J. Energy Conversion
Volume: 11, Issue: 1, 2024: 59-78

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۱، بهار۱۴۰۳، ص: ۵۹-۷۸

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

مجتبی مسیحی[۱]، علی نوری بروجردی[۲و*]، هادی کارگر شریف آباد[۳]

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 اینترینمت با طراحی جهت گیری ورودی اولیه می باشد. نتایج این پژوهش توافق خوبی با مدل والیس برای محاسبه اینترینمنت و مدل شیبرینگ 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 شکل گیری الگوهای جریان و ارزیابی کسر اینترینمنت در جریان دوفازی گاز- مایع در لوله قائم. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی.
۱۴۰۳; ۱۱ (۱) : ۵۹-۷۸

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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 وکم 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 سیستم های تهویه وتبرید، برج های خنک کن، صنایع نفت و گاز، صنایع پتروشیمی و همچنین خطوط لوله انتقال نفت دیده می‌شود، جریان دو فازی 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 ۳۸/۸ - ۰/۶ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز بین ۱۱۰/۶ -۱۳/۴ متر بر ثانیه می باشد. این در حالی است که تحلیل شرایط جریانی به دلیل برهم کنش های بوجود آمده بین دوفاز جریانی غیر همسو بسیار دشوار می‌باشد. برخورد هوا به صورت غیر همسو با جریان آب، در برج های خنک کن با جریان هوای مخالف را می توان به عنوان یکی از مثال های بارز در این زمینه نام برد. عموماً در رژیم های جریان غیر همسو با افزایش پیوسته هر یک از فازها حالت طغیان به وجود می آید و راه ورود فاز دیگر مسدود می شود و جریان از حالت غیر همسو خارج می شود [۱۱]. پیش‌بینی رفتار جریان نیز به دلیل رژیم‌های جریانی مجزا بسیار سخت و متفاوت می‌باشد. [۱۲,۶, ۱۳]. از جمله جریان های رایج در شرایط دوفازی هوا-آب در لوله‌ها، جریان حلقوی می‌باشد که به دلیل طیف گسترده ای از نرخ گاز و مایع اتفاق می‌افتد [۱۴, ۱۵]. از مشخصه‌های بارز این جریان، یک لایه نازک در امتداد دیوار ه ها با یک هسته گاز سریع در مرکز جریان است [۱۶]. شناسایی و تعیین جریان حلقوی دو فازی هوا و آب از آن جهت اهمیت دارد که در صنایع هسته ای، 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 پیچیدگی های اشاره شده هنوز علم دو فازی وابستگی شدیدی به نتایج حاصل از مطالعات تجربی و روابط حاصل از آن ها دارد. یکی از پارامترهای تاثیرگذار در نوع جریان های دوفازی استفاده از قطر لوله ها می باشد [۱۸, ۱۹]. در سال ۱۹۸۳، تایتل وبارنئا با استفاده از افت فشار لوله و الگوی جریان، برای لوله های افقی مدلی غیر همسو را ارائه دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند ک دو ناحیه احتمالی رخ می‌دهد که ناحیه اول هیچگونه رژیمی وجود ندارد اما در ناحیه‌ی دیگر جریان حلقوی و لخته‌ای و حبابی می تواند پدیدار شود [۲۰]. در سال ۱۹۹۴، حسن و همکاران، به منظور بررسی کسر حجمی مایع برای لوله های عمودی با ارتفاع ۵/۵ میلی متر و قطر ۲۷ میلی متر از دیدگاه drift flux استفاده کردند و مدلی را ارائه دادند که قابلیت بررسی جریان های لخته ای و حبابی را در جریان غیر همسو و لوله عمودی ارائه دادند. در سال ۲۰۰۶، چن و همکاران تاثیر قطر داخلی لوله را برای رژیم‌های مختلف با استفاده از سیال مبرد R134a برای لوله‌های عمودی برای چهار قطر داخلی لوله از ۱/۱ میلی متر تا ۴/۲۶ میلی متر انجام دادند. پس از بررسی‌های لازم، به این نتیجه سیدند که قطر داخلی لوله تاثیر زیادی بر تعیین الگوی جریان دارد [۲۱]. در سال ۲۰۱۶، بساگنی و اینزولی با استفاده از چند روش آزمایشگاهی مختلف به بررسی ویژگی های هیدرودینامیکی ستون حباب در لوله عمودی و جریان غیر همسو برای لوله ای با ارتفاع ۵/۳ متر و قطر داخلی ۲۴ میلی متر بررسی شد. آن ها یک همبستگی جدیدی برای کسر حجمی آب ارائه دادند و نتایج بدست آمده نشان داد که قطر لوله تاثیر 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 تاثیر عوامل مختلفی مانند اندازه لوله، سرعت سیال و خصوصیات سیال است. محققان بسیاری به منظور پیش بینی این پارامتر مهم تلاش کردند از جمله این محققان: در سال ۱۹۶۹، والیس [۲۷ , ۲۳] یک همبستگی تجربی جدید بر اساس مدل پالیو وفلیپوویچ ارائه دادند. نکته قابل تامل در این مقاله این است که در این رابطه به

