



## بررسی تجربی شکل‌گیری الگوهای جریان و ارزیابی کسر اینترینمنت در جریان دوفازی گاز-مایع در لوله قائم

مجتبی مسیحی<sup>۱</sup>، علی نوری بروجردی<sup>۲\*</sup>، هادی کارگر شریف آباد<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، masihi\_mojtaba@yahoo.com

۲\* - دانشکده مهندسی مکانیک، مرکز عالی تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، anouri@sharif.edu

۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران، hadikargarsharif@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

### چکیده

در پژوهش حاضر رفتار و الگوهای جریان دوفازی ناهم‌سوی گاز-مایع در لوله قائم از جنس پلکسی گلاس شفاف با قطر ۳۸ میلی متر به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سیالات مورد استفاده آب و هوا بوده و نتایج جریان برای ۱۲۵ حالت انتخابی با تغییر سرعت ظاهری آب و هوا بدست آمده است. محدوده سرعت های ظاهری هوا و آب به ترتیب ۹/۳۰ - ۴/۹۰ متر بر ثانیه و ۰/۱۳۹ - ۰/۰۸۳ متر بر ثانیه است. اندازه گیری پدیده اینترینمنت توسط تکنیک نمونه برداری ایزوسینتیک انجام شده است. در راستای یافتن بهترین شرایط از روش سطح پاسخ استفاده شد. تامین شرایط جریان مخالف مایع و گاز، جهت گیری اولیه و تاثیر این طراحی روی الگوی جریان، ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت، نوآوری کار حاضر می باشد. آنچه این تحقیق را از کارهای قبلی محققین متمایز می کند، بدست آوردن دقیق تر الگوی جریان حلقوی جهت محاسبه ضخامت فیلم مایع و پدیده اینترینمنت با طراحی جهت گیری ورودی اولیه می باشد. نتایج این پژوهش توافق خوبی با مدل والیس برای محاسبه اینترینمنت و مدل شیبیرینگ برای محاسبه ضخامت فیلم مایع دارد. بیشترین مقدار سرعت گاز برای تشکیل الگوی جریان حلقوی در لوله ۳۸ میلی متر برابر ۹/۳۰۳ متر بر ثانیه بدست آمد که بالاتر از این سرعت امکان تشکیل الگوی جریان حلقوی وجود ندارد.

\* عهده‌دار مکاتبات: anouri@sharif.edu

کلمات کلیدی: جریان دوفاز غیرهمسو، ضخامت فیلم مایع، کسر اینترینمنت، تنش برشی فصل مشترک، طغیان

نحوه استناد به این مقاله: مجتبی مسیحی، علی نوری بروجردی، هادی کارگر شریف آباد. بررسی تجربی شکل‌گیری الگوهای جریان و ارزیابی کسر اینترینمنت در جریان دوفازی گاز-مایع در لوله قائم. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی.

۱۴۰۳؛ ۱۱ (۱): ۷۸-۵۹

## ۱- مقدمه

تنش برشی و ضریب اصطکاک فصل مشترک، از متغیرهای کلیدی برای پیش‌بینی رفتارهای جریان دوفازی حلقوی در لوله‌های عمودی است. جریان حلقوی در سرعت بالای گاز و کم تا متوسط مایع رخ می‌دهد. مایع به صورت یک فیلم در راستای دیواره لوله جریان می‌یابد و همچنین به صورت قطراتی به دنبال هسته گازی کشیده می‌شود. فصل مشترک بین هسته گازی و فیلم مایع، همواره مواج است و سبب اتمی‌سازی و رسوب قطرات مایع می‌گردد. در شرایط تعادلی، سرعت اتمیزه شدن قطرات و رسوب آنها برابر است و در نتیجه، یک کسر پایایی از مایع به صورت قطره ظاهر می‌شود که کسر اینترینمنت نام دارد. این پارامتر در درک و مدل‌سازی رفتار جریان حلقوی، نقش حیاتی دارد. یکی از جریان‌هایی که در انواع تجهیزات انتقال گرما از جمله سیستم‌های تهویه و تبرید، برج‌های خنک‌کن، صنایع نفت و گاز، صنایع پتروشیمی و همچنین خطوط لوله انتقال نفت دیده می‌شود، جریان دوفازی غیر همسو می‌باشد [۱،۵]. اکثر مطالعات اخیر که بر روی جریان دوفازی صورت پذیرفته است، بر روی جریان دوفازی همسو صورت گرفته است [۳،۴،۶]. اما در این تحقیق به مطالعه جریان دوفازی غیر همسو با ورودی مایع منحصربفرد پرداخته است [۲]. در سال ۲۰۱۷، رحمان و همکاران [۹] یک رابطه همبستگی برای جریان دوفازی برای ضخامت فیلم مایع بدست آوردند. این رابطه برای محدوده سرعت ظاهری مایع بین  $38/8 - 0/6$  متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز بین  $110/6 - 13/4$  متر بر ثانیه می‌باشد. این در حالی است که تحلیل شرایط جریانی به دلیل برهم‌کنش‌های موجود آمده بین دوفاز جریانی غیر همسو بسیار دشوار می‌باشد. برخورد هوا به صورت غیر همسو با جریان آب، در برج‌های خنک‌کن با جریان هوای مخالف را می‌توان به عنوان یکی از مثال‌های بارز در این زمینه نام برد. عموماً در رژیم‌های جریان غیر همسو با افزایش پیوسته هر یک از فازها حالت طغیان به وجود می‌آید و راه ورود فاز دیگر مسدود می‌شود و جریان از حالت غیر همسو خارج می‌شود [۱۱]. پیش‌بینی رفتار جریان نیز به دلیل رژیم‌های جریانی مجزا بسیار سخت و متفاوت می‌باشد. [۱۳، ۱۲، ۶]. از جمله جریان‌های رایج در شرایط دوفازی هوا-آب در لوله‌ها، جریان حلقوی می‌باشد که به دلیل طیف گسترده‌ای از نرخ گاز و مایع اتفاق می‌افتد [۱۴، ۱۵]. از مشخصه‌های بارز این جریان، یک لایه نازک در امتداد دیواره‌ها با یک هسته گاز سریع در مرکز جریان است [۱۶]. شناسایی و تعیین جریان حلقوی دوفازی هوا و آب از آن جهت اهمیت دارد که در صنایع هسته‌ای، شیمیایی و نفتی این جریان بسیار شایع می‌باشد. لذا اولین گام در تحلیل یک جریان دوفازی، شناسایی الگوی غالب در آن است [۱۷]. با توجه به پیچیدگی‌های اشاره شده هنوز علم دوفازی وابستگی شدیدی به نتایج حاصل از مطالعات تجربی و روابط حاصل از آن‌ها دارد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در نوع جریان‌های دوفازی استفاده از قطر لوله‌ها می‌باشد [۱۹، ۱۸]. در سال ۱۹۸۳، تایتل و بارنبا با استفاده از افت فشار لوله و الگوی جریان، برای لوله‌های افقی مدلی غیر همسو را ارائه دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که دو ناحیه احتمالی رخ می‌دهد که ناحیه اول هیچگونه رژیمی وجود ندارد اما در ناحیه‌ی دیگر جریان حلقوی و لخته‌ای و حبابی می‌تواند پدیدار شود [۲۰]. در سال ۱۹۹۴، حسن و همکاران، به منظور بررسی کسر حجمی مایع برای لوله‌های عمودی با ارتفاع  $5/5$  میلی‌متر و قطر  $27$  میلی‌متر از دیدگاه *drift flux* استفاده کردند و مدلی را ارائه دادند که قابلیت بررسی جریان‌های لخته‌ای و حبابی را در جریان غیر همسو و لوله عمودی ارائه دادند. در سال ۲۰۰۶، چن و همکاران تأثیر قطر داخلی لوله را برای رژیم‌های مختلف با استفاده از سیال مبرد R134a برای لوله‌های عمودی برای چهار قطر داخلی لوله از  $1/1$  میلی‌متر تا  $4/26$  میلی‌متر انجام دادند. پس از بررسی‌های لازم، به این نتیجه رسیدند که قطر داخلی لوله تأثیر زیادی بر تعیین الگوی جریان دارد [۲۱]. در سال ۲۰۱۶، بساگنی و اینزولی با استفاده از چند روش آزمایشگاهی مختلف به بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی ستون حباب در لوله عمودی و جریان غیر همسو برای لوله‌ای با ارتفاع  $5/3$  متر و قطر داخلی  $24$  میلی‌متر بررسی شد. آن‌ها یک همبستگی جدیدی برای کسر حجمی آب ارائه دادند و نتایج بدست آمده نشان داد که قطر لوله تأثیر زیادی بر کسر حجمی مایع دارد [۲۲]. ضخامت فیلم مایع و توزیع قطره در فاز گازی، پیچیدگی مسئله پیش‌بینی که از قبل دشوار بوده را باز هم افزایش می‌دهند. کسر اینترینمنت، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند اندازه لوله، سرعت سیال و خصوصیات سیال است. محققان بسیاری به منظور پیش‌بینی این پارامتر مهم تلاش کردند از جمله این محققان: در سال ۱۹۶۹، والیس [۲۷، ۲۳] یک همبستگی تجربی جدید بر اساس مدل پالیو و فلیپوویچ ارائه دادند. نکته قابل تأمل در این مقاله این است که در این رابطه به

جای ویسکوزیته دینامیک گاز، ویسکوزیته دینامیک مایع را جایگزین کردند. در سال ۱۹۸۶، الیمانز و پاتز یک همبستگی به منظور جریان حلقوی عمودی با استفاده از دیتا بانک هارول استفاده کرده اند. این دیتا بانک شامل رنج قطر داخلی لوله از ۶ تا ۳۲ میلی متر و کشش سطحی ۰/۱۲ تا ۰/۷۳ نیوتن بر متر بوده که انواع جریان سیال از جریان خطی و آشفته را شامل می شود. [۲۴] در سال ۱۹۸۹، ایشی و میشیما با استفاده از یک سری مجموعه داده های جریان حلقوی یک رابطه همبستگی با در نظر گرفتن عدد رینولدز مایع و عدد وبر فاز گازی ارائه دادند. [۲۵] در سال ۲۰۰۲، پان و هانراتی یک رابطه همبستگی میان سرعت و اسپری قطرات مایع در گاز را برای جریان عمودی با قطر داخلی لوله از ۱۰/۶ تا ۵۷/۲ میلی متر، سرعت ظاهری مایع ۰/۱۲ تا ۱/۳۵ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۲۰ تا ۱۱۹ متر بر ثانیه ارائه دادند [۲۶]. در سال ۲۰۰۸، سوپرینگ و همکاران [۲۸] یک رابطه همبستگی برای جریان دوفازی برای ضخامت فیلم مایع بدست آوردند. نتیجه ی تحقیقات آن ها این بود که این روش دارای دقت عملکرد بالایی می باشد. برای انتخاب مقدار مناسب دبی جریان گاز و دبی جریان مایع در دسترس در آزمایشگاه همواره نوعی بهینه سازی بین قطر های لوله نیاز است. با توجه به اینکه قطر لوله های غالب در صنعت در این محدوده است این مقدار انتخاب گردید. علاوه بر این مطلب از مرور مقالات و گزارش های پیشین ملاحظه شد که نتایج با کارهای انجام یافته در این محدوده قطر برای جریان های دو فازی غیر همسو کمیاب است. لذا بنا بر ضرورت، کار حاضر با قطر مذکور انجام گرفت. همچنین سعی بر آن شد تا اندازه لوله هایی که در لوله کشی صنعتی پالایشگاه ها و نیروگاه ها پر کاربرد هستند با طراحی جدید ورودی فاز مایع و گاز مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. همچنین با توجه به محدودیت در دسترس نبودن تجهیزات آزمایشگاهی برای فراهم آوردن شرایط آزمایش تأمین دبی فازها و هم چنین محدودیت ساخت سیستم آزمایشگاهی با ابعاد بزرگ که از جمله مشکلات انجام آزمایش در لوله های بزرگ مقیاس است، قطر ۳۸ میلی متر انتخاب گردید، تا بتوان با شرایط طراحی ورودی های جدید مقایسه ای بین این اندازه و تاثیر آن بر روی الگوهای جریان و ضخامت فیلم مایع و پدیده اینترنمنت با پژوهش های محققان پیشین انجام داد [۲۹]. با توجه به پژوهش های صورت گرفته در لوله های عمودی تحت شرایط مختلف مشاهده می شود که تغییرات در پارامترهای تأثیر گذار جریان مانند قطر، شیب، سرعت فازها و سایر موارد، منجر به تغییرات قابل ملاحظه ای در رژیم ها و هیدرودینامیک جریان می شود. در تحقیق حاضر از یک لوله با قطر ۳۸ میلی متر استفاده شده است که در آن به بررسی ضخامت فیلم مایع و کسر اینترنمنت پرداخته شده است. اکثر داده های کسر اینترنمنت موجود با استفاده از لوله هایی با قطر کم بدست آمده اند که این امر مشکل افزایش مقیاس پیش بینی های e بر اساس داده های مربوط به قطر لوله کوچک را دشوارتر می سازد. هدف اصلی این مطالعه، محاسبه تنش برشی در فصل مشترک جریان دوفازی و آنالیز آنها و ارزیابی روش های موجود برای پیش بینی ضخامت فیلم مایع و کسر اینترنمنت در خط لوله با قطر متوسط ۳۸ میلی متر با طراحی هندسه جدید و جهت گیری اولیه مناسب ورودی مایع از بالا در الگوی جریان حلقوی است.

