



بررسی تجربی ضریب اصطکاک و تنش برشی بین سطحی در جریان دوفازی ناهمسو در لوله عمودی

آرش غفوری^۱، اشکان غفوری^{۱*}، عباس کوثری نیا^۱، علیرضا دنه‌دزفولی^۲

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*نویسنده مسئول: a.ghafouri@iauhvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

چکیده:

در پژوهش تجربی حاضر، شکل‌گیری الگوی جریان حلقوی در لوله عمودی با جریان دوفازی ناهمسو به کمک تکنیک ثبت و پردازش تصاویر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تفکیک رژیم جریان‌های دو فاز ایجاد شده، محدوده سرعت ظاهری هوا (پایین به بالا) و آب (بالا به پایین) به ترتیب ۳/۶۶-۲۰/۹۴ متر بر ثانیه و ۰/۰۶-۰/۳۱ متر بر ثانیه برای جریان حلقوی می‌باشد. ضریب اصطکاک بین سطحی (فاز مایع و گاز) بر حسب پارامترهای هیدرودینامیکی جریان مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه متوسط انحراف نتایج حاصله از پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های پیشین نشان از تطابق مناسب نتایج دارد. همچنین تنش برشی بین سطحی برای دو لوله آزمایش در الگوی جریان دوفازی ناهمسو در رژیم جریان حلقوی محاسبه و ارزیابی شده است. در این پژوهش ضریب اصطکاک بین سطحی (فاز مایع و گاز) نیز در قالب یک رابطه همبستگی جدید وابسته به عدد رینولدز جریان گاز و عدد رینولدز جریان مایع با ضریب همبستگی $R^2=0/98$ ارائه شده است.

کلمات کلیدی: سرعت ظاهری فاز مایع، سرعت ظاهری فاز گاز، ضریب اصطکاک بین سطحی، جریان حلقوی، تنش برشی

مقدمه

جریان حلقوی یکی از رایج‌ترین رژیم‌های جریان دوفازی است که در گستره وسیعی از نرخ جریان گاز و مایع اتفاق می‌افتد. این الگوی جریان با یک لایه نازک مایع در امتداد دیوارها و یک هسته گازی با حرکت سریع در مرکز جریان مشخص می‌شود [۱،۲]. از طرفی جریان دوفازی ناهمسو در انواع تجهیزات انتقال گرما، سیستم‌های تهویه و تبرید، برج‌های خنک‌کن، صنایع نفت و گاز، صنایع پتروشیمی و همچنین خطوط لوله انتقال نفت دیده می‌شود [۳،۴]. یکی از مهمترین مشکلات در تحلیل جریان دوفاز در لوله‌ها، تعیین الگوی جریان و یا توزیع فاز مایع و گاز درون لوله می‌باشد. کندوش و الختاب [۵] با استفاده از عکس برداری سرعت بالا در جریان دوفازی عمودی پایین رو الگوهای جریان حبابی، لخته ای و حلقوی را مشاهده کردند و مرز بین این سه الگو را براساس مقادیر کسر حجمی تخمین زدند. طی سال‌های گذشته اکثر مطالعات نظیر کلارک [۶] زدرزیل و همکاران [۷] و علیو و همکاران [۸] که بر روی جریان دوفازی حلقوی صورت پذیرفته است، با تمرکز بر جریان همسو پایین-رو یا بالا-رو بوده است. مطالعات کمی در مورد بررسی تجربی جریان‌های ناهمسو در لوله‌های عمودی در دسترس است که از مهمترین آنها می‌توان به مطالعات هانراتی و هنستوک [۹] و شوپرینگ و همکاران [۱۰] اشاره نمود. از طرفی ضریب اصطکاک بین سطحی در جریان دوفازی در مطالعات بهارتان و والیس [۱۱] و بیجایان و همکاران [۱۲] مورد ارزیابی قرار گرفته و در این پژوهش‌ها تلاش شده تا بر اساس متغیر اصلی جریان یک رابطه همبستگی برای ضریب اصطکاک بین سطحی ارائه گردد. در سال‌های اخیر نیز وان و همکاران [۱۳]