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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 ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۷۳ نیوتن بر متر بوده که انواع جریان سیال از جریان خطی و آشفته را شامل می‌شود. [۲۴] در سال ۱۹۸۹، ایشی و میشیما با استفاده از یک سری مجموعه داده‌های 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 ۵۷/۲میلی‌متر، سرعت ظاهری مایع ۰/۰۱۲ تا ۱/۳۵ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۲۰ تا ۱۱۹ متر بر ثانیه ارائه دادند [۲۶]. در سال ۲۰۰۸، سوبرینگ 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 اینترینمنت 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 اینترینمنت پرداخته شده است. اکثر داده‌های کسر اینترینمنت موجود با استفاده از لوله‌هایی با قطر کم بدست آمده اند که این امر مشکل افزایش مقیاس پیش‌بینی‌های e بر اساس داده‌های مربوط به قطر لوله کوچک را دشوارتر می‌سازد. هدف اصلی این مطالعه، محاسبه تنش برشی در فصل مشترک جریان دوفازی و آنالیز آنها و ارزیابی روش‌های موجود برای پیش‌بینی ضخامت فیلم مایع و کسر اینترینمنت 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 ها ی جریان توسط دوربین را مهیا می کند[۳۰]. در شرایط استاندارد، چگالی آب ۹۹۸ کیلوگرم برمتر مکعب ، ویسکوزیته دینامیکی آب ۰/۰۰۱ پاسکال-ثانیه و کشش سطحی آب ۰/۰۷۳ 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 منحصربفردی وارد لوله می شود. قطرات آب جدا شده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

خروجی از دو لوله به منظور محاسبه کسر اینترینمنت نیز در یک مخزن کوچک جهت توزین، جمع آوری می شوند. هم هوا و هم قطرات مایع مازاد همراه در خروجی مقطع لوله به جو فرستاده شدند تا فشار پشت سیستم کاهش یافته و سرعت هوا افزایش یابد. دبی های جریان هوا و آب به ترتیب با استفاده از دبی سنج های روتامتری هوا مدل (ACA 05-25ZT) با دقت 0.01± مترمکعب بر ساعت و روتامتری آب مدل (Z-5008) با دقت 0.01± لیتر بر دقیقه برای شرایط فشار ۱۰ بار اندازه گیری می شوند. بیشترین مقدار عدم قطعیت های اندازه گیری طبق استاندارد ANSI/ASME (۱۰) برای فلومتر آب 4%± و برای فلومتر هوا 4%± می باشد. دبی سنج ها با این پیشینه خطای هنگام خواندن مقادیر در حداکثر دبی عبوری ، دبی ها را محاسبه می کنند بنابراین نتایج حاصل تحت هر شرایط محیطی صحیح و دقیق خواهند بود. همچنین فشارسنج های 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، تاثیری 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 فازی کسر حجمی سطح مقطع است که کسری از سطح مقطع جریان عبوری از لوله که توسط فاز گاز اشغال‌شده 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 فازی ابداع شده‌است که یکی از مهم‌ترین آن ها 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 می توان 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:

$$(1-\alpha)=\frac{4\times\delta}{D} \qquad (۱)$$

یک سیستم نمونه‌برداری ایزوسینتیک مطابق مرجع[۲] برای تعیین پارامتر کسر اینترینمنت به کار گرفته شد. این بخش در فاصله ۱۴۰۰ میلی متری پایین‌دست ورودی گاز واقع است. این سیستم یک پروب ایزوسینتیک به قطر ۷/۶ میلی متر ، یک مخزن کوچک ۱۰ لیتری و یک روتامتر گازی دارد. برای اطمینان از شرایط ایزوسینتیک، دو شیر توپی در مسیر لوله اتصالی از پروپ 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 پروپ که به مخزن متصل بود جمع آوری 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:

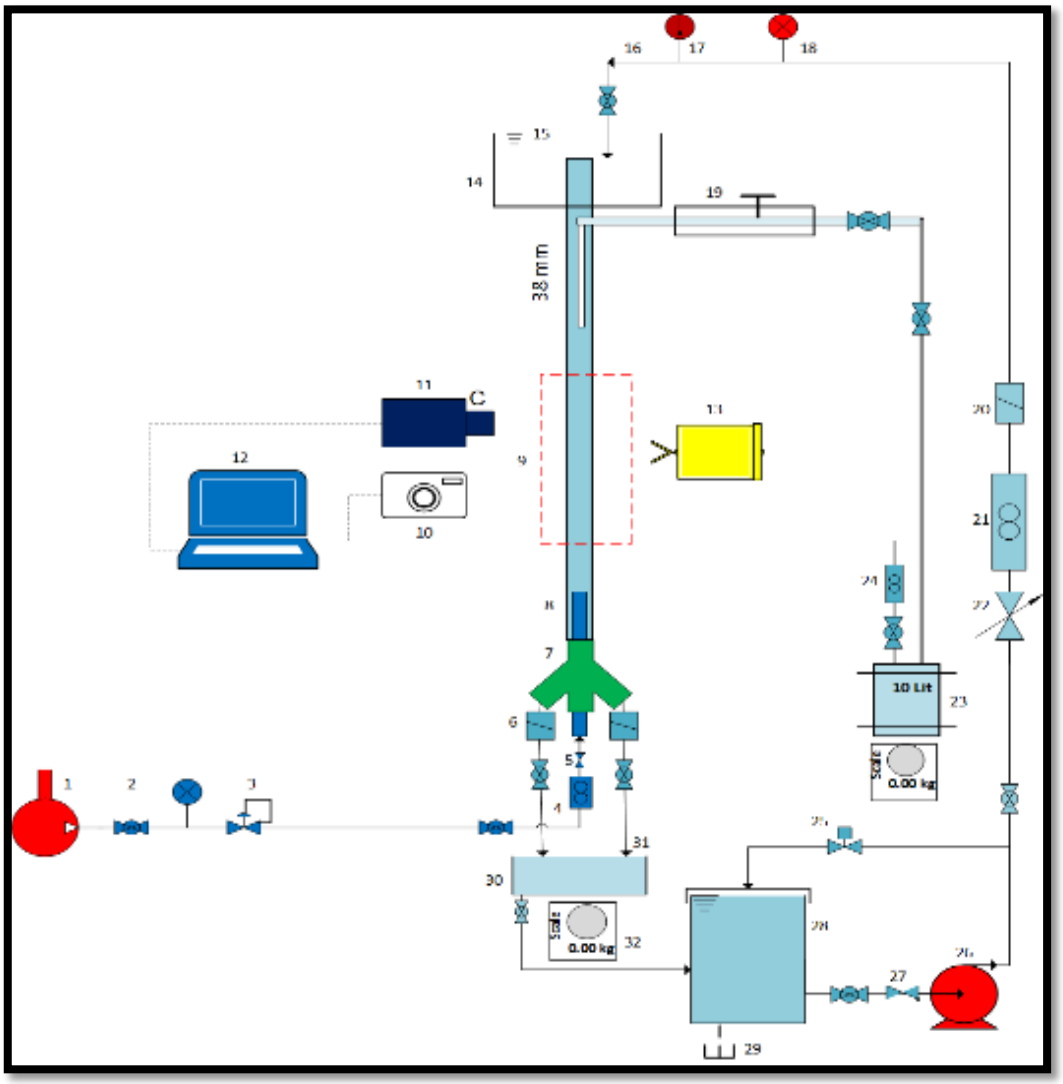
$$E_x=\frac{V_E}{(A_{probe}\times t_s)} \qquad (۲)$$

