



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Numerical Investigation of Flow Induced by a Gate Valve in the Slug Regime

Samira Mohammadi ^a, Ali Jahangiri ^{a,*}, Mohammad Emamzadeh ^a, Sahand Majidi ^a

^a Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-02-16

Revised: 2024-06-07

Accepted: 2024-06-12

Keywords:

Numerical simulation;

Slug frequency;

Pressure drop;

Horizontal pipe;

Gate valve;

Two-Phase flow.

ABSTRACT

Slug flow is a part of an intermittent flow that is avoided in industrial applications because of its irregularity and high-pressure fluctuations. The present investigation aims to comprehend the behavior of intermittent slug flow with the gate valve and its associated pressure drop, slug liquid holdup, slug frequency, and averaged slug body length using CFD simulation studies. To achieve this objective, numerical investigations of slug flow were carried out on a horizontal pipe 10 m in length and 20 mm in diameter with three distinct area contraction ratios. First, the numerical results (slug frequency) were validated by comparison with other studies, and a reasonable agreement with an error of less than 3% was achieved. Second, the numerical results were validated by comparison with experimental data in terms of time and space for slug flow encountering the gate valve, and a sensible agreement with an error of less than 15% was achieved. Eventually, pressure gradient, slug frequency, slug length, and the existence of a gate valve have been investigated using numerical methods. The results showed that the slug frequency increases by 4.3% and this phenomenon is due to the small waves that occur due to the high pressure drop at the valve location. The length of the liquid slug increases by 20.89 percent by reducing the opening of the gate valve and decreases by 30.4 percent by increasing the surface velocity of the gas. By increasing the distance from the gate valve, the pressure drops decrease by 15.65%.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33293.2625>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: a_jahangiri@sbu.ac.ir

How to cite this article:

Mohammadi, S., Jahangiri, A., Emamzadeh, M. and Majidi, S. (2025). Numerical Investigation of Flow Induced by a Gate Valve in the Slug Regime. *Journal of Modeling in Engineering*, 23(80), 219-232. doi: 10.22075/jme.2024.33293.2625

بررسی عددی جریان القا شده توسط یک شیر دروازه‌ای در رژیم جریان اسلاگ

سمیرا محمدی^۱، علی جهانگیری^{۱*}، محمد امامزاده^۱، سهند مجیدی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷	در بیشتر کاربردهای صنعتی به دلیل خاصیت نامنظمی و نوسانات فشار بالا در رژیم جریان اسلاگ، سعی بر آن است که از تشکیل آن جلوگیری شود. هدف از این تحقیق، بررسی گرادیان فشار، کسر حجمی مایع اسلاگ، فرکانس اسلاگ و طول اسلاگ با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای جریان اسلاگ با وجود شیر دروازه‌ای در لوله افقی می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، شبیه‌سازی عددی برای رژیم جریان اسلاگ در یک لوله افقی به طول ۱۰ متر و قطر ۲۰ میلی‌متر با سه نسبت بازشدگی سطح مقطع مجزا انجام شد. ابتدا نتایج عددی (فرکانس اسلاگ) در مقایسه با سایر مطالعات عددی اعتبارسنجی شد و توافق منطقی با خطای کمتر از ۳ درصد به دست آمد. دوم، نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی از نظر زمان و مکان برای حالتی که جریان اسلاگ در مواجهه با شیر دروازه‌ای قرار دارد، تأیید شد و خطای کمتر از ۱۵٪ به دست آمد. در نهایت، گرادیان فشار، فرکانس اسلاگ، طول اسلاگ و کسر حجمی مایع با وجود شیر دروازه‌ای با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این بود که فرکانس اسلاگ به میزان ۴/۳ درصد افزایش می‌یابد و این پدیده به دلیل موج‌های کوچکی است که به دلیل افت فشار زیاد در محل شیر به وجود می‌آیند. طول اسلاگ مایع با کاهش بازشدگی دهانه شیر دروازه‌ای به میزان ۲۰/۸۹ افزایش و با افزایش سرعت سطحی گاز به میزان ۳۰/۴ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله از شیر دروازه‌ای افت فشار به میزان ۱۵/۶۵ درصد کاهش می‌یابد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳	
واژگان کلیدی:	
شبیه‌سازی عددی، فرکانس اسلاگ، افت فشار، لوله افقی، شیر دروازه‌ای، جریان دو فاز.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33293.2625>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

و وجود دریچه‌های کنترل جریان) می‌باشد. اخیراً مطالعات زیادی در مورد جریان نزدیک به مانع انجام شده است. وجود مانع ممکن است به وجود آوردنده یا از بین برنده جریان اسلاگ در جریان دو فازی شود. در نتیجه بسیاری از روابط مرتبط با جریان اسلاگ غیرمعتبر شناخته می‌شود. در خطوط انتقال، وجود شیر دروازه‌ای برای اتصال و قطع و کنترل جریان دور از انتظار نیست. شیرهای دروازه‌ای از اجزای مهم در سیستم‌های انتقال پنوماتیکی هستند. فعالیت‌های صنعتی عمدتاً مستلزم تقریب افت فشار در شیر

یکی از رایج‌ترین تحقیقات در دهه اخیر، شبیه‌سازی عددی جریان‌های اسلاگ دو فازی در صنعت حمل‌ونقل نفت و گاز و نیروگاه‌های هسته‌ای در لوله‌های افقی است [۱]. فرآیندهای صنعتی اغلب به تخمین افت فشار روزنه برای یک دبی معین، یا نرخ جریان به عنوان تابعی از افت فشار روزنه نیاز دارند. اکثر مطالعات انجام شده، بیشتر در مورد موضوعاتی مانند تغییر فاز در روزنه و شکل روزنه (اندازه روزنه، ضخامت دهانه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a_jahangiri@sbu.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

دهانه را در لوله‌هایی با قطر بزرگ به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها افت فشار ایجاد شده توسط روزه‌های نازک و ضخیم در جریان دو فازی را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که کسر حجمی مایع به‌طور کلی در سراسر تکینگی افزایش می‌یابد و درست در پایین دست روزه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

برتولا [۷] توزیع کسر حجمی مایع را با استفاده از پروب‌های فیبر نوری برای جریان هوا-آب در یک بخش آزمایشی افقی با انقباض ناگهانی ناحیه مورد مطالعه قرار داد و دریافت که انقباض ناگهانی به‌طور قابل توجهی بر توزیع گاز در بالادست و پایین دست لوله تأثیر می‌گذارد و به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند. وی نشان داد که با نزدیک شدن مخلوط هوا و آب به انقباض سطحی، کسر حجمی متوسط مقطع کاهش می‌یابد. همچنین نتایج وی نشان داد که سرعت دماغه حباب با سرعت سطحی گاز به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد، اما مقدار آن حدود ۲۰ درصد کمتر از جریان مشابه در یک لوله مستقیم می‌باشد. آزمایش‌های آن‌ها این واقعیت را نشان داد که قرار دادن یک انقباض دهنده لوله، کسر حجمی و سرعت اسلاگ را تغییر می‌دهد.

اولیویرا و همکاران [۸] جریان جرمی آزمایشی مخلوط‌های هوا و آب را با استفاده از یک ونتوری با صفحه روزه‌ای جفت شده در جریان عمودی و افقی رو به بالا بر روی الگوی جریان حباب‌دار، اسلاگ، چرن و حلقوی، اندازه‌گیری کردند.

فوسا و گالمینی [۹] کسر حجمی و افت فشار را برای روزه‌های با لبه‌ی تیز با نسبت‌های انقباض مختلف برای جریان اسلاگ به صورت تجربی بررسی نمودند. در کار آن‌ها یک لوله افقی ۱۲ متری با قطر ۰/۰۶ و ۰/۰۴ متر مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که میانگین کسر حجمی به حداکثر مقدار خود در سطح پایین دست روزه می‌رسد.

زقلول و همکاران [۱۰] اثر یک روزه را بر جریان عمودی رو به بالای هوا-آب در رژیم‌های حباب‌دار، اسلاگ و چرن، برای نسبت‌های دیافراگم مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که وجود صفحه روزه به‌طور قابل توجهی ساختار جریان را در مجاورت تکینگی تغییر می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که فرکانس ساختارهای تناوبی

دروازه‌ای برای یک سرعت سطحی معین یا سرعت سطحی جریان دو فازی به عنوان تابعی از افت فشار شیر دروازه‌ای می‌باشند. از طرفی وجود جریان اسلاگ به دلیل خاصیت فرکانسی آن قبل از شیر دروازه‌ای می‌تواند به سازه شیر آسیب برساند. شیر دروازه‌ای به دلیل این که فرآیند قطع و وصل جریان را به تدریج انجام می‌دهد، ممکن است خود باعث ایجاد جریان اسلاگ شود. از این‌رو دریافت موقعیت و علت به وجود آمدن جریان اسلاگ با وجود شیر دروازه‌ای می‌تواند مفید واقع شود.

