

مطالعه عددی و تجربی رفتار جریان دوفاز در لوله عمودی پایین رو

فرهاد رئیس زاده^۱، ابراهیم حاجی دولو^{۱*}، مرتضی بهبهانی نژاد^۱، پدram حنفی زاده^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ آذر ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۰ فروردین ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

الگوی جریان
جریان دوفازی پایین رو
دوسیالی
فلوئنت

چکیده: در مقاله حاضر رفتار و الگوهای جریان دوفازی پائین رو آب - هوا در لوله عمودی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی آزمایشگاهی یک دستگاه آزمایش با قابلیت مشاهده و عکسبرداری ساخته و راهاندازی شده است. سیالات مورد استفاده آب و هوا بوده و نتایج جریان برای ۳۹۱ حالت انتخابی با تغییر سرعت ظاهری آب و هوا بدست آمده و پس از پردازش عکسها و بررسی الگوها، نقشه جریان تهیه و ارائه شده است. با استفاده از نمودار الگوی جریان (نقشه جریان) حاصل از نتایج آزمایشگاهی، شرایط وقوع الگوهای مختلف جریان دوفازی شناسایی و سپس از این شرایط در بدست آوردن شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی عددی الگوهای جریان دوفازی پائین رو از روش چندسیالی در دیدگاه اویلر - اویلر در نرم افزار آنسیس-فلوئنت استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی برای تمام الگوهای مورد انتظار از نقشه جریان تجربی را نشان می‌دهد و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای پیش‌بینی الگوهای جریان دوفاز رو به پایین می‌توان از روش‌های عددی استفاده نمود. در انتها نیز نقشه جریان با استفاده از حل عددی تهیه و با نقشه جریان تجربی مقایسه و تطابق نسبتاً خوبی مشاهده شد. مقادیر تجربی و عددی سرعت‌های ظاهری آب و هوا در مرزهای انتقال نیز مقایسه شد. بیشترین مقدار خطا ۲۰/۶ درصد و کمترین مقدار خطا ۱۱/۴ درصد برای پیش‌بینی مرزهای انتقال جریان بدست آمد.

۱- مقدمه

جریان‌های دوفازی گاز-مایع کاربردهای بسیاری در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، فناوری هسته‌ای و غیره دارند. از عمده‌ترین کاربردهای صنعتی جریان‌های دوفاز جریان در لوله‌ها می‌باشد که در شیب‌های مختلف از حالت افقی تا عمودی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از مهمترین مشکلات در تحلیل جریان دوفاز در لوله‌ها، تعیین الگوی دقیق جریان و یا توزیع فاز مایع و گاز درون لوله مورد نظر است. از آنجایی که بسیاری از پارامترهای مهم طراحی و مهندسی مانند افت فشار، انتقال جرم، انتقال حرارت و غیره رابطه نزدیکی با توزیع فازها دارند، لذا تعیین این توزیع یا به عبارت بهتر تعیین الگوهای جریان دوفازی یکی از ضروری‌ترین الزامات تحلیل جریان دوفاز می‌باشد [۱]. روش رایج برای این کار، تهیه نقشه‌های جریان بوده که براساس آزمایش‌های تجربی در شرایط عملکردی مشابه بدست می‌آید. در این آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های مختلف (مانند مشاهده و عکسبرداری سرعت بالا، ترکیب حسگر

با شبکه عصبی، روش اولتراسونیک و غیره). الگوهای جریان در لوله‌ها برای شرایط مختلف شناسایی می‌شوند. در واقع با این روش‌ها ابتدا الگوهای جریان در شرایط مختلف گاز و مایع تعیین و روی نمودارهایی مرتب می‌شود و سپس مرزهای بین الگوها رسم شده که انتقال بین الگوها را نشان می‌دهد. شکل ۱ الگوهای مختلف جریان دوفازی پائین رو را نشان می‌دهد [۲] و شکل ۲ نقشه جریان مربوط به یکی از این تحقیقات را نشان می‌دهد [۳]. خطوط مشکی نشان‌دهنده مرزهای انتقال بین الگوهای مختلف جریان می‌باشند. توجه به این نکته مهم است که در جریان‌های چندفازی تعمیم نتایج آزمایشگاهی که در شرایط خاص تهیه شده به شرایط واقعی همیشه از دقت لازم و کافی برخوردار نبوده و این یکی از مشکلات تحقیق در حوزه جریان چندفاز می‌باشد.

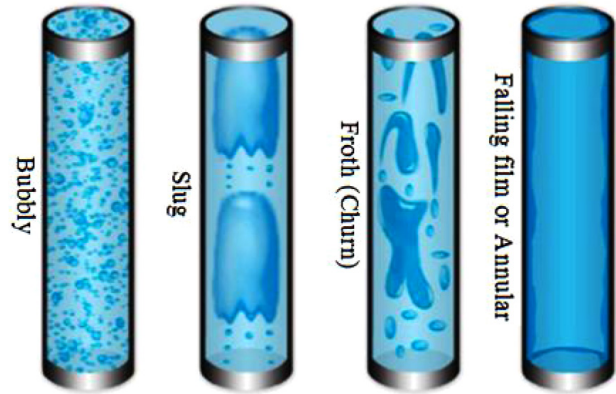
به عنوان مثال همانطور که به طور تجربی نشان داده شده، رژیم‌های جریان دوفاز در لوله‌های عمودی بالارو برای قطرهای کمتر از ۵۱ میلی‌متر با قطرهای بیشتر از ۵۱ میلی‌متر کمی تفاوت دارد [۴]؛ بنابراین نتایجی را که در آزمایشگاه برای قطرهای کوچک بدست می‌آید، نمی‌توان برای قطرهای بزرگ تعمیم داد، پس همیشه نمی‌توان نتایج تجربی را برای جریان دوفاز با

لوله‌های عمودی رو به پایین با قطر ۲۵ و ۵۱ میلی‌متر و طول ۱۰ متر، الگوهای جریان را به صورت مشاهده مستقیم ارائه دادند. کندوش و الختاب [۵] با استفاده از عکس‌برداری سرعت بالا در جریان دوفازی عمودی پایین‌رو الگوهای جریان حبابی^۱، لخته‌ای^۲ و حلقوی^۳ را مشاهده کردند. آنها مرزهای انتقال بین این سه الگو را براساس مقادیر کسر حجمی تخمین زدند. ایشی و همکاران [۶] الگوهای جریان عمودی دوفازی پایین‌رو را با کوپل کردن چند حسگر با شبکه عصبی برای دو لوله به قطرهای ۲۵/۴ و ۵۰/۸ میلی‌متر بدست آوردند. لی و همکاران [۷] نیز با استفاده از شبکه عصبی الگوهای جریان دوفازی عمودی بالا‌رو و پایین‌رو را بدست آوردند. آنها در مورد جریان بالا‌رو تطابق خوبی را با تحقیقات گذشته گزارش کردند ولی در مورد جریان پایین‌رو، غیر از الگوی لخته‌ای، در بقیه الگوها به دلیل وابستگی به قطر لوله تطابق کمتری مشاهده کردند.

بهاگوات [۸] با استفاده از روش مشاهده مستقیم و عکس‌برداری الگوهای جریان دوفازی عمودی پایین‌رو را بدست آورد و وجود پنج رژیم حبابی، لخته‌ای، کف‌آلود^۴، لایه‌ای پایین‌رو^۵ و حلقوی را گزارش کرد. المبروک [۳] نیز با استفاده از مشاهده و عکس‌برداری الگوهای جریان عمودی بالا‌رو، پایین‌رو و همچنین تأثیر وجود یک خم ۱۸۰° را روی الگوهای جریان بررسی کرد. ژولیا و همکاران [۹] با استفاده از حسگر و شبکه عصبی الگوهای جریان دوفازی عمودی پایین‌رو در یک لوله به قطر ۵۰/۸ میلی‌متر را بررسی کردند. همچنین مقایسه‌ای بین حالت بالا‌رو و پایین‌رو ارائه دادند و در حالت جریان حبابی و کف‌آلود شباهت بیشتری با موارد مشابه جریان بالا‌رو مشاهده کردند. رئیس زاده و همکاران [۱۰] نیز با استفاده از روش عکس‌برداری تأثیر دوران لوله عمودی را بر الگوهای مختلف جریان دوفازی عمودی پایین‌رو بدست آوردند و چهار الگوی لایه‌ای پایین‌رو، حبابی، لخته‌ای و کف‌آلود را گزارش کردند و نشان دادند که دوران لوله می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر نقشه جریان دوفاز داشته باشد.

مریمی و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی تأثیر حضور حباب‌ها همراه یک جریان محوری روی پسای اصطکاکی در جریان دوفازی آب-هوا در فضای حلقوی پرداختند. آنها با استفاده از یک فرآیند پردازش تصاویر قطر حباب‌ها را اندازه گرفتند و نشان دادند که جریان محوری اثر مثبت حباب‌ها را روی کاهش پسا، بهبود می‌بخشد.

با مطالعه تحقیقات گذشته می‌توان گفت تاکنون به دلیل ماهیت پیچیده جریان‌های دوفاز و مشکلات استفاده از روش‌های عددی برای مدل‌سازی این جریان‌ها، بیشتر از روش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شده است، ولی به تدریج و با پیشرفت توانمندی‌های محاسباتی رایانه‌ها، روش عددی نیز مورد توجه قرار گرفته تا در مطالعه جریان‌های دوفازی از مزایای این روش

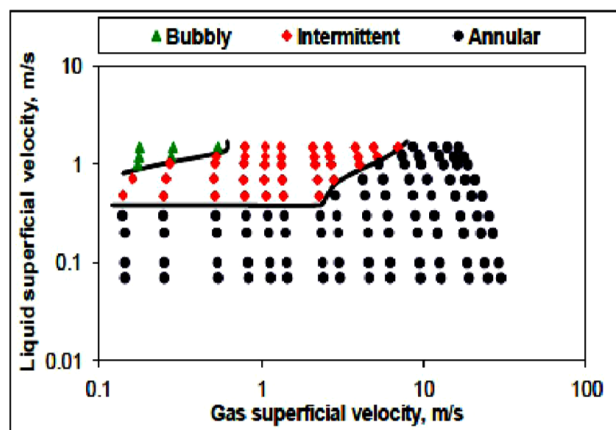


شکل ۱: الگوهای مختلف جریان دوفازی عمودی پایین‌رو [۲]
Fig 1. Different flow patterns of downward two phase flow [2]

اطمینان به شرایط واقعی تعمیم داد. به همین جهت، ضرورت تحلیل جریان دوفاز در شرایط عملکردی واقعی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است که برای این کار استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند روش مناسب و اقتصادی‌تری باشد.