## ۲-دستگاه آزمایش

طرح واره سیستم آزمایشگاهی که در شکل (۱) و اجزای تشکیل دهنده آن در جدول (۱) نشان داده است که شامل یک لوله با طول ۲۰۰۰ میلی متر و قطر داخلی ۳۸ میلی متر است. وقتی این دو سیال در یک لوله جریان پیدا می کنند بسته به میزان دبی آب و هوا و اساساً به دلیل خواص فیزیکی متفاوت دو سیال، الگوها و اشکال مختلفی از رژیم جریان در سطح مشترک دو فاز ایجاد می شود. همچنین دیواره شفاف لوله امکان بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل لوله حاوی سیالات تمیز آب و هوا را به ناظر بیرونی جهت فیلم برداری و تصویر برداری می دهد و امکان مشاهده بصری و ثبت رژیم های جریان توسط دوربین را مهیا می کند [۳۰]. در شرایط استاندارد، چگالی آب ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب، ویسکوزیته دینامیکی آب ۰/۰۰۱ پاسکال-ثانیه و کشش سطحی آب ۰/۷۳ نیوتن بر متر هستند. برای تأمین دبی هوای فشرده مورد نیاز از یک کمپرسور با توان ۷/۵ کیلو وات استفاده شده است. از آب شهر به عنوان فاز مایع و از هوا به عنوان فاز گاز در این آزمایش استفاده شده است. بدین منظور مطابق شکل (۲) از یک مخزن اصلی ۸۰ لیتری آب استفاده می شود که آب توسط یک پمپ در سیستم، پمپاژ می شود. آب از بالا وارد ورودی جدید طراحی شده می شود و هوا از پایین به شکل منحصر بفردی وارد لوله می شود. قطرات آب جدا شده

خروجی از دو لوله به منظور محاسبه کسر اینترینمنت نیز در یک مخزن کوچک جهت توزین، جمع‌آوری می‌شوند. هم‌هوا و هم‌قطرات مایع مازاد همراه در خروجی مقطع لوله به جو فرستاده شدند تا فشار پشت سیستم کاهش یافته و سرعت هوا افزایش یابد. دبی‌های جریان هوا و آب به ترتیب با استفاده از دبی‌سنج‌های روتامتری هوا مدل (ACA 05-25ZT) با دقت  $\pm 0.01$  مترمکعب بر ساعت و روتامتری آب مدل (Z-5008) با دقت  $\pm 0.01$  لیتر بر دقیقه برای شرایط فشار ۱۰ بار اندازه‌گیری می‌شوند. بیشترین مقدار عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری طبق استاندارد ANSI/ASME (۱۰) برای فلومتر آب  $\pm 4\%$  و برای فلومتر هوا  $\pm 4\%$  می‌باشد. دبی‌سنج‌ها با این پیشینه خطای هنگام خواندن مقادیر در حداکثر دبی عبوری، دبی‌ها را محاسبه می‌کنند بنابراین نتایج حاصل تحت هر شرایط محیطی صحیح و دقیق خواهند بود. همچنین فشارسنج‌های مورد استفاده آزمایش با دقت 3 mbar % و با بیشترین مقدار عدم قطعیت 1.38 % هستند.

آزمایش، دو مولفه اصلی داشت: بخش شیر برقی به سرعت بسته شونده و بخش نمونه‌برداری ایزوسینتیک، که در اینجا، مورد بررسی قرار می‌گیرند. چون طول لوله آزمایش کوتاه است، ورودی، تأثیری بر کسر اینترینمنت اندازه‌گیری شده توسط نمونه‌برداری ایزوسینتیک ندارد و جریان حلقوی در بخش‌های اندازه‌گیری به صورت کاملاً توسعه یافته است. یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین مشخصه‌های جریان دو فاز کسر حجمی سطح مقطع است که کسری از سطح مقطع جریان عبوری از لوله که توسط فاز گاز اشغال شده را نشان می‌دهد. مطابق این تعریف کسر حجمی برای جریان مایع کامل صفر و جریان گاز کامل یک است. تکنیک‌های زیادی برای اندازه‌گیری کسر حجمی در جریان دو فاز ابداع شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها روش بستن سریع شیر است که بر اساس گذاشتن دو شیر در قسمتی از لوله و بستن سریع دو شیر و در نهایت اندازه‌گیری حجمی گاز و مایع می‌باشد که روش دقیقی است. اما مهم‌ترین عیب آن متوقف کردن کامل جریان است. در این روش با محاسبه حجم مایع و داشتن حجم کل، کسر حجمی محاسبه شده و با استفاده از آن می‌توان ضخامت فیلم مایع را در جریان حلقوی طبق رابطه (۱) بدست آورد.

در جدول (۲) محدوده فشارها و دبی‌های مختلف در سه بخش بالا، میانه و پایین لوله ارائه شده است:

$$(1 - \alpha) = \frac{4 \times \delta}{D} \quad (1)$$

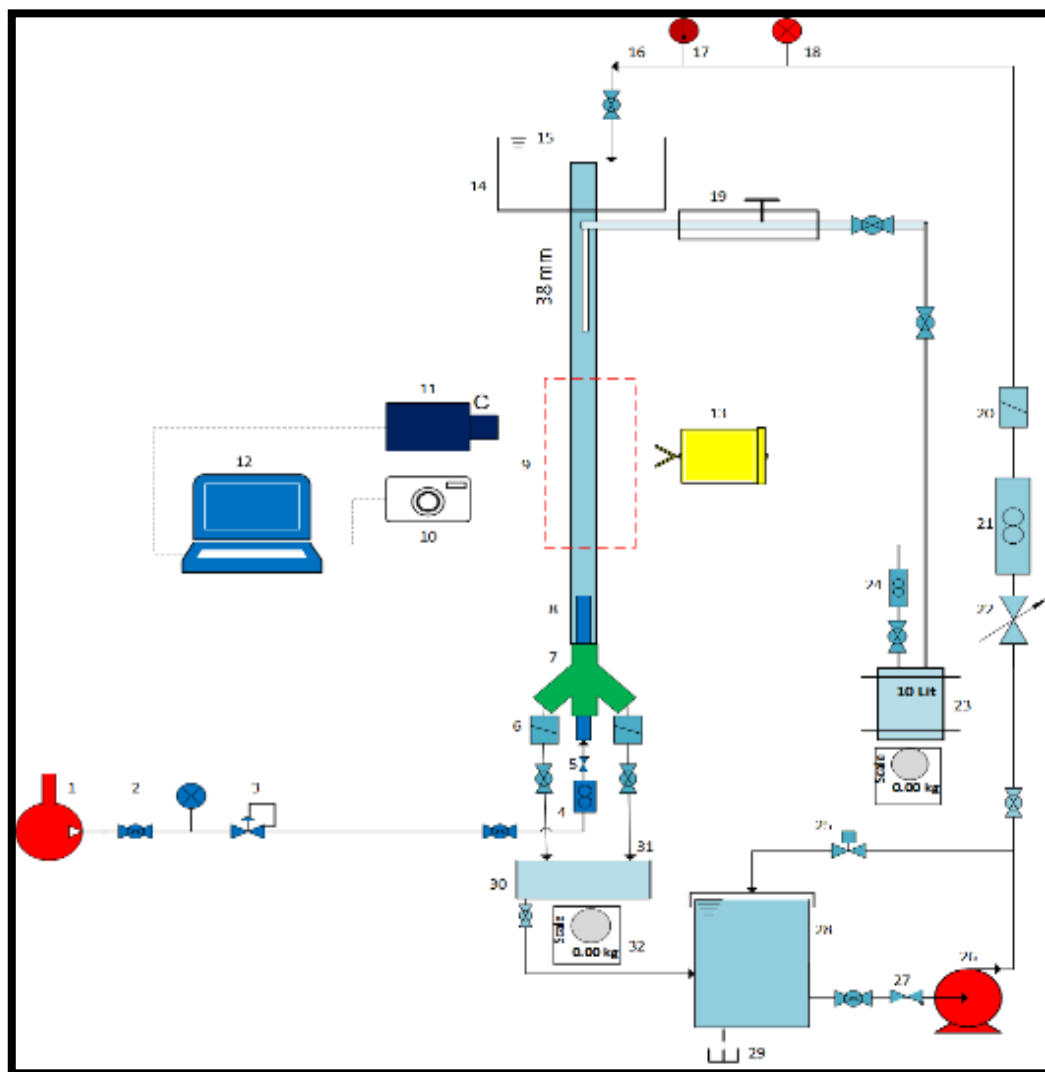
یک سیستم نمونه‌برداری ایزوسینتیک مطابق مرجع [۲] برای تعیین پارامتر کسر اینترینمنت به کار گرفته شد. این بخش در فاصله ۱۴۰۰ میلی‌متری پایین دست ورودی گاز واقع است. این سیستم یک پروب ایزوسینتیک به قطر ۷/۶ میلی‌متر، یک مخزن کوچک ۱۰ لیتری و یک روتامتر گازی دارد. برای اطمینان از شرایط ایزوسینتیک، دو شیر توپی در مسیر لوله اتصالی از پروب به مخزن ذخیره قطرات مایع، سرعت نمونه‌برداری را کنترل کردند تا اطمینان حاصل شود که سرعت گاز در پروب با سرعت گاز در لوله یکسان است. در هر آزمایش، پروب نمونه‌برداری ایزوسینتیک در عرض لوله حرکت کرد تا نمونه‌ها در مکان‌های مختلف بدست آیند. قطرات مایع از طریق پروب که به مخزن متصل بود جمع‌آوری شدند در حالی که گاز نمونه‌برداری شده از طریق روتامتر گازی به جو فرستاده شد. سپس مخزن وزن شد تا سرعت قطرات مایع و پیوستن به جریان گاز بدست آید. این حجم مایع و زمان نمونه‌برداری برای تعیین شار پارامتر کسر اینترینمنت به کار رفتند. در هر آزمایش ایزوسینتیک، اینترینمنت در پنج مکان اندازه‌گیری شد. این پنج مکان عبارتند از:  $d/6$ ،  $d/3$ ،  $d/2$  و  $2d/3$  و  $5d/6$  از انتهای لوله. در هر مکان، آزمایش به مدت ۵ دقیقه انجام شد. سپس مخزن وزن شد تا حجم مایع تعیین شود. حجم گردآوری شده  $V_E$  و زمان نمونه‌برداری  $t_s$  برای تعیین شار اینترینمنت  $E_x$  در هر مکان به صورت رابطه (۲) به کار رفتند:

$$E_x = \frac{V_E}{(A_{probe} \times t_s)} \quad (2)$$

اندازه‌گیری کسر اینترینمنت را می‌توان به صورت رابطه (۳) انجام داد [۴]. نتایج برای کسر اینترینمنت در جدول (۳) آورده شده است.