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

$$F_E = \frac{(\int E_x \, dA)}{(A_{pipe} \times u_{sl})} \quad (۳)$$

برای ثبت ساختار جریان های دو فازی آب – هوا در سرعت های مختلف و به دست آوردن الگوهای جریانی مختلف، از روش ثبت تصاویر با استفاده دوربین های سرعت بالا نیکون مدلD72 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 لوله‌ی 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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 bar	دبی حجمی مایع m^3/s	مساحت جانبی لوله m^2	حجم لوله m^3	ضخامت فیلم مایع mm
بالا - 1-1	6	$6/53\times10^{-5}$	0/2386	$2/88\times10^{-4}$	1/21
میانه - 1-2	6	$6/53\times10^{-5}$	0/2386	$2/19\times10^{-4}$	0/92
پایین -1-3	6	$6/53\times10^{-5}$	0/2386	$1/93\times10^{-4}$	0/81
بالا - 2-1	8	$5/92\times10^{-5}$	0/2386	$2/31\times10^{-4}$	0/97
میانه - 2-2	8	$5/92\times10^{-5}$	0/2386	$2/05\times10^{-4}$	0/86
پایین -2-3	8	$5/92\times10^{-5}$	0/2763	$1/74\times10^{-4}$	0/73
بالا - 3-1	10	$1/06\times10^{-4}$	0/2386	$1/86\times10^{-4}$	0/78
میانه - 3-2	10	$1/06\times10^{-4}$	0/2386	$1/50\times10^{-4}$	0/63
پایین -3-3	10	$1/06\times10^{-4}$	0/2386	$1/33\times10^{-4}$	0/56

جدول ۳: نتایج داده های آزمایشگاهی برای کسر اینترینمنت

شماره آزمایش	فشارورودی گاز bar	دبی حجمی مایع m^3/s	مساحت هسته m^2	حجم قطرات همراه گاز m^3	کسر اینترینمت
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 فلادینگ 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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 بالارونده 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 صرفا" 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 ۹/۳۰۳ 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 ۹/۳۰۳ 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 ۳۸ میلی متر در جدول (۴) آورده شده است.

$$\sqrt{u^*_{SG,min}} = c \quad (۴)$$

$$u_{SG,min} = c^2 \times \sqrt{\frac{g \times D \times \Delta\rho}{\rho_G}} \quad (۵)$$

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

ρ_L kg/m^3	ρ_G kg/m^3	D m	$\Delta\rho$ kg/m^3	g m/s^2	u_{SG} m/s	c	$u_{SG,min}$ m/s	$\dot{m}$ 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 فلادینگ از زمانی است که ادامه الگوی اصلی جریان به واسطه این گونه برهم کنش ها امکان پذیر نباشد. معادله والیس یکی از پرکاربردترین معادلات فلادینگ 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:

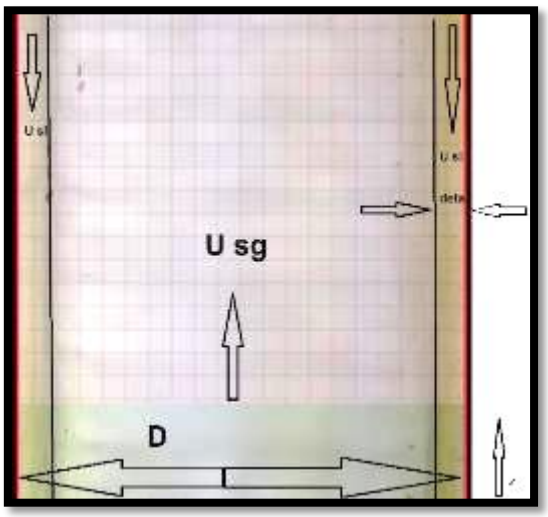
$$u^{*\,0.5}_{SG} + m \times u^{*\,0.5}_{SL} = C \quad (۶)$$

$$u^*_{SG} = u_{SG} \times \sqrt{\rho_G / g \times \Delta\rho \times D} \quad (۷)$$

$$u^*_{SL} = u_{SL} \times \sqrt{\rho_L / g \times \Delta\rho \times D} \quad (۸)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

