول متوسط حباب و اسلاگ مایعی که بعد از آن حرکت می‌کند ارائه شده‌اند که این طول‌ها با قطر بیرونی لوله بی‌بعد شده‌اند. با تحلیل نمودارهای حاصل، محتمل‌ترین طول بی‌بعد برای هر حالت استخراج شده و در جدول 3 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش طول حباب تیلور، طول اسلاگ مایع بین حباب‌ها نیز بیش‌تر می‌شود. با رسم تغییرات این دو نسبت به هم در یک نمودار (شکل 13) مشاهده می‌شود که تغییرات محتمل‌ترین طول متوسط بی‌بعد حباب بر حسب محتمل‌ترین طول متوسط بی‌بعد اسلاگ مایع در داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده خطی است و با شیبی در حدود 0/54 تغییر می‌کند.

بر اساس نتایج حاصل می‌توان گفت که رفتار حباب تیلور و اسلاگ مایع بین آن‌ها به هم وابسته است و هرگونه تغییر در هر یک بر رفتار هیدرودینامیکی دیگری تأثیرگذار خواهد بود. با دقت در نتایج ارائه شده در جدول 2 و 3 می‌توان دریافت برای حالتی که طول حباب تیلور و اسلاگ مایع بعد از آن کم‌تر از سایر حالت‌ها هستند، سرعت حباب بیش‌تر است و در حالتی که حباب و اسلاگ مایع دارای بیش‌ترین طول هستند، سرعت صعود حباب به مراتب کم‌تر است. لذا می‌توان گفت سرعت متوسط حباب و طول آن (شکل 14) و هم‌چنین طول اسلاگ مایع با هم نسبت عکس دارند.

حباب‌های تیلور تقریباً تمام سطح مقطع لوله‌ای را که در آن در حال حرکت هستند، اشغال می‌کنند، لذا با حرکت نزدیک دیواره نیروی برشی ناشی از زیر لایه لزج بر بدنه آن‌ها اعمال می‌شود و نیرویی در خلاف جهت حرکت حباب ایجاد می‌کند، حال اگر طول حباب بیش‌تر شود، نیروی برشی قابل توجهی به بدنه حباب وارد می‌شود که نتیجه آن کند شدن حرکت حباب است.

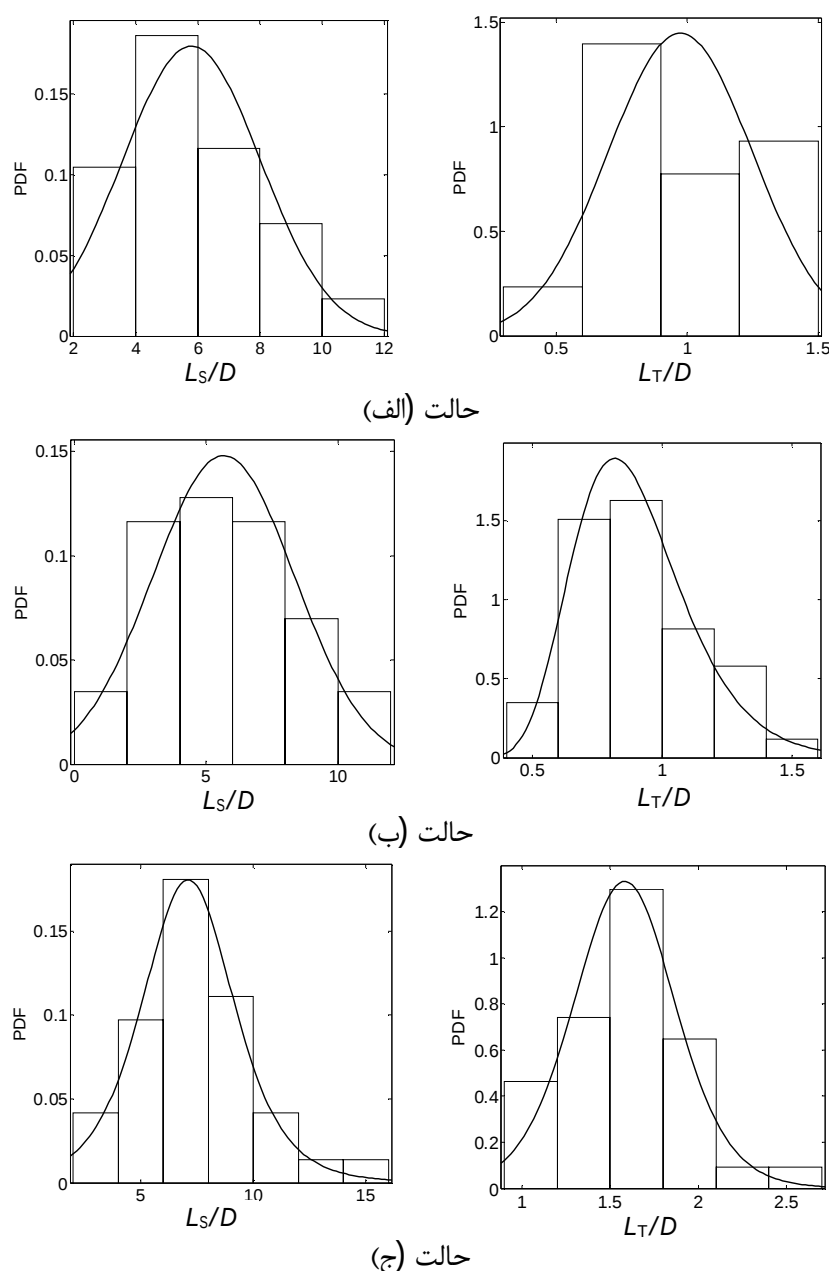
جدول 2 محتمل‌ترین سرعت متوسط حباب تیلور در هر حالت