تاکنون موضوعاتی مانند تغییرات فاز در برخورد با روزه، تأثیر هندسه روزه بر ویژگی‌های جریان و همچنین شکل‌های مختلف دهانه روزه بررسی شده است. از جمله مقالاتی که در مورد بررسی جریان دو فاز در روزه و شیر دروازه‌ای در لوله افقی برای جریان دو فازی مورد مطالعه قرار گرفته است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تاپوکو و همکاران [۲] با استفاده از معادلات جرم، تکانه و انرژی یک بعدی، افت فشار را در صفحات روزه و همچنین مناطق مسدود شده مسطح تخمین زدند. لین و همکاران [۳]، فرسایش شیر دروازه‌ای را در جریان دو فازی گاز-جامد با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۲ و DEM بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که تعداد ذرات جامد نقش مهمی در فرسایش دریاچه دروازه‌ای ایفا می‌کند.

بررسی جریان دو فاز و تک فاز از روزه‌های نازک و ضخیم توسط رول و داش [۴] در یک لوله افقی انجام شد. آن‌ها افت فشار در جریان عبوری از روزه‌های یک لوله افقی را به صورت عددی مطالعه نمودند. تأثیر هندسه روزه بر افت فشار دو فاز با انتخاب دو لوله با قطرهای داخلی ۶۰ میلی‌متر و ۴۰ میلی‌متر و هشت حالت بازشدگی متفاوت با سه نسبت سطح متفاوت در نظر گرفته شده است. مقایسه مطالعه عددی و تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که نتایج کار آن‌ها قابل قبول می‌باشد.

در گذشته مطالعاتی در رابطه با جریان دو فاز در مواجهه با موانع ارائه شده است، از جمله جانسن [۵] که افت فشار در جریان دو فازی آب-بخار، برای ناپیوستگی و انبساط آب در یک لوله افقی بررسی کرده است.

سعداوی و همکاران [۶] جریان دو فازی عبوری از طریق

² CFD

بالادست و پایین دست روزنه برای رژیم‌های حبایی و اسلاگ بسیار شبیه به یکدیگر است.

زقلول و همکاران [۱۱] افت فشار جریان تک فاز و دو فاز عمودی را برای جریان رو به بالا از طریق شیر دروازه و شیر توپی برای پنج حالت بازشدگی دریچه برای جریان اسلاگ، حبایی و چرن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که برای جریان تک فاز، افت فشار با افزایش نرخ جریان مایع افزایش می‌یابد و با افزایش سطح مقطع دریچه، کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش سطح دریچه برای جریان دو فاز، افت فشار به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

رول و داش [۱۲] افت فشار، کسر حجمی و نسبت لغزش جریان آب-هوای دو فاز را از طریق روزنه‌های نازک و ضخیم با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی و اولبرین-اولبرین در یک لوله افقی به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها با انتخاب دو لوله با قطر داخلی ۶۰ و ۴۰ میلی‌متر و هشت مقدار قطر داخلی روزنه مختلف (برای هر لوله)، تأثیر هندسه روزنه را بر فشار دو فاز بررسی نمودند. نتایج آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت. در این راستا یک مدل ریاضی برای کسر خود ارائه نمودند.

شند و نیوول [۱۳] با استفاده از یک سیستم اندازه‌گیری ضخامت فیلم مایع نوری غیرتهاجمی، مجموعه‌ای منحصر بفرد از داده‌های ضخامت لایه مایع و افت فشار را برای جریان افقی و حلقوی هوا و آب از طریق لوله‌هایی با سطح مقطع گرد، مربع و مثلث پیدا کردند.

علیمونتی و همکاران [۱۴] افت فشار اصطکاکی و کسر حجمی جریان دو فاز را در شیرهای چند دهانه‌ای با سه نسبت قطر متفاوت، برای دو الگوی جریان حبایی و اسلاگ برای یک لوله عمودی با قطر ۴ میلی‌متر را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که روابط موجود نمی‌تواند به درستی پارامترهای آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند. آن‌ها این تفاوت را به دلیل هندسه گلوگاه شیر و نسبت قطر/ضخامت در جریان دو فاز اعلام کردند.

گراتن و همکاران [۱۵] الگوهای جریان را در لوله‌ای به قطر ۱۲۷ میلی‌متر با اندازه‌های مختلف دهانه‌های صفحه و یک شیر دروازه‌ای بررسی نمودند. آن‌ها داده‌های مربوط به افت فشار روی صفحات شیر و اوریفیس را مطالعه کردند و با دو نمونه از روابط افت فشار که در مقالات قبلی ذکر شده بود، مقایسه نمودند. آن‌ها عدم دقت این روابط را به دلیل وجود روزنه و دریچه در لوله نشان دادند.

چینگ و همکاران [۱۶] تلفات فشار در شیرهای گلوب و دروازه‌ای را در جریان دو فاز امولسیون روغن/آب مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ضرایب تلفات را برای دریچه‌های گلوب و دروازه‌ای کاملاً باز و نیمه باز، به‌طور آزمایشگاهی در طول جریان آشفته مخلوط‌های روغن-آب دو فاز تعیین نمودند. همچنین نشان دادند که غلظت و نوع امولسیون‌ها (روغن در آب یا آب در روغن) که از شیرها جریان می‌یابند، تأثیر ناچیزی بر ضرایب تلفات دارد.

بویایهو و همکاران [۱۷] جریان دو فاز آب - هوا را در یک لوله عمودی با قطر داخلی ۳۴ میلی‌متر (جریان رو به پایین) بررسی نمودند. کسر حجمی در هفت موقعیت در امتداد بخش آزمایش اندازه‌گیری شد. روابط ارائه شده تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌داد. آن‌ها همچنین برای فرکانس اسلاگ، رابطه‌ای پیشنهاد کردند که با داده‌های آزمایشگاهی خطایی در حدود ۱۰ درصد داشت. با توجه به آنچه تاکنون بررسی شد، وجود شیرهای قطع جریان در لوله‌های انتقال سیال دور از انتظار نیست. از طرف دیگر، یکی دیگر از مواردی که می‌تواند به دریچه‌های دروازه‌ای آسیب برساند، وجود جریان اسلاگ قبل از شیر دروازه‌ای است. جریان اسلاگ می‌تواند باعث شکست یا خوردگی تجهیزات شیر دروازه‌ای شود. بنابراین، بررسی عواملی که باعث راه‌اندازی اسلاگ می‌شوند و مقابله با آن‌ها قبل از شیر دروازه‌ای مفید می‌باشد. از طرفی خود شیرهای دروازه‌ای سرعت دو فاز جریان را در دهانه‌های مختلف تغییر می‌دهند و می‌توانند باعث تلاطم و در نهایت اسلاگی شدن جریان شوند. با این دلایل ذکر شده، عدم انجام تحقیقات لازم برای بررسی وجود هم‌زمان جریان اسلاگ و شیر دروازه‌ای در لوله افقی ما را به مطالعه در این زمینه ترغیب نمود.

۲- شبیه‌سازی عددی

به منظور درک مشخصه‌های جریان اسلاگ مانند کسر حجمی مایع، افت فشار و فرکانس اسلاگ در سطح مقطع شیر دروازه‌ای، شبیه‌سازی عددی جریان اسلاگ دو فاز آب - هوا در لوله‌ای با قطر ۰/۰۲ متر و طول ۱۰ متر انجام شده است. به دلیل الگوی پیچیده جریان اسلاگ، از مدل انتقال تنش برشی $k-\omega$ (SST) برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شد. طرح $k-\omega$ (SST) از مدل اصلی $k-\omega$ در ناحیه داخلی لایه مرزی استفاده می‌کند و به مدل استاندارد $k-\epsilon$ در منطقه بیرونی لایه مرزی انتقال می‌یابد.