$$F_E = \frac{(\int E_x dA)}{(A_{pipe} \times u_{sl})} \quad (3)$$

برای ثبت ساختار جریان های دو فاز آب - هوا در سرعت های مختلف و به دست آوردن الگوهای جریانی مختلف، از روش ثبت تصاویر با استفاده دوربین های سرعت بالا نیکون مدل D72 با سرعت فیلم برداری ۲۴۰ فریم بر ثانیه و دوربین کاسیو مدل ( EX-ZR1200 ) با سرعت فیلم برداری ۲۴۰ فریم بر ثانیه و ثبت تصاویر با کیفیت ۱۶/۱ مگاپیکسل استفاده شده است. دوربین ها برای ثبت تصاویر در ارتفاع از سطح پایینی لوله تنظیم شده اند. فاصله دوربین از لوله ها بسته به شرایط جریان داخل لوله، بین ۱۵-۲۰ سانتی متر متغیر بوده ولی به طور متوسط تصاویر تهیه شده طولی معادل ۱۵ سانتی متر از لوله را به طور واضح پوشش می دهند. همچنین نور سفید با فاصله مناسب از پشت لوله آزمایش به صفحاتی مات و سفید می تابد که این صفحات موجب پخش شدن نور به بخش وسیع تری از داخل لوله شده و منجر به متمرکز کردن لنز از دوربین بر روی ساختار جریان می شود که تأثیر بسیار به سزایی بر افزایش کیفیت تصاویر ثبت شده دارد. در این سیستم آزمایشگاهی قبل از ورود گاز به لوله آزمایش، یک شیر یک طرفه و یک شیر برقی نصب شده است که تا حد زیادی از نفوذ و برگشت آب در مسیر هوا جلوگیری می شود. هوا از طریق لوله ورودی با قطر داخلی ۲۰ میلی متر از پایین و آب از طریق لوله ورودی با قطر داخلی ۱۵ میلی متر از بالا وارد محفظه لوله آزمایش می شود.



شکل ۱: طرح واره دستگاه آزمایشگاهی برای جریان دوفاز

جدول ۱: اجزای تشکیل دهنده دستگاه آزمایش دوفازی عمودی

| شماره و نام تجهیز | شماره و نام تجهیز   | شماره و نام تجهیز | شماره و نام تجهیز |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| کمپرسور هوا       | لوله آزمایش         | - شیر دروازه ای   | - شیر برقی        |
| شیر توپی گاز      | - پروژکتور          | - ترازوی دیجیتال  | - دبی سنج آب      |
| فشار سنج          | - دوربین دیجیتال    | - مخزن            | - شیر دروازه ای   |
| رگولاتور گاز      | - دوربین فیلمبرداری | - تخلیه           | - مخزن آب         |
| دبی سنج گاز       | - لپ تاپ            | - شیر توپی        | - گیج فشار        |
| شیر یکطرفه گاز    | - شیر برقی          | - شیر یکطرفه      | - ترمومتر آب      |
| سه راهی           | - شیر توپی          | - پمپ             | - شیر توپی        |
| ورودی گاز         | - مخزن              | - شیر برقی        | - مخزن آب         |

جدول ۲: نتایج داده های آزمایشگاهی برای ضخامت فیلم مایع

| شماره آزمایش | فشارورودی گاز<br>bar | دبی حجمی مایع<br>$m^3/s$ | مساحت جانبی لوله<br>$m^2$ | حجم لوله<br>$m^3$     | ضخامت فیلم مایع<br>mm |
|--------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| بالا - 1-1   | 6                    | $6/53 \times 10^{-5}$    | 0/2386                    | $2/88 \times 10^{-4}$ | 1/21                  |
| میانه - 1-2  | 6                    | $6/53 \times 10^{-5}$    | 0/2386                    | $2/19 \times 10^{-4}$ | 0/92                  |
| پایین - 1-3  | 6                    | $6/53 \times 10^{-5}$    | 0/2386                    | $1/93 \times 10^{-4}$ | 0/81                  |
| بالا - 2-1   | 8                    | $5/92 \times 10^{-5}$    | 0/2386                    | $2/31 \times 10^{-4}$ | 0/97                  |
| میانه - 2-2  | 8                    | $5/92 \times 10^{-5}$    | 0/2386                    | $2/05 \times 10^{-4}$ | 0/86                  |
| پایین - 2-3  | 8                    | $5/92 \times 10^{-5}$    | 0/2763                    | $1/74 \times 10^{-4}$ | 0/73                  |
| بالا - 3-1   | 10                   | $1/06 \times 10^{-4}$    | 0/2386                    | $1/86 \times 10^{-4}$ | 0/78                  |
| میانه - 3-2  | 10                   | $1/06 \times 10^{-4}$    | 0/2386                    | $1/50 \times 10^{-4}$ | 0/63                  |
| پایین - 3-3  | 10                   | $1/06 \times 10^{-4}$    | 0/2386                    | $1/33 \times 10^{-4}$ | 0/56                  |

جدول ۳: نتایج داده های آزمایشگاهی برای کسر اینترینمنت

| شماره آزمایش | فشارورودی گاز<br>bar | دبی حجمی مایع<br>$m^3/s$ | مساحت هسته<br>$m^2$ | حجم قطرات همراه گاز<br>$m^3$ | کسر اینترینمنت |
|--------------|----------------------|--------------------------|---------------------|------------------------------|----------------|
| ۱            | ۴                    | ۰/۰۰۰۱۱                  | ۰/۰۰۱۴۸۹            | ۰/۰۰۱                        | ۰/۱۹۸          |
| ۲            | ۶                    | ۰/۰۰۰۱۲۷                 | ۰/۰۰۱۴۸۱            | ۰/۰۰۱۴                       | ۰/۲۴۲          |
| ۳            | ۸                    | ۰/۰۰۰۱۴۲                 | ۰/۰۰۱۴۷۴            | ۰/۰۰۱۶۵                      | ۰/۲۵۱          |
| ۴            | ۱۰                   | ۰/۰۰۰۱۵۸                 | ۰/۰۰۱۴۶۸            | ۰/۰۰۱۹                       | ۰/۲۵۸          |

### ۳- محدودیت های عملیاتی در جریان ناهمسو

برای اطمینان از تشکیل شدن الگوی جریان حلقوی باید شرایط بوجود آمدن فلائینگ و محدودیت های جریان ناهمسو را نیز در نظر گرفت. محدودیت های جریان ناهمسو بیانگر نکات مهم و اساسی است که می بایست در طراحی و تحلیل هر سیستم دوفازی گازمایع با جریان ناهمسو مورد توجه قرار گیرد. در شکل (۲) یک مخزن بزرگ مایع از طریق لوله ای عمودی که در پایین آن قرار دارد به یک مخزن انتهایی متصل شده است. همچنین هوا می تواند از طریق لوله تزریقی به مخزن بالایی وارد

شود. در شرایطی که هیچ گازی به سیستم تزریق نمی شود جریان مایع می تواند آزادانه به سمت پایین حرکت کند و میزان جریان مایع صرفاً توسط اصطکاک دیواره و دیگر عوامل افت فشار محدود می شود. حال شرایطی را در همین سیستم در نظر می گیریم که یک جریان بالا رونده گاز با میزان سرعت جریان ثابت  $u_{SG}$  در حالتی که مخزن مایع خالی است به سیستم اعمال می شود. سپس مایع با یک نرخ افزایشی به داخل مخزن تزریق می شود تا جایی که نرخ جریان پایین رونده مایع در لوله قابل اندازه گیری باشد. جریان گاز بالا رونده در این حالت یک نیروی برشی فصل مشترک را بر مایع اعمال می کند. که نرخ نفوذ مایع پایین رونده را به شکل جدی محدود می کند. در این حالت الگوی جریان به شکل حلقوی بوده و متشکل از یک فیلم مایع ریزان در سرتا سر دیواره است که فاز گاز از میان این حلقه بالا می رود. در این الگوی جریانی  $\tau_i \ll \tau_w$  و محدودیت ها صرفاً در انتهای بالایی لوله بوده و فیلم مایع آزادانه در داخل کانال جریان می یابد. در صورتی که سیستم تحت آزمایش، به نحوی تغییر کند که امکان افزایش تدریجی میزان جریان گاز در یک میزان جریان ثابت از جریان مایع وجود داشته باشد مشاهدات ساده دیگری نیز پیدا خواهد شد. اما با افزایش جریان فاز گاز شاهد کاهش میزان جریان مایع پایین رونده خواهیم بود که تا سرعت امکان  $9/303$  متر بر ثانیه بوجود آمدن الگوی جریان حلقوی وجود دارد با این تفاوت که مرزهای بین فازی مایع-گاز دارای حالتی آشفته و موج دار به صورت فیلم ناصاف هستند. در این حالت  $\tau_i \gg \tau_w$  بوده و محدودیت های جریانی در انتهای پایینی لوله پدیدار می شود. با افزایش سرعت جریان فاز گاز به بیش از  $9/303$  متر بر ثانیه شاهد کاهش میزان جریان مایع پایین رونده و قطع آن با توجه به محدودیت های معادله والیس (۶) خواهیم بود [۲۷، ۲۳]. حداقل سرعت ظاهری فاز گاز در شرایطی که نفوذ مایع صفر است به صورت معادله (۴) و (۵) بدست می آید که نتایج آن برای لوله  $38$  میلی متر در جدول (۴) آورده شده است.

$$\sqrt{u_{SG,min}^*} = c \quad (4)$$

$$u_{SG,min} = c^2 \times \sqrt{\frac{g \times D \times \Delta \rho}{\rho_G}} \quad (5)$$

جدول ۴: حداقل سرعت ظاهری فاز گاز جهت بوجود آمدن الگوی جریان حلقوی طبق معادله والیس [۲۳]

| $\rho_L$<br>kg/m <sup>3</sup> | $\rho_G$<br>kg/m <sup>3</sup> | $D$<br>m | $\Delta \rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | $g$<br>m/s <sup>2</sup> | $u_{SG}$<br>m/s | $c$   | $u_{SG,min}$<br>m/s | $\dot{m}$<br>kg/s |
|-------------------------------|-------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|-----------------|-------|---------------------|-------------------|
| ۹۹۷                           | ۱/۱۸۵                         | ۰/۰۳۸    | ۹۹۵/۸۱۵                            | ۹/۸۱                    | ۱               | ۰/۷۲۵ | ۹/۳۰۳               | ۰/۱۶۴             |
| ۹۹۷                           | ۱/۱۸۵                         | ۰/۰۳۸    | ۹۹۵/۸۱۵                            | ۹/۸۱                    | ۳               | ۰/۷۲۵ | ۹/۳۰۳               | ۰/۶۷۶             |
| ۹۹۷                           | ۱/۱۸۵                         | ۰/۰۳۸    | ۹۹۵/۸۱۵                            | ۹/۸۱                    | ۱۲              | ۰/۷۲۵ | ۹/۳۰۳               | ۰/۰۰۷             |