حالت	محتمل‌ترین سرعت (m/s)	درصد احتمال %
(الف)	0/63	12/35
(ب)	0/69	12/44
(ج)	0/58	9/56

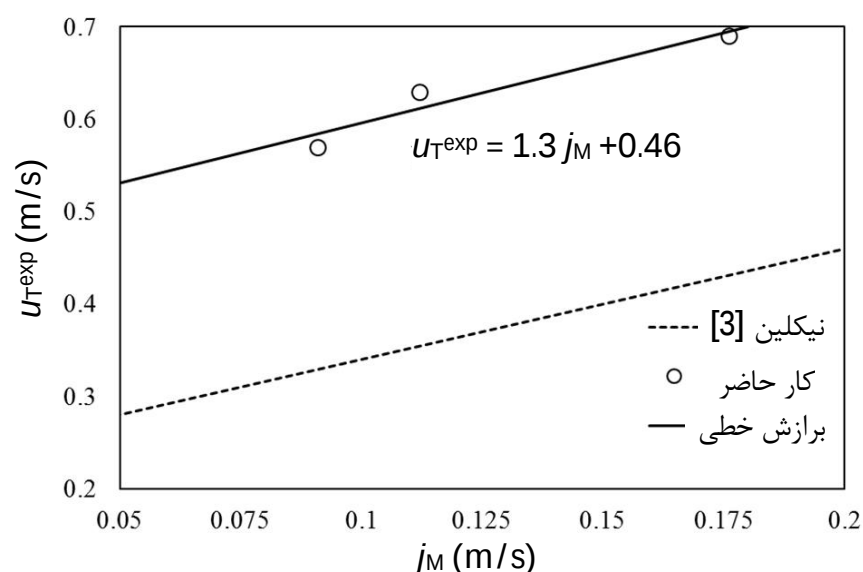
معروف‌ترین رابطه‌ای که تغییرات سرعت متوسط حباب تیلور را بر حسب سرعت ظاهری کل فازها بیان می‌کند توسط نیکلین [3] ارائه شده است. جهت بررسی نتایج حاصل از آزمایش با رابطه نیکلین، داده‌ها بر روی نموداری که در شکل 15 نمایش داده شده است، رسم شده‌اند.