۱-۲- معادلات حاکم

اولین قدم در شبیه‌سازی جریان اسلاگ، پیش‌بینی متغیرهای اصلی موثر بر آن است. توازن جرم مایع و گاز برای جریان اسلاگ به صورت زیر ارزیابی شده است:

$$U_{SL} = U_S H_S \frac{l_S}{l} + U_f H_f \frac{l_f}{l} \quad (1)$$

$$U_{SG} = U_S (1 - H_S) \frac{l_S}{l} + U_G (1 - H_f) \frac{l_f}{l} \quad (2)$$

که در آن l_S و l_f طول ناحیه اسلاگ و طول فیلم مایع می‌باشند. H_S و H_f کسر حجمی مایع در ناحیه اسلاگ و فیلم مایع هستند و U_{SL} و U_{SG} به ترتیب سرعت سطحی مایع و سرعت سطحی گاز هستند. با پیشنهاد تایتل و بارنیا [۱۸]، سرعت اسلاگ مایع مخلوط U_m به صورت زیر برآورد شده است:

$$U_S = U_m = U_{SL} + U_{SG} \quad (3)$$

داکلو و هابارد [۱۹] مقدار l را بر اساس داده‌های تجربی افت فشار برای یک لوله افقی به صورت زیر ارائه نمودند:

$$l = \frac{U_t}{f_s} \quad (4)$$

فرکانس اسلاگ مرتبط با عدد فرود Fr_s ، با استفاده از داده‌های تجربی توسط گرگوری و اسکات [۲۰] با رابطه ۶ می‌باشد، که در آن، g ثابت شتاب گرانش، و D قطر داخلی لوله است:

$$f_s = 0.0226 Fr_s^{(1/2)} \quad (5)$$

$$Fr_s = \left(\frac{\left(\frac{U_{SL}}{gD} \right)}{\frac{19.75}{U_m} + U_m} \right) \quad (6)$$

U_t در معادله (۴)، که سرعت انتقال است، با استفاده از معادله به دست آمده توسط تایتل و بارنیا [۱۸] برای جریان اسلاگ محاسبه می‌شود:

$$U_t = 1.2 U_m + 0.54 \sqrt{gD} \quad (7)$$

مدل حجم سیال [۲۱] بر اساس روش ردیابی اسلاگ برای شبیه‌سازی جریان دو فازی هوا-آب است. حل معادلات بقای حرکت و جرم [۲۲] در حوزه جریان سیال به‌طور هم-زمان انجام شده است. در همه موارد ذکر شده، تغییر فازی

رخ نمی‌دهد. هوا و آب به عنوان جریان تراکم ناپذیر فرض شده‌اند. بر اساس این مفروضات، معادلات تداوم و تکانه به صورت معادلات زیر معرفی می‌شوند.

$$\nabla \cdot (\bar{U}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) =$$

$$-\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + F \quad (9)$$

که در آن معادله مشتق شده \bar{U} و F به ترتیب بردار سرعت و نیروی کشش سطحی را نشان دادند. چگالی (ρ) و ویسکوزیته (μ) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho = \alpha \rho_G + (1 - \alpha) \rho_L \quad (10)$$

$$\mu = \alpha \mu_G + (1 - \alpha) \mu_L \quad (11)$$

که در آن، α کسر حجمی مایع را ارائه می‌کند. این رابطه با افزودن یک عبارت فشرده‌سازی مصنوعی به معادله حجم سیال^۳ [۲۳] ایجاد شده است.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{u} \nabla \cdot (\alpha) + \nabla \cdot (\bar{u}_c \alpha (1 - \alpha)) = 0 \quad (12)$$

که در آن (\bar{u}_c) سرعت فشرده‌سازی مصنوعی است که به-طور معمول به اسلاگ اعمال می‌شود، تا میدان کسر حجمی را فشرده و شکل اسلاگ را حفظ کند. بردار سرعت فشرده سازی اسلاگ به صورت معادله (۱۳) ارائه می‌شود:

$$\bar{u}_c = C_a |\bar{u}| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (13)$$

که در آن ضریب C_a یکی از پارامتر اصلی می‌باشد که برای کنترل فشرده‌سازی سطحی، مقدار مشخص صفر یا یک را به خود اختصاص می‌دهد. نیروی کشش سطحی [۲۵] به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$F = \sigma \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \nabla \alpha \quad (14)$$

σ به عنوان ضریب کشش سطحی سیال تعریف می‌شود. تحلیل جریان با استفاده از دو موازنه مومنوم برای هر فاز انجام شده است:

$$-A_L \left(\frac{dp}{dx} \right) - \tau_{wL} S_L + \tau_i S_i = 0 \quad (15)$$

³ VOF

محیط ناحیه مرطوب فیلم، گاز و ناحیه سطح مشترک توسط روابط زیر بیان می‌گردد:

$$S_L = D\theta \quad (26)$$

$$S_G = D(\pi - \theta) \quad (27)$$

$$S_i = D\theta \quad (28)$$

$$H_L = \frac{\theta - 0.5 \sin 2\theta}{\pi} \quad (29)$$

مدل آشفتگی SST k- ω انتقال تنش برشی آشفته را در نظر می‌گیرد و پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی از شروع و میزان جداسازی جریان تحت گرادیان فشار نامطلوب را ارائه می‌دهد. برای کارایی نسبتاً بالا برای حل مسائل عددی، مدل دو معادله SST k- ω اغلب برای شبیه‌سازی عددی اتخاذ می‌شود. بررسی عددی جریان اسلاگ برای یک لوله جریان افقی دو فازی با استفاده از مدل آشفتگی SST k- ω برای هر دو فاز توسط والی و همکاران انجام شده است [۲۷]. این مدل آشفتگی در مطالعه کنونی مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا به یک فاز اجازه انتشار و اعمال میرایی در سطح آزاد اشغال شده توسط فاز دیگر، نزدیک فصل مشترک را می‌دهد. معادلات مدل SST k- ω از دو معادله انتقال تشکیل شده است: انرژی جنبشی k و نرخ اتلاف ω .

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{v_i} P - \beta \rho \omega^2 \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_w \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ &2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{w2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (30)$$

که در آن، ρ چگالی سیال است، k و Ω به ترتیب انرژی جنبشی آشفتگی و فرکانس اتلاف آن، P تولید انرژی جنبشی آشفته، V_T ویسکوزیته سینماتیکی آشفته و m ویسکوزیته دینامیکی مولکولی است.

۲-۲- هندسه لوله و شرایط مرزی

همانطور که ذکر شد، مدل حجم سیال در مطالعه حاضر برای ردیابی فصل مشترک بین فازهای هوا-آب به منظور تعیین رژیم جریان اسلاگ استفاده شده است. مجموعه‌ای واحد از معادلات بقاء برای هر دو سیال همراه با کسر حجمی از پیش تعریف شده برای هر فاز، همراه با مدل آشفته همگن به صورت تکراری حل شده است. شایان ذکر است که از کد

$$-A_G \left(\frac{dp}{dx} \right) - \tau_{wG} S_G - \tau_i S_i = 0 \quad (16)$$

که A_G و A_L سطح مقطع گاز و مایع هستند، S_G و S_L قوسی شکل در تماس با آب و هوا و τ_{wg} ، τ_{wl} و τ_i تنش برشی دیوار-آب، تنش برشی دیوار-هوا و سطح مشترک هستند.

$$\tau_{wL} = f_L \rho_L \frac{u_L^2}{2} \quad (17)$$

$$\tau_{wG} = f_G \rho_G \frac{u_G^2}{2} \quad (18)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_G (U_G - U_L)^2 \quad (19)$$

که در آن f_L ، f_G و f_i به ترتیب فاکتورهای اصطکاک فاینینگ لایه مایع، حباب گاز و اسلاگ گاز-مایع و ρ_L و ρ_G چگالی مایع و گاز می‌باشند. برای جریان اسلاگ در یک لوله صاف، f_L و f_G بر حسب عدد رینولدز هر فاز بیان می‌شوند [۲۶]:

$$f_L = \frac{C_L}{(\rho_L U_L D_{hL} / \mu_L)^n} \quad (20)$$

$$f_G = \frac{C_G}{(\rho_G U_G D_{hG} / \mu_G)^m} \quad (21)$$

قطرهای هیدرولیکی فیلم مایع و حباب‌های گاز به صورت زیر ارائه شده است [۲۸]:

$$D_{hL} = \frac{4A_L}{S_L} \quad (22)$$

$$D_{hG} = \frac{4A_G}{(S_G + S_i)} \quad (23)$$

مقدار ثابت برای جریان آرام هر دو فاز با مقدار $C_L = 16$ ، $C_G = 1$ ، $n = 1$ تخمین زده می‌شود. برای جریان آشفته برای هر دو فاز نیز $C_L = C_G = 0.046$ ، $m = 0.2$ می‌باشد.

