



## ارزیابی تجربی اثر زاویه انحراف لوله بر ضخامت کمینه و بیشینه فیلم مایع در جریان دوفازی

آرش غفوری<sup>۱</sup>، اشکان غفوری<sup>۱\*</sup>، عباس کوثری نیا<sup>۱</sup>، علیرضا دنه‌دزفولی<sup>۲</sup>

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: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

### چکیده

در این پژوهش، تاثیر زاویه انحراف محدود جریان دوفازی در یک لوله عمودی بر تشکیل ضخامت فیلم مایع با استفاده از تکنیک ثبت و پردازش تصاویر مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد الگوی جریان حلقوی، از جریان ناهمسوی آب و هوا در سه لوله شفاف با قطرهای بین ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر استفاده گردید. پس از تجزیه و تحلیل نتایج الگوی جریان حلقوی برای محدوده‌های مختلف سرعت ظاهری و عدد رینولدز جریان گاز و مایع، به همراه اقطار مختلف لوله، ضخامت بیشینه و کمینه فیلم مایع و نسبت آنها ارزیابی و ارائه شد. همچنین، مقادیر ضخامت معادل فیلم مایع در لوله‌های زاویه‌دار به صورت بی‌بُعد نسبت به ضخامت یکنواخت فیلم مایع در حالت عمودی کامل ارائه گردید. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با تغییر زاویه انحراف از ۹۰ به ۸۵ درجه، نسبت ضخامت فیلم بیشینه به ضخامت فیلم کمینه افزایش می‌یابد و همچنین ضخامت معادل فیلم مایع با کاهش روبرو بوده که این نتایج با تحقیقات قبلی نیز تطابق قابل قبولی دارد. همچنین آنالیز عدم قطعیت نشان می‌دهد که عدم قطعیت در ارزیابی تجربی ضخامت فیلم مایع حداکثر ۴/۹ درصد می‌باشد که در محدوده قابل قبول قرار دارد.

**کلمات کلیدی:** فیلم مایع، ضخامت کمینه، ضخامت بیشینه، ضخامت معادل، جریان دوفازی

### مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات در تحلیل جریان حلقوی دوفاز در لوله‌ها، تعیین ضخامت فیلم مایع در حالت عمودی و حالت مایل می‌باشد. بسیاری از رفتارها و ویژگی‌های بین سطحی (فاز مایع و گاز) نظیر تنش برشی بین سطحی، ضریب اصطکاک و افت فشار تصور می‌شود که به اندازه لایه مایع در اطراف محیط لوله مرتبط باشد [۱]. از طرفی تعیین الگوی جریان و یا توزیع فاز مایع و گاز درون لوله نیز از موضوعات چالشی در این حوزه می‌باشد. بعلاوه، جریان دوفازی ناهمسو خصوصاً جریان عمودی در زاویه‌های محدود انحراف نسبت به حالت قائم 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. بسیاری از پژوهشگران با استفاده از عکس برداری سرعت بالا در جریان دوفازی عمودی پایین رو یا بالارو الگوهای جریان حبابی، لخته‌ای و حلقوی را مشاهده کردند و مرز بین این سه الگو را براساس مقادیر کسر حجمی تخمین زدند [۲]. طی سال‌های گذشته اکثر مطالعاتی که بر روی جریان دوفازی حلقوی صورت پذیرفته است، با تمرکز بر جریان همسو پایین‌رو یا بالارو و در حالت کاملاً قائم بوده است و مطالعات کمی در مورد بررسی تجربی جریان‌های ناهمسو در لوله‌های عمودی در دسترس است. از مهمترین این پژوهش‌ها می‌توان به ارزیابی ضخامت فیلم مایع در مطالعات هنستوک و هانراتی و همکاران [۳]، ویجایان و همکاران [۴]، زادرازیل و همکاران [۵]، ویرا و همکاران [۶]، وان و همکاران [۷] و غفوری و همکاران [۸] نام برد.