$m = c = 1$ ساده ترین حالت این معادله است. در این حالت از کلیه برهم کنش های بین دو فاز صرف نظر می شود. البته این معادله می تواند 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 تقریبا" در بازه هایی به شکل $m = 0.8 - 1$ و $c = 0.7 - 1$ تغییر می کنند و قویا تابعی از ساختار لوله و تاثیرات انتهای لوله هستند. پارامترC بیش از هر چیزی به شرایط ورودی فاز مایع وابسته است، در صورتی که این لبه ها نوک تیز داشته باشند طبق تحقیقات والیس c =0.725 توصیه می شود. بر اساس معادله والیس در شرایط طغیان،قطر لوله به نحو موثری برسرعت های ظاهری هر یک از فازها تاثیر گذار است. جریان ناهمسو در لوله عمودی مشابه شکل (۳) را با فرض اینکه هیچگونه محدودیت عملیاتی وجود ندارد در نظر می گیریم . 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 میلی متر

$$-\frac{dp}{dz} + \frac{4}{D} \times \tau_w - [\rho_L(1-\alpha) + \rho_G \times \alpha] \times g = 0 \qquad (۹)$$

$$-\frac{dp}{dz} \times \alpha + \frac{4 \times \tau_i \times \sqrt{\alpha}}{D} - \rho_G \times \alpha \times g = 0 \qquad (۱۰)$$

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

$$\frac{4 \times \tau_w}{D} - \frac{4 \times \tau_i}{D \times \sqrt{\alpha}} = (\rho_L - \rho_G) \times g \times (1-\alpha) \qquad (۱۱)$$

(۱۲)

$$\tau_w = \frac{1}{2} \times f_w \times \rho_L \times \frac{u_{SL}^2}{(1-\alpha)^2} \qquad (۱۲)$$

برای تنش برشی فصل مشترک ابتدا باید مفهوم پدیده اینتریمنت را بدانیم . در جریان حلقوی یک ناصافی در سطح مایع به وجود می آید 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 می شود، زیرا مایع سرعت کمتری از گاز دارد و قطراتی را که از سطح مایع جدا می کند به همراه بخار یا گاز به حرکت در می آید. بنابراین به قطراتی که از مایع جدا شده و به همراه گاز به حرکت در می آیند اینترینمنت گفته می شود. و با حرف e نشان داده می شود که محدوده آن بین $0 \le e \le 1$ می باشد. برای محدوده اینترینمنت ابتدا و انتها به صورت زیر می باشد:اگر هیچ قطره ای از مایع جدا نشده باشد (e=0) و اگر همه قطرات از مایع جدا شده باشند(e = 1) . این پدیده باعث می شود که چگالی گاز بیشتر از چگالی گاز خالص باشد و به چگالی مخلوط ρ_{mix} برسد ، در این صورت عدد رینولدز به صورت Re (1-e) در می آید 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 می شود:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

$$\tau_i = \frac{1}{2} \times f_i \times \rho_G \times (\frac{u_{SG}^2}{\alpha^2} - \frac{u_{SL}^2}{(1-\alpha)^2} \quad (۱۳)$$

f_i و f_w ضرایب اصطکاک دیواره و فصل مشترک هستند. باید توجه داشت که در شرایط نزدیک به حالت فلادینگ 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:

$$\frac{2f_i}{\alpha^{2/5}} \times {u_{SG}^*}^2 + \frac{2\,f_w}{(1-\alpha)^2} \times {u_{SL}^*}^2 - (1-\alpha) = 0 \quad (۱۴)$$

برای هر مقدار مشخص α در بازه قابل قبول جهت شکل گیری رژیم جریان حلقوی معادله (۱۴) در فرم منحنی u_{SL}^* برحسب u_{SG}^* انحنا 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] :

$$f_{wall} = \frac{0.079}{(Re_L)^{0.25}} = \frac{0.079}{(\frac{\rho_L \times u_{sl} \times D}{\mu_L})^{0.25}} \quad (۱۵)$$

$$f_{interface} = \frac{0.079}{(Re_{shear})^{0.25}} = \frac{0.079}{(\frac{\rho g \times u_{sg} \times (D-2\delta)}{\mu_g})^{0.25}} \quad (۱۶)$$