۲- بیان مسأله

با توجه به افزایش کاربردهای صنعتی جریان دوفاز رو به پایین در لوله‌ها بخصوص در صنعت حفاری چاه‌های نفت و گاز، اهمیت بررسی و تحقیقات این شکل از جریان دوفاز رو به افزایش است. در روش تجربی، الگوهای جریان توسط روش‌های مختلفی مانند مشاهده مستقیم و عکس‌برداری، ترکیب حسگر با شبکه عصبی، روش‌های صوتی و غیره بدست می‌آید که همگی مستلزم صرف وقت و تجهیزات آزمایشگاهی می‌باشد. بارنتا و همکاران [۴] با انجام آزمایش‌هایی روی جریان دوفازی در



شکل ۲: نقشه جریان دوفازی پایین‌رو آب - هوا در تحقیق المبروک [۳]

Fig 2. Flow map of downward two phase flow in Almabrok [3]

¹Bubbly

²Slug

³Annular

⁴Froth

⁵Falling film

نیز استفاده شود.

افقی و عمودی بالارو تحقیق عددی در مورد تشخیص الگوهای جریان صورت گرفته است. دی شپر و همکاران [۱۲] با استفاده از روش حجم سیال به شبیه‌سازی الگوهای مختلف جریان دوفازی افقی با نرم افزار فلونت^۵ پرداختند و تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی مشاهده کردند. در مورد حالت عمودی بالارو نیز داکشینامورتی و همکاران [۲۰] از شرکت انسیس^۶ با استفاده از روش ترکیبی دوسیالی و حجم سیال^۷ به بررسی عددی الگوهای این نوع جریان پرداخته و توانستند الگوهای جریان را پیش‌بینی نمایند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، علیرغم تحقیقات عددی انجام شده در زمینه جریان دوفاز، در زمینه پیش‌بینی تمام الگوهای جریان دوفاز پایین‌رو و تهیه نقشه جریان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تحقیقی انجام نشده است. در این تحقیق برای اولین بار شبیه‌سازی عددی جریان عمودی دوفازی پایین‌رو در لوله برای تمام رژیم‌های جریان انجام شده و نقشه جریان نیز به صورت عددی استخراج شده است. برای این کار الگوهای جریان عمودی دوفازی پایین‌رو و نقشه جریان، در ابتدا به صورت تجربی ایجاد شده و سپس با انتخاب شرایط وقوع هر یک از الگوهای جریان، شبیه‌سازی عددی آن با استفاده از نرم افزار انسیس-فلونت انجام شده است. در انتها نیز نقشه جریان با استفاده از حل عددی تهیه و رسم شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج حل عددی با نتایج تجربی همین تحقیق مقایسه شده است.

۳- بررسی آزمایشگاهی

۳-۱- دستگاه آزمایش

برای مطالعه رفتار جریان دوفازی پایین‌رو در لوله عمودی یک دستگاه آزمایش شامل لوله به طول ۴ متر و قطر ۵۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد و تجهیزات لازم مانند پمپ، کمپرسور، مخلوط‌کننده دوفاز^۸، دبی‌سنج‌های آب و هوا و شیرهای ارتباطی نصب گردید (شکل ۳).

هوا و آب تصفیه شده به عنوان سیالات عامل فاز گاز و مایع در تمام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در آزمایش‌های مربوط به جریان دوفاز از یک پمپ برای به جریان انداختن آب استفاده می‌شود. پمپ از نوع سانتریفیوژ با توان ۴ کیلووات انتخاب شده است. برای جلوگیری از وارد شدن ارتعاشات به کل سامانه در هنگام عملکرد پمپ، از دو لرزه‌گیر در ورودی و خروجی پمپ استفاده می‌شود. به منظور جلوگیری از ورود ذرات به داخل سامانه قبل از پمپ در خط آب از یک صاف‌کننده جریان و یک فیلتر در خط هوا استفاده می‌شود. هوای فشرده از طریق کمپرسور به صورت پیوسته تأمین شده و وارد قسمت مخلوط‌کننده می‌گردد و سپس مخلوط هوا و آب وارد لوله اصلی می‌شود. کمپرسور از نوع پیستونی با فشار حداکثر ۱۰۰۰ کیلوپاسکال بوده و دارای یک مخزن ۱۵۰ لیتر برای ذخیره هوا می‌باشد. دبی‌سنج‌های آب و هوا روماتر بوده که برای اندازه‌گیری مقادیر به صورت دقیقتر از دو روماتر

یکی از ضعف‌های عمده روش تجربی آن است که نمودارهای نقشه جریان بدست آمده از این روش معمولاً برای محدوده خاصی از پارامترهای جریان معتبر بوده و تعمیم آنها برای سایر شرایط همیشه قابل اطمینان نبوده و احتمال خطا در پیش‌بینی نتایج را بالا می‌برد، در حالی که در روش عددی می‌توان این نقص را برطرف ساخت و برای هر شرایط واقعی تحلیل جریان را به سرعت و بسهولت انجام داد [۱۲ و ۷].

تحقیقات عددی متنوع و مختلفی در زمینه جریان دوفاز پایین‌رو انجام شده است که هر یک ویژگی‌های خاص خود را داشته است. بعضی از تحقیقات بیشتر در مورد یک الگوی خاص بوده [۱۷-۱۳] و در بعضی چند الگو برای هدفی مشخص، مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱-۱۸]. ولی تاکنون برای پیش‌بینی تمام الگوهای جریان دوفازی پایین‌رو و تهیه نقشه جریان با استفاده از نتایج عددی تحقیقی انجام نشده است.

هیبکی و همکاران [۱۳] ساختار جریان حبابی پایین‌رو را بررسی کردند. آنها با استفاده از داده‌های تجربی موجود یک مدل شار رانشی^۱ یک بعدی برای این نوع جریان ارائه دادند. انصاری و همکاران [۱۴] الگوی جریان لخته‌ای را در اتصال T شکل به روش حجم سیال^۲ بررسی کردند و نشان دادند که وجود این نوع اتصال، الگوی لخته‌ای را کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از تقاطع، دامنه نوسانات فشار و سرعت را کاهش می‌دهد.

کاشینسکی و همکاران [۱۵] جریان حبابی رو به پایین در یک لوله به قطر ۲۰ میلی‌متر را به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. رحیمی و کریمی [۱۶] یک مدل توازن پراکندگی حباب‌ها^۳ را با دینامیک سیالات محاسباتی^۴ ترکیب کردند و تأثیر اغتشاشات بر کسر حجمی گاز و توزیع سرعت مایع در جریان حبابی دوفازی آب-هوا پایین‌رو در یک لوله عمودی به قطر ۵۷/۱۵ میلی‌متر و طول ۳/۰۶ متر را بررسی کردند. حدیدی و جلالی [۱۷] اثر میدان مغناطیسی بر جریان حبابی را مطالعه نمودند و با مقایسه دینامیک حباب‌ها دریافتند که حباب‌ها در راستای میدان اعمال شده، کشیده می‌شوند. همچنین میدان مغناطیسی زمان الحاق حباب‌ها را کاهش می‌دهد و در مجموع می‌تواند در کنترل جریان حبابی مورد استفاده قرار گیرد.

حسن [۱۸] جریان حبابی و لخته‌ای پایین‌رو در لوله‌های قائم و مایل را بررسی کرد. او با استفاده از دیدگاه شار رانشی مدل یک بعدی را برای تعیین سرعت لغزشی بین فازها ارائه داد. گودا و همکاران [۱۹] با استفاده از مدل شار رانشی و معادله برای جریان دوفازی بالارو، مقادیر کسر حجمی در الگوهای جریان عمودی دوفازی پایین‌رو را بررسی کردند و علت اختلاف با داده‌های آزمایشگاهی را سیالات مورد استفاده، قطر کانال (لوله)، فشار سامانه و سرعت فازها بیان کردند.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که تنها در حالت جریان‌های

^۵Fluent

^۶Ansys

^۷Multifluid VOF model

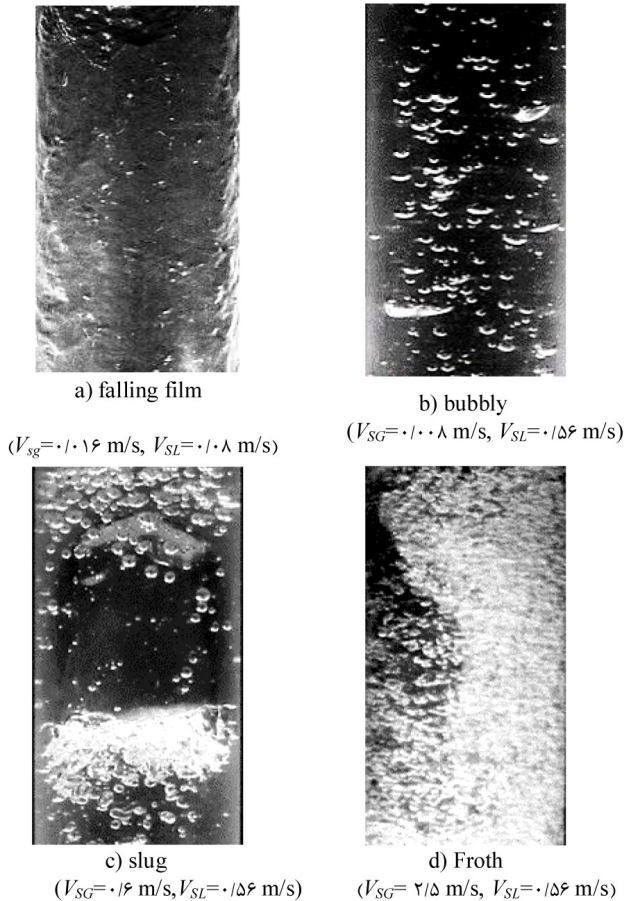
^۸Mixer

^۱Drift flux

^۲Volume of Fluid (VOF)