انگیزه و نوآوری اصلی این پژوهش ارزیابی تجربی ضخامت بیشینه و ضخامت کمینه فیلم مایع در جریان حلقوی به کمک تکنیک ثبت و پردازش تصاویر در یک لوله عمودی با زاویه محدود (حداکثر ۵ درجه) در جریان دوفازی ناهمسو می‌باشد. همچنین ضخامت معادل فیلم مایع نیز به کمک روابط موجود محاسبه و ارزیابی می‌گردد.

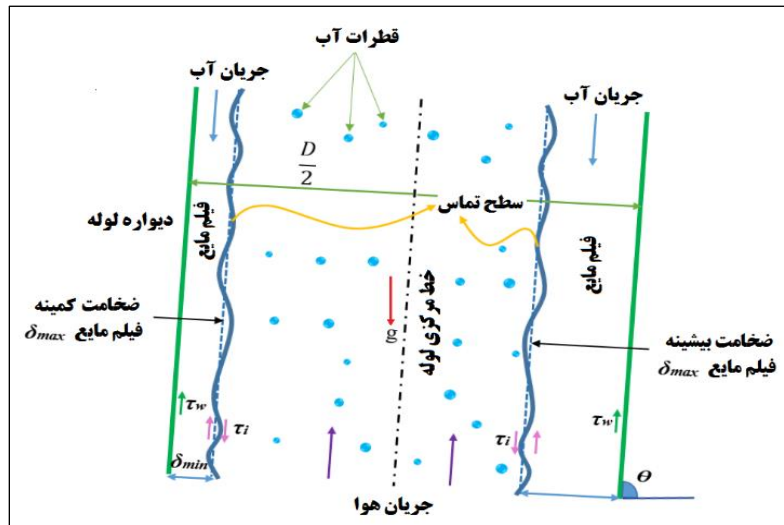
### سامانه تجربی آزمایشگاهی

در این پژوهش، به منظور مطالعه جریان حلقوی دوفازی در یک لوله عمودی با زاویه محدود، یک سامانه آزمایشگاهی شامل پمپ، کمپرسور، شیرهای کنترلی، لوله انجام آزمایش و تجهیزات تصویربرداری آماده شده است. از لوله‌هایی با جنس پلکسی گلاس شفاف و با قطرهای داخلی متنوع (در محدوده ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر) برای شکل‌گیری و مطالعه الگوی جریان حلقوی در سیال دوفازی استفاده شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی دو نوع سیال مورد استفاده قرار گرفته است: جریان هوای تامین‌شده توسط یک کمپرسور با توان ۱۰ کیلووات که از سمت پایین به بالا جریان دارد و جریان آب که به سمت بالا به پایین (مخالف جهت جریان هوا) پمپاژ می‌شود. بر اساس محدوده دبی آب و هوا و خواص فیزیکی متفاوت دو سیال، الگوها و اشکال مختلفی در سطح مشترک دو فاز ایجاد می‌شود که به آنها "رژیم جریان" می‌گویند. با توجه به محدوده دبی، سرعت ظاهری و عدد رینولدز جریان آب و هوا برای لوله‌های مختلف و محدوده‌های شکل‌گیری جریان حلقوی، بیش از ۲۵۰ داده مرتبط با آنها جدا شده و تحلیل‌ها بر اساس این داده‌ها انجام شده است. دیواره شفاف لوله به ناظر بیرونی امکان بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل لوله حاوی سیالات شفاف آب و هوا را فراهم می‌کند. این امکان به ناظر اجازه می‌دهد تا با استفاده از فیلم‌برداری و تصویربرداری، بصری‌سازی و ثبت رژیم‌های مختلف جریان را انجام دهد و امکان کمی‌سازی مقادیر خصوصاً ضخامت فیلم مایع در جریان حلقوی را فراهم سازد. تجهیزات اصلی اندازه‌گیری در این پژوهش در جدول (۱) ذکر شده و دقت هر کدام از آنها به صورت جداگانه مشخص شده است.