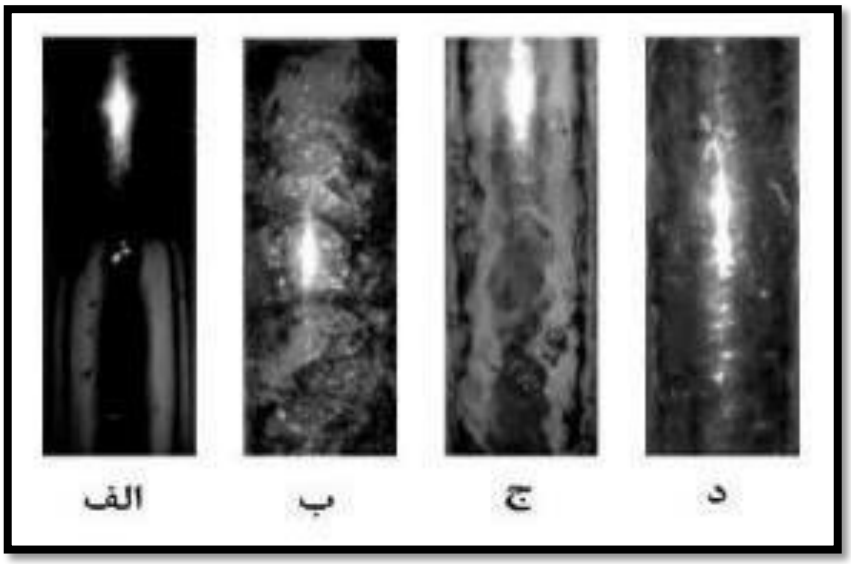
۴- نتایج و یافته ها

۴-۱-تعیین الگوی جریان

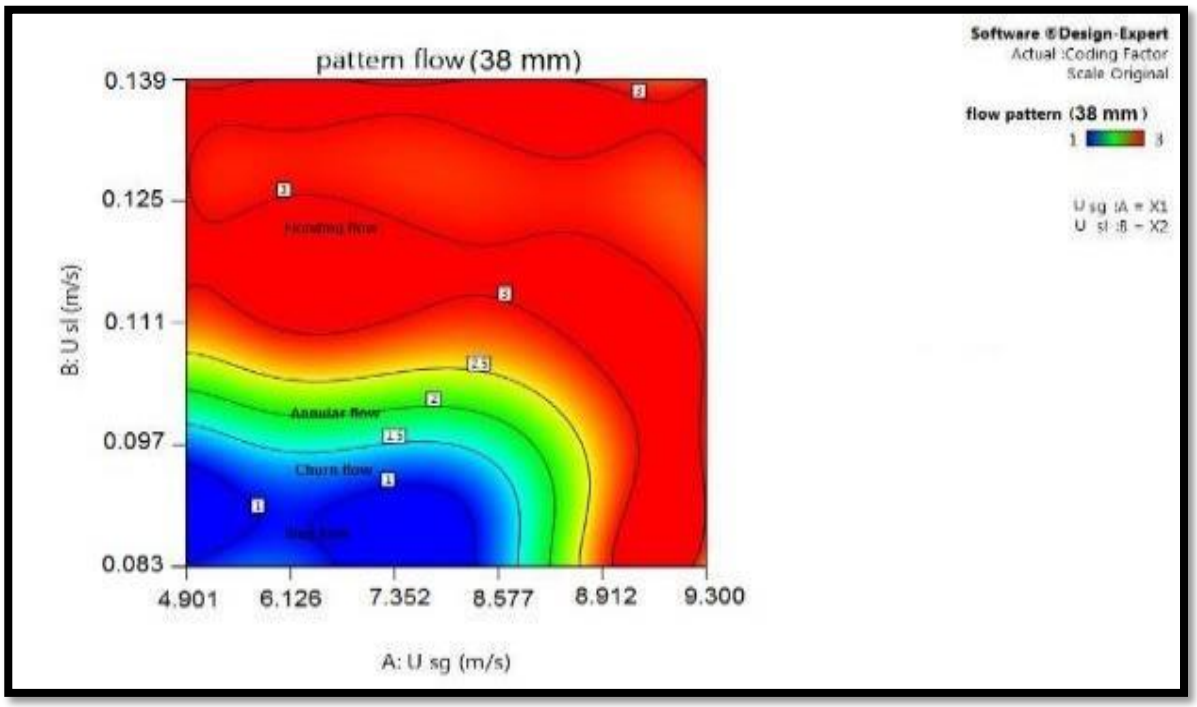
برای این لوله نسبت طول به قطر داخلی L/D=52.63 بوده و آزمایش برای ۱۲۵ حالت انجام شده است. محدوده ی سرعت ظاهری آب بین ۰/۱۳۹- ۰/۰۸۳ متر بر ثانیه و محدوده ی سرعت ظاهری هوا بین ۹/۳۰ -۴/۹۰ متر بر ثانیه می باشد. الگوهای مشاهده شده در این حالت شامل الگوهای اصلی لخته ای – متلاطم، حلقوی و جریان طغیان می باشد. 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(شکل۳-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 تآخیر افتادن شروع رژیم حلقوی است (شکل ۳-ج). در انتها ، جریان طغیان تغییرات نسبتا 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 فلادینگ با روش اینترینمنت در لوله با قطر ۳۸ میلی متر و بزرگتر با دبی‌های کم مایع رخ می‌دهد زمانی‌که دبی گاز افزایش می‌یابد قطرات کوچکی در نزدیکی خروجی مایع شکل می‌گیرد اما این قطرات در همین ناحیه دوباره به فیلم مایع برمی‌گردند با افزایش بیشتر دبی گاز تعداد قطرات افزایش می‌یابد و در قسمت‌های بالاتر مقطع قابل‌مشاهده هستند با افزایش کافی دبی گاز قطرات در بالاتر از ورودی مایع تا خروجی گاز قابل‌مشاهده هستند در این شرایط قسمت کمی از دبی مایع از بالای لوله خارج می‌شود که این مقدار قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد فلادینگ در این مرحله رخ داده‌است امواج بزرگ که به سمت بالا حرکت می‌کنند مشاهده نمی‌شود اما در بعضی موارد امواجی فقط در نیمه پایینی لوله دیده می‌شود با افزایش بیشتر جریان گاز فقط تعداد قطرات افزایش می‌یابد و امواجی بالا رونده به وجود

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

نمی‌آید درهنگام 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 میلی متر، 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 می باشد. جریان کف آلود به دلیل اینکه جریان ناپایدار می باشد در کد گذاری آورده نشده است. همانگونه که در شکل مشاهده می گردد، الگوی جریان مناسب مَورد استفاده در این آزمایش حلقوی می باشد.