هندسه جریان ناحیه فیلم و کسر حجمی مایع در ناحیه فیلم مایع با نیمی از زاویه‌ای که سطح مشترک مایع-گاز را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ارزیابی می‌شود [۲۹]:

$$A_L = \frac{D^2}{4} (\theta - 0.5 \sin 2\theta) \quad (24)$$

$$A_G = \frac{D^2}{4} (\pi - \theta - 0.5 \sin 2\theta) \quad (25)$$

۳- روش حل

گزینه PRESTO^۴ برای درون‌یابی فشار استفاده شده است. ترکیبی از الگوریتم PISO^۵ (فشار ضمنی با تقسیم عملگرها) برای جفت فشار-سرعت و طرح محاسبه مرتبه دوم در جهت بالا برای تعریف کسر حجمی و تکانه برای انجام شبیه‌سازی انجام شد. آب به عنوان فاز اولیه و هوا به عنوان فاز ثانویه انتخاب شد. کشش سطحی برای آب-هوا، مقدار ثابت $\omega = 0.072 \text{ N/m}$ تعیین شد. جریان دو فاز گاز-مایع یک رفتار جریان دینامیکی می‌باشد، از این‌رو، تمام موارد شبیه‌سازی برای محاسبه حالت ناپایدار با گام زمانی 0.001 ثانیه انجام شد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها عدد کورانت با مقدار ثابت 0.25 برای معادلات کسر حجمی مشخص شد. مقدار باقیمانده متغیرهای محاسبه شده برای جرم، مؤلفه‌های سرعت و کسر حجمی دو فاز با مرتبه چهار تعیین شدند.

نیروهای وارد بر جهت متعامد اسلاگ با استفاده از معادله (۸)، با فرض ثابت بودن ضریب کشش سطحی [۲۶]، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، در نظر گرفته می‌شوند.

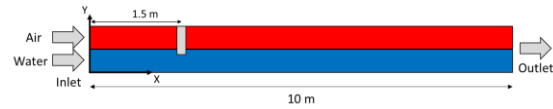
جدول ۱- خواص فیزیکی استاندارد هوا-آب

خواصیت	واحد	آب	هوا
ρ	kg/m^3	۹۹۸/۵	۱/۱۸۴
μ	kg/ms	1.0×10^{-4}	1.844×10^{-5}
σ	N/m	۰/۰۷۲	-

۴- کیفیت مش و مطالعه وابستگی مش

در شبیه‌سازی عددی کنونی از شبکه ساختاری مقطع O-grid استفاده شد. به منظور اطمینان از مستقل بودن شبیه‌سازی عددی از شبکه، پنج شبکه مش مختلف با تعداد سلول‌های مختلف در مقطع و طول لوله مورد بررسی قرار گرفت. این اصلاحات مش برای سه مقدار مختلف سلول، به تفصیل در جدول ۲ گزارش شده است. برای توابع دیوار استاندارد، مقدار ۵ برای $Y+$ اعمال شده است.

تابع تعریف شده توسط کاربر (UDF) استفاده شده است، تا جداسازی دو فاز و تعیین سرعت هر فاز در مرز ورودی مشخص گردد. ورودی سرعت، خروجی فشار و دیوار صاف هیدرولیک با شرایط مرزی غیرلغزشی برای تعریف شرایط مرزی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، نیمه بالایی لوله توسط هوا و نیمه پایینی قطر لوله توسط آب اشغال شده است. شیر دروازه‌ای به صورت یک استوانه با ضخامت 0.02 متر انتخاب شده است.

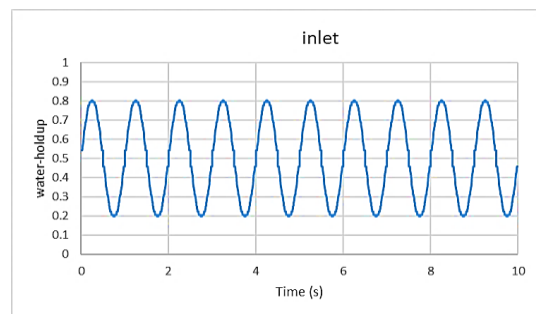


شکل ۱- لوله افقی متقارن همراه با بخش‌های نظارت بر اسلاگ

توزیع فاز ورودی با استفاده از تابع سینوسی برای ایجاد اختلال در سطح مشترک دو سیال در لوله افقی در شبیه‌سازی با استفاده از UDF تعریف شده است. این تابع با استفاده از سطح مایع Y_1 به صورت زیر ارائه می‌شود: [۳۰]

$$Y_1 = Y_0 + A_1 \sin\left(2\pi \frac{V_1 t}{P_1}\right) \quad (31)$$

که در آن A_1 ، P_1 و Y_0 به همان مقادیری که برای مقداردهی اولیه دامنه استفاده می‌شود، تنظیم شده‌اند ($Y_0=0/0$ ، $A_1=0/25 D$ ، $P_1=0/25 L$). تغییرات کسر حجمی مایع در ورودی لوله با زمان در شکل (۲) نشان داده شده است. در شکل (۲) کسر حجمی مایع، به عنوان کسری از المان لوله که توسط مایع در همان لحظه اشغال می‌شود، تعریف می‌شود.



شکل ۲- کسر حجمی مایع در ورودی لوله.

⁵ pressure implicit with splitting of operators

⁴ pressure staggering options

جدول ۲- مروری بر نتایج مطالعه استقلال از شبکه

خطا (%)	فرکانس اسلاگ (1/s)	تعداد کل شبکه	U(SL) (m/s)	U(SG) (m/s)	مطالعه شبکه‌بندی
۲۸	۰/۴۷۵۲	۴۰۳۲۰۰	۱	۲/۱	شبکه‌بندی ۱
۱۹/۳۳۳۳۳۳۳	۰/۵۳۲۴۲۲	۸۸۰۰۰۰	۱	۲/۱	شبکه‌بندی ۲
۱۷/۰۱۳۳۳۳۳۳	۰/۵۴۷۷۱۲۲۲	۱۰۱۰۵۰۰	۱	۲/۱	شبکه‌بندی ۳
۱۷/۰۰۴	۰/۵۴۷۷۷۳۶	۱۲۰۰۲۳۰	۱	۲/۱	شبکه‌بندی ۴
۱۷/۰۰۳۵	۰/۵۴۷۷۷۶۹	۲۲۰۲۰۰۰	۱	۲/۱	شبکه‌بندی ۵

داده‌های تجربی حاصل از اختلالات جریان ناشی از عبور جریان از روزنه [۳۲]، استفاده شده است. برای این منظور، شبیه‌سازی عددی برای یک لوله با قطر داخلی ۰/۰۲۶ با نسبت انقباض روزنه ۰/۱۲۳، در موقعیت محوری $X/D=100$ انجام شد.

برای انجام این کار، شبیه‌سازی‌هایی برای انقباض ناحیه خاص در یک موقعیت محوری انجام شد. فرکانس اسلاگ برای شش سرعت سطحی جریان دو فازی مختلف در برابر داده‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی با پنج شبکه‌بندی مختلف و اندازه‌گیری میزان تغییرات فرکانس اسلاگ در مقایسه با کار آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود که بعد از شبکه‌بندی ۴ خطای اندازه‌گیری بسیار ناچیز است و افزایش تعداد سلول‌ها (از شبکه شماره ۲ به شبکه شماره ۴) منجر به تغییرات تنها ۲/۸٪ در پیش بینی فرکانس اسلاگ شده است. از این‌رو، شبکه‌بندی ۴ انتخاب شده است.