جدول ۱: تجهیزات اصلی اندازه‌گیری در پژوهش حاضر و دقت آنها

ردیف	نام تجهیز	مدل	دقت عملکرد
۱	دبی سنج آب	Z-۵۰۰۸	±۰.۴٪
۲	دبی سنج هوا	ACA05-25ZT	±۰.۴٪
۳	ترمومتر	TE100	±۰.۳٪
۴	فشارسنج	Autonics-PSAN	±۰.۳٪
۵	خط‌کش سنجش سطح	Pars	±۰/۵ Mm
۶	دوربین تصویر برداری	Nikon-D۷۲۰۰	CMOS-24.2MP
۷	دوربین فیلم برداری	Casio Ex- ZR۱۲۰۰	CMOS-16.1MP

همچنین در شکل (۱) نحوه شکل‌گیری جریان حلقوی در یک لوله عمودی با زاویه انحراف محدود به همراه جزئیات مربوطه نشان داده شده است.



شکل ۱: شکل‌گیری فیلم مایع در لوله زاویه‌دار

### ارزیابی ضخامت فیلم مایع جریان حلقوی در لوله با زاویه انحراف محدود

به منظور ارزیابی و تحلیل ضخامت فیلم مایع در لوله زاویه‌دار، ابتدا روابط مساحت برای ضخامت لایه یکنواخت فیلم مایع برای لوله کاملاً عمودی با زاویه ۹۰ درجه و سپس ضخامت لایه غیر یکنواخت برای لوله تقریباً عمودی با زاویه انحراف محدود، بیان شده است. ضخامت فیلم مایع در حالت عمودی که لایه‌ای یکنواخت است، به مساحت یک مستطیل منبسط شده و برای فیلم مایع در حالت تقریباً عمودی با زاویه انحراف محدود به یک ذوزنقه منبسط شده است. رابطه (۱) و (۲) مساحت لایه یکنواخت و غیر یکنواخت را همانطور که قبلاً نیز توسط بارنی [۹] استفاده شده است، نشان می‌دهد:

$$A_1 = \pi D \delta_C \quad (1)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \pi D [\delta_{\min}(0, \theta) + \delta_{\max}(\pi, \theta)] \quad (2)$$

در روابط فوق قطر لوله و  $\delta$  ضخامت فیلم مایع است. برای ضخامت فیلم یکنواخت از نماد  $\delta_C$  و برای ضخامت کمینه و بیشینه فیلم مایع در قسمت فوقانی و تحتانی لوله شیب دار از  $\delta_{\min}(0, \theta)$  و  $\delta_{\max}(\pi, \theta)$  به ترتیب استفاده شده است. به منظور معادل سازی ضخامت فیلم غیر یکنواخت لوله شیب‌دار با یک مقدار متوسط، ابتدا مساحت  $A_1$  و  $A_2$  برابر قرار داده می‌شوند و از آنجا مقدار متوسط معادل ضخامت فیلم مایع ( $\delta_{eq}$ ) مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\delta_{eq} = \frac{1}{2} [\delta_{\min}(0, \theta) + \delta_{\max}(\pi, \theta)] \quad (3)$$

همچنین لو و همکاران [۱۰] یک رابطه تجربی برای محاسبه نسبت ضخامت کمینه به بیشینه فیلم مایع بر حسب زاویه انحراف لوله در جریان حلقوی هم جهت ارائه دادند که زاویه انحراف لوله ( $\theta$ ) با حالت عمودی لوله و حداکثر تا ۳۰ درجه انحراف مقایسه خواهد شد:



$$\frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}} = \frac{1 - 0.0287(90 - \theta)}{1 + 0.0287(90 - \theta)} \quad (4)$$