^۳Population Balance Modelling (PBM)

^۴Computational Fluid Dynamics (CFD)



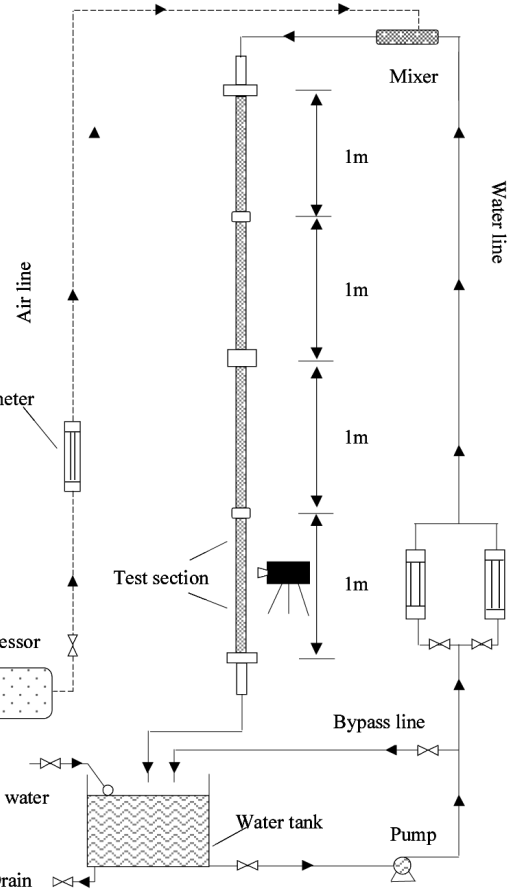
شکل ۴: تصاویر پردازش شده رژیم های مختلف جریان در تحقیق حاضر

Fig 4. Processed photos of different flow patterns for this study

حالت را شامل می شود. با استفاده از عکس برداری و پردازش عکس ها در تمام حالت های مورد نظر (۳۹۱ حالت)، الگوهای مختلف جریان بدست آمد. در هنگام انجام آزمایش ها زمان کافی (تقریباً ۱۰ دقیقه) در نظر گرفته می شد تا اثرات هیستریزس رژیم قبلی از بین برود و وقتی تغییری در رژیم جدید دیده نمی شد، عکس ها گرفته می شد. اثرات هیستریزس، اثرات باقی مانده از رژیم قبلی است که هنوز بر روی رژیم فعلی تأثیر می گذارد. دوربین های مورد استفاده CASIO EX-F1 بوده که دارای ۱۶۰ fps در عکاسی و ۱۲۰۰ fps در فیلم برداری است و دوربین CANON EOS 5D با ۲۴۰ fps در عکاسی و ۳۰ fps در فیلم برداری است. همچنین کیفیت عکس های گرفته شده با روش پردازش تصویر ارتقا داده شد [۲۱].

۳-۳- نتایج آزمایشگاهی

شکل ۴ تصاویر پردازش شده مربوط به الگوهای جریان در تحقیق حاضر را نشان می دهد که در آن چهار الگوی لایه ای پایین رو، حبابی، لخته ای و



شکل ۳: شماتیک دستگاه آزمایش

Fig 3. Schematic of experimental setup

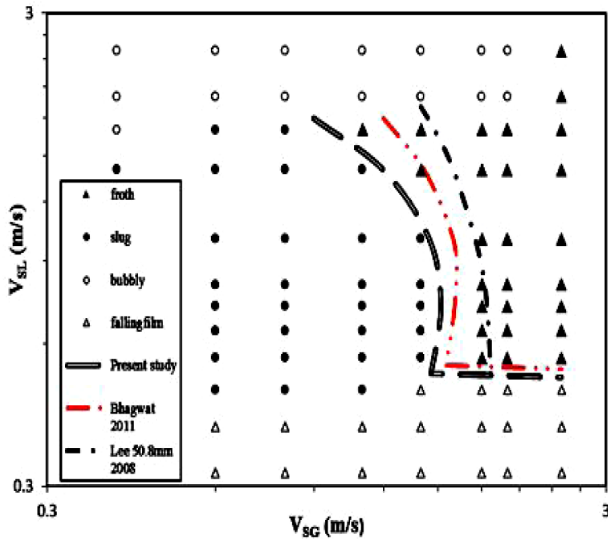
برای آب و چهار روماتر برای هوا استفاده شده است. روماترها هر چند وقت یکبار کالیبره شده، تا نتایج دقیق تری بدست آید و صحت و اعتبار اندازه گیری بیشتر شود. شیرها نیز از نوع گازی و در اندازه های مختلف استفاده شده است.

۳-۲- نحوه آزمایش ها

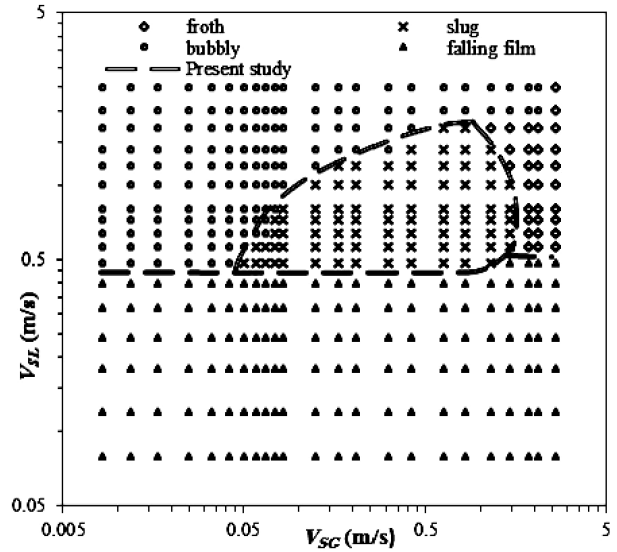
برای هماهنگی بیشتر و مقایسه بهتر با تحقیقات گذشته به دو نکته در طراحی سامانه آزمایشی توجه شد. یکی توجه به انتخاب ابعاد لوله بود که طول ۴ متر و قطر ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شد تا شرایط لازم برای توسعه یافتن جریان دوفاز بوجود آید و نکته بعدی در مورد انتخاب محورهای مختصات برای نمایش نمودار الگوی جریان (نقشه جریان) بود که برای این کار از سرعت های ظاهری استفاده گردید. در واقع توافق کلی در این موضوع وجود ندارد، ولی برای مقایسه بهتر و همچنین با توجه به استفاده بیشتر محققین، سرعت های ظاهری آب و هوا به عنوان محورهای مختصات انتخاب شدند [۶-۳ و ۱۰].

سرعت ظاهری هوا بین $2/5 \text{ m/s} - 0/08 \text{ m/s}$ و سرعت ظاهری آب بین $2/5 \text{ m/s} - 0/08 \text{ m/s}$ قرار داده شد. برای سرعت ظاهری هوا ۲۳ مقدار و برای سرعت ظاهری آب ۱۷ مقدار انتخاب گردید که در مجموع ۳۹۱

¹Frame Per Second



شکل ۷: انتقال از رژیم لخته‌ای به کف‌آلود
Fig 7. Slug to froth transition



شکل ۵: نقشه جریان برای جریان دوفازی عمودی پایین رو در تحقیق حاضر

Fig 5. Flow pattern map for vertical downward two phase flow in 50mm pipe in this study

الف-انتقال از حبابی به لخته‌ای

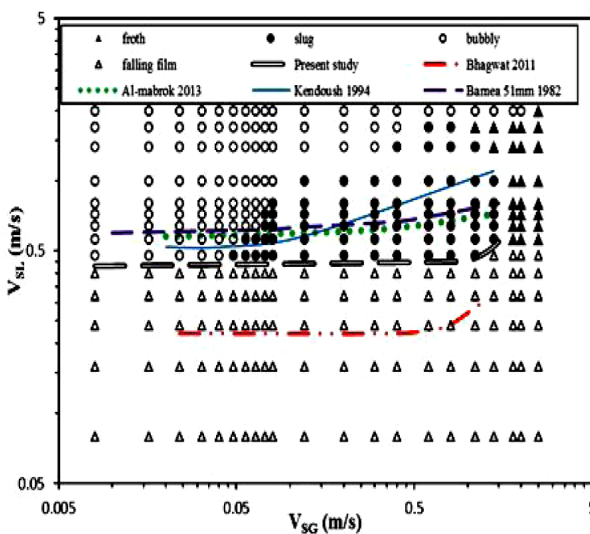
انتقال از رژیم حبابی به لخته‌ای و مقایسه آن با دیگر تحقیقات، المبروک [۳]، بارنتا [۴]، کندوش [۵]، لی [۷] و بهاگوات [۸] در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تطابق خوبی میان این تحقیق و تحقیقات گذشته وجود دارد.