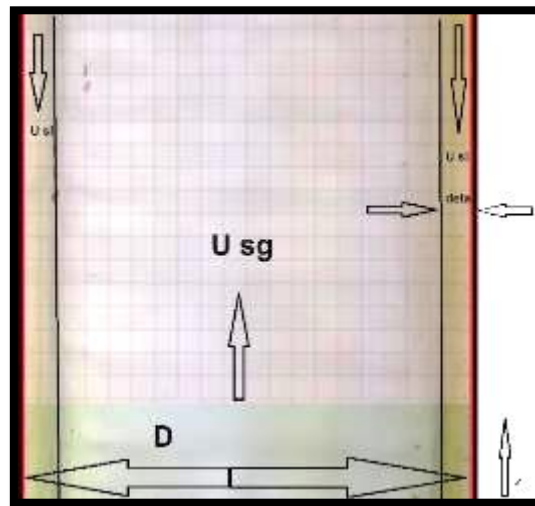
بنابراین شروع محدودیت های عملیاتی جریان ناهمسو مانند فلاپینگ از زمانی است که ادامه الگوی اصلی جریان به واسطه این گونه برهم کنش ها امکان پذیر نباشد. معادله والیس یکی از پرکاربردترین معادلات فلاپینگ است. معادله والیس در شرایط مشابه آزمایش شکل (۲) تا حد بسیار زیادی قابل قبول بوده و به صورت معادله (۶)، (۷) و (۸) بیان می شود:

$$u_{SG}^{*0.5} + m \times u_{SL}^{*0.5} = C \quad (6)$$

$$u_{SG}^* = u_{SG} \times \sqrt{\rho_G / g \times \Delta \rho \times D} \quad (7)$$

$$u_{SL}^* = u_{SL} \times \sqrt{\rho_L / g \times \Delta \rho \times D} \quad (8)$$

$m = c = 1$  ساده‌ترین حالت این معادله است. در این حالت از کلیه برهم‌کنش‌های بین دو فاز صرف‌نظر می‌شود. البته این معادله می‌تواند با توجه به شرایط ورودی و خروجی لوله مقادیر متفاوتی از  $m$  و  $c$  را به خود گرفته و به شکل یک معادله تجربی بیان شود. این دو پارامتر تقریباً در بازه‌هایی به شکل  $m = 0.8 - 1$  و  $c = 0.7 - 1$  تغییر می‌کنند و قویاً تابعی از ساختار لوله و تأثیرات انتهای لوله هستند. پارامتر  $C$  بیش از هر چیزی به شرایط ورودی فاز مایع وابسته است، در صورتی که این لبه‌ها نوک تیز داشته باشند طبق تحقیقات والیس  $C = 0.725$  توصیه می‌شود. بر اساس معادله والیس در شرایط طغیان، قطر لوله به نحو موثری بر سرعت‌های ظاهری هر یک از فازها تأثیر گذار است. جریان ناهمسو در لوله عمودی مشابه شکل (۳) را با فرض اینکه هیچگونه محدودیت عملیاتی وجود ندارد در نظر می‌گیریم. با فرض شرایط یکنواخت و تعادلی معادلات ممنتوم مخلوط فازها و فاز گاز به ترتیب (۹) و (۱۰) خواهد بود:



شکل ۲: الگوی حلقوی مشاهده شده در جریان ناهمسو برای لوله با قطر داخلی ۳۸ میلی‌متر

$$-\frac{dp}{dz} + \frac{4}{D} \times \tau_w - [\rho_L(1 - \alpha) + \rho_G \times \alpha] \times g = 0 \quad (9)$$

$$-\frac{dp}{dz} \times \alpha + \frac{4 \times \tau_i \times \sqrt{\alpha}}{D} - \rho_G \times \alpha \times g = 0 \quad (10)$$

با حذف پارامتر افت فشار از دو معادله بالا به رابطه (۱۱) می‌رسیم، از طرفی مانند معادله (۱۲) برای تنش برشی دیواره داریم:

$$\frac{4 \times \tau_w}{D} - \frac{4 \times \tau_i}{D \times \sqrt{\alpha}} = (\rho_L - \rho_G) \times g \times (1 - \alpha) \quad (11)$$

(۱۲)

$$\tau_w = \frac{1}{2} \times f_w \times \rho_L \times \frac{u_{SL}^2}{(1 - \alpha)^2} \quad (12)$$

برای تنش برشی فصل مشترک ابتدا باید مفهوم پدیده اینترینمنت را بدانیم. در جریان حلقوی یک ناصافی در سطح مایع به وجود می‌آید که در جریان حلقوی هوا در وسط و مایع در اطراف است. بنابراین جریان هوا یا گاز در میان باعث یک ناصافی یا ناهمواری در سطح مایع می‌شود، زیرا مایع سرعت کمتری از گاز دارد و قطراتی را که از سطح مایع جدا می‌کند به همراه بخار یا گاز به حرکت در می‌آید. بنابراین به قطراتی که از مایع جدا شده و به همراه گاز به حرکت در می‌آیند اینترینمنت گفته می‌شود. و با حرف  $e$  نشان داده می‌شود که محدوده آن بین  $0 \leq e \leq 1$  می‌باشد. برای محدوده اینترینمنت ابتدا و انتها به صورت زیر می‌باشد: اگر هیچ قطره‌ای از مایع جدا نشده باشد ( $e=0$ ) و اگر همه قطرات از مایع جدا شده باشند ( $e=1$ ). این پدیده باعث می‌شود که چگالی گاز بیشتر از چگالی گاز خالص باشد و به چگالی مخلوط  $\rho_{mix}$  برسد، در این صورت عدد رینولدز به صورت  $Re(1-e)$  در می‌آید که در محاسبات با وجود اینترینمنت باید لحاظ گردد. بنابراین اگر  $e=0$  باشد آن گاه تنش برشی فصل مشترک به صورت معادله (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$\tau_i = \frac{1}{2} \times f_i \times \rho_G \times \left( \frac{u_{SG}^2}{\alpha^2} - \frac{u_{SL}^2}{(1-\alpha)^2} \right) \quad (13)$$

$f_i$  و  $f_w$  ضرایب اصطکاک دیواره و فصل مشترک هستند. باید توجه داشت که در شرایط نزدیک به حالت فلاپینگ سرعت فاز مایع بسیار کمتر از سرعت فاز گاز است. لذا با در نظر گرفتن این مطلب می توان از عبارت  $\frac{u_{SL}^2}{(1-\alpha)^2}$  در معادله (۱۳) صرف نظر نمود. از ترکیب سه معادله فوق خواهیم داشت:

$$\frac{2f_i}{\alpha^{2/5}} \times u_{SG}^{*2} + \frac{2f_w}{(1-\alpha)^2} \times u_{SL}^{*2} - (1-\alpha) = 0 \quad (14)$$

برای هر مقدار مشخص  $\alpha$  در بازه قابل قبول جهت شکل گیری رژیم جریان حلقوی معادله (۱۴) در فرم منحنی  $u_{SL}^*$  برحسب  $u_{SG}^*$  انحنای ایجاد می نماید. طبیعی است که هر چه معادلات دقیق تری جهت پیش بینی  $f_w$  و  $f_i$  استفاده شود صحت منحنی به دست آمده از معادله (۱۴) بیشتر خواهد بود. شکل (۵) نمونه ای از منحنی های رسم شده را نشان می دهد. جهت پیش بینی ضرایب اصطکاک دیواره و فصل مشترک از فرمول های (۱۵) و (۱۶) استفاده می کنیم [۲۳]:

$$f_{wall} = \frac{0.079}{(Re_L)^{0.25}} = \frac{0.079}{\left( \frac{\rho_L \times u_{SL} \times D}{\mu_L} \right)^{0.25}} \quad (15)$$

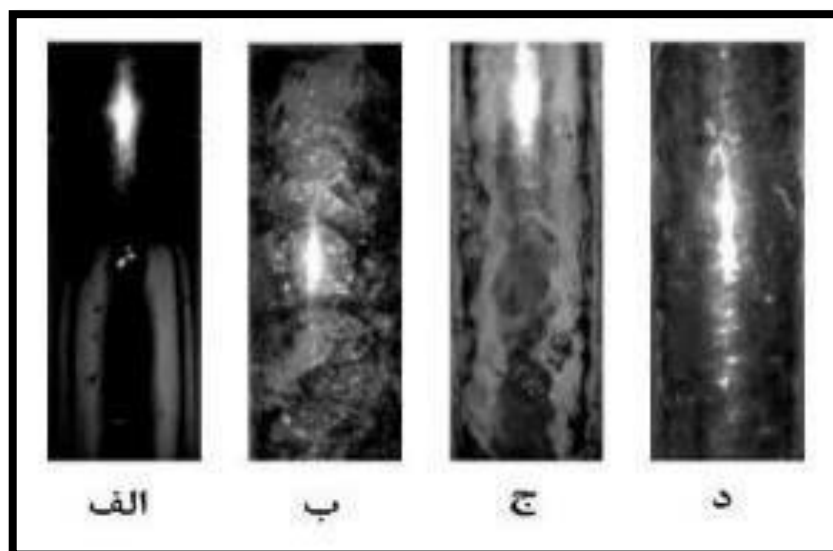
$$f_{interface} = \frac{0.079}{(Re_{shear})^{0.25}} = \frac{0.079}{\left( \frac{\rho_g \times u_{sg} \times (D-2\delta)}{\mu_g} \right)^{0.25}} \quad (16)$$