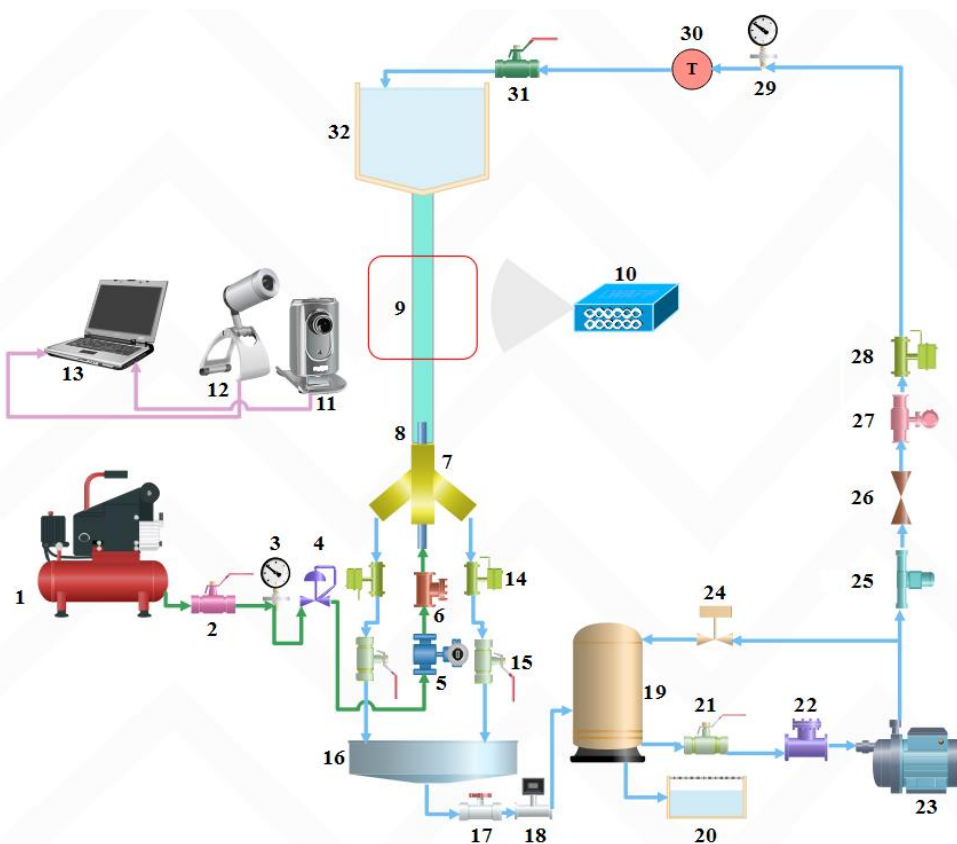


ما و همکاران [۱۴] و وان و همکاران [۱۵] به مطالعه تجربی مشخصات هیدرودینامیکی جریان دو فاز گاز-مایع در لوله عمودی در رژیم‌های مختلف جریان و تحلیل محدودیت‌های مربوطه پرداخته‌اند.

نوآوری اصلی این پژوهش ارائه یک رابطه نیمه تجربی برای ضریب اصطکاک بین سطحی به کمک تکنیک ثبت و پردازش تصاویر در یک لوله عمودی در جریان دوفازی ناهمسو می‌باشد. تمرکز پژوهش بر شکل‌گیری جریان حلقوی که دارای طیف کاربرد وسیعی در صنعت است بوده و از میان محدوده سرعت ظاهری فاز گاز و فاز مایع، محدوده مربوط به جریان حلقوی تفکیک و بر اساس بانک اطلاعاتی بدست آمده رابطه نیمه تجربی استخراج و اعتبار سنجی خواهند شد. ارزیابی تنش برشی در فصل مشترک دو فاز بر حسب متغیرهای هیدرودینامیکی جریان در دو قطر کوچک و متوسط لوله آزمایش بخشی از دستاوردهای کار حاضر می‌باشد.

سامانه تجربی آزمایش

شکل (۱) شماتیک سامانه آزمایشگاهی و اجزای تشکیل دهنده برای جریان دوفازی در لوله های عمودی را به تصویر کشیده است. دو لوله از جنس پلکسی گلاس شفاف با طول دو متر و قطرهای داخلی به ترتیب ۰/۰۲۶ و ۰/۰۴۴ متر برای شکل‌گیری و مطالعه الگوی جریان حلقوی در سیال دوفازی مورد استفاده قرار گرفت. سیالات مورد استفاده جریان هوای تامین شده توسط یک کمپرسور با توان ۷ کیلووات در جهت پایین به بالا و جریان آب پمپاژ شده در جهت بالا به پایین (مخالف جهت جریان هوا) می‌باشد. بسته به محدوده دبی آب و هوا و به دلیل خواص فیزیکی متفاوت دو سیال، الگوها و اشکال مختلفی در سطح مشترک دو فاز ایجاد می‌شود که رژیم جریان نامیده می‌شوند.



شکل (۱): شماتیک ستاپ آزمایشگاهی استفاده شده.



جدول (۱): اجزا اصلی ستاپ آزمایشگاهی در جریان دوفازی ناهمسو.