ب-انتقال از لخته‌ای به کف‌آلود

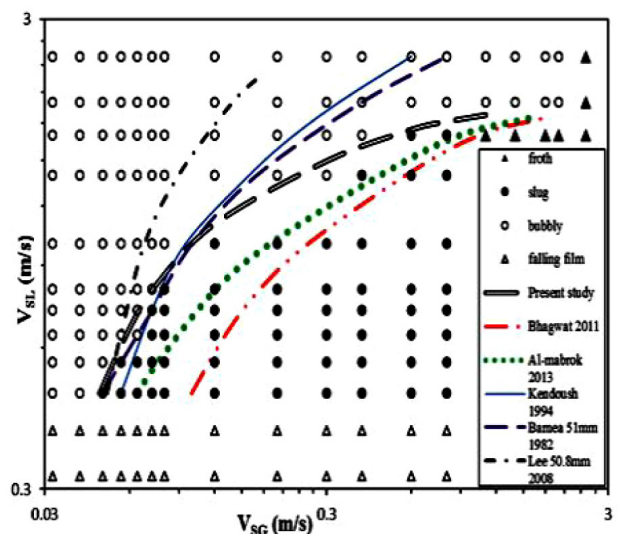
در بسیاری از تحقیقات گذشته، رژیم کف‌آلود به طور جداگانه تعریف نشده است، به همین علت امکان مقایسه تنها با دو تحقیق لی [۷] و بهاگوات [۸]

کف‌آلود نشان داده شده است. پس از تعیین الگوهای جریان در هر یک از ۳۹۱ حالت ذکر شده و رسم مرزهای بین الگوهای مختلف، نقشه جریان مطابق شکل ۵ بدست آمد.

برای مقایسه با تحقیقات پیشین، و به منظور درک بهتر و جلوگیری از شلوعی و تراکم نمودارها، این مقایسه در چهار قسمت الف (انتقال از حبابی به لخته‌ای)، ب (انتقال از لخته‌ای به کف‌آلود)، ج (انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به کف‌آلود) و د (انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای) و شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است:



شکل ۸: انتقال از رژیم لایه‌ای به حبابی و لخته‌ای
Fig 8. Falling film to bubbly and slug transition



شکل ۶: انتقال از رژیم حبابی به لخته‌ای
Fig 6. Bubbly to slug transition

دوفازی پایین‌رو، مدل چندسیالی بهترین گزینه برای پیش‌بینی توزیع فازها در مقایسه با سایر روش‌های معرفی شده می‌باشد. این مدل برای شبیه‌سازی بسیاری از جریان‌های چندفازی استفاده شده است [۲۲].

۴-۱- معادلات حاکم

در این بخش، در مدل دوسیالی یا اوپلری معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای فاز i به ترتیب عبارتند از [۲۳]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \vec{F}_i + \vec{F}_{lift,i} + \vec{F}_{vm,i} + \vec{R}_{ji} \quad (2)$$

در معادله (۲)، \vec{F}_i و $\vec{F}_{lift,i}$ و $\vec{F}_{vm,i}$ به ترتیب نیروی حجمی خارجی، نیروی برآ و نیروی جرم مجازی، \vec{R}_{ji} نیروی برهم‌کنش میان فازها، $\vec{\tau}_i$ تانسور تنش-کرنش فاز i می‌باشد که ترم‌های توربولانسی نیز در آن وجود دارد و P فشار مشترک بین فازهاست. لازم به ذکر است، مدل دوسیالی نرم‌افزار از یک فشار برای همه فازها استفاده می‌کند [۲۳].

برای مدل کردن \vec{R}_{ji} که بیشتر به اصطکاک، فشار و چسبندگی بستگی دارد، از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{ji} = \sum_{p=1}^n K_{ji} (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \quad (3)$$

در معادله (۳)، $K_{ji} = K_{ij}$ ضریب تبادل مومنتم بین دو فاز می‌باشد و برای جریان‌های سیال-سیال با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$K_{ij} = \frac{\alpha_j \alpha_i \rho_i f}{\tau_i} \quad (4)$$

در معادله (۴)، f تابع پسا می‌باشد و برای مدل‌های مختلف ضریب تبدیل، تعریف متفاوتی دارد. τ_i زمان آسایش ذره می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_i = \frac{\rho_i d_i^2}{18\mu_i} \quad (5)$$

به ترتیب d_i و ρ_i و μ_i قطر حباب، چگالی گاز و لزجت مایع می‌باشند. تقریباً تمامی تعاریف f شامل ضریب پسای C_D می‌باشد که این ضریب بر پایه عدد رینولدز نسبی Re بیان می‌شود. برای شبیه‌سازی از مدل شیلر و نیومان^۱ استفاده شده است. برای مدل شیلر و نیومان تابع f به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (6)$$

¹Schiller-Neuman

بود. مطابق شکل ۷ تطابق خوبی با تحقیق بهاگوات [۸] مشاهده می‌شود. در واقع در تحقیقاتی که در سال‌های گذشته انجام شده است به علت اغتشاش زیاد نام خاصی برای این الگو نبوده است، ولی در تحقیقات سال‌های اخیر در تعریف و نامگذاری این رژیم یک هماهنگی بوجود آمده است [۸]. روند لی [۷] هم شبیه است و شاید اختلاف موجود به دلیل تفاوت روش در دو تحقیق باشد.

ج-انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به کف‌آلود

انتقال دیگری که در شکل ۷ وجود دارد، انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به کف‌آلود است. مطابق شکل تطابق نسبتاً خوبی با تحقیق بهاگوات [۸] دیده می‌شود. البته همان‌طور که اشاره شد، به دلیل عدم تعریف الگوی کف‌آلود در اکثر تحقیقات گذشته، این انتقال نیز در تحقیقات پیشین نشان داده نشده بود و به همین دلیل امکان مقایسه بیشتر وجود نداشت.

د-انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای

شکل ۸ این انتقال را نشان می‌دهد. روند این انتقال مشابه تحقیقات گذشته است و تنها اختلاف در سرعت ظاهری مایع است. در مرجع [۳ و ۴] این انتقال در $V_{SL} = 0/6$ متر بر ثانیه رخ می‌دهد، در حالی که برای تحقیق حاضر این مقدار $V_{SL} = 0/42$ متر بر ثانیه است. البته شایان ذکر است این انتقال، در تحقیق بهاگوات [۸] برای $V_{SL} = 0/24$ متر بر ثانیه تنها در محدوده $V_{SL} = 0/4 - 1/5$ متر بر ثانیه رسم شده است.

در بعضی از نقشه‌های جریان، مقادیری برای سرعت‌های پایین (نزدیک صفر) ارائه نشده است [۳ و ۶ و ۸].

همان‌طور که در قسمت دستگاه آزمایش اشاره شد، برای اندازه‌گیری دقیق‌تر سرعت‌های هوا از چهار روتامتر و برای آب از دو روتامتر استفاده شد. در واقع با این کار سعی شد این نقص تا حدود زیادی برطرف شود و در تحقیق حاضر امکان بررسی جریان تا سرعت ظاهری هوا $0/08$ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری آب $0/08$ متر بر ثانیه فراهم شود.

۴-۲- مدل‌سازی جریان چندفازی

مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی عددی جریان‌های چند فاز وجود دارد. از آنجایی که دیدگاه اوپلر-لاگرانژ در نرم‌افزار فلوئنت توانایی بررسی مسأله کوپل چهار راهه را ندارد و نمی‌تواند اثر برخورد ذرات به یکدیگر را در نظر بگیرد، لذا از دیدگاه اوپلر-اوپلر استفاده شده است. از آنجایی که در دیدگاه اوپلر-اوپلر ذرات مانند یک فاز پیوسته مورد بررسی قرار می‌گیرند، اطلاعات مفیدتری را می‌توان بدست آورد و همچنین هزینه محاسباتی کمتری نسبت به دیدگاه اوپلر-لاگرانژ دارد.

مهمترین مدل‌های چند فازی که از دیدگاه اوپلر-اوپلر بهره می‌گیرند، عبارتند از: مدل دوسیالی یا اوپلری، مدل مخلوط، مدل حجم سیال.

تجربیات عددی بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که برای جریان

که C_D به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1+0.15Re^{0.687})}{Re} & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (7)$$

Re نیز عدد رینولدز نسبی است و برای فاز پیوسته l و فاز پراکنده g به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{\rho_l |\vec{v}_g - \vec{v}_l| d_g}{\mu_l} \quad (8)$$

برای جریان‌های چند فازی، نرم افزار فلوئنت تاثیر نیروهای برآ بر ذرات (حباب‌ها) را لحاظ می‌کند. نیروی برآ عمل کننده روی فاز ثانویه j در فاز اولیه i ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{F}_{ift} = -0.5 \rho_i \alpha_i (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \times (\nabla \times \vec{v}_i) \quad (9)$$

اثر نیروی جرم مجازی وقتی مهم است که فاز ثانویه j نسبت به فاز اولیه i شتاب داشته باشد، به عبارت دیگر وقتی مهم است که دانسیته فاز ثانویه خیلی کوچکتر از دانسیته فاز اولیه باشد. اینرسی جرم فاز اولیه در اثر ذرات (حباب‌ها) شتاب‌دار به صورت نیروی جرم مجازی روی ذره اعمال می‌شود:

$$\vec{F}_{vm} = -0.5 \rho_i \alpha_i \left(\frac{d_i \vec{v}_i}{dt} - \frac{d_j \vec{v}_j}{dt} \right) \quad (10)$$

در معادله (۱۰) ترم di/dt بیانگر مشتق زمانی فاز است. تانسور تنش - کرنش فاز i از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{\tau}_i = \alpha_i \left[(\mu_i + \mu_{t,i}) (\nabla \vec{v}_i + \nabla \vec{v}_i^T) \right] - \frac{2}{3} \alpha_i \left[(\mu_i + \mu_{t,i}) \nabla \vec{v}_i \delta - \rho_i \lambda_i \delta \right] \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، δ دلتای کرونگر، $\mu_{t,i}$ ویسکوزیته اغتشاش فاز i می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu_{t,i} = \rho_i C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $C_\mu = 0.09$ می‌باشد.

در مورد نیروی نیروی جرمی خارجی \vec{F}_i تنها در جهت l نیروی وزن را داریم، که در قسمت شرایط کاری^۱ در نظر گرفته می‌شود. ρ_l و ρ_g نیز و به ترتیب برابر ۱/۲۲۵ و ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب قرار داده شده است.