#### ۴- نتایج و یافته ها

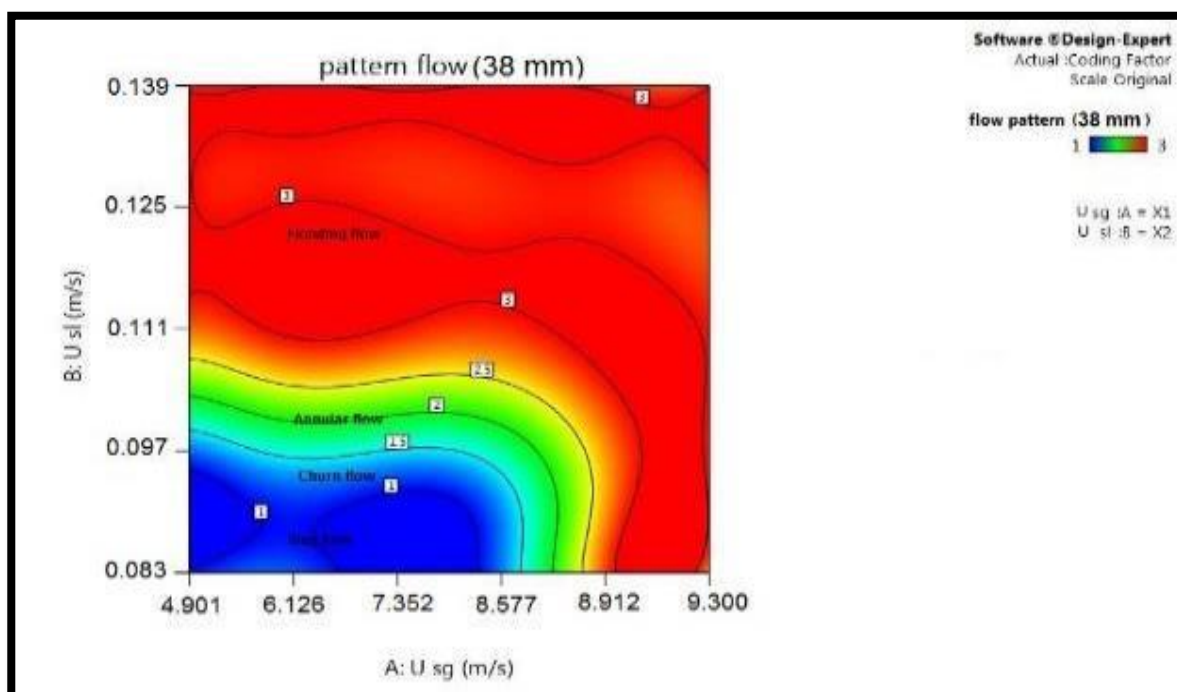
##### ۴-۱- تعیین الگوی جریان

برای این لوله نسبت طول به قطر داخلی  $L/D=52.63$  بوده و آزمایش برای ۱۲۵ حالت انجام شده است. محدوده ی سرعت ظاهری آب بین  $0.139-0.83$  متر بر ثانیه و محدوده ی سرعت ظاهری هوا بین  $9.30-4.90$  متر بر ثانیه می باشد. الگوهای مشاهده شده در این حالت شامل الگوهای اصلی لخته ای - متلاطم، حلقوی و جریان طغیان می باشد. از یک سو با توجه به از هم پاشیدن سریع تر حباب های تیلور، بخشی از رژیم لخته ای در لوله به جریان کف آلود تبدیل شده است (شکل ۳- الف) و از سوی دیگر با افزایش حجم آب درون لوله، هوا قدرت کمتری برای نفوذ به مرکز لوله دارد و بخشی از رژیم حلقوی نیز در این لوله با رژیم کف آلود جایگزین شده است (شکل ۳- ب). سپس در این وضعیت ترکیبی از هر دو رژیم کف آلود و حلقوی مشاهده شده است. سپس رژیم حلقوی مشاهده می گردد که در واقع افزایش محدوده ی ناشی از ناتوانی فاز گاز در راندن آب و تشکیل جریان طغیان است که در نتیجه آن بخشی از نقاط متناظر با جریان طغیان جزئی در لوله، در شرایط فعلی به رژیم حلقوی، تغییر یافته است. همان طور که پیش تر اشاره شد، محدوده ی رژیم متلاطم با مقداری گسترش همراه بوده که باعث به تأخیر افتادن شروع رژیم حلقوی است (شکل ۳- ج). در انتها، جریان طغیان تغییرات نسبتاً زیادی را محدوده ی خود متحمل شده است. جریان طغیان مشاهده شده در راندن کامل آب به خارج از لوله ناتوان بوده و تعادل ناشی از اندر کنش بین مومنتم گاز و نیروی جاذبه ی مایع در سطح مقطعی از لوله اتفاق می افتد (شکل ۳- د). وقوع فلاپینگ با روش اینترنمنت در لوله با قطر ۳۸ میلی متر و بزرگتر با دبی های کم مایع رخ می دهد زمانی که دبی گاز افزایش می یابد قطرات کوچکی در نزدیکی خروجی مایع شکل می گیرد اما این قطرات در همین ناحیه دوباره به فیلم مایع برمی گردند با افزایش بیشتر دبی گاز تعداد قطرات افزایش می یابد و در قسمت های بالاتر مقطع قابل مشاهده هستند با افزایش کافی دبی گاز قطرات در بالاتر از ورودی مایع تا خروجی گاز قابل مشاهده هستند در این شرایط قسمت کمی از دبی مایع از بالای لوله خارج می شود که این مقدار قابل اندازه گیری می باشد فلاپینگ در این مرحله رخ داده است امواج بزرگ که به سمت بالا حرکت می کنند مشاهده نمی شود اما در بعضی موارد امواجی فقط در نیمه پایینی لوله دیده می شود با افزایش بیشتر جریان گاز فقط تعداد قطرات افزایش می یابد و امواجی بالا رونده به وجود

نمی‌آید در هنگام فلادینگ در این مکانیزم افت فشار افزایش نمی‌یابد ملاک قرار دادن افت فشار برای وقوع فلادینگ در این مکانیزم نادرست می‌باشد. الگوهای جریان مشاهده در لوله ۳۸ میلی‌متر، در شکل (۴) نمایش داده شده است. در این تصویر که بر اساس نرم افزار design expert طراحی شده است کد ۱: slug flow، کد ۲: annular flow، کد ۳: flooding flow می‌باشد. جریان کف آلود به دلیل اینکه جریان ناپایدار می‌باشد در کد گذاری آورده نشده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌گردد، الگوی جریان مناسب مورد استفاده در این آزمایش حلقوی می‌باشد.



شکل ۳: الگوهای جریان مشاهده شده برای لوله با قطر ۳۸ میلی‌متر (الف) لخته ای، (ب) کف آلود، (ج) حلقوی، (د) جریان طغیان



شکل ۴: الگوهای جریان برای لوله ۳۸ میلی‌متر

با توجه به نتایج آزمایشگاهی مقادیر جدول (۵) جهت ورود به نرم افزار دیزاین اکسپرت انتخاب گردید.

جدول ۵: نتایج داده های آزمایشگاهی برای ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت برای لوله ۳۸ میلی متر

| e     | $\delta(mm)$ | $1 - \alpha$ | FROUD N | WEBER N | $f_i$ | $f_{wall}$ | $u_{sl}$ | $u_{sg}$ |
|-------|--------------|--------------|---------|---------|-------|------------|----------|----------|
| ۰/۰۲۷ | ۰/۴۱۳        | ۰/۰۴         | ۰/۰۱۹   | ۱۵/۰۰۵  | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۸۳    | ۴/۹۰۱    |
| ۰/۰۵۴ | ۰/۳۰۰        | ۰/۰۳         | ۰/۰۱۹   | ۲۳/۴۴۵  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۸۳    | ۶/۱۲۶    |
| ۰/۰۸۰ | ۰/۲۳۳        | ۰/۰۲         | ۰/۰۱۹   | ۳۳/۷۶۰  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۸۳    | ۷/۳۵۲    |
| ۰/۱۰۷ | ۰/۱۸۸        | ۰/۰۲         | ۰/۰۱۹   | ۴۵/۹۵۱  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۸۳    | ۸/۵۷۷    |
| ۰/۱۳۴ | ۰/۱۵۷        | ۰/۰۲         | ۰/۰۱۹   | ۵۴/۱۶۶  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۸۳    | ۹/۳۰     |
| ۰/۱۳۸ | ۰/۴۷۴        | ۰/۰۵         | ۰/۰۲۵   | ۱۵/۰۰۵  | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۹۷    | ۴/۹۰۱    |
| ۰/۱۶۱ | ۰/۳۴۵        | ۰/۰۴         | ۰/۰۲۵   | ۲۳/۴۴۵  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۹۷    | ۶/۱۲۶    |
| ۰/۱۸۴ | ۰/۲۶۷        | ۰/۰۳         | ۰/۰۲۵   | ۳۳/۷۶۰  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۹۷    | ۷/۳۵۲    |
| ۰/۲۰۶ | ۰/۲۱۵        | ۰/۰۲         | ۰/۰۲۵   | ۴۵/۹۵۱  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۹۷    | ۸/۵۷۷    |
| ۰/۲۲۹ | ۰/۱۷۹        | ۰/۰۲         | ۰/۰۲۵   | ۵۴/۱۶۶  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۱      | ۰/۰۹۷    | ۹/۳۰     |
| ۰/۲۲۱ | ۰/۵۳۶        | ۰/۰۶         | ۰/۰۳۳   | ۱۵/۰۰۵  | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۱۱    | ۴/۹۰۱    |
| ۰/۲۵۱ | ۰/۳۸۹        | ۰/۰۴         | ۰/۰۳۳   | ۲۳/۴۴۵  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۱۱    | ۶/۱۲۶    |
| ۰/۲۶۱ | ۰/۳۰۱        | ۰/۰۳         | ۰/۰۳۳   | ۳۳/۷۶۰  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۱۱    | ۷/۳۵۲    |
| ۰/۲۷۱ | ۰/۲۴۲        | ۰/۰۳         | ۰/۰۳۳   | ۴۵/۹۵۱  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۱۱    | ۸/۵۷۷    |
| ۰/۲۸۱ | ۰/۲۰۱        | ۰/۰۲         | ۰/۰۳۳   | ۵۴/۱۶۶  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۱۱    | ۹/۳۰     |
| ۰/۲۵۹ | ۰/۵۹۷        | ۰/۰۶         | ۰/۰۴۲   | ۱۵/۰۰۵  | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۲۵    | ۴/۹۰۱    |
| ۰/۲۶۸ | ۰/۴۳۳        | ۰/۰۵         | ۰/۰۴۲   | ۲۳/۴۴۵  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۲۵    | ۶/۱۲۶    |
| ۰/۲۷۷ | ۰/۳۳۴        | ۰/۰۴         | ۰/۰۴۲   | ۳۳/۷۶۰  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۲۵    | ۷/۳۵۲    |
| ۰/۲۸۵ | ۰/۲۶۹        | ۰/۰۳         | ۰/۰۴۲   | ۴۵/۹۵۱  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۲۵    | ۸/۵۷۷    |
| ۰/۲۹۴ | ۰/۲۲۳        | ۰/۰۲         | ۰/۰۴۲   | ۵۴/۱۶۶  | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۱۰      | ۰/۱۲۵    | ۹/۳۰     |

#### ۴-۲- آنالیز آماری

در راستای یافتن بهترین شرایط برای محاسبه ضخامت فیلم مایع بی بعد شده و کسر اینترینمنت، از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> و هیستوریکال دیتا، استفاده شد. روش سطح پاسخ، مجموعه ای از روشهای ریاضی و آماری است که برای مدلسازی و تجزیه و تحلیل مسائلی مورد استفاده قرار می گیرد که در آنها پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر گوناگون قرار دارد. هدف از اعمال این روش، یافتن بهترین مجموعه از سطوح عامل برای رسیدن به بعضی ویژگی های خاص و مورد نظر می باشد یا به عبارت دیگر انتخاب بهترین حالات طرح یا مدل که بهترین نتیجه را داشته باشد. این روش باعث تسهیل روند تحقیق، کاهش زمان و هزینه ها خواهد شد. کیفیت مدل های مناسب نیز از طریق بررسی ضریب همبستگی و ضریب همبستگی تنظیم شده مورد بررسی قرار می گیرند و هر مدلی که شرایط فوق را پاس کند دارای بهترین شرایط در پاسخ خواهد بود. طرح انتخابی، طرح هیستوریکال دیتا بود که بر این اساس ۴۰ داده آزمایش مربوط به جریان حلقوی به نرم افزار طراحی دیزاین اکسپرت وارد و نتایج ارائه گردید. به منظور تحلیل داده ها از روش سطح پاسخ و مدل استفاده شده از نوع Quadratic می باشد. متغیرهای ورودی برای این بخش شامل عدد رینولدز فاز گاز ( $Re_{sg}$ )، عدد رینولدز فاز مایع ( $Re_{sl}$ ) و متغیرهای خروجی مورد بررسی شامل  $(\frac{\delta}{d})$  و کسر  $e$  برای لوله عمودی شفاف با قطر داخلی 38 میلی متر استفاده شده است. نرم افزار از دو پارامتر آماری P-value و F-value به منظور بررسی پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه استفاده می کند. همان گونه که در تنظیمات این نرم افزار تعریف شده است، مقادیر P-value هنگامی که  $P < 0.05$  و F-value هنگامی که  $F > 100$  باشد آن متغیر معنی دار است و در غیر این صورت متغیر معنی دار نبوده و آن متغیر را می بایست حذف کنیم. در این تحلیل از دو فاکتور کمی عدد رینولدز

<sup>2</sup> Response Surface

گاز (A: Re<sub>sg</sub>) و عدد بی بعد فروود (B: Froude) به منظور بررسی و تحلیل کسر  $e$  و از دو فاکتور کمی عدد رینولدز مایع (A: Re<sub>sl</sub>) و عدد بی بعد وبر (B: Weber) برای  $\left(\frac{\delta}{d}\right)$  استفاده شده است. به منظور بررسی نتایج مدل های آماری نرم افزار از طریق مقایسه و بررسی ضریب همبستگی، میانگین حداقل خطای مربعات، F-value و P-value، بررسی مدل ANOVA، بررسی تصویری و گرافیکی تاثیر متغیرهای مستقل استفاده شده است. هر کدام از مقادیر A و B و حاصلضرب A در B نشان داده شده در جدول (۶) به ترتیب نشان دهنده ی عدد رینولدز فاز گاز و مایع، عدد بدون بعد فروود و وبر در هر حالت و حاصلضرب آن ها می باشد. جدول (۶) نتایج ارائه شده برای میزان  $\left(\frac{\delta}{d}\right)$  و کسر  $e$  برای لوله ۳۸ میلی متر می باشد. مقادیر P-value و F-value نشان داده شده، گویای این مطلب است که متغیرهای ورودی A، B، AB و A<sup>2</sup> برای تعیین ضخامت فیلم مایع در لوله ۳۸ میلی متری معنی دار بوده ولی ترم B<sup>2</sup> که معرف توان دوم متغیر Re<sub>sl</sub> می باشد یک مقدار بی معنی می باشد. متغیرهای ورودی A، B، AB و B<sup>2</sup> برای تعیین کسر  $e$  در لوله ۳۸ میلی متری معنی دار بوده ولی ترم A<sup>2</sup> که معرف توان دوم متغیر Re<sub>sg</sub> می باشد برای تعیین کسر  $e$  بی معنی می باشد و از محاسبات حذف خواهند شد. حذف این پارامترها تاثیر بسیار زیادی در پیش بینی بهتر مقدار کسر  $e$  و  $\left(\frac{\delta}{d}\right)$  برای لوله ۳۸ میلی متر را نشان می دهد.