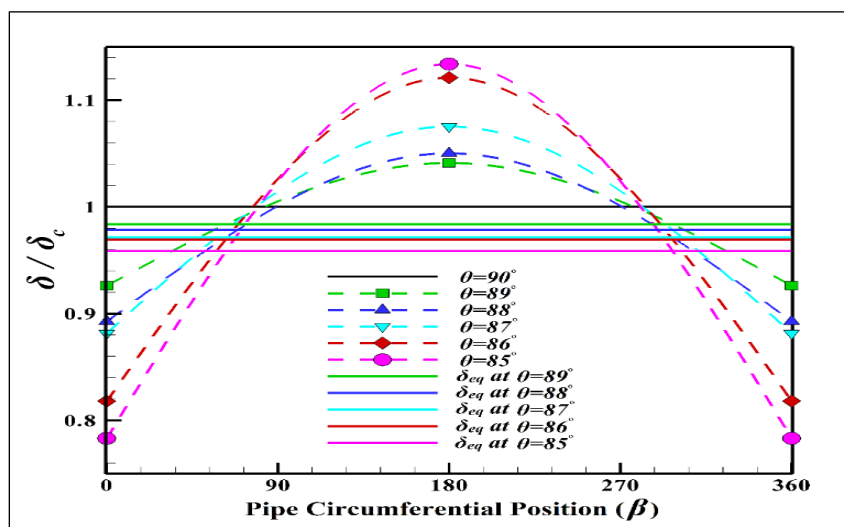
شکار و همکاران [۱۱] یک همبستگی تجربی برای محاسبه نسبت ضخامت فیلم کمینه به ضخامت فیلم بیشینه به شکل رابطه زیر را پیشنهاد نمودند که مبنای ارائه این رابطه مقادیر تجربی ارائه شده توسط پاز و شوهام [۱۲] می‌باشد:

$$\frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}} = \exp\left[-8.80 \times 10^{-2}(90 - \theta)\right] \quad (5)$$

همچنین وانگ و همکاران [۱۳] در پژوهش خود از یک رابطه تجربی برای محاسبه نسبت ضخامت فیلم کمینه به ضخامت فیلم بیشینه بر حسب داده های تجربی فرشمن و همکاران [۱۴] استفاده کردند:

$$\frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}} = \exp\left[-3.44 \times 10^{-2}(90 - \theta)\right] \quad (6)$$

بر اساس ارزیابی انجام شده بر ضخامت فیلم مایع به کمک پردازش تصاویر، مقایسه‌ای بین مقادیر کمینه و بیشینه ضخامت فیلم مایع در زوایای انحراف مورد مطالعه در شکل (۲) ارائه شده است. از مقادیر ضخامت فیلم مایع ( $\delta_c$ ) در حالت عمودی ( $\theta = 90^\circ$ ) به عنوان مبنای بی‌بعد سازی مقادیر کمینه و بیشینه در این نمودار استفاده شده است و با خط صاف مشکی در نمودار مشخص شده است.

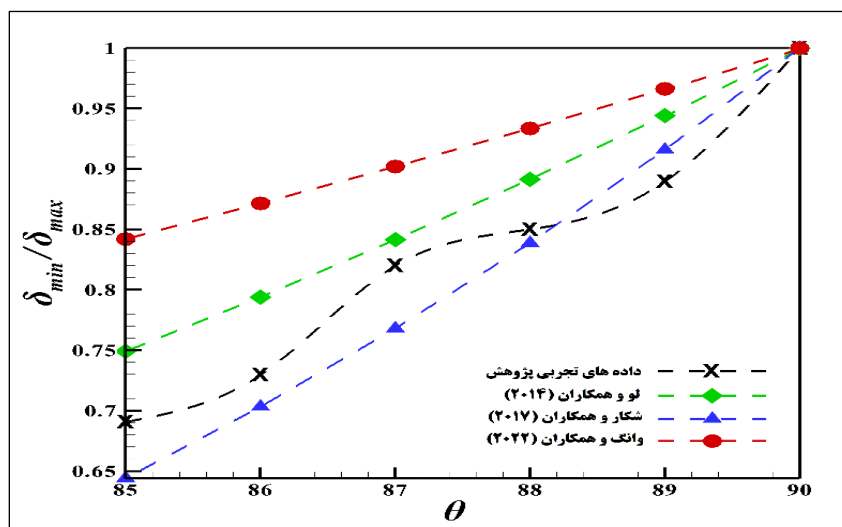


شکل ۲: مقایسه ضخامت فیلم کمینه و بیشینه در زوایای محیطی و زوایای انحراف مختلف

همچنین در شکل (۳) مقادیر ضخامت فیلم مایع کمینه نسبت به ضخامت فیلم مایع بیشینه که به کمک نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با مقادیر حاصل از پژوهش‌های همچون لو و همکاران [۱۰]، شکار و همکاران [۱۱] و وانگ و همکاران [۱۳] مقایسه شده