برای بررسی اثرات اغتشاشات در جریان از مدل توربولانسی k - ε استفاده شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان‌های چندفازی سه مدل مخلوط^۲، پراکنده^۳ و برای هر فاز^۴ وجود دارد که در این تحقیق از مدل مخلوط استفاده شده است. معادلات حاکم برای انرژی جنبشی توربولانسی مخلوط (k) و اتلاف توربولانسی مخلوط (ε) به ترتیب مطابق روابط (۱۳) و

(۱۴) می‌باشند [۲۴].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (14)$$

در معادلات (۱۳) و (۱۴) چگالی و سرعت مخلوط، ρ_m و \vec{v}_m به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \quad (15)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i} \quad (16)$$

نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی $G_{k,m}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} \left(\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T \right) : \nabla \vec{v}_m \quad (17)$$

ثابت‌ها در این معادلات مانند ثابت‌های ارائه شده برای مدل k - ε جریان تک فاز می‌باشند. در این معادلات C_1 و C_2 و σ_k و σ_ε ضرایب تجربی ثابت را نشان می‌دهند که مطابق رابطه (۱۸) عبارتند از:

$$C_1 \cong 1.44, C_2 \cong 1.92, \sigma_k \cong 1.0, \sigma_\varepsilon \cong 1.3 \quad (18)$$

مجهولات اصلی در اینجا عبارتند از: V_{SL} و V_{SG} (۶ مجهول)، P (۱ مجهول)، α_G و α_L (۲ مجهول)، k انرژی جنبشی اغتشاش (۱ مجهول) و ε نرخ استهلاک انرژی جنبشی اغتشاش (۱ مجهول). بنابراین با وجود ۱۱ مجهول، برای بستن دستگاه معادلات نیاز به ۱۱ معادله می‌باشد.

این ۱۱ معادله عبارتند از: ۲ معادله پیوستگی برای دوفاز، ۶ معادله مومنتم برای دوفاز هر کدام در سه جهت، یک معادله k ، یک معادله ε و یک معادله کسر حجمی که جمع کسر حجمی دوفاز برابر یک است.

برای محاسبه محاسبه جریانهای جریانهای چندفازی با استفاده از مدل اوپلری از الگوریتم پی‌سی - سیمپل برای کوپل سرعت و فشار استفاده میشود می‌شود. در این الگوریتم با حل معادلات مومنتوم (با استفاده از مولفه‌های مؤلفه‌های سرعت و فشار حدسی) مولفه‌های مؤلفه‌های سرعت محاسبه میشوند می‌شوند. سپس با استفاده از معادله تصحیح فشار که از ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم بدست می‌آید، به منظور بدست بدست آوردن یک میدان تصحیح فشار استفاده میشود می‌شود. از میدان تصحیح فشار محاسبه شده برای تصحیح میدان سرعت و فشار استفاده میشود می‌شود. این فرایند تکرار تا همگرایی میدانهای سرعت و فشار انجام میشود می‌شود. با مشخص شدن این ۱۱ مجهول، با استفاده از معادلات کمکی (۳) تا (۱۲) بقیه مجهولات بدست می‌آید.

¹Operating condition

²Mixture

³Dispersed

⁴Per phase

جدول ۱: شرایط وقوع الگوهای جریان دوفازی از نقشه جریان
Table 1. Operating condition for the simulations of two phase flow patterns from flow map

V_{SL} (m/s)	V_{SG} (m/s)	الگوی جریان
۰/۰۸	۰/۰۱۶	لایه‌ای پایین‌رو
۰/۰۵۶	۰/۰۰۸	حبابی
۰/۰۵۶	۰/۶	لخته‌ای
۰/۰۵۶	۲/۵	کف‌آلود
۰/۱۶	۲	لایه‌ای پایین‌رو
۰/۸	۰/۰۳۲	حبابی
۰/۸	۰/۴	لخته‌ای
۰/۸	۲	کف‌آلود

برای خروجی از شرط مرزی جریان خروجی^۳ استفاده گردید.

سرعت‌های ظاهری آب و هوا به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A_P} \quad (20)$$

$$V_{SG} = \frac{Q_G}{A_P} \quad (21)$$

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی عددی

برای مقایسه هر چه بهتر نتایج حل عددی با نتایج قسمت آزمایشگاهی، همان قسمتی از حل عددی در لوله برای مقایسه انتخاب شده که در شکل دستگاه آزمایش به عنوان مقطع آزمایش^۴ نشان داده شده است (شکل ۱۰). برای اطمینان از درستی حل ابتدا باید استقلال از شبکه بررسی شود. برای این منظور پنج شبکه با تعداد سلول‌های مختلف تولید شده است. برای مقایسه اندازه شبکه‌ها، مقادیر کسر حجمی الگوی حبابی در نصف مقطع لوله، در ارتفاع ۱ متر از پایین لوله در هر شبکه بدست آمد. شکل ۱۱ بررسی استقلال از شبکه را نشان می‌دهد که با روند نتایج تجربی زالینسکی [۲۶] مطابقت دارد. با توجه به دقت مورد نیاز و هزینه‌های محاسباتی از شبکه با تعداد ۸۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی استفاده شده است.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی ارائه شده است. شکل‌های ۱۲ (الف) و ۱۳ (الف) شبیه‌سازی جریان لایه‌ای پایین‌رو در سرعت‌های مختلف ظاهری آب و هوا را نشان می‌دهد.

هنگامی که سرعت مایع از مقدار مشخصی کمتر باشد، فاز مایع به صورت یک لایه روی دیواره لوله قرار می‌گیرد. (همان‌طور که قبلاً در نتایج تجربی بیان شد، این مقدار توسط محققین مختلف متفاوت است: این مقدار

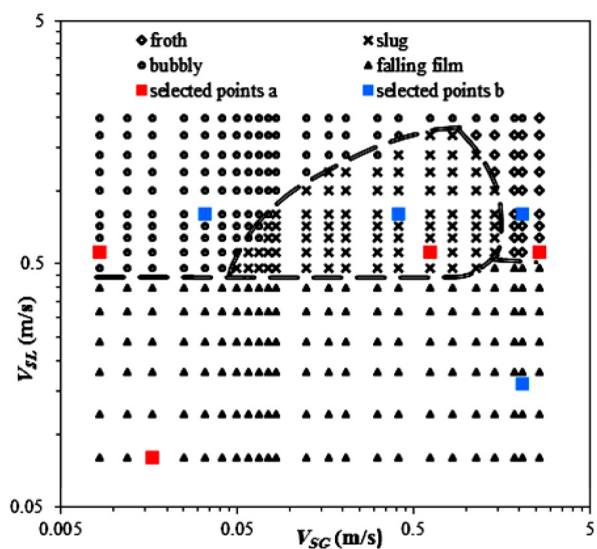
۴-۲- روش شبیه‌سازی

شبیه‌سازی جریان برای هندسه مشابه دستگاه ساخته شده (طول لوله ۴ متر و قطر ۵۰ میلی‌متر) به صورت سه بعدی انجام گرفت تا بتوان مقایسه نتایج را بخوبی انجام داد. تأثیر نیروی جاذبه نیز در نظر گرفته شد و همچنین فرض شده انتقال جرم بین دوفاز وجود نداشته و هر دوفاز قابل تراکم می‌باشند؛ زیرا طول لوله کوتاه بوده و تغییرات فشار در این طول زیاد نیست [۱۲ و ۲۰]. با توجه به تحلیل جریان دوفاز در حالت گذرا از گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه استفاده شد و محاسبات تا رسیدن به حالت پایدار ادامه یافت.

برای کوپلینگ فشار-سرعت از الگوریتم کوپلینگ فاز^۱ و برای مدل‌سازی اغتشاش از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. برای جداسازی معادلات مومنتم و دو معادله اغتشاش از روش محاسباتی بادسو مرتبه اول و برای معادله کسر حجمی از روش محاسباتی بادسو مرتبه دوم استفاده شده است [۲۵].

برای مدل‌سازی تابع پسا از مدل شیلر-نیومن^۲ استفاده شده است. برای ورودی داده‌ها جهت انجام شبیه‌سازی جریان، می‌توان از اطلاعات الگوهای جریان دوفازی بدست آمده در قسمت آزمایشگاهی استفاده نمود. جدول ۱ دو دسته شرایط انتخابی از نقشه جریان برای وقوع هر یک از الگوهای جریان را که در شبیه‌سازی عددی نیز بکار رفته است، نشان می‌دهد. شکل ۹ نیز موقعیت نقاط انتخابی بر روی نقشه جریان را نشان می‌دهد.

سیالات مورد استفاده آب و هوا بوده که در تمام حالات به صورت عمود بر صفحه ورودی وارد لوله می‌شوند. چگالی آب 998 kg/m^3 و چگالی هوا $1/225 \text{ kg/m}^3$ قرار داده شد. برای ورودی شرط مرزی ورودی سرعت و



شکل ۹: موقعیت نقاط انتخابی برای شبیه‌سازی عددی

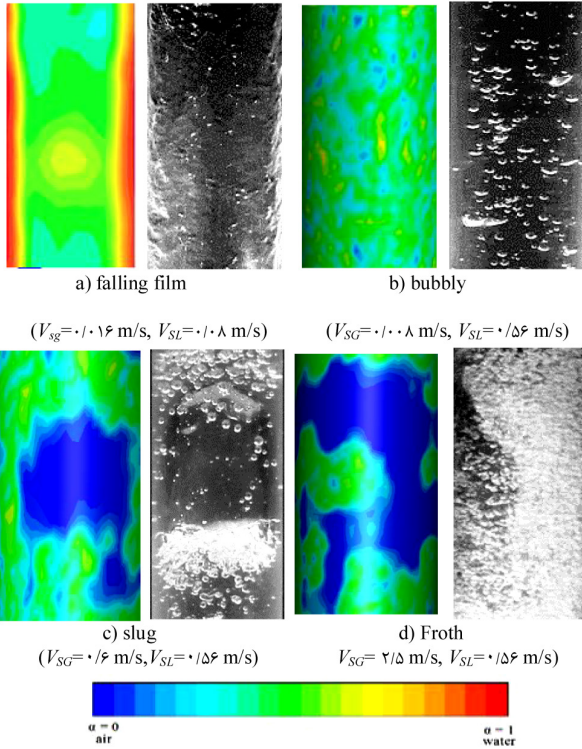
Fig 9. Location of selected points for numerical solution