جدول ۶: تجزیه و تحلیل مدل ANOVA به منظور تعیین اثربخشی پارامترهای ورودی در تعیین میزان ضخامت فیلم مایع بی بعد شده و کسر اینترینمنت برای لوله با قطر داخلی ۳۸ میلی متر.

| پارامتر مدل     | Source              | Sum of squares | df | Mean square error | F-value | p-value  |
|-----------------|---------------------|----------------|----|-------------------|---------|----------|
| ضخامت فیلم مایع | Model               | 0.0003         | 5  | 0.0001            | 427.64  | < 0.0001 |
|                 | A- Re <sub>sl</sub> | 0.00001        | 1  | 0.00001           | 93.41   | < 0.0001 |
|                 | B-Weber N           | 0.0002         | 1  | 0.0002            | 1593.6  | < 0.0001 |
|                 | AB                  | 5.98E-06       | 1  | 5.98E-06          | 42.9    | < 0.0001 |
|                 | A <sup>2</sup>      | 0.0001         | 1  | 0.0001            | 116.58  | < 0.0001 |
|                 | B <sup>2</sup>      | 0.00001        | 1  | 0.00001           | 3.22    | 0.0886   |
|                 | Residual            | 2.65E-06       | 19 | 1.39E-07          | -       | -        |
|                 | Cor Total           | 0.0003         | 24 |                   | -       | -        |
| کسر اینترینمنت  | Model               | 0.1662         | 6  | 0.0277            | 1016.7  | < 0.0001 |
|                 | A-Re <sub>sg</sub>  | 0.0035         | 1  | 0.0035            | 128.33  | < 0.0001 |
|                 | B-Froude N          | 0.0059         | 1  | 0.0059            | 216.21  | < 0.0001 |
|                 | AB                  | 0.0025         | 1  | 0.0025            | 92.51   | < 0.0001 |
|                 | A <sup>2</sup>      | 0.0000         | 1  | 0.0000            | 5.87    | 0.0262   |
|                 | B <sup>2</sup>      | 0.0258         | 1  | 0.0258            | 947.9   | < 0.0001 |
|                 | Residual            | 0.0005         | 18 | 0.0000            | -       | -        |
|                 | Cor Total           | 0.1667         | 24 | -                 | -       | -        |

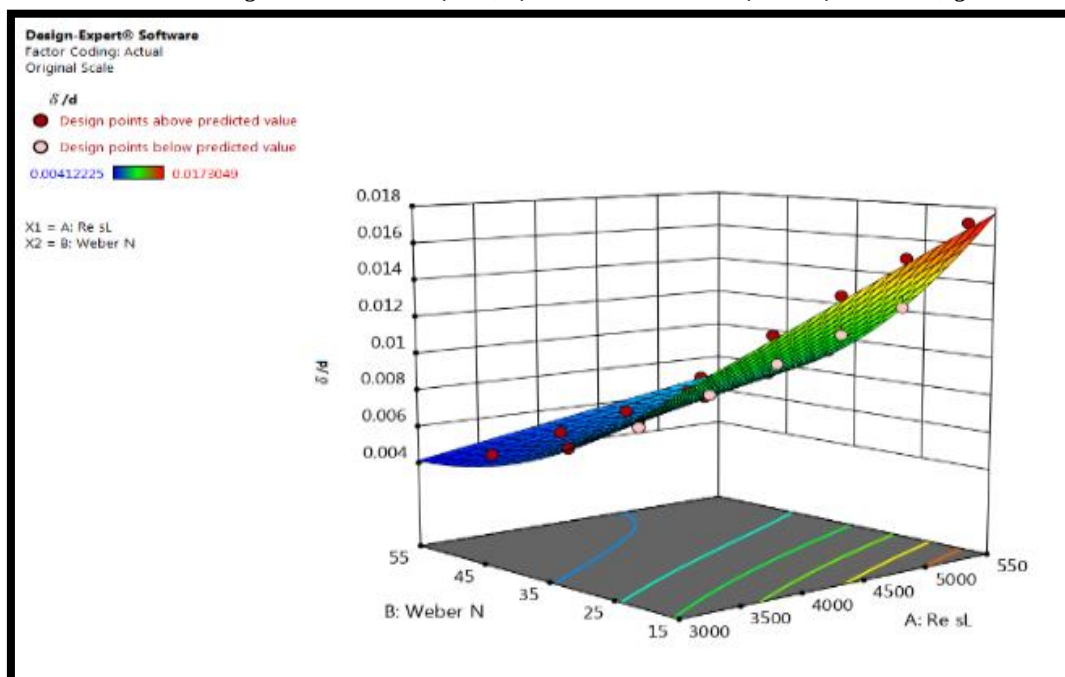
پاسخ های مورد بررسی شامل ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت در جدول (۶) آورده شده است. در مورد هر دو پاسخ مقادیر بهینه شده با مدل درجه دو تعریف شدند. ضریب تعیین تعدیل شده R<sup>2</sup> برای مقدار ضخامت فیلم مایع بی بعد شده و کسر اینترینمنت برای لوله عمودی ۳۸ میلی متر به ترتیب 0.9889 و 0.9961 می باشد. این نتایج نشان می دهد که دقت عملکرد مدل های ارائه شده برای لوله عمودی ۳۸ میلی متر برای یافتن مقدار ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت در حد بالا می باشد. با بررسی مقادیر جدول (۶)، نتیجه می شود که با توجه به دید تجربی و مهندسی بهتر است مدل همبستگی بدست آمده DOE براساس اعداد بدون بعد وبر، فروود و رینولدز برای پیش بینی ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت باشد. فرمول های نهایی برای ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت برای لوله ۳۸ میلی متر خروجی از نرم افزار از داده های جدول زیر به صورت معادلات (۱۷) و (۱۸) و شکل های (۵) و (۶) می باشد:

(۱۷)

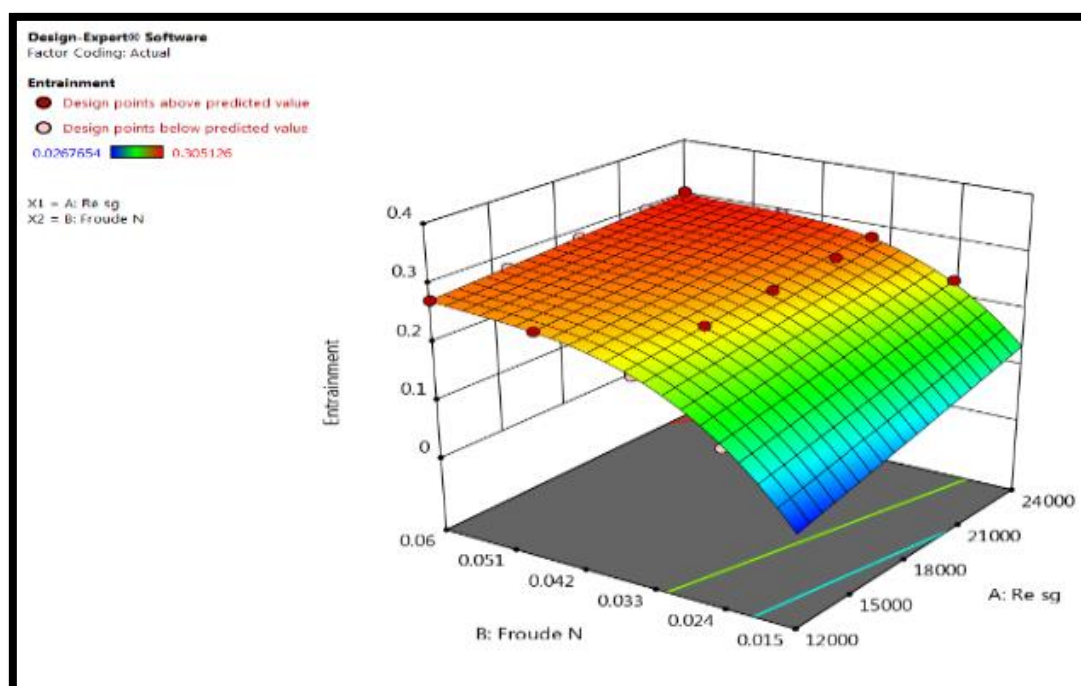
$$\left(\frac{\delta}{d}\right) = 0.0016 + 4.67 \times 10^{-6} \times N_{Re,sl} - 0.000033 N_{we,sg} - 1.283 \times 10^{-7} \times N_{Re,sl} \times N_{we,sg} + 2.73 \times 10^{-7} \times N_{we,sg}^2$$

(۱۸)

$$e = -0.476 + 0.000014 \times N_{Re,sg} + 34.267 \times N_{Fr,sl} - 0.000348 \times N_{Fr,sl} \times N_{Re,sg} - 566.45 \times (N_{Fr,sl})^2 + 0.00272 \times (N_{Fr,sl})^2 \times N_{Re,sg}$$



شکل ۵: نمودار ضخامت فیلم مایع بر حسب عدد وبر و عدد رینولدز فاز مایع



شکل ۶: نمودار کسر اینتریمننت بر حسب عدد فرود و عدد رینولدز فاز گاز

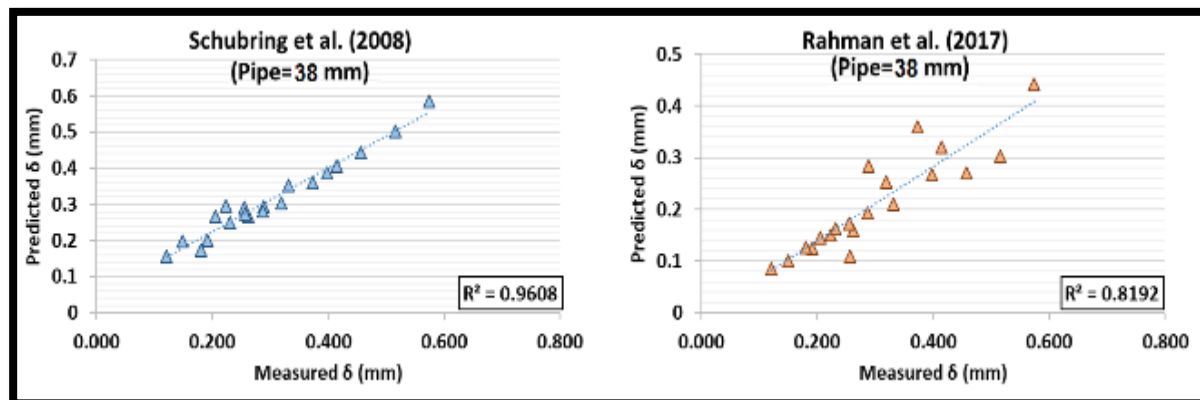
به منظور بررسی نتایج حاصله از داده‌های آزمایشگاهی و معادلات تجربی محققان دیگر از پارامترهای آماری percentage error (PE), mean squared error (MSE), mean relative error (MRE), root mean squared error (RMSE), mean absolute relative error (MARE), coefficient of determination ( $R^2$ ), and standard deviation (STD) استفاده شده است که در جدول (۷) نشان داده شده است [۷ و ۸ و ۱۰].

در نهایت اطلاعات آزمایشگاهی بدست آمده شده برای تعیین ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی برای لوله ۳۸ میلی متر با محققانی همچون مدل سوپرینگ و همکاران (۲۰۰۸) و مدل رحمان و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از معیارهای آماری مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن‌ها در جدول (۷) گزارش شده است. نتایج ارائه شده برای لوله ۳۸ میلی متر، نشان می‌دهد که دقت عملکرد مدل سوپرینگ و همکاران بهتر از مدل رحمان و همکاران بوده و نتایج قابل قبول تری را ارائه می‌دهد.