شماره	عنوان	شماره	عنوان	شماره	عنوان	شماره	عنوان
۱	کمپرسور	۹	لوله آزمایش	۱۷	شیر دروازه‌ای	۲۵	شیر برقی
۲	شیر توپی	۱۰	پروژکتور	۱۸	مقیاس دیجیتال	۲۶	دبی سنج
۳	فشارسنج	۱۱	دوربین دیجیتال	۱۹	مخزن	۲۷	شیر دروازه‌ای
۴	رگلاتور	۱۲	دوربین فیلم‌برداری	۲۰	تخلیه	۲۸	مخزن آب
۵	دبی سنج	۱۳	لب‌تاپ	۲۱	شیر توپی	۲۹	گیج فشار
۶	شیر یکطرفه	۱۴	شیر برقی	۲۲	شیر یکطرفه	۳۰	ترموتر
۷	سه راهی	۱۵	شیر توپی	۲۳	پمپ	۳۱	شیر توپی
۸	ورودی گاز	۱۶	مخزن	۲۴	شیر برگشتی	۳۲	مخزن آب

با توجه به محدوده مورد مطالعه برای دبی و سرعت ظاهری در مجموع ۲۸۸ حالت مختلف از الگوی جریان شامل جریان‌های کف آلود، لخته ای، حلقوی و طغیان شکل می‌گیرد. دیواره شفاف لوله امکان بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل لوله حاوی سیالات تمیز آب و هوا را به ناظر بیرونی جهت فیلم‌برداری و تصویر برداری می‌دهد و امکان مشاهده بصری و ثبت رژیم‌های مختلف جریان توسط دوربین را مهیا می‌کند. دبی جریان هوای استفاده شده در ستاپ آزمایشگاهی توسط روتامتر مدل ACA0525ZT با دقت $\pm 0.1\%$ مترمکعب بر ساعت و دبی جریان آب به کمک روتامتر مدل Z-5008 با دقت $\pm 0.1\%$ لیتر بر دقیقه سنجش می‌گردد. از یک مخزن ۷۵ لیتری جهت نگهداری و پمپاژ آب در این ستاپ استفاده شده است. همچنین از فشار سنج Autronics-PSAN با دقت 3 mbar % مورد استفاده قرار گرفته است. برای ثبت ساختار جریان‌های دو فازی آب - هوا در سرعت‌های مختلف و به دست آوردن الگوهای جریانی مختلف، از روش ثبت تصاویر با استفاده از دوربین سرعت بالا نیکون DV۳۰۰ با حسگر ۲۰/۹ CMOS مگاپیکسلی و همچنین دوربین کاسیو Ex-ZR۱۲۰۰ با حسگر ۱۶/۱ مگاپیکسلی CMOS و حساسیت ۱۰۰-۱۲۰۰ با قابلیت فیلم‌برداری فول اچ‌دی استفاده شده است. در جدول (۱) اجزا تشکیل دهنده ستاپ آزمایشگاهی در قالب ۳۲ جز و بر اساس شکل (۱) فهرست شده است.

شکل‌گیری جریان حلقوی در لوله عمودی

شکل‌گیری الگوی جریان‌های مختلف رژیم جریان ناهمسوی گاز-مایع بدین صورت است که با افزایش سرعت ظاهری فاز گاز کم کم اولین الگوی جریان تحت عنوان جریان کف آلود شکل می‌گیرد. در این رژیم مقداری آب که حاوی تعداد زیادی حباب کوچک است و در حال دنبال کردن حباب تیلور هستند ملاحظه شد. حباب تیلور مشاهده شده در این لوله به صورت یک گنبد چتری شکل گازی است. پس از آن با افزایش سرعت فاز گاز، حباب‌های تیلور شکسته شده و جریان ناپایدار و انتقالی بین دو جریان لخته ای و حلقوی شکل خواهد گرفت. در این رژیم، هوا تحت تأثیر مومنتوم خود آب را به سمت بالا می‌راند و آب هم پس از بالا رفتن به دلیل چگالی بالایی که نسبت به هوا دارد به قسمت‌های پایین لوله باز می‌گردد که باعث می‌شود در این جریان حرکت‌های نوسانی به سمت بالا و پایین رخ دهد. سپس در این وضعیت ترکیبی از هر دو رژیم کف آلود و حلقوی مشاهده شده است. در یک بازه زمانی جریان به شدت آشفته و نوسانی بوده و پس از خروج بیشتر آب از لوله، جریان از این حالت خارج شده و برای مدتی به جریان حلقوی تغییر حالت می‌دهد. سپس جریان حلقوی به تنهایی در وسط لوله جریان می‌یابد و تنها لایه ای از آب در اطراف لوله قرار دارد و شکلی مانند یک استوانه‌ی تو خالی را ایجاد می‌کند. جریان حلقوی به عنوان یک هسته‌ی گازی تعریف می‌شود که با لایه پیوسته مایع مجاور لوله احاطه شده است. در انتها جریان طغیان به گونه‌ای است که سرعت هوا بسیار بیشتر از سرعت آب