مشاهده می‌شود که تفاوت زیادی بین نتایج حاصل وجود دارد. این اختلاف در کار میور و همکارانش [11] برای لوله به قطر داخلی 52 mm نیز گزارش شده است.

مشاهده می‌شود که تغییرات به صورت خطی است، لذا با برازش خطی



شکل 12 نمودار تابع چگالی طول متوسط بی‌بعد حباب تیلور (ستون سمت راست) و اسلاگ مایع (ستون سمت چپ) برای حالت‌های مختلف.



شکل 15 نمودار تغییرات سرعت متوسط حباب تیلور بر حسب سرعت ظاهری کل فازها

که در آن U_z و U_t به ترتیب عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری طول و زمان هستند. همچنین $\partial U_T / \partial z = 1 / \Delta t$ و $\partial U_T / \partial t = -\Delta z / \Delta t^2$ هستند. عدم قطعیت در اندازه‌گیری زمان برابر با نصف زمان شاتر دوربین و در اندازه‌گیری طول برابر با طول یک پیکسل از تصویر است. دوربین مورد استفاده زمان شاتر برابر با $3/125 \times 10^{-4} \text{ s}$ دارد و طول یک پیکسل از تصویر برای لوله 40 mm برابر با 0/62 mm است، لذا $U_t = 1/563 \times 10^{-4}$ و $U_z = 6/2 \times 10^{-4}$ هستند. با در دست داشتن این مقادیر می‌توان عدم قطعیت سرعت متوسط محاسبه شده را برای هر سه حالت بررسی شده به دست آورد. میانگین عدم قطعیت مربوط به هر حالت در جدول 4 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همگی مقادیر عدم قطعیت در کل کمتر از 0/006 هستند که نشان دهنده دقت بالای روش به کار رفته جهت اندازه‌گیری سرعت حباب تیلور است.

4- نتیجه‌گیری

- با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در پژوهش حاضر، نتایج را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:
- با به دست آوردن مسیر حرکت دماغه حباب‌های تیلور در لوله 40 mm در سه شرایط جریان مختلف و متوسط‌گیری نتایج، مشاهده شد که دماغه آن در $\pm 20\%$ اطراف محور مرکزی لوله حرکت کرده و از این محدوده تجاوز نمی‌کند.
- سرعت‌های متوسط به دست آمده حباب تیلور در شرایط مختلف نشان می‌دهد که هر چه طول حباب تیلور کوچک‌تر باشد، سرعت صعود آن نیز بیش‌تر است.
- طول حباب تیلور رابطه مستقیمی با طول اسلاگ مایع پشت آن دارد و با افزایش طول حباب تیلور، اسلاگ مایع پشت سر آن نیز طول‌تر می‌شود.

جدول 4 مقادیر عدم قطعیت میانگین در اندازه‌گیری سرعت متوسط حباب تیلور

حالت	عدم قطعیت میانگین (m/s)
(الف)	0/00342
(ب)	0/00401
(ج)	0/00583

می‌توان رابطه‌ای همانند رابطه نیکلین بدست آورد. شیب حاصل از خط برازش شده برابر با 1/3 است که نزدیک به مقدار 1/2 برای رژیم آشفته در رابطه نیکلین است. مقدار ضریب ثابت به دست آمده از نتایج حاضر تقریباً دو برابر مقدار مشابه در رابطه نیکلین است، لذا ممکن است با اعمال ضریبی که اثر قطر را بهتر در رابطه نشان دهد بتوان رابطه نیکلین را به قطرهای بزرگ‌تری که الگوی اسلاگ در آن‌ها قابل مشاهده است نیز تعمیم داد.