جدول ۷: نتایج آماری تعیین دقت عملکرد برای پیش‌بینی ضخامت فیلم مایع بی بعد شده برای جریان دوفازی در لوله عمودی.

| $R^2$<br>- | RMSE<br>(mm) | MSE<br>(mm) | STD<br>(mm) | AARE<br>(%) | ARE<br>(%) | Models<br>-             | Pipe Size<br>mm |
|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------------------|-----------------|
| 0.9608     | 0.02828      | 7.996E-04   | 0.025       | 9.528       | -7.132     | Schubring et al. (2008) | ۳۸ mm           |
| 0.8192     | 0.10391      | 1.080E-02   | 0.052       | 30.185      | 30.185     | Rahman et al. (2017)    |                 |

شکل (۷)، نشان‌دهنده نمودار متقاطع تعیین ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی محاسبه شده در برابر اندازه‌گیری شده به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی برای مدل محققان دیگر می‌باشد. در نتایج جدول (۷) و شکل (۷) مشاهده می‌گردد، مدل سوپرینگ و نتایج نزدیکتری به نتایج حاصل شده از آزمایش داشته و دقت عملکرد بهتری را برای لوله ۳۸ میلی متر از خود نشان می‌دهد.



شکل ۷: نمودار متقاطع تعیین ضخامت فیلم مایع محاسبه شده در برابر اندازه‌گیری شده به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی برای مدل محققان دیگر (۳۸ میلی متر)

علاوه بر آن شکل (۸) نشان می‌دهد که مدل رحمان و همکاران برای لوله ۳۸ میلی متر از دقت عملکرد پایین تری برخوردار می‌باشد، در نتیجه این مدل را نمی‌توان برای لوله‌های بالاتر از ۳۸ میلی متر استفاده کرد. به منظور مقایسه و بررسی مدل محققان دیگر برای پیش‌بینی کسر اینترینمنت در لوله ۳۸ میلی متر از نتایج ارائه شده در جدول (۸) می‌توان بهره برد. همان گونه که از نتایج ارائه شده در این جدول مشاهده می‌گردد، برای لوله ۳۸ میلی متر، بالاترین و پایین‌ترین دقت عملکرد به منظور تعیین کسر اینترینمنت به ترتیب برای مدل‌های والیس (۱۹۶۸) و پان و هانراتی (۲۰۰۲) می‌باشد.

جدول ۸: نتایج آماری تعیین دقت عملکرد برای تعیین کسر اینترینمنت برای جریان دوفازی در لوله عمودی.

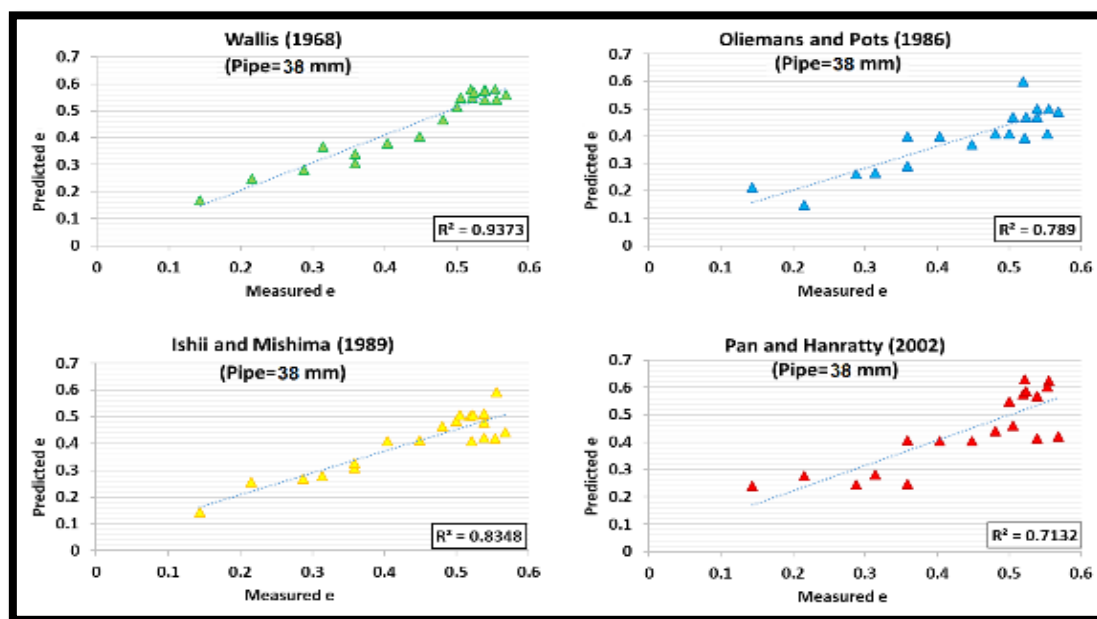
| Pipe Size<br>mm | Models                   | ARE<br>(%) | AARE<br>(%) | STD<br>(mm) | MSE<br>(mm) | RMSE<br>(mm) | R <sup>2</sup> |
|-----------------|--------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
| ۳۸<br>mm        | Wallis (1968)            | -3.114     | 7.606       | 0.056       | 1.167E-03   | 0.0342       | 0.9373         |
|                 | Oliemans and Pots (1986) | -3.114     | 7.606       | 0.032       | 5.111E-03   | 0.0715       | 0.7890         |
|                 | Ishii and Mishima (1989) | 6.886      | 9.665       | 0.049       | 3.709E-03   | 0.0609       | 0.8348         |
|                 | Pan and Hanratty (2002)  | -3.201     | 16.387      | 0.072       | 5.163E-03   | 0.0719       | 0.7123         |

شکل (۸) به ترتیب نمودار مقاطع تعیین کسر اینترینمنت محاسبه شده در برابر اندازه گیری شده در لوله ۳۸ میلی متر به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی برای مدل محققان دیگر را نشان می دهد. این نمودار تعیین کننده ی coefficient of determination برای مدل محققان دیگر می باشد. همان گونه که از نتایج حاصله در شکل (۸) و جدول (۸) دیده می شود دقت عملکرد برای مدل محققان به شرح زیر می باشد:

لوله ۳۸ میلی متر:

Wallis (1968) > Ishii and Mishima (1989) > Oliemans and Pots (1986) > Pan and Hanratty (2002)

بر اساس نتایج حاصله در جدول (۸) به این نتیجه می رسیم که استفاده از مدل پان و هانراتی (۲۰۰۲) به منظور تعیین کسر اینترینمنت برای لوله با سایز ۳۸ میلی متر مناسب نمی باشد و بهترین مدل قابل استفاده برای این سایز از لوله، مدل والیس (۱۹۶۸) می باشد.

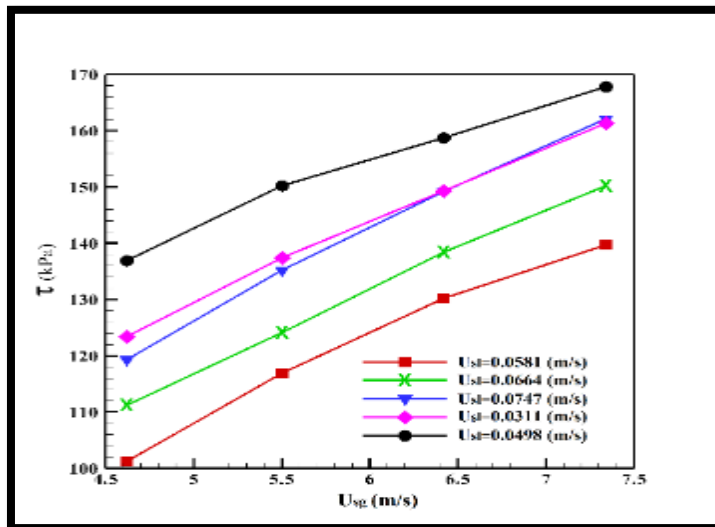


شکل ۸: نمودار مقاطع تعیین کسر اینترینمنت محاسبه شده در برابر اندازه گیری شده در لوله ۳۸ میلی متر به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی برای مدل محققان دیگر

#### ۳-۴- اعتبارسنجی تنش برشی فصل مشترک برای داده های آزمایشگاهی

به منظور بررسی اعتبار سنجی تنش برشی فصل مشترک نشان داده شده در معادله (۱۳)، از ۲۰ نقطه داده ی آزمایشگاهی درالگوی جریان حلقوی در این مطالعه استفاده شده است. شکل (۹) میزان تنش برشی فصل مشترک به ازای سرعت ظاهری گاز برای سرعت های مایع مختلف برای لوله ۳۸ میلی متر را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل ها دیده می شود در

ابتدا هنگامی که سرعت ظاهری مایع کم است میزان تنش برشی فصل مشترک نیز کم می‌شود و هنگامی که سرعت ظاهری مایع بالا می‌رود میزان تنش برشی فصل مشترک نیز بالا می‌رود. لذا این نمودار اعتبار سنجی داده‌های بدست آمده توسط آزمایش را به ما نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشخص است بیشترین تنش برشی فصل مشترک برای لوله ۳۸ میلی متری بیشترین مربوط به سرعت ظاهری مایع ۰/۰۴۹۸ متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل ۹: میزان تنش برشی فصل مشترک به ازای سرعت ظاهری گاز برای سرعت مایع مختلف برای لوله ۳۸ میلی متری

## ۵- نتیجه گیری

تعیین پارامترهای مهم جریان دوفازی گاز مایع غیر همسو در لوله‌های عمودی از جنس پلکسی گلاس شفاف برای لوله با قطر های مختلف از مفاهیم اساسی برای جریان دو فاز می‌باشد. در این مقاله هدف تعیین پارامترهای مهم الگوی جریان دوفازی، کسر اینترینمنت، ضخامت فیلم مایع، تنش برشی فصل مشترک و ارائه مدل‌های تجربی آن‌ها می‌باشد. نتایج ارائه شده در مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی مدل ANOVA به منظور تعیین میزان کسر اینترینمنت برای لوله با قطر ۳۸ میلی متر نشان می‌دهد که مقدار  $A^2$  معرف توان دوم متغیر  $Re_{sg}$  می‌باشد یک مقدار بی معنی است و باید از محاسبات و مدل‌های خروجی ارائه شده با استفاده از DOE حذف گردد. کسر اینترینمنت به شدت به سرعت ظاهری مایع و در نتیجه آن به عدد فرود وابسته است به همین خاطر ترم سرعت ظاهری گاز و در نتیجه آن عدد وبر گازی تأثیری کمتری دارد و می‌توان فقط توان دوم متغیر  $Re_{sg}$  را از محاسبات حذف کرد، ولی برهم کنش بین عدد بی بعد رینولدز فاز گاز و عدد بی بعد فرود یعنی AB قابل صرف نظر نیست.

- بررسی مدل ANOVA به منظور تعیین میزان ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی برای لوله ۳۸ میلی متر نشان می‌دهد که مقدار  $A^2$  معرف توان دوم متغیر  $Re_{sl}$  می‌باشد یک مقدار بی معنی می‌باشد و باید از محاسبات و مدل‌های خروجی ارائه شده با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت حذف گردد. ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی به شدت به سرعت ظاهری گاز و در نتیجه آن به عدد وبر گازی وابسته است به همین خاطر ترم سرعت ظاهری مایع و در نتیجه آن عدد فرود و رینولدز مایع تأثیری کمتری دارد و می‌توان فقط توان دوم متغیر  $Re_{sl}$  را از محاسبات حذف کرد، ولی برهم کنش بین عدد بدون بعد رینولدز مایع A و عدد بدون بعد وبر B ناشی از سرعت ظاهری فاز گاز یعنی AB قابل صرف نظر نیست.