است و بنابراین در مقطع از لوله، هوا از سرازیر شدن آب جلوگیری کرده و آب را به سمت بالا می‌راند. در این وضعیت جریان از حالت غیر همسو خارج شده و به جریان همسو و رو به بالا تبدیل می‌شود و به پدیده طغیان تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر تشکیل جریان حلقوی و ویژگی‌های آن در جریان ناهمسوی دوفازی مدنظر بوده، لازم است به بررسی و تفکیک انواع الگوی جریان پرداخته شود. از میان ۲۸۸ حالت آزمایش انجام شده و پردازش تصاویر و فیلم‌های برداشته شده متناسب با محدوده سرعت ظاهری جریان گاز (u_{sg}) و سرعت ظاهری جریان مایع (u_{sl}) برای هر دو قطر ۰/۰۲۶ و ۰/۰۴۴ متر تنها ۵۰ حالت در الگوی جریان حلقوی بوده که محدوده دبی، سرعت ظاهری و رینولدز جریان گاز و مایع در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول (۲): محدوده دبی جریان، سرعت ظاهری و عدد رینولدز فاز گاز و مایع در جریان حلقوی

قطر لوله (mm)	نوع جریان	دبی کمینه (cm^3/s)	دبی بیشینه (cm^3/s)	سرعت ظاهری کمینه (m/s)	سرعت ظاهری بیشینه (m/s)	رینولدز کمینه	رینولدز بیشینه
۲۶	هوا	۵۵۵۰	۱۱۱۱۰	۱۰/۴۶۹	۲۰/۹۳۸	۱۸۱۴۷	۳۶۲۹۳
۲۶	آب	۱۱۰/۴	۱۶۴	۰/۲۰۸	۰/۳۰۹	۵۳۸۳	۷۹۹۷
۴۴	هوا	۵۵۵۰	۱۱۱۱۰	۳/۶۵۵	۷/۳۱۱	۱۰۷۲۳	۲۱۴۴۶
۴۴	آب	۹۴/۶۳	۱۵۷/۷	۰/۰۶۲	۰/۱۰۳	۲۷۲۶	۴۵۴۷

ضریب اصطکاک سطحی

در جریان حلقوی یک ناصافی در سطح مایع به وجود می‌آید، بدین صورت 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. در جریان ناهمسو معادله بالانس نیرو در فاز گاز مطابق رابطه (۱) می‌باشد:

$$\frac{\pi D_{core}^2}{4} \left(-\frac{dp}{dz} + \rho_g g \right) - \tau_i \pi D_{core} = 0 \quad (1)$$

برای فاز مایع در جریان حلقوی ناهمسو بالانس نیرو مطابق رابطه (۲) می‌باشد:

$$\frac{\pi \times (D^2 - D_{core}^2)}{4} \left(\frac{dp}{dz} - \rho_l g \right) - \tau_i \pi D_{core} + \tau_w \pi D = 0 \quad (2)$$

بر اساس پژوهش تایتل-داکتر [۱۶] گرادیان فشار هر دو فاز، تنش برشی بین سطحی دوفاز و رابطه (۱) و (۲)، رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$\tau_i = \left[\left(-\frac{dp}{dz} \right)_{TP} + (\rho_g g) \right] \times \left(\frac{D - 2\delta}{4} \right) \quad (3)$$

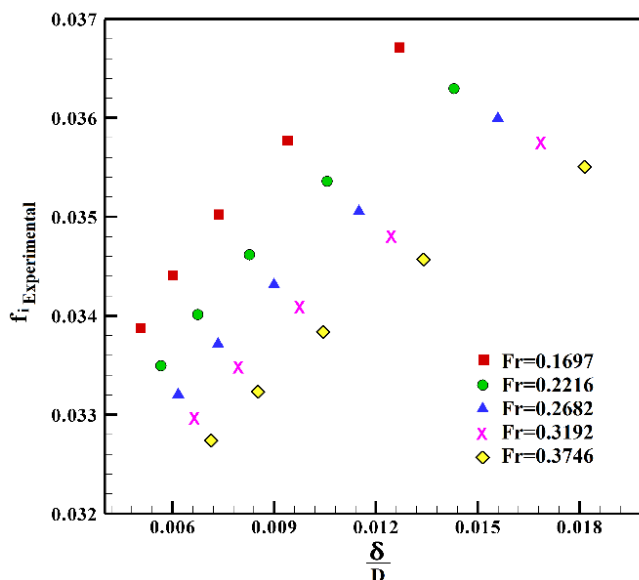
همچنین تنش برشی دیواره و ضریب اصطکاک بین دو فاز مطابق روابط (۴) و (۵) حاصل می‌گردد:

$$\tau_w = \tau_i \frac{D_{core}}{D} + \frac{1}{4} \left[\left(-\frac{dp}{dz} \right)_{TP} + (\rho_l g) \right] \times \left(\frac{D^2 - D_{core}^2}{D} \right) \quad (4)$$