³outflow

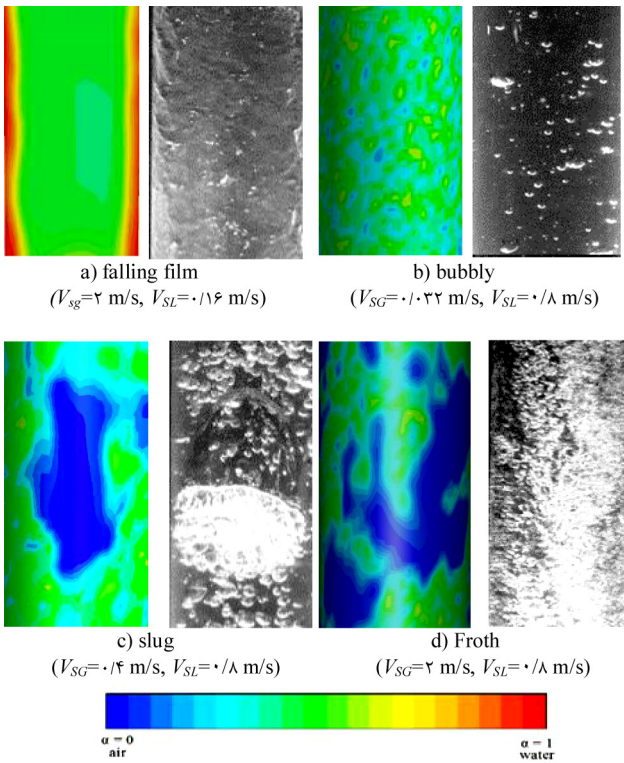
⁴Test section

¹Phase coupled

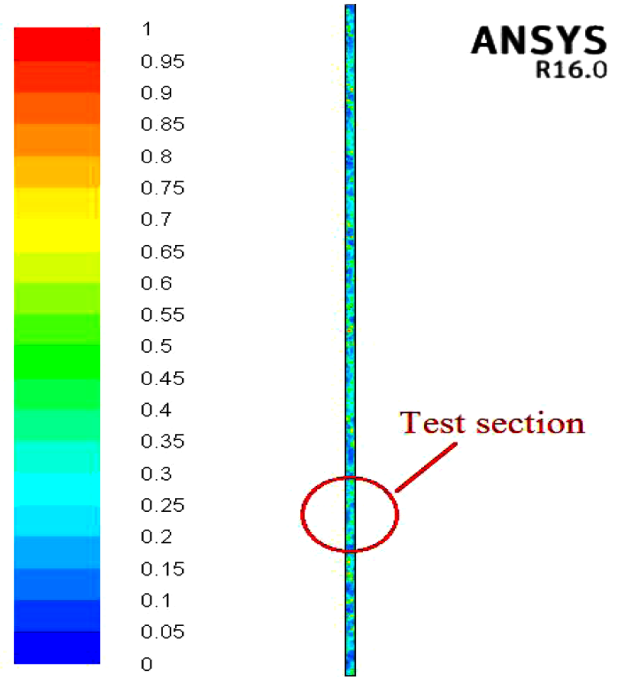
²Schiller-Naumann



شکل ۱۲: کانتورهای کسر حجمی فاز دو (هوا) و مقایسه با نتایج تجربی
 Fig 12. Contours of phase 2 (air) volume fraction and comparison with experimental results

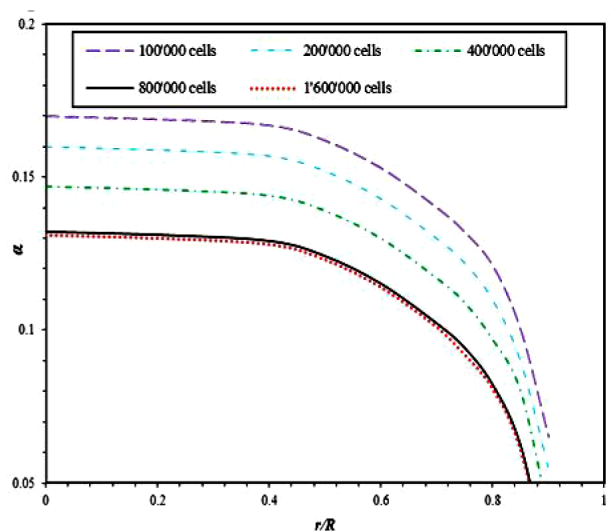


شکل ۱۳: کانتورهای کسر حجمی فاز دو (هوا) و مقایسه با نتایج تجربی
 Fig 13. Contours of phase 2 (air) volume fraction and comparison with experimental results

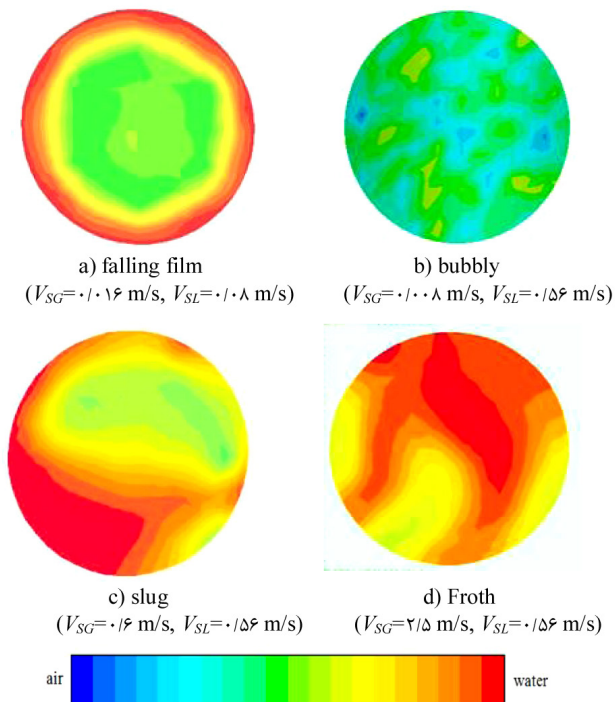


شکل ۱۰: انتخاب مقطع آزمایش در حل عددی
 Fig 10. Selection of test section in numerical solution

توسط المبروک [۳] و بارنتا [۴] ۰/۶ متر بر ثانیه، کندوش [۵] ۰/۵ متر بر ثانیه، رئیس زاده و همکاران [۱۰] ۰/۴ متر بر ثانیه بهاگوات [۸] ۰/۲ متر بر ثانیه و تحقیق حاضر ۰/۴۴ متر بر ثانیه گزارش شده است. باید توجه داشت در جریان حلقوی نیز به دلیل سرعت بالای فاز هوا، فاز آب به صورت یک لایه روی دیواره قرار می‌گیرد که شباهت زیادی به جریان لایه‌ای پایین‌رو دارد.



شکل ۱۱: نتایج مربوط به بررسی استقلال شبکه
 Fig 11. Results of grid independence study



شکل ۱۵: کانتورهای کسر حجمی هوا در مقطع عرضی در ارتفاع ۰/۷ متر

Fig 15. Air volume fraction contours in horizontal section 0.7 m

در ادامه اگر باز سرعت گاز افزایش یابد، حباب‌های لخته‌ای متلاشی شده و جریان نامنظم و آشفته پدید می‌آورند که الگوی کف‌آلود نام دارد. نتایج شبیه‌سازی برای این الگو در شکل‌های ۱۲ (د) و ۱۳ (د) نشان داده شده است.

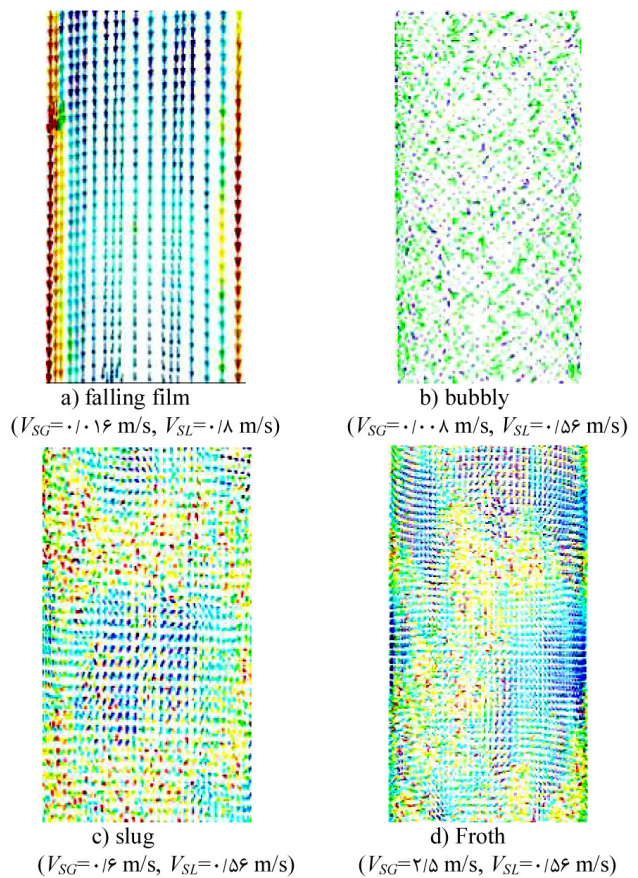
شکل ۱۴ بردارهای سرعت فاز دو (هوا) را نشان می‌دهد. مشابه شکل‌های قبل رنگ آبی مربوط به هوا و رنگ قرمز مربوط به آب است. همانطور که مشاهده می‌شود در شکل ۱۴ (الف) بردارهای قرمز رنگ (آب) در اطراف لوله قرار دارند و بردارهای آبی رنگ (هوا) در وسط لوله قرار گرفته و توسط آب احاطه شده‌اند که همان تعریف الگوی لایه‌ای پایین‌رو می‌باشد. به همین ترتیب بردارهای آبی رنگ (هوا) در شکل ۱۴ (ب) یا الگوی حبابی به صورت لکه‌هایی در میان بردارهای قرمز رنگ (آب) و در شکل ۱۴ (ج) یا الگوی لخته‌ای به صورت یک لکه بزرگتر مشخص شده است. در شکل ۱۴ (د) نیز به علت ماهیت آشفته الگوی کف‌آلود بردارها نیز به طور نامنظم با یکدیگر مخلوط شده‌اند.