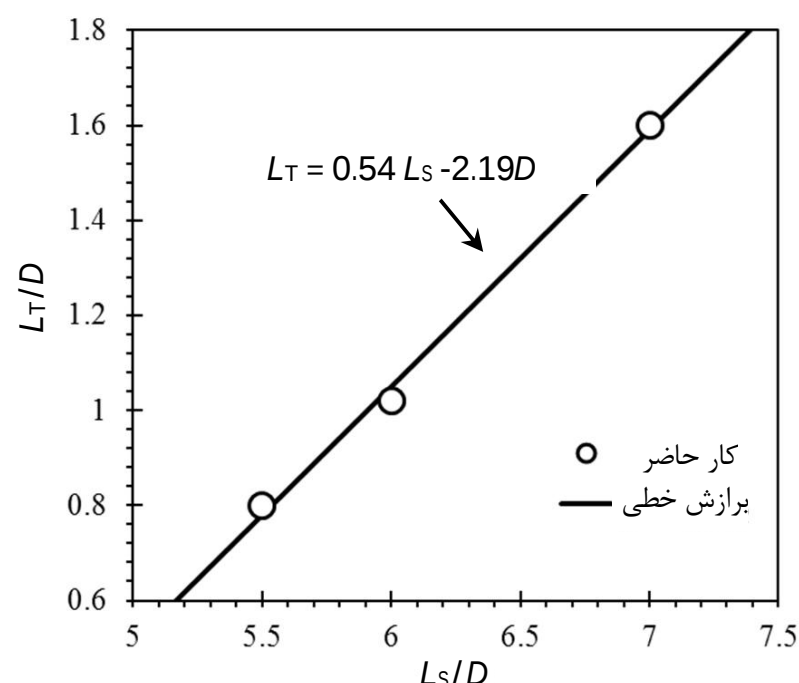
3-5- تحلیل خطای اندازه‌گیری

در انتها نیاز است که عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری سرعت متوسط حباب تیلور نیز بررسی شود تا از میزان دقت نتایج به دست آمده آگاه شد. سرعت متوسط حباب تابعی از مکان و زمان است، لذا عدم قطعیت مربوط به محاسبه سرعت از رابطه (8) به دست می‌آید.

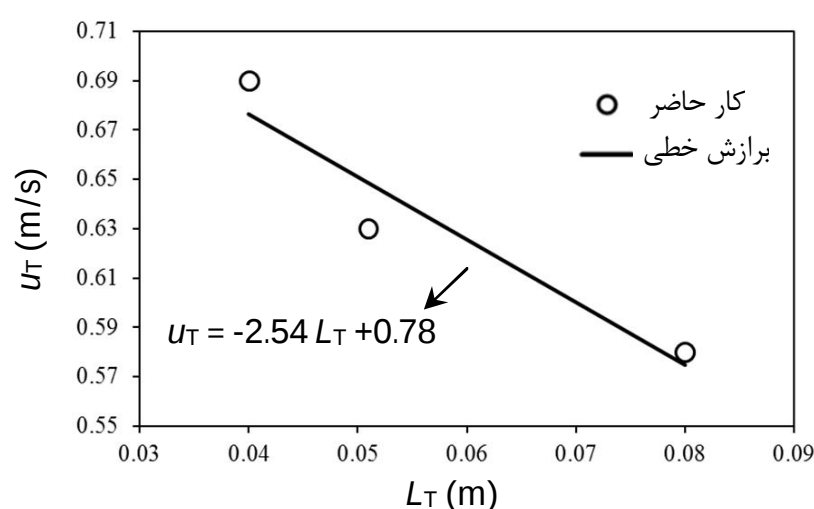
$$U_{u_T}^2 = \left(\frac{\partial u_T}{\partial z} \right)^2 U_z^2 + \left(\frac{\partial u_T}{\partial t} \right)^2 U_t^2 \quad (8)$$

جدول 3 محتمل‌ترین طول بی‌بعد حباب تیلور و اسلاگ مایع در سه شرایط جریانی مختلف

حالت	محتمل‌ترین طول بی‌بعد	درصد احتمال	محتمل‌ترین طول بی‌بعد	درصد احتمال	اسلاگ مایع
(الف)	1/02	1/43	6/0	0/18	درصد احتمال %
(ب)	0/80	1/89	5/5	0/15	
(ج)	1/60	1/33	7/0	0/18	



شکل 13 نمودار تغییرات محتمل‌ترین طول متوسط حباب تیلور بر حسب محتمل‌ترین طول متوسط اسلاگ مایع