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



شکل ۴: الگوهای جریان برای لوله‌ی ۳۸ میلی متر

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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[1] 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 **۲۰** 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 $\left(\frac{\delta}{d}\right)$ 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 می‌کند. 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

[2] Response Surface

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

گاز ($A: Re_{sg}$) و عدد بی بعد فرود ($B: Froude$) به منظور بررسی و تحلیل کسر eو از دو فاکتور کمی عدد رینولدز مایع ($A: Re_{sl}$) 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 فرود 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^2 برای تعیین ضخامت فیلم مایع در لوله ۳۸ میلی متری معنی دار بوده ولی ترم B^2 که معرف توان دوم متغیر Re_{sl} می باشد یک مقدار بی معنی می باشد. متغیرهای ورودی A، B، AB و B^2 برای تعیین کسر e در لوله ۳۸ میلی متری معنی دار بوده ولی ترم A^2 که معرف توان دوم متغیر Re_{sg} 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_{sl}	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^2	0.0001	1	0.0001	116.58	< 0.0001
	B^2	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_{sg}	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^2	0.0000	1	0.0000	5.87	0.0262
	B^2	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^2 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 ، فرود 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:

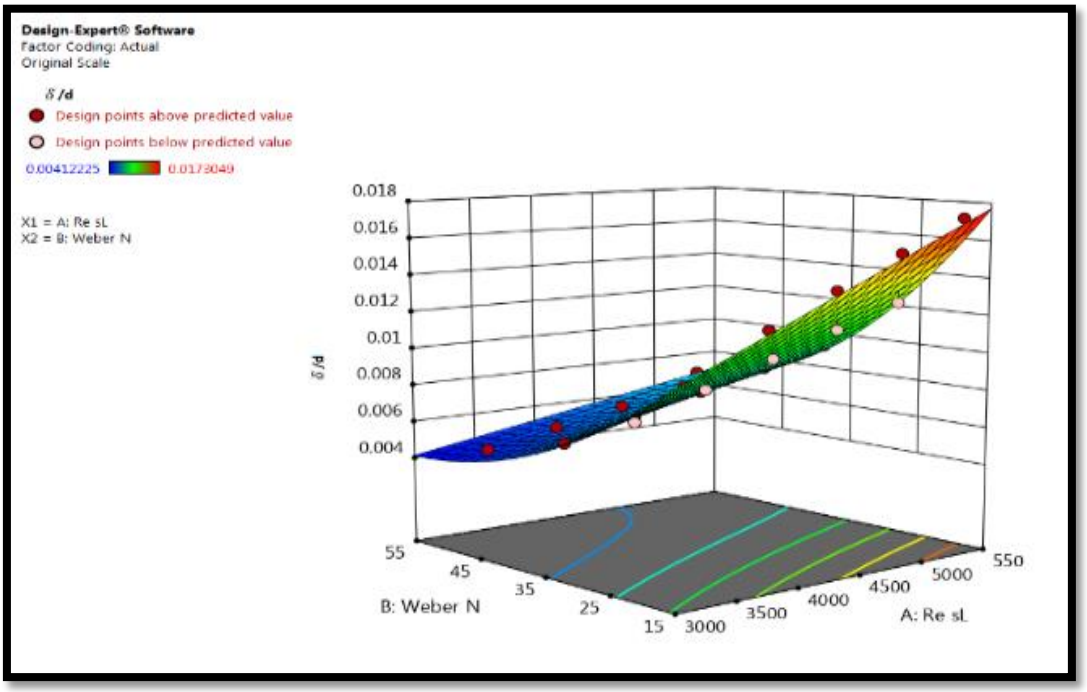
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

(۱۷)

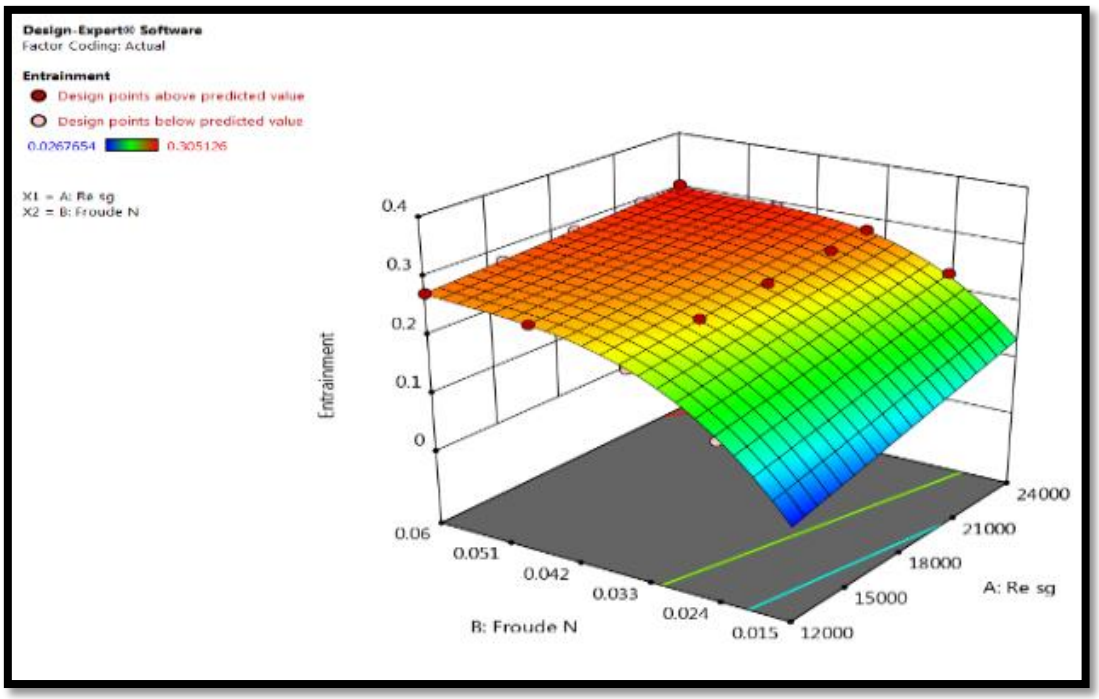
$$\left(\frac{\delta}{d}\right) = 0.0016 + 4.67 \times 10^{-6} \times N_{Re,sl} - 0.000033\ N_{we,sg} - 1.283 \times 10^{-7} \times N_{Re,sl} \times N_{we,sg} + 2.73 \times 10^{-7} \times {N_{we,sg}}^2$$