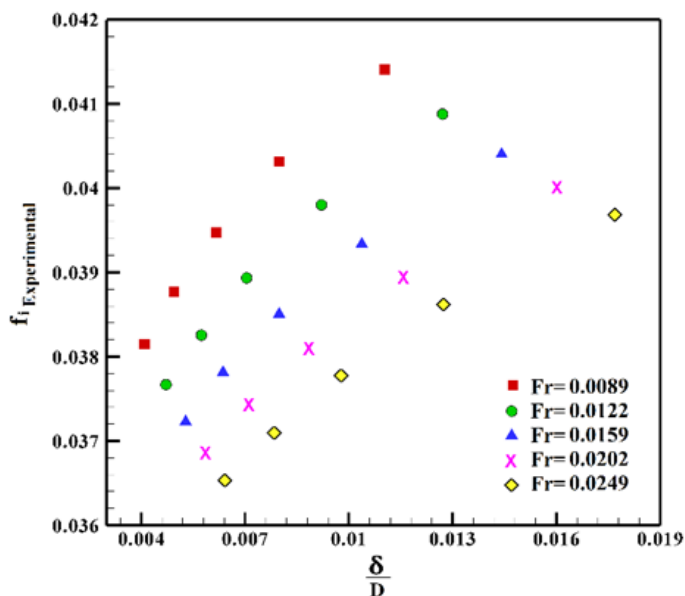
$$f_i = \frac{2\tau_i}{\rho_g (u_{sg} - u_{sl})^2} \quad (5)$$



بر اساس روابط ارائه شده، در شکل‌های (۲) و (۳) مقادیر تجربی ضریب اصطکاک بین سطحی بر حسب عدد فرود و ضخامت بی‌بعد فیلم مایع برای دو لوله با قطرهای ۰/۰۲۶ و ۰/۰۴۴ متر به تصویر کشیده شده است.



شکل (۲): مقادیر تجربی ضریب اصطکاک بین سطحی برای مقادیر مختلف عدد فرود و ضخامت فیلم مایع در لوله با قطر ۲۶ میلیمتر.

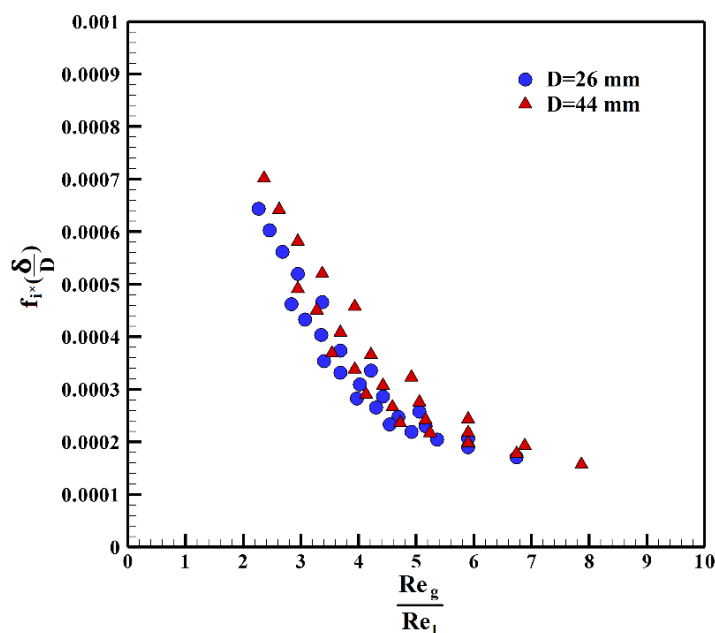


شکل (۳): مقادیر تجربی ضریب اصطکاک بین سطحی برای مقادیر مختلف عدد فرود و ضخامت فیلم مایع در لوله با قطر ۴۴ میلیمتر.

مطابق شکل (۲) مشاهده می‌شود که افزایش عدد فرود جریان مایع در محدوده ۰/۱۶۹ تا ۰/۳۷۴ برای رینولدز فاز گاز برابر $Re_g=36293$ ضمن افزایش ضخامت فیلم مایع در لوله با قطر ۰/۰۲۶ متر سبب می‌گردد تا ضریب اصطکاک بین سطحی ۳/۳ درصد کاهش یابد. با کاهش سرعت فاز گاز و بالتبع کاهش عدد رینولدز فاز گاز از ۳۶۲۹۳ به ۱۸۱۴۶ میزان ضخامت فیلم مایع و



ضریب اصطکاک بین سطحی به طور همزمان روند افزایشی را نشان خواهند داد به طوری که در $Fr=0/374$ ضریب اصطکاک $8/5$ درصد افزایش خواهد داشت. در قطر لوله $0/044$ متر نیز مطابق شکل (۳) روند مشابه با مقادیر متفاوت مشاهده می‌گردد. به نحوی که تغییر عدد فرود جریان مایع در محدوده $0/009$ تا $0/250$ برای رینولدز فاز گاز برابر $Re_g=21445$ سبب کاهش $4/2$ درصدی ضریب اصطکاک بین سطحی می‌گردد. در این قطر لوله مورد آزمایش نیز کاهش عدد رینولدز فاز گاز از 21445 به 10722 میزان ضخامت فیلم مایع و ضریب اصطکاک بین سطحی به طور همزمان روند افزایشی را نشان خواهند داد به طوری که در $Fr=0/250$ ضریب اصطکاک $8/7$ درصد افزایش خواهد داشت. شکل (۴) روند تغییرات ضریب اصطکاک به کمک گروه‌های بی‌بعد را برای دو قطر لوله آزمایش به تصویر کشیده است.