که علیرغم تفاوت در محدوده سرعت ظاهری، اعداد رینولدز فاز گاز و مایع، قطر لوله‌ها و شرایط جریان در لوله از همخوانی قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۳: مقایسه نسبت ضخامت کمینه به بیشینه فیلم مایع با پژوهش‌های پیشین در زوایای انحراف مختلف

به منظور ارزیابی نتایج در حالت عمودی با نتایج پژوهش‌های پیشین، ضخامت فیلم مایع و سرعت نسبی فاز گاز به فاز مایع به شکل بی‌بعد فیلم در قالب زیر تعریف می‌گردند:

$$\tilde{u}_{sr} = \frac{u_{sg}}{u_{sl}}, \quad \tilde{\delta}_c = \frac{\delta_c}{D} \quad (7)$$

در مقایسه ارائه شده در شکل (۴) هر دو پژوهش برحسب مطالعه جریان ناهمسو انجام شده و علیرغم انجام آزمایش در قطر‌ها و سرعت‌های ظاهری مختلف تطابق خوبی در روند و مقادیر بی‌بعد حاصله مشاهده می‌گردد.

### آنالیز عدم قطعیت

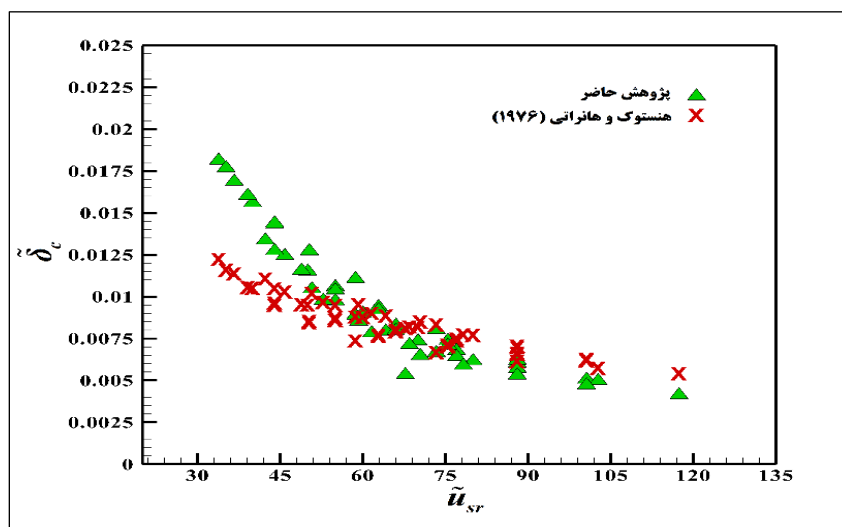
عدم قطعیت نتیجه تمام خطاهای احتمالی است که می‌توان به نتیجه اندازه‌گیری آزمایشگاهی نسبت داد و نشان دهنده درجه تردید نسبت به نتیجه اندازه‌گیری شده است. در این مطالعه عدم قطعیت در محاسبه پارامترهای اصلی جریان دو فازی حلقوی مانند ضخامت فیلم مایع کمینه و ضخامت فیلم مایع بیشینه بر اساس روش پیشنهادی کلین و مک‌کلینتوک [۱۵] محاسبه شده است. با توجه به رابطه (۸)، عدم قطعیت پارامتر R با استفاده از عدم قطعیت پارامترهای مستقل  $X_1, X_2, \dots, X_N$  بدست می‌آید. رابطه (۹) برای محاسبه عدم قطعیت پارامتر R استفاده می‌گردد.