شکل 14 تغییرات محتمل‌ترین سرعت بر اساس محتمل‌ترین طول حباب تیلور

6- مراجع

- [1] G.-d. Xia, Z.-z. Cui, Q. Liu, F.-d. Zhou, M.-s. Hu, A model for liquid slug length distribution in vertical gas-liquid slug flow, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 21, No. 4, pp. 491-498, 2009.
- [2] T. S. Mayor, V. Ferreira, A. M. F. R. Pinto, J. B. L. M. Campos, Hydrodynamics of gas-liquid slug flow along vertical pipes in turbulent regime—An experimental study, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 4, pp. 1039-1053, 2008.
- [3] D.J. Nicklin, J.O. Wilkes, J.F. Davidson, Two-phase flow in vertical tubes, *Chemical Engineering*, No. 40, pp. 61–68, 1962.
- [4] W.H. McAdams, W.K. Woods, L.C. Heroman, Vaporization inside horizontal tubes-III, benzene-oil mixtures, *Trans. ASME*, No. 64, pp. 193, 1942.
- [5] W. Chang, G. Pu-zhen, T. Si-chao, X. Chao, Effect of aspect ratio on the laminar-to-turbulent transition in rectangular channel, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 46, No. 0, pp. 90-96, 2012.
- [6] A. M. F. R. Pinto, M. N. Coelho Pinheiro, J. B. L. M. Campos, Coalescence of two gas slugs rising in a co-current flowing liquid in vertical tubes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 16, pp. 2973-2983, 1998.
- [7] D. Barnea, Y. Taitel, A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 5, pp. 829-838, 1993.
- [8] R. van Hout, D. Barnea, L. Shemer, Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 9, pp. 1579-1602, 2001.
- [9] R. van Hout, D. Barnea, L. Shemer, Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 8, pp. 1333-1350, 2002.
- [10] L. Shemer, Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, No. 3, pp. 334-344, 2003.
- [11] T. S. Mayor, A. M. F. R. Pinto, J. B. L. M. Campos, Vertical slug flow in laminar regime in the liquid and turbulent regime in the bubble wake-Comparison with fully turbulent and fully laminar regimes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, No. 14, pp. 3614-3631, 2008.
- [12] Y. Wang, C. Yan, X. Cao, L. Sun, C. Yan, Q. Tian, Hydrodynamics of slug flow in a vertical narrow rectangular channel under laminar flow condition, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 73, No. 0, pp. 465-477, 2014.
- [13] Y. Wang, C. Yan, L. Sun, C. Yan, Characteristics of slug flow in a vertical narrow rectangular channel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 53, No. 0, pp. 1-16, 2014.
- [14] 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.
- [15] *Image Processing Toolbox*, Mathworks, Inc., 2013, <http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/index.htm>.
- [16] Otsu, N., "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.
- [17] C.G. Rafael, E.W. Richard, L.E. Steven, *Digital Image Processing Using Matlab*, GatesMark Publishing, 2009.

- رابطه معروف نیکلین [3] توانایی پیش‌بینی درست سرعت متوسط حباب تیلور را در قطر لوله داخلی 40 mm ندارد، لذا رابطه‌ای بر اساس نتایج به دست آمده بین سرعت متوسط حباب تیلور و سرعت‌های ظاهری فازها برای این قطر لوله به دست آمد.

5- فهرست علائم

C	ضریب نیکلین
D	قطر (m)
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
G	سرعت جرمی (ms^{-1})
j	سرعت ظاهری (ms^{-1})
L	طول (m)
Re	عدد رینولدز
u	سرعت حباب تیلور (ms^{-1})
U	عدم قطعیت
علائم یونانی	
Δt	گام زمانی (s)
μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
بالانویس‌ها	
exp	آزمایشگاهی
زیرنویس‌ها	
G	فاز گاز
L	فاز مایع
M	مربوط به مجموع سرعت ظاهری دو فاز
s	نسبی / مربوط به اسلاگ مایع
T	مربوط به حباب تیلور
TP	مربوط به دوفازی