۴-۱- اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی در برابر داده‌های تجربی

در شبیه‌سازی حاضر جهت اعتبارسنجی مدل عددی از

جدول ۳- اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی در برابر داده‌های تجربی و عددی

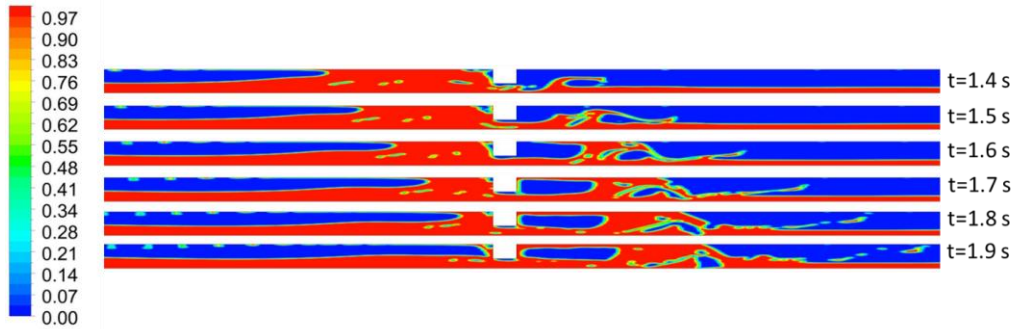
خطای عددی (%)	خطای تجربی (%)	f (Hz)	U _{sl} (m/s)	U _{sg} (m/s)
۲/۱	۱۱	۰/۲۶۷	۰/۳	۰/۳
۳/۷	۱۶	۰/۳۳۶	۰/۳	۰/۴
۳/۲	۱۳	۰/۴۳۵	۰/۳	۰/۵
۲/۵	۱۱	۰/۶۲۳	۰/۳۳	۰/۶
۴/۳	۱۴	۱/۶۳۴	۰/۵۳	۰/۴۸
۴/۸	۱۶	۲/۳۵۲	۰/۶۷	۰/۶

می‌شود. به‌طور هم‌زمان، یک گرداب در پایین دریچه ظاهر می‌شود. جریان جت با سرعت بالا نیز در زیر شیر تشکیل می‌شود. با کاهش بازشدگی دریچه، جریان جت مسافت بیشتری را طی می‌کند، یعنی طول منطقه گردش افزایش می‌یابد. در نتیجه این اتفاقات جریان اسلاگ ایجاد شده و با عبور از شیر، به صورت گردابه‌ای به سطح بالای لوله می‌رسد. در نهایت این اتفاق جریان اسلاگ مجدداً تشکیل می‌گردد.

همان‌طور که از مقایسه نتایج مشخص است، تفاوت در داده‌ها قابل قبول می‌باشد.

۴-۲- تجسم کیفی جریان اسلاگ

در شکل (۳)، عبور جریان اسلاگ از شیر دروازه‌ای در بازشدگی $\delta=0/3$ نشان داده است. با عبور جریان از شیر، به دلیل انسداد مساحت دریچه، آب از زیر شیر عبور می‌کند و در نتیجه موج کوچکی در سطح مشترک جریان ایجاد



شکل ۳- کانتور کسر حجمی مایع اسلاگ در عبور جریان دو فاز آب - هوا از شیر دروازه‌ای در یک لوله افقی

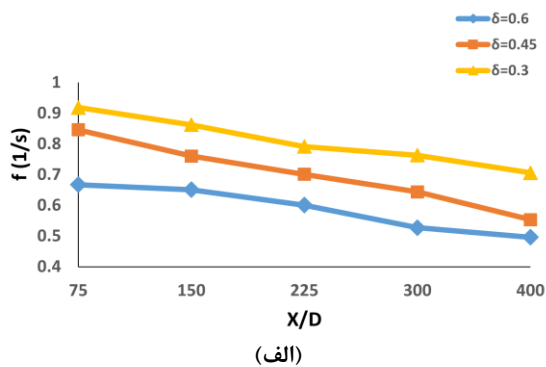
۳-۴- تجسم عددی جریان اسلاگ

نتایج عددی ویژگی‌های جریان اسلاگ، یعنی فرکانس اسلاگ، طول اسلاگ، کسر حجمی مایع و افت فشار متأثر از وجود شیر دروازه‌ای به تفصیل در بخش‌های فرعی زیر بیان شده است.

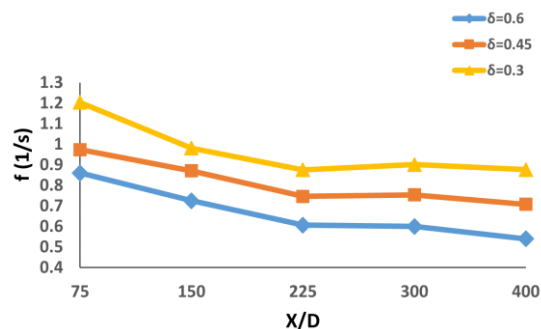
۳-۴-۱- فرکانس اسلاگ

در شکل (۴) نتایج به دست آمده برای فرکانس اسلاگ، در بخش‌های $X/D = 75, 150, 225, 300, 400$ از ورودی برای سه نسبت بازشدگی سطح مقطع مجزا ($\delta = 0/3$ و $\delta = 0/6$ و $\delta = 0/45$)، برای سه سرعت سطحی متفاوت، الف: $U_{sg}=1/50, U_{sl}=0/30, U_{sg}=0/67, U_{sl}=0/30$ m/s، ب: $U_{sg}=2/05, U_{sl}=1/20$ m/s، ج: $U_{sl}=0/67, U_{sg}=0/30$ m/s، د: $U_{sl}=0/67, U_{sg}=2/05$ m/s داده شده است. با افزایش سرعت سطحی مایع، فرکانس اسلاگ به میزان $4/3$ درصد افزایش و در سرعت ثابت سطحی آب، فرکانس با افزایش سرعت گاز به میزان $5/89$ درصد کاهش یافته است. فرکانس اسلاگ در مکانی که شیر دروازه‌ای واقع شده است، مقدار $3/1$ درصد نسبت به فواصل دورتر از شیر افزایش دارد و دلیل آن می‌تواند افزایش اختلالات جریان سطح مشترک در شیر دروازه‌ای باشد. هنگامی که شیر دروازه‌ای به‌طور کامل باز نشده است، سطح مقطع به دلیل مسدود شدن فلش مورد، کاهش می‌یابد. از این رو سرعت مایع در این ناحیه افزایش یافته می‌یابد و در نتیجه مقدار فرکانس اسلاگ افزایش می‌یابد. وجود شیر در مسیر جریان باعث ایجاد اختلال در فصل مشترک آب و هوا می‌شود که این امر باعث به وجود آمدن امواج جدید می‌گردد. در نتیجه رشد موج ایجاد شده و مسدود شدن کامل لوله اسلاگ ایجاد می‌شود، از این رو فرکانس اسلاگ در حالت لوله بدون شیر افزایش می‌یابد. متوسط مقدار فرکانس اسلاگ از روند فرکانس لوله مستقیم پیروی می‌کند، اما بیشتر از فرکانس عبوری از لوله مستقیم بدون

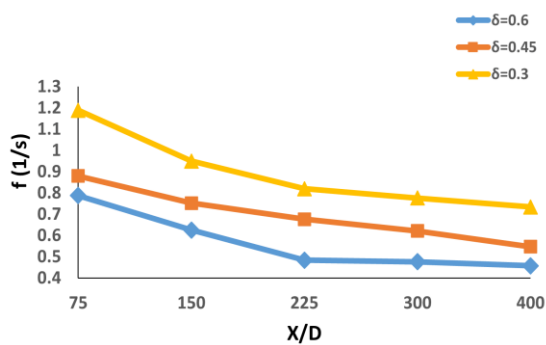
شیر دروازه‌ای است.



(الف)



(ب)



(ج)

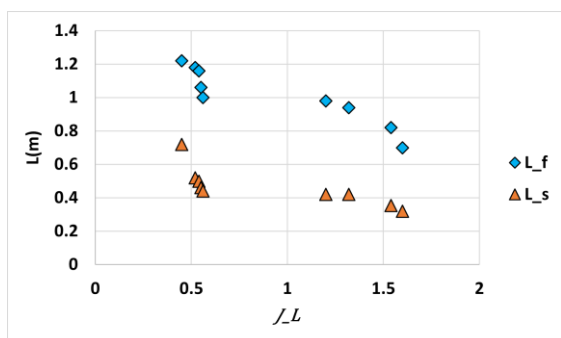
شکل ۴- تغییرات فرکانس اسلاگ در فواصل ۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵،

۳۰۰ و ۴۰۰ از ورودی لوله در سه حالت مختلف الف:

ج: $U_{sg}=1/50, U_{sl}=0/67$ m/s، ب: $U_{sg}=0/67, U_{sl}=0/30$ m/s

د: $U_{sl}=0/67, U_{sg}=2/05$ m/s

افزایش می‌یابد. با این حال، میانگین طول اسلاگ هنگامی که سرعت سطحی مایع در سرعت سطحی گاز ثابت افزایش می‌یابد، کاهش ۳۰/۴ درصدی خواهد یافت.