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (8)$$

$$U_R = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} U_{Xi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$



عدم قطعیت ضخامت فیلم مایع در پژوهش حاضر مطابق تحلیل داده‌های تجربی برابر  $4/9$  درصد محاسبه شده که از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۴: ارزیابی داده‌های تجربی ضخامت بی‌بعد فیلم مایع با پژوهش مرجع [۳] در نسبت‌های مختلف سرعت ظاهری فاز گاز به فاز مایع

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش تجربی یک جریان دوفازی غیر همسو در یک سامانه آزمایشگاهی به صورت عمودی و با زاویه انحراف محدود بین  $85$  تا  $90$  درجه در لوله‌هایی با اقطار  $25$  تا  $75$  میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. پس از بررسی رژیم‌های جریان ایجاد شده، به طور خاص رژیم جریان حلقوی به کمک تکنیک ثبت و پردازش تصاویر مورد مطالعه و ارزیابی گردید. در بیشتر کاربردهای صنعتی زاویه انحراف لوله نسبت به حالت عمودی بسیار محدود و در حد حداکثر  $5$  درجه می‌باشد و از این جهت نتایج این مطالعه حایز اهمیت می‌باشد. ضخامت کمینه، ضخامت بیشینه و ضخامت معادل فیلم مایع از جمله پارامترهای مهم ارزیابی شده در این پژوهش می‌باشند. مشاهده گردید که با تغییر زاویه انحراف از  $90$  به  $85$  درجه، نسبت ضخامت فیلم بیشینه به ضخامت فیلم کمینه افزایش می‌یابد و همچنین ضخامت معادل فیلم مایع با کاهش روبرو بوده که این نتایج با تحقیقات قبلی نیز تطابق دارد. همچنین آنالیز عدم قطعیت نشان می‌دهد که عدم قطعیت در ارزیابی تجربی ضخامت فیلم مایع حداکثر  $4/9$  درصد می‌باشد که در محدوده قابل قبول قرار دارد.

### مراجع:

- [1] Wallis, G.B., Flow, O.D.T.P., (1969). McGraw-Hill Inc. New York, NY, USA.
- [2] 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): pp 34-38.
- [3] Hanratty, T.J., Henstock, W.H., (1976). The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows. AIChE Journal 22(6): pp 990-1000.
- [4] 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): pp 51-67.



- [5] Zadrazil, I., Matar, O.K., Markides, C.N., (2014). An experimental characterization of downwards gas-liquid annular flow by laser-induced fluorescence: Flow regimes and film statistics. *International journal of multiphase flow* 60: pp 87-102.
- [6] Vieira, C., Stanko, M., Oplt, T., (2021). An improved model for predicting liquid loading onset in inclined pipes with non-uniform liquid wall films. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 91: 103902.
- [7] Wan, J., Sun, W., Deng, J., Zhu, L., Ma, Z., Zhang, L., Huang, T., 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.
- [8] Ghafouri, A., Ghafouri, A., Kosarineia, A., Daneh-Dezfuli, A., (2023). An optimize empirical correlations for liquid film thickness and interfacial friction factor in vertical gas-liquid annular flow. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*: 104706.
- [9] Barnea, D., (1986). Transition from annular flow and from dispersed bubble flow—unified models for the whole range of pipe inclinations. *International journal of multiphase flow* 12(5): pp 733-744.
- [10] Luo, S., Kelkar, M., Pereyra, E., Sarica, C., (2014). A new comprehensive model for predicting liquid loading in gas wells. *SPE Production & Operations* 29(04): pp 337-349.
- [11] Shekhar, S., Kelkar, M., Hearn, W.J., Hain, L.L., (2017). Improved prediction of liquid loading in gas wells. *SPE Production & Operations* 32(04): pp 539-550.
- [12] Paz, R.J., Shoham, O., (1999). Film-thickness distribution for annular flow in directional wells: horizontal to vertical. *SPE Journal* 4(02): pp 83-91.
- [13] Wang, L.S., Liu, S., Hou, L.T., Yang, M., Zhang, J., Xu, J.Y., (2022). Prediction of the liquid film reversal of annular flow in vertical and inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow* 146: 103853.
- [14] Fershtman, A., Robers, L., Prasser, H.M., Barnea, D., Shemer, L., (2020). Interfacial structure of upward gas-liquid annular flow in inclined pipes. *International journal of multiphase flow* 132: 103437.
- [15] Kline, S. J., McClintock, F. A., (1963). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech. Eng.* 75: 3-8.8.