در بررسی آزمایشگاهی به روش مشاهده مستقیم و عکس برداری، برای تشخیص الگوهای جریان در یک موقعیت از روبروی لوله تصویری تهیه می‌شود که نمونه آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شد. ولی باید توجه داشت در بررسی آزمایشگاهی امکان تصویربرداری از مقطع لوله میسر نمی‌باشد. بنابراین می‌توان برای رفع این مشکل از نتایج شبیه‌سازی استفاده

از آنجایی که ساختار جریان لایه‌ای پایین‌رو و حلقوی بسیار شبیه به یکدیگر است، تنها به شبیه‌سازی این الگو اکتفا شده است. در واقع تا مقدار مشخصی از سرعت ظاهری مایع (۰/۴ متر بر ثانیه در تحقیق حاضر)، تنها تفاوت این دو الگو در سرعت ظاهری فاز گاز است، به طوری که در سرعت‌های پایین گاز، الگوی لایه‌ای پایین‌رو و در سرعت‌های بالای گاز الگوی حلقوی شکل می‌گیرد.

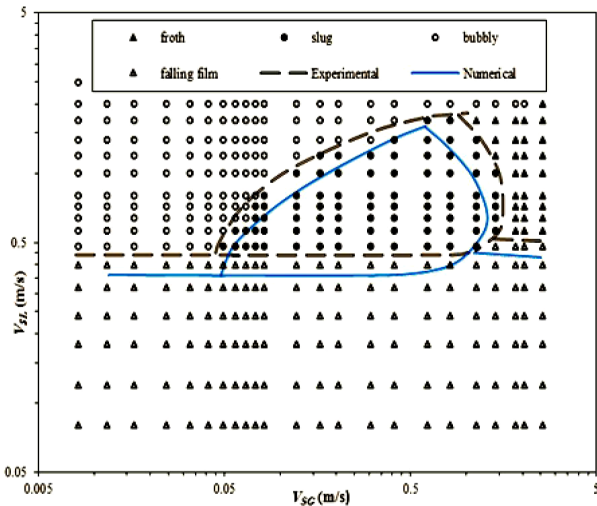
نتایج شبیه‌سازی عددی برای جریان حبابی در شکل‌های ۱۲ (ب) و ۱۳ (ب) نشان داده شده است. به محض این که سرعت مایع از ۰/۴ متر بر ثانیه بیشتر شود، فاز مایع تمام لوله را اشغال می‌کند. اگر سرعت گاز کمتر از ۰/۰۵ متر بر ثانیه باشد، فاز گاز به صورت حباب‌هایی در فاز مایع پخش می‌شود و الگوی حبابی شکل می‌گیرد.

اگر سرعت گاز بیشتر شود، حباب‌های گاز بهم می‌پیوندند و تشکیل حباب‌های بزرگتری را به نام حباب‌های لخته‌ای می‌دهند که قطر این حباب‌ها نزدیک به قطر لوله می‌شود. این الگو، الگوی لخته‌ای نام دارد. نتایج شبیه‌سازی عددی برای این جریان در شکل‌های ۱۲ (ج) و ۱۳ (ج) نشان داده شده است.



شکل ۱۴: بردارهای سرعت الگوهای جریان در تحقیق حاضر

Fig 14. Velocity vectors of different flow patterns for this study



شکل ۱۶: نقشه جریان عددی و تجربی برای جریان دوفازی عمودی پایین رو در تحقیق حاضر

Fig 16. Numerical and experimental flow pattern map for vertical downward two phase flow in 50mm pipe in this study

بدست آمده از نتایج تجربی را نشان می‌دهد.

علت اختلاف دو منحنی می‌تواند ناشی از خطاهای مربوط به قرائت سرعت‌های ظاهری آب و هوا (خطای اپراتور، خطای دستگاه اندازه‌گیری مانند روتامتر) در شرایط آزمایشگاه، در مقایسه با حل عددی باشد.

جدول ۲ مقایسه بین نتایج بررسی تجربی و عددی را برای مرزهای انتقال نشان می‌دهد. به عنوان مثال انتقال از الگوی لایه‌ای پایین‌رو به کف‌آلود در شبیه‌سازی عددی در $V_{SL}=0/48$ متر بر ثانیه می‌باشد که در مقایسه با مقدار تجربی (۰/۵۶ متر بر ثانیه) ۱۴/۳٪ خطا دارد. انتقال از الگوی لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای در شبیه‌سازی عددی در $V_{SL}=0/39$ متر بر ثانیه و در بررسی تجربی $V_{SL}=0/44$ متر بر ثانیه می‌باشد که ۱۱/۴٪ خطا دارد.

با توجه به جدول ۲ بیشترین میزان خطا ۲۰/۶٪ و کمترین میزان خطا ۱۱/۴٪ می‌باشد. بیشترین میزان خطا مربوط به انتقال از لخته‌ای به کف‌آلود است که میزان بالای خطا می‌تواند ناشی از اغتشاش زیاد جریان کف‌آلود باشد. کمترین میزان خطا نیز مربوط به انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای می‌باشد.

۵- جمع‌بندی

با توجه به گسترش کاربردهای صنعتی جریان دوفاز رو به پایین، مدل‌سازی و شبیه‌سازی آن برای پیش‌بینی شرایط مختلف آن در لوله‌ها اهمیت کاربردی زیادی دارد. در این تحقیق الگوی جریان لایه‌ای پایین‌رو، حبابی، لخته‌ای و کف‌آلود در جریان رو به پایین لوله به طور واضح مشخص و عکس‌برداری شد و با استفاده از نقشه جریان که از بررسی آزمایشگاهی

کرد. در شکل ۱۵ نتایج شبیه‌سازی کسر حجمی در ارتفاع ۰/۷ متر از پایین لوله برای الگوهای جریان دوفاز نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل ۱۵ (الف) مربوط به جریان لایه‌ای پایین‌رو کانتورهای قرمز رنگ (آب) در اطراف و کانتورهای آبی رنگ (هوا) در وسط لوله قرار گرفته‌اند.

در شکل ۱۵ (ب) حباب‌های هوا (لکه‌های آبی رنگ) به خوبی قابل تشخیص هستند؛ اما در شکل ۱۵ (ج) پدیده جالبی قابل توجه است. با دقت در شکل مشاهده می‌شود که حباب لخته‌ای در مرکز لوله قرار نگرفته است، در حالی که در شکل ۱۵ (ب) حباب‌های هوا (لکه‌های آبی رنگ) به خوبی قابل تشخیص هستند.

اما در شکل ۱۵ (ج) پدیده جالبی قابل توجه است. با دقت در شکل مشاهده می‌شود که حباب لخته‌ای در مرکز لوله قرار نگرفته است، در حالی که در عکس از روبرو (حتی در حالت آزمایشگاهی) این حباب کاملاً در مرکز لوله به نظر می‌رسد، لذا برای شناخت بهتر جریان لازم است که تصاویر مقطع نیز بررسی شوند. در شکل ۱۵ (د) نیز همان‌طور که انتظار می‌رفت یک جریان نامنظم و آشفته مشاهده می‌شود.

در مرحله آخر، پس از مقایسه حل عددی با نتایج تجربی و حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی و شبیه‌سازی در پیش‌بینی الگوهای جریان، باید نقشه جریان تهیه شود. برای این منظور چند حالت (۴۴ حالت) در اطراف مرزهای انتقال، انتخاب و بررسی عددی انجام شد.

این نقاط باید به گونه‌ای انتخاب شوند تا محل دقیق مرز انتقال را برای رسم نقشه جریان مشخص کنند. به عنوان مثال برای رسم مرز انتقال از لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای، ابتدا باید سرعت مایع که در آن این انتقال رخ می‌دهد، مشخص شود.

برای این منظور، نقاط انتخابی در این مرحله به صورت سرعت گاز ۰/۲۴ متر بر ثانیه و سرعت‌های مایع ۰/۳۶ و ۰/۳۷ و ۰/۳۸ و ۰/۳۹ و ۰/۴ و ۰/۴۲ متر بر ثانیه انتخاب شد. پس از شبیه‌سازی عددی مشخص شد که انتقال در سرعت ۰/۳۹ متر بر ثانیه رخ می‌دهد. این مقدار در مقایسه با مقدار تجربی (۰/۴۴ متر بر ثانیه) به میزان ۱۱/۴٪ خطا دارد.

سپس باید بررسی شود که امتداد این مرز انتقال (لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای) چگونه است. نقاط انتخابی در این حالت شامل مقدار ثابت سرعت مایع، یعنی ۰/۳۹ متر بر ثانیه، و سرعت‌های متغیر گاز ۰/۰۳۲ و ۰/۰۵۶ و ۰/۰۸ و ۰/۰۳ و ۰/۰۸ و ۰/۰۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در نقطه $V_{SG}=0/9$ متر بر ثانیه آنگاه $V_{SL}=0/32$ متر بر ثانیه الگوی جریان کف‌آلود می‌شود، پس در اینجا مرز انتقال به سمت بالا امتداد پیدا می‌کند.

روند کار برای رسم سه مرز دیگر نیز به همین منوال است که با انتخاب ۱۵ نقطه برای مرز حبابی به لخته‌ای و انتخاب ۱۲ نقطه برای مرز لخته‌ای به کف‌آلود، ۳ نقطه برای مرز لایه‌ای پایین‌رو به کف‌آلود محل سه مرز دیگر نیز مشخص شده و نقشه جریان کامل می‌گردد (شکل ۱۶).