شکل ۵- تغییرات طول اسلاگ با سرعت سطحی گاز

نسبت گاز به مایع در واحد اسلاگ با افزایش سرعت سطحی گاز در سرعت سطحی مایع ثابت، افزایش می‌یابد. به طور کلی، برای طول واحد اسلاگ یکسان، منطقه اختلاط بیشتر ناشی از نسبت گاز به مایع است. در نتیجه با افزایش سرعت سطحی گاز در خط لوله، طول اسلاگ افزایش می‌یابد. کسر حجمی گاز در اسلاگ در سرعت‌های بالاتر گاز و مایع به دلیل تلاطم بیشتر، مقدار بالاتری خواهد داشت. با این حال، زمانی که منطقه اختلاط کاهش می‌یابد، طول ناحیه فیلم ثابت می‌ماند. تغییرات طول اسلاگ (L_s) و طول فیلم مایع اسلاگ (L_f) با افزایش میزان سرعت سطحی گاز در شکل (۵) نشان داده شده است. چگونگی این تغییرات در حالتی که شیر دروازه‌ای در مسیر لوله وجود ندارد، یکسان است.

۴-۳-۳- افت فشار

تغییرات افت فشار در شیر دروازه‌ای در طول جریان اسلاگ دو فازی در شکل (۶) بررسی شده است. اوج نوسان فشار در بالادست مربوط به عبور یک اسلاگ مایع از شیر دروازه‌ای اتفاق افتاده که در نتیجه آن کاهش سرعت جریان مایع، حاصل شده است.

کاهش سرعت اسلاگ مایع باعث عبور حجم زیادی از مایع در محل شیر دروازه‌ای می‌شود که باعث ایجاد یک دره فشار در پایین دست دهانه می‌گردد. پس از عبور اسلاگ از محل شیر دروازه‌ای گردابه‌ای -به دلیل وجود جت مایع- ایجاد می‌شود که افت فشار جریان را بالاتر می‌برد. با افزایش سرعت سطحی گاز و مایع در ورودی، افت فشار به میزان ۱۰/۲ درصد افزایش می‌یابد. هر چه میزان بازشدگی دهانه شیر دروازه‌ای بیشتر می‌شود، افت فشار به میزان متوسط ۱۵/۶۵ درصد کاهش خواهد یافت.

۴-۳-۲- طول اسلاگ

طول اسلاگ با ضرب سرعت اسلاگ، U_s ، و اختلاف زمانی بین نوک اسلاگ، t_n ، و دم اسلاگ، t_t مشخص می‌گردد.

$$L_s = U_s(t_t - t_n) \quad (32)$$

تایتل و بارنیا [۱۸] محاسبه طول اسلاگ‌ها را با استفاده از رابطه زیر پیشنهاد نمودند:

$$I = \frac{fL_{mb}}{C} \quad (33)$$

تناوب I به عنوان کسر زمانی تعیین می‌شود که یک اسلاگ هنگام عبور از نقطه ثابت مشاهده می‌شود. تناوب I رامی توان به صورت زیر تقریب زد:

$$I \sim \frac{J_L}{J_L + J_G} \quad (34)$$

علاوه بر این، وودز و هانترتی [۳۰] رابطه ۳۶ را ارائه نمودند:

$$C = \frac{1}{2}(J_L + J_G) \quad (35)$$

برخی از نویسندگان با استفاده از روابطی که به دست آوردند، اثبات نموده‌اند که طول متوسط اسلاگ با توجه به سرعت مخلوط جریان هوا و آب در خط لوله دارای مقادیر متفاوتی است. میانگین طول اسلاگ مشاهده شده توسط نویسندگان مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است.

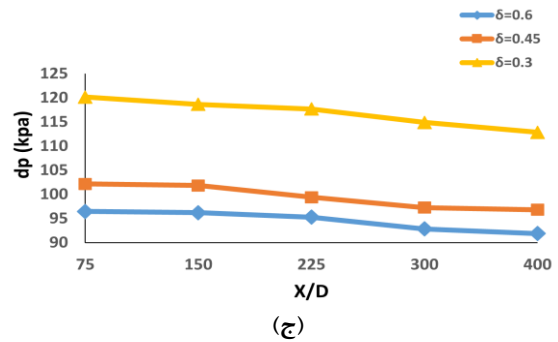
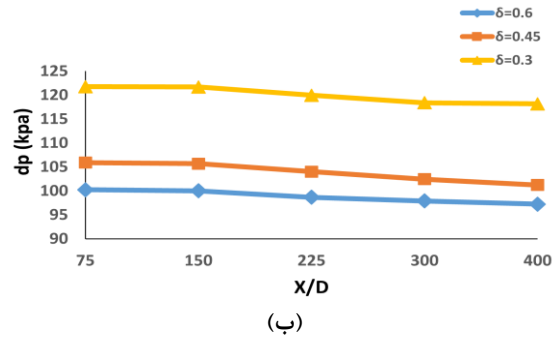
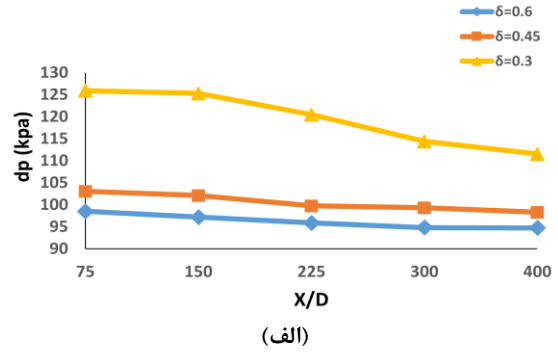
جدول ۴- میانگین طول اسلاگ ارائه شده توسط نویسندگان مختلف

Lmb/D	Lmb	نام نویسندگان
۱۸	۱۲-۲۴d	داکتر و هابارد [۱۹]
۱۸	۱۲-۲۴d	اندروسی و بندیکسن [۳۱]
۲۱	۱۲-۳۰d	نیکولسون و همکاران [۳۲]
۲۳/۰۰۵	۳۳/۲۴-۱۲/۷۷d	بالقاسم [۳۳]

شکل (۵) ارزیابی بین داده‌های شبیه‌سازی طول اسلاگ برای لوله افقی با شیر دروازه‌ای را به صورت متوالی نشان می‌دهد. اختلاف زمانی بین نوک و دم اسلاگ، هنگامی که اسلاگ از امتداد ناحیه نظارتی مورد نظر یعنی $X/D=75$ عبور می‌کند، محاسبه می‌شود.

طبق مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی، در سرعت سطحی مایع ثابت، زمانی که سرعت سطحی گاز افزایش می‌یابد، میانگین طول اسلاگ به میزان ۲۰/۸۹ درصد

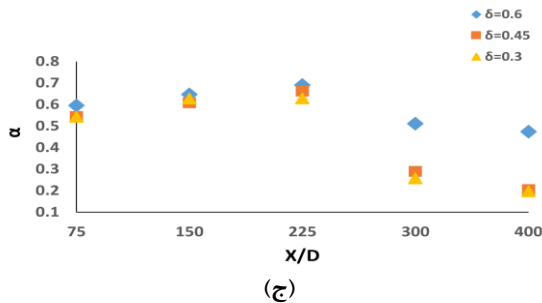
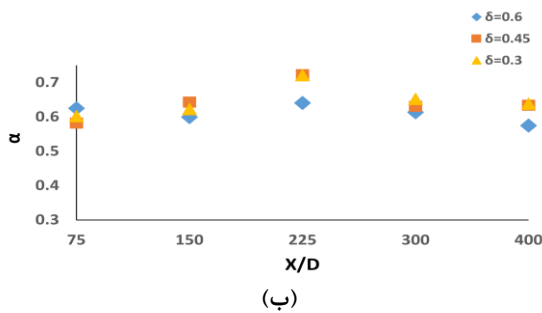
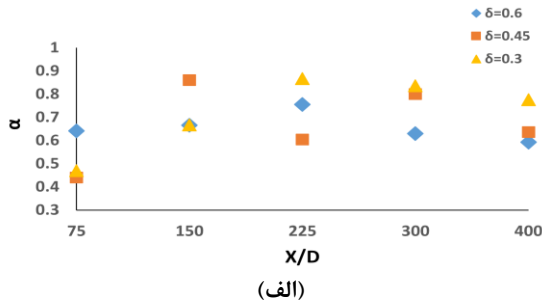
می‌کند. زمانی که سرعت سطحی مایع افزایش می‌یابد، قبل از رسیدن به شیر دروازه‌ای، اسلاگ ایجاد می‌گردد، از این رو مقدار کسر حجمی مایع به میزان ۱۲/۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش بازشدگی شیر دروازه‌ای، میزان کسر حجمی به میزان ۱۴ درصد افزایش می‌یابد، زیرا که مایع کل فضای شیر را پر می‌کند. هنگامی که شیر دروازه به‌طور کامل باز نشده است، بخشی از حجم مایع جریان همراه با انسداد فلاش‌بورد، کاهش می‌یابد، در نتیجه آب مجبور می‌شود، از زیر مانع عبور کند و یک موج کوچک روی درپچه دروازه ایجاد نماید. به‌طور هم‌زمان، یک گردابه در پایین دست درپچه ظاهر می‌شود. جریان جت با سرعت بالا نیز در زیر شیر تشکیل می‌شود. با کاهش باز شدن درپچه، جریان جت مسافت بیشتری را طی می‌کند، یعنی طول منطقه گردش افزایش می‌یابد.