شکل (۴): مقادیر تجربی ضریب اصطکاک بین سطحی متناسب با گروه‌های بی‌بعد مورد مطالعه

در شکل (۴) از دو گروه بی‌بعد نسبت اعداد رینولدز فاز گاز به فاز مایع در محدوده $2/26$ تا $7/86$ و همچنین ضخامت فیلم مایع بی‌بعد بر حسب قطر لوله آزمایش در محدوده $0/041$ تا $0/181$ استفاده شده است و مشاهده می‌گردد که تغییرات ضریب اصطکاک بین سطحی سیال دو فازی در جریان حلقوی ناهمسو رفتار مشابه با مقادیر متناظر را نشان می‌دهد. در شکل (۵) مقایسه نتایج تجربی ضریب اصطکاک بین سطحی در لوله عمودی در جریان دوفازی حلقوی با مقادیر بدست آمده در کنار نتایج پژوهش‌های شوپرینگ و همکاران [۱۰] و بهارتان و والیس [۱۱] به تصویر کشیده شده است. در مقایسه نتایج تلاش شده تا در حد امکان از بی‌بعد سازی مقادیر استفاده شود، تا بتوان مقادیر متفاوت سرعت ظاهری فاز مایع و فاز گاز و همچنین قطر لوله متفاوت بین پژوهش حاضر و پژوهش‌های پیشین را مقایسه نمود. بخشی از اختلاف‌ها به دلیل یکسان نبودن شرایط اولیه این پژوهش‌ها با مطالعه تجربی حاضر می‌باشد. لذا برای حل مساله تفاوت محدوده پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش‌ها با کار حاضر از نسبت اعداد بی‌بعد رینولدز فاز گاز به رینولدز فاز مایع استفاده شده است. همچنین متوسط انحراف نتایج شوپرینگ و همکاران [۱۰] و بهارتان و والیس [۱۱] از مقادیر ضریب اصطکاک بین سطحی پیش بینی شده در پژوهش حاضر به ترتیب 10 و $4/3$ درصد بوده که نشان از تطابق مناسب نتایج دارد.



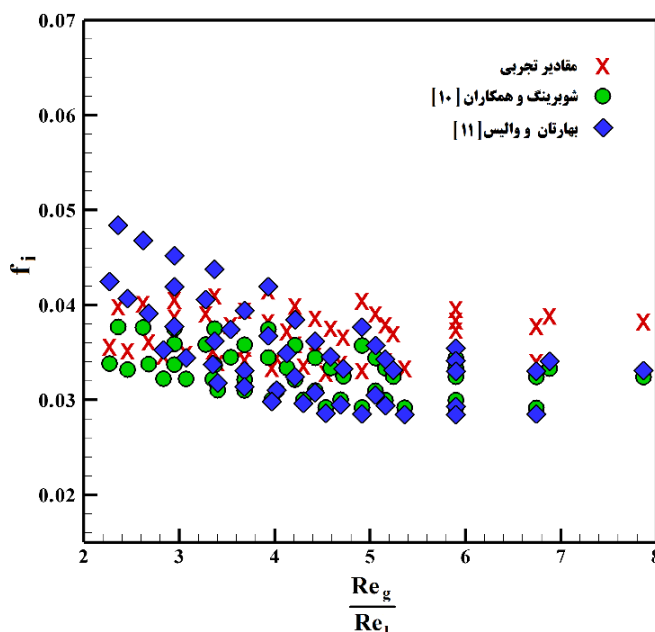
بر اساس شکل (۵) و رابطه (۵) محاسبه ضریب اصطکاک بین سطحی در سیال دو فازی تابع میزان تنش برشی بین سطحی بوده و بدون یک تحلیل آزمایشگاهی یا عددی جامع محاسبه میزان و نحوه تغییرات آن ممکن نیست. بنابراین ارائه یک رابطه نیمه تجربی بر حسب گروهی از متغیرهای مهم تاثیر گذار نظیر رینولدز فاز گاز و عدد رینولدز فاز مایع می تواند ارزیابی دقیقی از وضعیت ضریب اصطکاک بین سطحی در جریان دوفازی ناهمسو برای الگوی جریان حلقوی ارائه دهد.

$$f_i = f(Re_g, Re_l) \quad (6)$$

با استفاده از رگرسیون خطی و تکنیک ANOVA برای هر دو قطر لوله مورد مطالعه و به کمک بانک اطلاعات استخراج شده از مطالعه تجربی، رابطه همبستگی زیر برای محدوده پارامترهای مورد مطالعه حاصل می گردد:

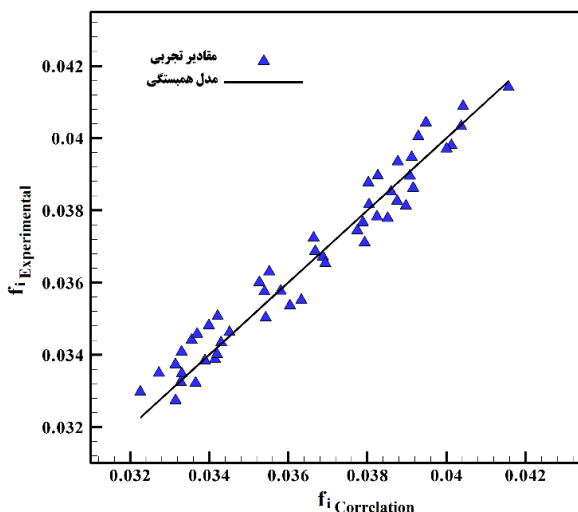
$$f_i = 0.242 Re_g^{-0.118} Re_l^{-0.085} \quad (7)$$

در رابطه فوق مقدار ضریب همبستگی برابر $R^2=0.98$ می باشد. رابطه (۷) برای محدوده رینولدز فاز مایع و رینولدز فاز گاز ارائه شده در جدول (۲) معتبر می باشد. همچنین به کمک آنالیز عدم قطعیت، ضریب اصطکاک بین سطحی دارای $5/8\%$ عدم قطعیت می باشد.



شکل (۵): مقایسه نتایج تجربی ضریب اصطکاک بین سطحی با نتایج سایر پژوهش‌ها

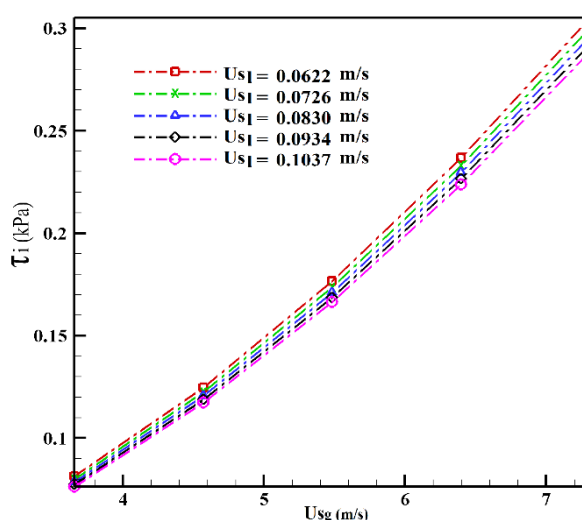
شکل (۶) مقایسه بین ضریب اصطکاک بین سطحی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و ضریب اصطکاک بین سطحی بدست آمده از رابطه همبستگی (۷) را نشان می‌دهد که بیشینه اختلاف بین مقادیر بدست آمده برابر $2/6\%$ درصد می باشد و نشان دهنده قابلیت اطمینان و دقت رابطه فوق در پیش بینی ضریب اصطکاک بین سطحی می‌باشد.



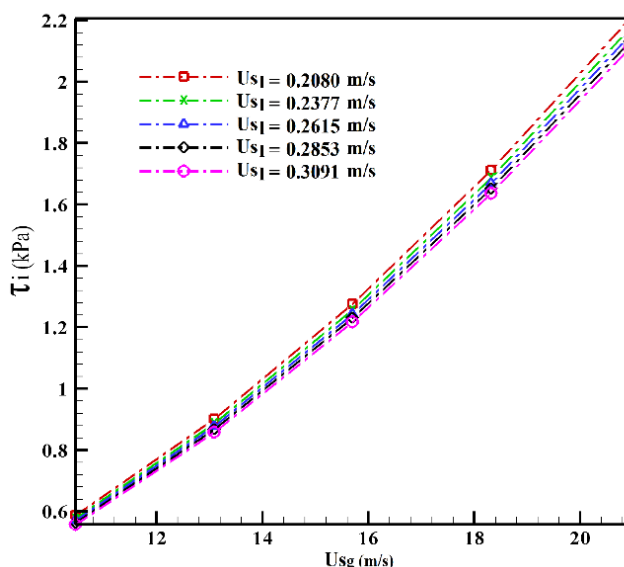
شکل (۶): مقایسه نتایج تجربی با مدل همبستگی ارائه شده