(۱۸)

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



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



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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

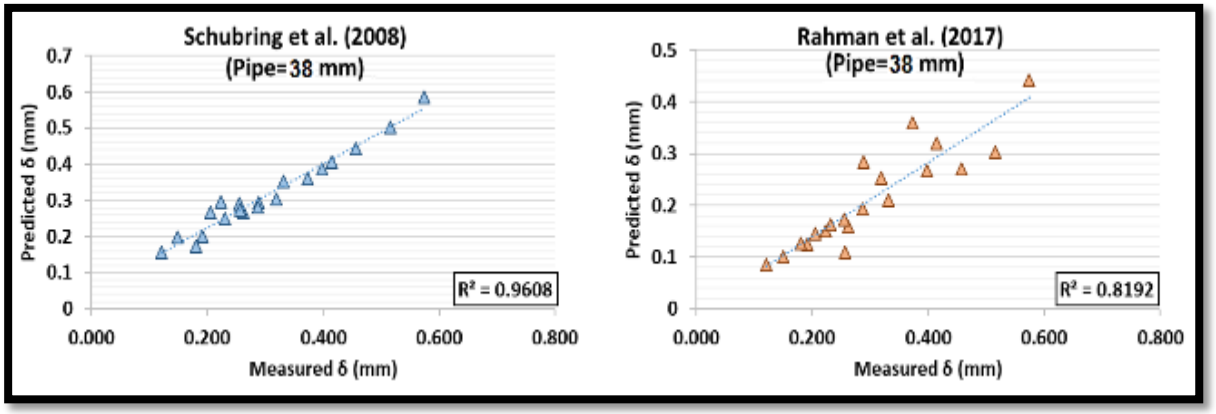
به منظور بررسی نتایج حاصله از داده های آزمایشگاهی و معادلات تجربی محققان دیگر از پارامترهای آماری percentage error (PE), mean squared error (MSE), mean relative error (MRE), root mean squared error (RMSE), mean absolute relative error (MARE), coefficient of determination (R^2), and standard deviation (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 سوبرینگ و همکاران (۲۰۰۸) و مدل رحمان و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از معیارهای آماری مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن ها در جدول (۷) گزارش شده است. نتایج ارائه شده برای لوله ۳۸ میلی متر ، نشان می دهد که دقت عملکرد مدل سوبرینگ و همکاران بهتر از مدل رحمان و همکاران بوده و نتایج قابل قبول تری را ارا ئه می دهد.

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

R^2 -	RMSE (mm)	MSE (mm)	STD (mm)	AARE (%)	ARE (%)	Models -	Pipe Size 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)، نشان دهنده ی نمودار متقاطع تعیین ضخامت فیلم مایع بی بعد شده با قطر داخلی محاسبه شده در برابر اندازه گیری شده به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی برای مدل محققان دیگر می باشد. در نتایج جدول (۷) و شکل (۷) مشاهده می گردد، مدل سوبرینگ و نتایج نزدیکتری به نتایج حاصل شده از آزمایش داشته و دقت عملکرد بهتری را برای لوله ۳۸ میلی متر از خود نشان می دهد.



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

علاوه بر آن شکل (۸) نشان می دهد که مدل رحمان و همکاران برای لوله ۳۸ میلی متر از دقت عملکرد پایین تری برخوردار می باشد، در نتیجه این مدل را نمی توان برای لوله های بالاتر از ۳۸ میلی متر استفاده کرد. به منظور مقایسه و بررسی مدل محققان دیگر برای پیش بینی کسر اینترینمنت در لوله ۳۸ میلی متر از نتایج ارائه شده در جدول (۸) می توان بهره برد. همان گونه که از نتایج ارائه شده در این جدول مشاهده می گردد، 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 و هانراتی (۲۰۰۲) می باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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