شکل ۶- افت فشار اسلاگ در فواصل ۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵، ۳۰۰ و ۴۰۰ از ورودی لوله در سه حالت مختلف الف: $U_{sg}=1/50, U_{sl}=0/67$ m/s؛ ب: $U_{sg}=0/67, U_{sl}=0/30$ m/s؛ ج: $U_{sg}=2/05, U_{sl}=1/20$ m/s

۴-۳-۴- کسر حجمی مایع ۶

در شکل (۷) نتایج به دست آمده برای کسر حجمی مایع اسلاگ، در بخش‌های $X/D = 75, 150, 225, 300, 400$ از ورودی برای سه نسبت بازشدگی سطح مقطع مجزا ($\delta = 0/3$ و $\delta = 0/45$ و $\delta = 0/6$)، برای سه سرعت سطحی متفاوت، برای لوله افقی نشان داده شده است. طیف کسر حجمی مایع در نزدیکی شیر دروازه‌ای با طیف تغییرات افت فشار شیر دروازه‌ای مطابقت دارد. هر چه اندازه بازشدگی شیر بیشتر می‌شود، تغییرات کسر حجمی مایع به حالت بدون شیر دروازه‌ای نزدیک‌تر می‌گردد. بستگی به سرعت‌های سطحی ورودی لوله و این که اسلاگ قبل از شیر ایجاد شود یا بعد از آن، میزان کسر حجمی مایع تغییر



شکل ۷- کسر حجمی مایع اسلاگ در فواصل ۷۵، ۱۵۰، ۲۲۵، ۳۰۰ و ۴۰۰ از ورودی لوله در سه حالت مختلف الف: $U_{sg}=1/50, U_{sl}=0/67$ m/s؛ ب: $U_{sg}=0/67, U_{sl}=0/30$ m/s؛ ج: $U_{sg}=2/05, U_{sl}=1/20$ m/s

⁶ Liquid holdup

در $U_{sg}=1/50$, $U_{sl}=0/30$ m/s، $U_{sg}=0/67$, $U_{sl}=0/30$ m/s، $U_{sg}=2/05$, $U_{sl}=1/20$ m/s و $U_{sg}=0/67$, $U_{sl}=0/67$ m/s در $\delta=1$ در مقایسه با لوله بدون شیر دروازه‌ای یعنی $\delta=1$ در شکل (۸) به نمایش در آمده است. روند تغییرات PDF در سرعت سطحی پایین گاز و مایع یعنی U_{sg} و U_{sl} به گونه ای است که گویا دهانه شیر دروازه‌ای همانند فیلتری عمل می‌کند که موجب کاهش کسر حجمی مایع می‌گردد و در نتیجه همانطور که در شکل دیده می‌شود، PDF به سمت پایین و چپ تمایل پیدا می‌کند.

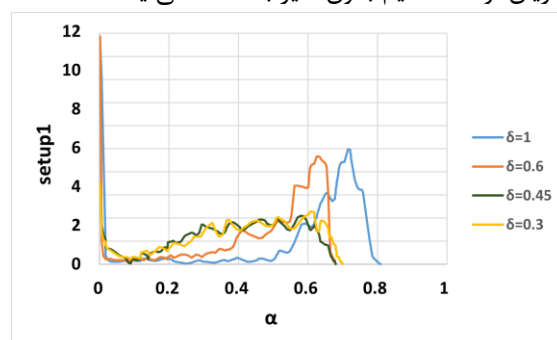
در نسبت بازشدگی بالا یعنی $\delta=0/6$ میزان تغییرات کسر حجمی مایع به حالتی که در لوله شیری وجود نداشته باشد، نزدیک‌تر است. با کاهش سرعت سطحی گاز و مایع، به دلیل کاهش میزان حجم مایع در محل شیر دروازه‌ای، مقدار کسر حجمی مایع به میزان $11/5$ درصد کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

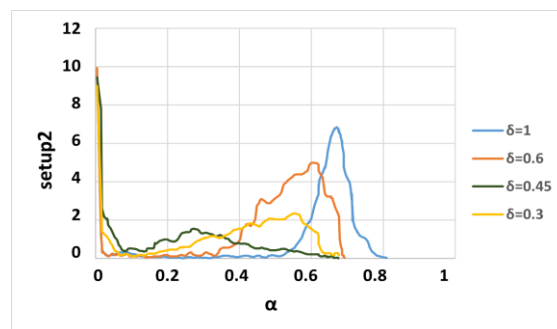
بررسی جریان اسلاگ در لوله افقی، با وجود شیر دروازه‌ای به دلیل تغییراتی که در کاراکترهای جریان اسلاگ ایجاد می‌شود، حائض اهمیت است. در بررسی‌های عددی انجام شده، مشخص گردید که فرکانس فرکانس اسلاگ در حالتی که شیر دروازه‌ای در لوله وجود دارد، با حالتی که لوله بدون شیر می‌باشد، متفاوت است. فرکانس اسلاگ بعد از شیر دروازه‌ای به میزان $4/3$ درصد افزایش می‌یابد و این پدیده به دلیل موج‌های کوچکی است که به دلیل افت فشار زیاد در محل شیر به وجود می‌آیند. این پدیده حتی زمانی که سرعت‌های سطحی آب و گاز طبق نمودار مندهنی در محدوده جریان اسلاگ نیست، به وجود می‌آید. افت فشار در مکانی از لوله که شیر واقع شده است، افزایش ناگهانی پیدا می‌کند. بعد از شیر دروازه‌ای گردابه‌ای از جریان مایع ایجاد می‌شود و پس از برخورد به جت جریان مایع بعد از عبور جریان از شیر دروازه‌ای، به جلو رانده می‌شود، و با سطح بالای لوله برخورد و گسترش می‌یابد، که خود نمونه‌ای از پدیده جریان اسلاگ است. طول اسلاگ مایع با کاهش بازشدگی دهانه شیر دروازه‌ای به میزان $20/89$ افزایش و با افزایش سرعت سطحی گاز به میزان $30/4$ درصد کاهش یافته است. ترند تغییرات طول اسلاگ با حالت بدون شیر دروازه‌ای برابری می‌کند. با افزایش فاصله از شیر دروازه‌ای افت فشار به میزان $15/65$ درصد کاهش می‌یابد. این روند برای فرکانس اسلاگ و کسر حجمی مایع نیز صادق است.

۴-۳-۵- آنالیز مبتنی بر PDF

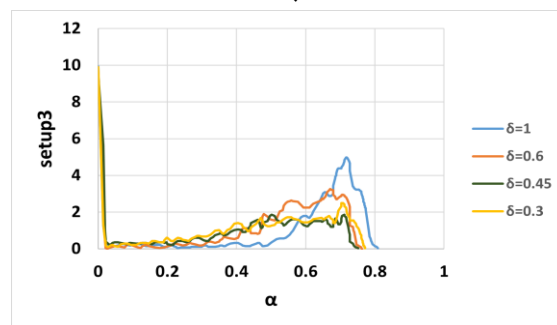
اندازه‌گیری اختلالات جریان حاصل از وجود شیر دروازه‌ای در لوله افقی، با استفاده از روش‌های ارزیابی متوسط، دارای محدودیت‌هایی است، زیرا که این روش‌ها از نتایج آماری در محاسبات خود استفاده می‌کنند. درک فیزیکی بهتر این پدیده با مقایسه نمودارهای PDF که با عنوان تابع چگالی احتمالی معرفی می‌شود که انتگرال آن در هر بازه معین، برابر با احتمال قرار داشتن متغیر تصادفی در آن بازه باشد. این نمودارها مربوط به وجود شیر دروازه‌ای در برابر PDFهای جریان لوله مستقیم بدون شیر به دست می‌آید.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- تغییرات PDF کسر حجمی مایع اسلاگ در سه حالت مختلف الف: $U_{sg}=1/50$, $U_{sl}=0/67$, $U_{sl}=0/30$ m/s؛ ب: $U_{sg}=2/05$, $U_{sl}=1/20$ m/s؛ ج: $U_{sg}=0/67$, $U_{sl}=0/67$ m/s.