- ضریب تعیین تعدیل شده  $R^2$  برای مقدار ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی و کسر اینترینمنت برای لوله ۳۸ میلی متر به ترتیب ۰/۹۸۸۹ و ۰/۹۹۶۱ می باشد. این نتایج نشان می دهد که دقت عملکرد مدل های ارائه شده برای لوله ۳۸ میلی متر برای یافتن مقدار ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی و اینترینمنت در حد بالا می باشد.
- اطلاعات آزمایشگاهی بدست آمده شده برای تعیین ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی برای لوله ۳۸ میلی متر با محققانی همچون سوپرینگ (۲۰۰۸) و رحمان و همکاران (۲۰۱۷) مورد مقایسه قرار گرفت، نتایج ارائه شده برای لوله ۳۸ میلی متر نیز نشان می دهد که دقت عملکرد مدل سوپرینگ بهتر از مدل رحمان بوده و نتایج قابل قبول تری را ارائه می دهد.
- نتایج ارائه شده به منظور تعیین کسر اینترینمنت برای لوله ۳۸ میلی متر، بالاترین و پایین ترین دقت عملکرد به منظور تعیین کسر اینترینمنت به ترتیب برای مدل های والیس (۱۹۶۸) و پان وهانراتی (۲۰۰۲) می باشد. در کل، تحلیل ها بیانگر این بود که باید پیش بینی اینترینمنت بهبود پیدا کند.
- از نتایج مربوط به نمودارهای تنش برشی فصل مشترک برای داده های آزمایشگاهی به این نتیجه می رسیم که دقت عملکرد مدل های ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی و کسر اینترینمنت که جز متغیرهای ورودی تنش برشی فصل مشترک می باشند، از اعتبار بالایی برخوردار بوده است. علاوه بر این بیشترین تنش برشی فصل مشترک برای لوله ۳۸ میلی متری مربوط به سرعت ظاهری مایع ۰/۰۴۹۸ متر بر ثانیه می باشد. همچنین بیشترین مقدار سرعت گاز برای تشکیل الگوی جریان حلقوی در لوله ۳۸ میلی متر برابر ۹/۳۰۳ متر بر ثانیه می باشد و بالاتر از این سرعت الگوی جریان طغیان را مشاهده خواهیم کرد.

## فهرست علائم

| علائم انگلیسی                       |                                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| $A = u_{sg}$                        | سرعت ظاهری فاز گاز                 |
| $B = u_{sl}$                        | سرعت ظاهری فاز مایع                |
| $\left(-\frac{dp}{dz}F\right)_{TP}$ | افت فشار اصطکاکی جریان دو فاز      |
| $A^2$                               | توان دوم سرعت ظاهری گاز            |
| $B^2$                               | توان دوم سرعت ظاهری مایع           |
| $AB$                                | برهم کنش سرعت های ظاهری گاز و مایع |
| علائم یونانی                        |                                    |
| $\sigma$                            | کشش سطحی مایع                      |
| $\delta$                            | ضخامت فیلم مایع                    |
| $e$                                 | entrainment fraction               |
| $\tau_i$                            | تنش برشی فصل مشترک دو فاز          |
| $\mu_g$                             | ویسکوزیته دینامیک گاز              |
| $\rho_{mix}$                        | دانسیته مخلوط جریان دوفاز          |
| زیر نویس                            |                                    |
| i                                   | فصل مشترک فازها                    |
| G                                   | فاز گاز                            |
| L                                   | فاز مایع                           |

## مراجع

- [1] Moayedi H, Aghel B, Vaferi B, Foong LK, Bui DT. The feasibility of Levenberg–Marquardt algorithm combined with imperialist competitive computational method predicting drag reduction in crude oil pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2020;185:106634. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106634>.
- [2] Mojtaba Masihi, Ali Nouri-Borujerdi, Hadi Kargarsharif abad. Experimental Investigation of the Flow Regime Development and Liquid Film Thickness at the Interface of Counter current Gas-Liquid Two-Phase Flow in Transparent Vertical pipes. *Journal of Energy Conversion*, 2022, 9(2), 99-120. DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.1.4
- [3] Aliyu, A. M., Lao, L., Almagbrok, A. A., & Yeung, H. (2016). Interfacial shear in adiabatic downward gas/liquid co-current annular flow in pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72, pp75-87.
- [4] K.L.. L. Magrini; ,C.. Sarica; ,A.. Al-Sarkhi; ,H.-Q.. -Q. Zhang , Liquid Entrainment in Annular Gas/Liquid Flow in Inclined Pipes SPE J. 17 (02): 617–630. ,Paper Number: SPE-134765-PA. <https://doi.org/10.2118/134765-PA>
- [5] Zheng X, Lin Z, Xu BY. Thermal conductivity and sorption performance of nano-silver powder/FAPO-34 composite fin. *Applied Thermal Engineering* 2019;160:114055. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114055>.
- [6] Azzopardi BJ. Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow. *Nuclear Engineering and Design* 1986;92(2):121-33. doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(86\)90240-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(86)90240-2).
- [7] Ghorbani H, Wood DA, Moghadasi J, Choubineh A, Abdizadeh P, Mohamadian N. Predicting liquid flow-rate performance through wellhead chokes with genetic and solver optimizers: an oil field case study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2019;9(2):1355-73. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-018-0532-6>.
- [8] Ghorbani H, Wood DA, Mohamadian N, Rashidi S, Davoodi S, Soleimanian A, et al. Adaptive neuro-fuzzy algorithm applied to predict and control multi-phase flow rates through wellhead chokes. *Flow Measurement and Instrumentation* 2020;76:101849. doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101849>.
- [9] Rahman et al., J Pet, An Improved Film Thickness Model for Annular Flow Pressure Gradient Estimation in Vertical Gas Wells , *Environ Biotechnol*, 2017, 8:1 DOI: 10.4172/2157-7463.1000314
- [10] Ghorbani H, Moghadasi J, Dashtbozorg A, Kooti S. Developing a new multiphase model for choke function relation for Iran's gas wells. *American Journal of Oil and Chemical Technologies* 2017;5(3):172-80.
- [11] Taitel Y, Bornea D, Dukler AE. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal* 1980;26(3):345-54. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690260304>.
- [12] Jayanti S, Hewitt GF, White SP. Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow. *International journal of multiphase flow* 1990;16(6):1097-116. doi: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(90\)90108-U](https://doi.org/10.1016/0301-9322(90)90108-U).
- [13] Sawant P, Ishii M, Hazuku T, Takamasa T, Mori M. Properties of disturbance waves in vertical annular two-phase flow. *Nuclear Engineering and Design* 2008;238(12):3528-41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.06.013>.
- [14] Hurlburt ET, Fore LB, Bauer RC. A two zone interfacial shear stress and liquid film velocity model for vertical annular two-phase flow. 47519. 2006:677-84. doi: <https://doi.org/10.1115/FEDSM2006-98512>.
- [15] Shedd TA, Newell TA. Automated optical liquid film thickness measurement method. *Review of Scientific Instruments* 1998;69(12):4205-13. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1149232>.
- [16] Haider G, Othayq M, Zhang J, Vieira RE, Shirazi SA. Effect of particle size on erosion measurements and predictions in annular flow for an elbow. *Wear* 2021;476:203579. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203579>.
- [17] Fershtman A, Barnea D, Shemer L. Wave identification in upward annular flow-a focus on ripple characterization. *International Journal of Multiphase Flow* 2021;137:103560. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103560>.

- [18] Peng W, Cao X, Hou J, Ma L, Wang P, Miao Y. Numerical prediction of solid particle erosion under upward multiphase annular flow in vertical pipe bends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2021;192:104427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104427>.
- [19] Ghiaasiaan SM, Wu X, Sadowski DL, Abdel-Khalik SI. Hydrodynamic characteristics of counter-current two-phase flow in vertical and inclined channels: Effects of liquid properties. *International Journal of Multiphase Flow* 1997;23(6):1063-83. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(97\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(97)00027-X).
- [20] Taitel Y, Barnea D. Counter current gas-liquid vertical flow, model for flow pattern and pressure drop. *Int J Multiphase Flow*; (United Kingdom) 1983;9(6). doi: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6317315>.
- [21] Chen L, Tian YS, Karayiannis TG. The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2006;49(21-22):4220-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.03.025>.
- [22] Besagni G, Inzoli F. Comprehensive experimental investigation of counter-current bubble column hydrodynamics: Holdup, flow regime transition, bubble size distributions and local flow properties. *Chemical Engineering Science* 2016;146:259-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.043>.
- [23] Wallis GB. Phenomena of liquid transfer in two-phase dispersed annular flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1968;11(4):783-5. doi:
- [24] Oliemans RVA, Pots BFM, Trompe N. Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes. *International journal of multiphase flow* 1986;12(5):711-32. doi: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(86\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(86)90047-9).
- [25] Ishii M, Mishima K. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1989;32(10):1835-46. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(89\)90155-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90155-5).
- [26] Pan L, Hanratty TJ. Correlation of entrainment for annular flow in vertical pipes. *International Journal of Multiphase Flow* 2002;28(3):363-84. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(01\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(01)00073-8).
- [27] Wallis, G.B., (1969). *One Dimensional Two Phase Flow*. McGraw-Hill Inc. New York.
- [28] Schubring, D., Ashwood, A. C., Hurlburt, E. T., & Shedd, T. A. (2008, January). Optical Measurement of Base Film Thickness in Annular Two-Phase Flow. In *Fluids Engineering Division Summer Meeting* (Vol. 48401, pp665-672).
- [29] M. Zarei, M. R. Ansari, P. Rostami, Identification of flow patterns maps for counter-current gas-liquid two-phase flow in large diameter tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 433-444, 2016 (in Persian).
- [30] P. Adibi, M.R. Ansari, Experimental Investigation of Slug Initiation to Upstream Conditions of Two Phases in Long Horizontal Channels in Two Fluids, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 27-35, 2014 (In Persian) .

چکیده انگلیسی:

## Experimental Investigation of the Flow Patterns Development and evaluation of entrainment fraction in gas-liquid two-phase flow in a vertical pipe

Mojtaba Masihi<sup>1</sup>, Ali Nouri-Borujerdi<sup>2\*</sup>, Hadi Kargarsharifabad<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
masihi\_mojtaba@yahoo.com

\*2- Center of Excellence in Energy Conversion, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. anouri@sharif.edu

3- Department of Mechanical Engineering, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran.  
hadikargarsharif@gmail.com

Received: April 2024

Accepted: June 2024

### Abstract

In the present research, the behavior and flow pattern of a Counter-current Gas-Liquid Two-Phase Flow in Transparent Vertical pipe made from Plexiglas with inner diameter of 38 mm was experimentally investigated. The considered fluids included the water and the air, and the results were obtained for a total of 125 select cases differing in the apparent velocities of the water and the air. The superficial velocities of the air and water in the 38 mm pipe were investigated in the ranges 4.90 – 9.30 m/s and 0.083– 0.139 m/s, respectively. The Entrainment fraction was measured Isokinetic-sampling technique. Provision of the Counter current Gas-Liquid Two-Phase Flow conditions in terms of initial flow orientation and the investigation of the effect of this design on the flow patterns, liquid film thickness, and the Entrainment fraction are the major innovations of the present research. In contrast to previous research works, the present study sets the scene for a more accurate evaluation of the annular flow pattern for calculating the liquid film thickness and the Entrainment fraction by designing the initial inlet orientation. Based on a comparison, as far as the calculation of the Entrainment was concerned, the results of the present research exhibited good agreement with the Wallis model in the 38 mm pipe, and when it came to obtaining the liquid film thickness, the results were consistent to those of the Schubring model. It is shown that the predictions of this new correlation outperform those from previously reported studies.

**Key words:** Counter-Current Two phase flow, Liquid Film Thickness, Entrainment Fraction, Interfacial Shear Stress, Flooding

\*Corresponding author: anouri@sharif.edu

**Cite this article as** Mojtaba Masihi, Ali Nouri-Borujerdi, Hadi Kargarsharifabad. Experimental Investigation of the Flow Patterns Development and evaluation of entrainment fraction in gas-liquid two-phase flow in a vertical pipe. Journal of Energy Conversion, 2024, 11(1), 59-78.