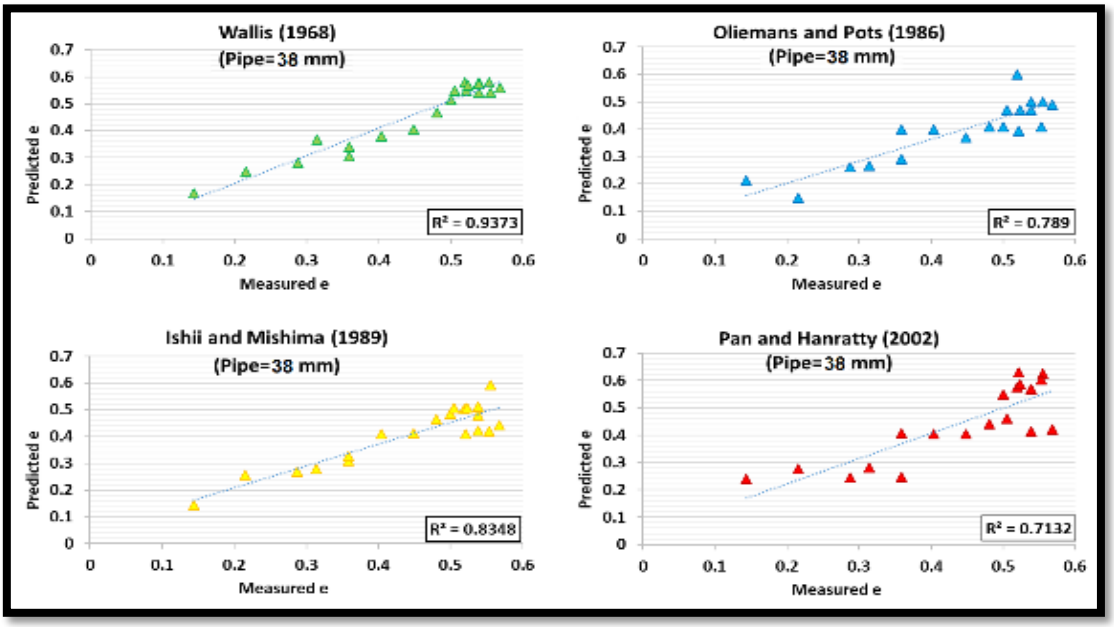
R^2 -	RMSE (mm)	MSE (mm)	STD (mm)	AARE (%)	ARE (%)	Models -	Pipe Size mm
0.9373	0.0342	1.167E-03	0.056	7.606	-3.114	Wallis (1968)	۳۸ mm
0.7890	0.0715	5.111E-03	0.032	7.606	-3.114	Oliemans and Pots (1986)	
0.8348	0.0609	3.709E-03	0.049	9.665	6.886	Ishii and Mishima (1989)	
0.7123	0.0719	5.163E-03	0.072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

شکل (۸) به ترتیب نمودار متقاطع 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 می‌باشد:

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.



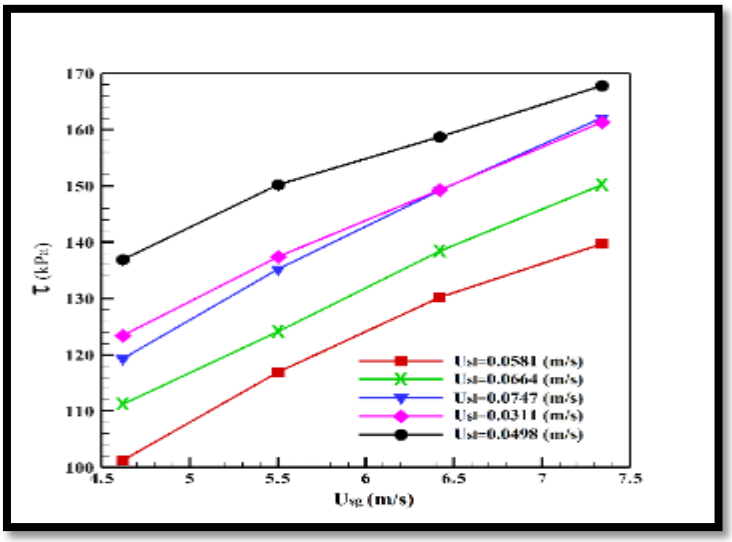
شکل ۸: نمودار متقاطع تعیین کسر اینترینمنت محاسبه شده در برابر اندازه گیری شده در لوله ۳۸ میلی متر به منظور بررسی نتایج آزمایشگاهی برای مدل محققان دیگر

۴-۳- 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

ابتدا هنگامی که سرعت ظاهری مایع کم است میزان تنش برشی فصل مشترک نیز کم می شود و هنگامی که سرعت ظاهری مایع بالا می رود میزان تنش برشی فصل مشترک نیز بالا می رود. لذا این نمودار اعتبار سنجی داده های بدست آمده توسط آزمایش را به ما نشان می دهد. 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 می باشد.



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

۵- نتیجه گیری

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

- بررسی مدل ANOVA به منظور تعیین میزان کسر اینترینمنت برای لوله با قطر ۳۸ میلی متر نشان می دهد که مقدار A^2 معرف توان دوم متغیر Re_{sg} می باشد یک مقدار بی معنی است و باید از محاسبات و مدل های 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 تاثیری کمتری دارد و می توان 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 می دهد که مقدار A^2 معرف توان دوم متغیر Re_{sl} می باشد یک مقدار بی معنی می باشد و باید از محاسبات و مدل های 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 تاثیری کمتری دارد و می توان 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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., Almabrok, 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.

[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. FlowMeasurement 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 D0I: 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.

[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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[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.
[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.
[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.
[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.
[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) .

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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[1], Ali Nouri-Borujerdi [2,*], Hadi Kargarsharifabad[3]

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 supperfacial 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 consistented 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 Thichness, 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]