نمودار PDF برای کسر حجمی مایع، در سه نسبت بازشدگی $\delta=0/3$ و $\delta=0/45$ و $\delta=0/6$

تقدیر و تشکر

در انجام این پژوهش از امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات آزمایشگاه انتقال حرارت و جریان چندفازی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شهید بهشتی استفاده شده است. بنابراین نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از مسئولین محترم این دانشکده که همکاری لازم را به عمل آورده‌اند اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ

مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت های نویسندگان

سمیرا محمدی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نرم‌افزار، تحقیق، نگارش پیش نویس اصلی،

علی جهانگیری: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش.

محمد امام زاده: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش.

سهند مجیدی: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش.

منابع مالی: جهت تامین منابع مالی مقاله از اعتبار ویژه اساتید استفاده شده است.

مراجع

- [1] V. Pugliese, A. Ettehadtavakkol, and E. Panacharoensawad. "Drift Flux Model Parameters Estimation Based on Numerical Simulation of Slug Flow Regime with High-Viscous Liquids in Pipelines." *International Journal of Multiphase Flow* no.135 (2021): 103527.
- [2] S. Anupriya, and S. Jayanti. "Study of Gas-Liquid Upward Annular Flow through a Contraction." *Annals of Nuclear Energy* no.129 (2019): 169–80.
- [3] Z. Lin, X. Sun, T. Yu, Y. Zhang, Y. Li, and Z. Zhu. "Gas–Solid Two-Phase Flow and Erosion Calculation of Gate Valve Based on the CFD-DEM Model." *Powder Technology*, no. 366 (2020): 395–407.
- [4] S. Kumar Panda, K. Charan Rath, and B. Kumar Choudhury. "Determining the Flow Correlation for an Orifice with a Non-Dimensional Number." *Flow Measurement and Instrumentation*, no. 90 (2023): 102338.
- [5] E. Janssen. "Two-phase pressure loss across abrupt contraction and expansions, steam-water at 600 to 1400 PSIA." *Proceedings of the 3rd International Heat Transfer Conference, Chicago*, no. 5 (1966): 13–23.
- [6] T. Zhao, J. Zhang, L. Ma. "A general structural design methodology for multi-hole orifices and its experimental application." *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (2011): 2237–2246.
- [7] S. Kumar Panda, K. Charan Rath, and B. Kumar Choudhury. "A Two Phase Analysis of Orifice Based on a Non-Dimensional Number." *Flow Measurement and Instrumentation*, no. 94 (2023): 102470.
- [8] M.A. Pasquini, and E.S. Rosa. "Orifice Plate Modeling with Two-Phase Multiplier Including the Effect of the Area Contraction Ratio." *International Journal of Multiphase Flow* 157 (2022): 104095
- [9] A. Maurya, and R.P. Chhabra. "Flow and Thermal Characteristics of Power-Law Fluids through a Rectangular-Shaped Orifice: Effects of Aspect Ratio and Orifice Location." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 152 (2024): 107303.
- [10] A. Arabi, Y. Salhi, Y. Zenati, E.K. Si-Ahmed, and J. Legrand. "Experimental Investigation of Sudden Expansion's Influence on the Hydrodynamic Behavior of Different Sub-Regimes of Intermittent Flow." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 205 (2021): 108834.
- [11] A. Zeghloul, A. Azzi, N. Ghendour, and A.S. Berrouk. "A Differential Pressure Technique for Void Fraction Measurement in Gas-Liquid Flow." *ENP Engineering Science Journal* no. 2 (2021): 69–75.
- [12] N. Almalki, and W.H. Ahmed. "Experimental Investigation of Two-Phase Flow Development through Two-Stage Orifices." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 238 (2024).

- [13] R.E. Vieira, T.A. Sedrez, S.A. Shirazi, and G. Silva. "Multiphase Flow in Circular and Triangular Pipes: Examining Flow Characteristics, Sand Erosion and Heat Transfer Via CFD and experimental work." *International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE* no. 79 (2021): 101894.
- [16] A. Zeghloul, H. Bouyahiaoui, A. Azzi, A.H. Hasan, and A. Al-Sarkhi. "Experimental Investigation of the Vertical Upward Single- And Two-Phase Flow Pressure Drops through Gate and Ball Valves." *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME* 142 no. 2 (2020).
- [17] N. Li, and B. Chen. "Investigation on Gas-Liquid Two-Phase Frictional Pressure Drop in Pipeline Riser." *Geoenergy Science and Engineering* 234 (2024): 212627.
- [18] S.G. Holagh, and W.H. Ahmed. "Critical Review of Vertical Gas-Liquid Slug Flow: An Insight to Better Understand Flow Hydrodynamics' Effect on Heat and Mass Transfer Characteristics." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 225 (2024): 125422.
- [19] X. Wu, Z. Wang, L. Dong, Y. Xin, and H. Cao. "Experimental Study on the Slugging Characteristics of Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal Pipes." *ACS Omega* 7, no. 25 (2022): 21643–53.
- [20] D.Y. Park, and J. Liang. "Effects of Fatigue Parameters on Fatigue Crack Growth Rate of Pipe Steels and Girth Weld." *Journal of Pressure Vessel Technology* 146, no. 3 (2024).
- [21] P. Tan, M. Zhou, C. Tang, and K. Zhou. "A Powder-Scale Multiphysics Framework for Powder Bed Fusion of Fiber-Reinforced Polymer Composites." *Advanced Powder Materials* no. 4 (2024): 100190.
- [22] D. Apte, M. Ge, and O. Coutier-Delgosha. "Numerical Investigation of a Cavitating Nozzle for Jetting and Rock Erosion Based on Different Turbulence Models." *Geoenergy Science and Engineering* 231 (2023): 212300.
- [23] H. Zhang, L. Zhao, and W. Wang. "Finite Element Implementation of a Seepage-Stress Coupling Method for Solid-Liquid-Gas Three Phases in Porous Media Considering Compressible Gas." *Computers and Geotechnics* 169 (2024): 106189.
- [24] Y. Guo, M. Bao, L. Gong, S. Shen, and K. Zhang. "Numerical Investigation of the Falling Film Thickness and Heat Transfer Characteristics over Horizontal Round Tube." *International Journal of Multiphase Flow* 149 (2022): 103977.
- [25] S. Gross, and A. Reusken. "Numerical Simulation of Continuum Models for Fluid-Fluid Interface Dynamics." *The European Physical Journal Special Topics* no. 1 (2013): 211–39.
- [26] A. Orell. "Experimental Validation of a Simple Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal Pipes." *Chemical Engineering Science*, no. 5 (2005): 1371–81.
- [27] M. Rezavand, and X. Hu. "Numerical Simulation of Two-Phase Slug Flows in Horizontal Pipelines: A 3-D Smoothed Particle Hydrodynamics Application." *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 104 (2024): 56–67.
- [28] S. Schmelter, M. Olbrich, E. Schmeier, and M. Bär. "Numerical Simulation, Validation, and Analysis of Two-Phase Slug Flow in Large Horizontal Pipes." *Flow Measurement and Instrumentation* 73 (2020): 101722.
- [29] L.F.A. Alegría, L.E. Ortiz-Vidal, C.E. Álvarez-Pacheco, J.E.C. Bolivar, and O. M.H. Rodriguez. "Influence of a Restriction on Flow Patterns, Void Fraction, and Pressure Drop in Gas-Liquid Pipe Flow." *Experimental Thermal and Fluid Science* 155 (2024): 111180.
- [30] Y. Cao, Q. Xu, T. Liu, H. Yu, B. Huang, and L. Guo. "Experimental Investigation on Long Hydrodynamic Slugs in Offshore Pipeline." *Ocean Engineering* 289 (2023): 116136.
- [31] H.C. Shin, S.H. Kim, Y. Shah, and S.M. Kim. "An Experimental Study on Air-Oil Flow Patterns in Horizontal Pipes Using Two Synthetic Oils." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 226 (2024): 125459.
- [32] A. Kabiri-Samani, N. Jafarinasab, and Z. Sheikh Khozani. "Relationship between Two-Phase Flow in Bottom Outlet and Air-Core Vortices at Intake." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* no. 2 (2024): 97–111.
- [33] A. Arabi, Y. Salhi, Y. Zenati, E.K. Si-Ahmed, and J. Legrand. "Experimental Investigation of Sudden Expansion's Influence on the Hydrodynamic Behavior of Different Sub-Regimes of Intermittent Flow." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 205 (2021): 108834.