ارزیابی تنش برشی بین سطحی

در این مطالعه به منظور ارزیابی تنش برشی بین سطحی نشان داده شده در رابطه (۳)، از ۵۰ داده آزمایشگاهی درالگوی جریان حلقوی استفاده شده است. شکل‌های (۷) و (۸) میزان تنش برشی بین سطحی به ازای سرعت ظاهری فاز گاز برای سرعت‌های ظاهری مختلف فاز مایع به ترتیب برای لوله با قطر ۰/۰۲۶ و ۰/۰۴۴ متر را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود تغییرات سرعت ظاهری فاز گاز سبب می‌گردد که میزان تنش برشی در قطر لوله ۰/۰۲۶ و ۰/۰۴۴ متر به ترتیب از ۰/۰۷۶ به ۰/۲۸۸ کیلو پاسکال و از ۰/۵۵۷ به ۲/۱۱ کیلو پاسکال افزایش یابد. اما تغییر سرعت ظاهری فاز مایع تغییرات چندانی در نتایج ایجاد نخواهد کرد. همچنین در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد بیشترین تنش برشی بین سطحی برای لوله ۰/۰۲۶ متر مربوط به سرعت ظاهری مایع برابر ۰/۲۰۸۰ متر بر ثانیه می‌باشد و برای لوله ۰/۰۴۴ متر بیشترین تنش برشی بین سطحی مربوط به سرعت ظاهری مایع برابر ۰/۰۶۲۲ متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل (۷): تنش برشی بین سطحی برای سرعت‌های مختلف فاز گاز و فاز مایع برای قطر ۲۶ میلی‌متر



شکل (۸): تنش برشی بین سطحی برای سرعت‌های مختلف فاز گاز و فاز مایع برای قطر ۴۴ میلی‌متر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تجربی، جریان دوفازی غیر همسو در یک سامانه آزمایشگاهی به صورت عمودی در دو لوله با قطرهای ۰/۰۲۶ و ۰/۰۴۴ متر مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از ایجاد رژیم‌های جریان مختلف، به طور خاص رژیم جریان حلقوی به کمک تکنیک ثبت و پردازش تصاویر مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر تنش برشی بین سطحی و ضریب اصطکاک بین سطحی از جمله پارامترهای مهم ارزیابی شده در این پژوهش می‌باشند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که یک رابطه همبستگی مناسب با دقت قابل قبول بین ضریب اصطکاک بین سطحی با رینولدز فاز گاز و مایع به کمک مقادیر تجربی بدست آمده و با ضریب همبستگی ۰/۹۸ وجود دارد. همچنین تطبیق بسیار خوبی بین نتایج تجربی حاصل و روابط همبستگی ارائه شده با نتایج پژوهش‌های پیشین در جریان حلقوی ناهمسو مشاهده شده است.

مراجع

- [1] Hewitt, G. F., & Hall-Taylor, N. S. (1970). *Annular Two-phase Flow*, Pergamon Press.
- [2] Hewitt, G. F., Jayanti, S., & Hope, C. B. (1990). Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow. *International journal of multiphase flow*, 16(6), pp951-957.
- [3] Sorgun, M., Murat Ozbayoglu, A., & Evren Ozbayoglu, M. (2015). Support vector regression and computational fluid dynamics modeling of Newtonian and Non-Newtonian fluids in annulus with pipe rotation. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(3).
- [4] Moayedi, H., Aghel, B., Vaferi, B., Foong, L. K., & Bui, D. T. (2020). 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*, 185, 106634.
- [5] Kendoush, A. A., & Al-Khatib, S. A. (1994). Experiments on flow characterization in vertical downward two-phase flow. *Experimental thermal and fluid science*, 9(1), pp34-38.
- [6] Clark, W. W. (2002). Liquid film thickness measurement. *Multiphase science and technology*, 14(1).
- [7] Liu, J., & Xue, T. (2022). Investigation on Influencing Factors of Film Bubbles in Vertical Upward Annular Flow Based on Fluorescence Imaging. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, pp1-9.



- [8] Aliyu, A. M., Lao, L., Almbrok, 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.
- [9] Henstock, W. H., & Hanratty, T. J. (1976). The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows. *AIChE Journal*, 22(6), pp990-1000.
- [10] 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).
- [11] Bharathan, D., & Wallis, G. B. (1983). Air-water countercurrent annular flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 9(4), pp349-366.
- [12] Vijayan, M., Jayanti, S., & Balakrishnan, A. R. (2002). Experimental study of air-water countercurrent annular flow under post-flooding conditions. *International journal of multiphase flow*, 28(1), pp51-67.
- [13] Wan, J., Sun, W., Deng, J., Pan, L. M., & Ding, S. H. (2021). Experimental study on air-water countercurrent flow limitation in a vertical tube based on measurement of film thickness behavior. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(6), pp1821-1833.
- [14] Ma, Y., Zeng, S., Shao, J., Zhou, T., Lyu, J., Li, J., & Lu, P. (2022). An experimental study on gas-liquid two-phase countercurrent flow limitations of vertical pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 110789.
- [15] Wan, J., Sun, W., Deng, J., Zhu, L., Ma, Z., Zhang, L. & Pan, L. M. (2022). Development of a dimensionless flooding correlation based on experimental study on air-water countercurrent flow limitation in a vertical tube. *Progress in Nuclear Energy*, 153, 104408.
- [16] Taitel, Y., & Dukler, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE journal*, 22(1), pp 47-55.