شکل ۱۶ نقشه جریان بدست آمده از حل عددی و مقایسه آن با نقشه

بود و الگوهای حبابی و لخته‌ای نیز نسبتاً تطابق قابل قبولی داشتند. کمترین تطابق در مورد الگوی کف‌آلود می‌باشد که می‌تواند ناشی از اثرات آشفتگی زیاد جریان باشد. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای سرعت انتقال بین مرزها نشان می‌دهد که بیشترین میزان خطا ۲۰/۶٪ و کمترین میزان خطا ۱۱/۴٪ می‌باشد. به هر حال از دید کلی می‌توان تطابق نسبتاً خوبی را که نتایج شبیه‌سازی مخصوصاً نقشه جریان با نقشه جریان آزمایشگاهی دارد، نشان از قابلیت خوب دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی الگوهای جریان دوفازی پایین‌رو دانست.

فهرست علائم

Re	عدد رینولدز نسبی
R_{ji}	نیروی برهم کنش میان دوفاز
\vec{V}_i	سرعت فاز i (متر بر ثانیه)
\vec{V}_m	سرعت مخلوط (متر بر ثانیه)
V_{SG}	سرعت ظاهری فاز گاز
V_{SL}	سرعت ظاهری فاز مایع
α_i	کسر حجمی فاز i
ε	انرژی اتلافی ناشی از آشفتگی (مجذور متر بر مکعب ثانیه)
μ_i	ویسکوزیته دینامیکی فاز i (کیلوگرم بر متر بر ثانیه)
$\mu_{(i)}$	ویسکوزیته اغتشاش فاز i
$\mu_{(t,m)}$	ویسکوزیته اغتشاش مخلوط
ρ_i	چگالی فاز i (کیلوگرم بر متر مکعب)
ρ_m	چگالی مخلوط (کیلوگرم بر متر مکعب)
τ_i	زمان آسایش ذره
$\bar{\tau}_i$	تانسور تنش کرنش فاز i

مراجع

- [1] E.M. Ozbayoglu, M.A. Ozbayoglu, Flow pattern and frictional-pressure-loss estimation using neural networks for UBD, Society of Petroleum Engineers, IADC/SPE 108340, (2007) 1-9.

جدول ۲: مقایسه نتایج تجربی و عددی در مرزهای انتقال نقشه جریان

Table 2. Comparison of experimental and numerical results for boundary transition in flow map

مرز انتقال	V_{SL} (m/s)	V_{SG} (عددی) (m/s)	V_{SG} (تجربی) (m/s)	درصد خطا
حبابی به لخته‌ای	۰/۴۸	۰/۰۵۴	۰/۰۴۸	۱۲/۵
	۰/۵۶	۰/۰۵۷	۰/۰۵	۱۴
	۰/۶۴	۰/۰۶۴	۰/۰۵۶	۱۴/۳
	۰/۷۲	۰/۰۷۷	۰/۰۶۴	۱۸/۴
	۰/۸	۰/۰۸۶	۰/۰۷۲	۱۹/۴
	۱	۰/۱۳	۰/۱۱	۱۸/۲
	۱/۲	۰/۲۱	۰/۱۸	۱۶/۷
	۱/۴	۰/۳۶	۰/۳	۲۰
لخته‌ای به کف‌آلود	۰/۵۶	۱/۲	۱/۴	۱۴/۳
	۰/۶۴	۱/۲۲	۱/۴۳	۱۴/۷
	۰/۷۲	۱/۲۴	۱/۴۳	۱۳/۳
	۰/۸	۱/۲	۱/۴۳	۱۶
	۱	۱/۱۵	۱/۴	۱۷/۸
	۱/۲	۱/۰۸	۱/۳۶	۲۰/۶
	۱/۴	۰/۹	۱/۱	۱۸/۲
<p>• انتقال از الگوی لایه‌ای پایین‌رو به کف‌آلود در شبیه‌سازی عددی در $V_{SL} = 0/48$ متر بر ثانیه و در بررسی تجربی، $V_{SL} = 0/56$ متر بر ثانیه می‌باشد که ۱۴/۳ درصد خطا دارد.</p> <p>• انتقال از الگوی لایه‌ای پایین‌رو به حبابی و لخته‌ای در شبیه‌سازی عددی در $V_{SL} = 0/39$ متر بر ثانیه و در بررسی تجربی $V_{SL} = 0/44$ متر بر ثانیه می‌باشد که ۱۱/۴ درصد خطا دارد.</p>				

بدست آمد، شرایط وقوع الگوهای جریان دوفازی تعیین شد. سپس در این شرایط با استفاده از روش دوسیالی در نرم افزار انسیس-فلونت^۱ شبیه‌سازی این الگوها انجام شد و الگوهای جریان برای همان شرایط عملیاتی آزمایشگاهی استخراج گردید. بهترین تطابق در مورد الگوی لایه‌ای پایین‌رو

¹Ansys-Fluent 16

- simulation of slug flow pattern in T junction using volume of fluid method, *Modares Mechanical Engineering*, 15(10) (2015) 41-48. (In Persian)
- [15] O.N. Kashinsky, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, V.V. Randin, V.I. Terekhov, Experimental and numerical study of downward bubbly flow in a pipe, *Heat and Mass Transfer*, 49 (2007) 3717–3727.
- [16] M.R. Rahimi, H. Karimi, Computational fluid dynamics modeling of downward bubbly flows, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 73 (2006) 832-836.
- [17] Hadidi, D. Jalali-Vahid, Numerical study of the uniform magnetic field effect on the interactions of bubbles in viscous liquid column, *Modares Mechanical Engineering*, 15(11) (2015) 293-302. (In Persian)
- [18] A.R. Hasan, Void fraction in bubbly and slug flow in downward vertical and inclined systems, *Society of Petroleum Engineers*, SPE 26522, (1995) 172-176.
- [19] H. Goda, T. Hibiki, S. Kim, M. Ishii, J. Uhle, Drift-flux model for downward two-phase flow, *Heat and Mass Transfer*, 46 (2003) 4835-4844.
- [20] D. Dakshinamoorthy, Y. Dai, M. Agrawal, CFD modelling of bubbly, slug and annular flow regimes, *Offshore Technology Conference*, OTC 24245, 2013.
- [21] P. Hanafizadeh, S. Ghanbarzadeh, M.H. Saidi, Visual technique for detection of gas–liquid two-phase flow regime in the airlift pump, *Petroleum Science and Engineering*, 75(3-4) (2011) 327-335.
- [22] E. Stenmark, *Multiphase Flow Models in Ansys CFD Software*, M.Sc –Thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Goteberg, Sweden, 2013.
- [23] ANSYS FLUENT, 16.0 User’s Guide. ANSYS Inc, 2015.
- [24] Y. Shen, C.-O. Ng, A. Chwang, A two-fluid model of turbulent two-phase flow for simulating turbulent stratified flows, *Ocean engineering*, 30(2) (2003) 153-161.
- [25] I. Lun, R.K. Calay, A.E. Holdo, Modeling two-phase flows using CFD, *Apply Energy*, 53 (1996) 299–314.
- [26] L. Szalinski, L.A. Abdulkareem, M.J. Da Silva, S. Thiele, M. Beyer, D. Lucas, V. Hernandez Perez, U. Hampel, B.J. Azzopardi, Comparative study of gas–oil and gas–water two-phase flow in a vertical pipe, *Chemical Engineering Science*, 65(2010) 3836-3848.
- [2] O. Bratland, *Pipe Flow 2-Multiphase Flow Assurance*, Flow Assurance Consulting, Thailand, 2009.
- [3] A. Almbrok, *Gas-Liquid Two-Phase Flow in Up and Down Vertical Pipes*, PhD Thesis, Cranfeild University, 2013.
- [4] D. Barnea, O. Shoham, Y. Taitel, Flow pattern transitions for vertical downward two-phase flow, *Chemical Engineering Science*, 37(5) (1982) 741-744.
- [5] A.A. Kendoush, S.A.W. Al-khatib, Experiments on flow characterization in vertical downward two-phase flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 9 (1) (1994) 34-38.
- [6] M. Ishii, S.S. Pranjape, S. Kim, X. Sun, Interfacial structures and interfacial area transport in downward two-phase bubbly flow, *Multiphase flow*, 30 (7-8), (2004) 779-801.
- [7] J.Y. Lee, M. Ishii, N.S. Kim, Instantaneous and objective flow regime identification method for the vertical upward and downward co-current two-phase flow, *Heat and Mass Transfer*, 51(13-14) (2008) 3442-3459.
- [8] M.S. Bhagwat, A. Ghajar, Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 39 (2012) 213-227.
- [9] J.E. Julia, Y. Liu, T. Hibiki, M. Ishii, Local flow regime analysis in vertical co-current downward two-phase flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44 (2013) 345-355.
- [10] F. Raeiszadeh, E. Hajidavalloo, M. Behbahaninejad, P. Hanafizadeh, Effect of Pipe Rotation on Downward Co-current air-water flow in a vertical pipe, *Multiphase Flow*, 81 (2016) 1-14.
- [11] R. Maryami, S. Farahat, M. H. Shafie Mayam, S. M. JavadPoor, Experimental Investigation of the Bubbly Drag Reduction in the Presence Reduction in the Presence of Axial Flow in the Couette-Taylor System, *Amirkabir Journal of Science & Research*, 47(1) (2015) 33-45. (In Persian)
- [12] S.C.K. De Schepper, G.J. Heynderickx, B.G. Marin, CFD modelling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by the Baker chart, *Chemical Engineering*, 138 (2008) 349-357.
- [13] T. Hibiki, H. Goda, S. Kim, M. Ishii, J. Uhle. Structure of vertical downward bubbly flow, *Heat and Mass Transfer*, 47 (2005) 1847–1862.
- [14] M. R. Ansari, S. Rafiei Asl, N. Samkhaniani, Numerical

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Raeiszadeh, E. Hajidavalloo, M. Behbahaninejad, P. Hanafizadeh, Numerical and Experimental Study of Two-phase

Flow in Downward vertical Pipe, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 413-426.

DOI: 10.22060/mej.2017.12238.5286

