

Numerical Modeling and Evaluation of Pigging in Pipeline Using SPH Method with Performance Optimization Approach

Amir Askari Kashan¹, Mohammad Reza Nazari^{2*}, Ahamad Reza Faghieh Khorasani³, Rahim Shamsoddini⁴

¹ School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, a.askari@stu.yazd.ac.ir

² School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, mnazari@yazd.ac.ir

³ School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, faghieh@yazd.ac.ir

⁴ School of Mechanical Engineering, Sirjan University, Sirjan, Iran, shamsoddini@sirjantech.ac.ir

Keywords:

pigging
energy management
pipeline
sph
bypass pig
meta-heuristic optimization
algorithm
GWO

Abstract: Due to importance of pigging operations for purposes such as monitoring-cleaning, which leads to an increase in the service life of pipeline networks, management, and optimization of energy consumption in oil and gas industries, providing accurate numerical models is a research need that has been very vital. Considering advantages of meshless methods, for the first time in this research a model is presented for evaluating the flow around the pig using the smooth particle hydrodynamics (SPH) method and the standard k-ε model to simulate the turbulence of the flow. Besides, the performance of the model based on the experimental study has been evaluated and validated. The results showed that the average error rate of the SPH model compared to the laboratory model was less than 5%, which indicated the research model's high accuracy and acceptable performance. After validating the performance of the research model, the simulation of the flow around the stationary and mobile pig was modeled, and the results were compared and evaluated with the existing numerical results. In addition, by using a meta-heuristic algorithm of gray wolves optimization (GWO), studies were conducted on the relative diameter parameter of the bypass pig to achieve optimal values of this parameter. The results of the optimization model showed that the optimal relative diameter of the bypass pig was equal to $d/D=0.418$. The results of this research showed that the presented model had an acceptable accuracy in modeling the flow around the bypass pig in the pipe, and it could also be used as a reference model based on the SPH method for modeling the flow around the bypass pig.

Original Research Article

Paper History:

Received: 3/06/2022

Accepted: 02/11/2022

How to cite this article: Askari Kashan, A., Nazari, M.R., Faghieh Khorasani, A., Shamsoddini, R., "Numerical Modeling and Evaluation of Pigging in Pipeline Using SPH Method with Performance Optimization Approach", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 2, PP. 140-161, 2023. <https://doi.org/10.22052/JEEM.2023.113710>

© 2023 University of Kashan Press.

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



Introduction

Due to importance of pigging operations for purposes such as monitoring-cleaning, which leads to an increase in the service life of pipeline

networks, management, and optimization of energy consumption in oil and gas industries, providing accurate numerical models is a research need that has been very vital. To date,

few numerical studies have been performed to evaluate the flow around the pig in pipelines mainly using the classical CFD methods (based on meshing methods). Considering the advantages of meshless methods such as the particle method, for the first time in this research, a model for evaluating the flow around the pig using the SPH method is presented.

Materials and Methods

In this research, a numerical model was developed using the WCSPH approach to simulate the flow around the pig. Also, to evaluate the turbulent flow, the standard k- ϵ method was used to solve the turbulence term in the momentum equation. Therefore, an algorithm for numerical modeling of pig dynamics, based on the SPH method, was proposed to simulate the bypass PIG movement in pipes. Based on the proposed algorithm, the type of pig movement (accelerated or constant speed movement) was determined by calculating the result of the total forces acting on the pig, t , and the amount of speed, and finally the amount of PIG displacement were determined by specifying the type of movement. In addition, by using a meta-heuristic optimization algorithm of gray wolves (GWO), the bypass pig's relative diameter parameter was studied to achieve this parameter's optimal values.

Results

According to the proposed model, the simulation of pigging operations in two-dimensional space was implemented using the SPH method. To evaluate the performance of the proposed model, modeling was performed under two conditions (a) fixed PIG, b) - mobile PIG) and the results of SPH model were compared with the results of CFD models. The results of this study showed that the proposed model had an acceptable accuracy in modeling the flow around the bypass PIG in pipelines.

Discussion and Conclusion

In this research, through modeling under fixed PIG conditions while considering the PIG fixed in the initial position, the amount of force on the pig with a variable considering the relative diameter of the PIG (the ratio of pig hole's diameter to pipe's diameter) has been studied. The results of this model showed that with an

increase in the relative diameter of the PIG, the amount of pressure dropped around the PIG decreased, and, consequently, the total force acting on the pig decreased. In the fixed pig model, studies have been performed considering 6 different conditions of relative PIG diameters (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, and 0.7). Also, the results of the SPH model have been compared with the results of the CFD model (Ramirez et al., 2011), which indicates the acceptable accuracy of the SPH model for modeling under fixed PIG conditions. In the mobile PIG modeling, considering the initial conditions of the model based on Table 2 and determining the relative pig diameter equal to 0.4, modeling has been done. In this model, the PIG is moved in the pipe due to the collision of fluid particles as well as due to the pressure difference of fluid particles around the pig. The moving pig model was implemented based on the proposed numerical solution algorithm. According to the results of mobile PIG modeling, it was found that the pig movement was accelerated at the beginning of the simulation. Also, the result of the forces acting on the PIG at the beginning of the simulation had maximum values, and the result of the forces acting on the pig, with passing time and increasing the time step of the solution, decreased to zero. In addition, the results showed that the pig speed at the beginning of modeling was equal to zero and the PIG speed increased over time. Also, in the period of $0.8s < t < 1s$, the speed changes were linear, which represented the movement of the PIG at a constant speed. In order to evaluate the performance of the mobile PIG model, we have performed a comparison between the results of the SPH model and the CFD model. Examining the results and evaluating the flow patterns around the pig in the two models, we found that that the proposed model had acceptable accuracy in modeling the flow around the mobile PIG in the pipe. Examining the results and comparing the outputs of the SPH model with the results of the CFD models, it became clear that the proposed model had an acceptable accuracy in modeling the flow around the bypass PIG under both fixed and mobile pig simulation conditions. In addition, the proposed model can be used as a reference model based on the SPH method for modeling the flow around the moving PIG to evaluate and conduct pigging operation studies.

مدل سازی عددی و ارزیابی عملیات پیگرانی در خط لوله به روش SPH با رویکرد بهینه سازی عملکرد پیگ

امیر عسکری کاشان^۱، محمدرضا نظری امینه^{۲*}، احمدرضا فقیه خراسانی^۳، رحیم شمس الدینی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

a.askari@stu.yazd.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

mnazari@yazd.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

faghih@yazd.ac.ir

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

shamsoddini@sirjantech.ac.ir

| | |
|---|--|
| چکیده: با توجه به اهمیت عملیات پیگرانی در خط لوله برای مقاصدی همچون نظارت-تمیزکاری که منجر به افزایش عمر مفید شبکه انتقال و مدیریت و بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع نفت-گاز می شود، ارائه مدل های مطالعاتی دقیق در این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و به عنوان یک نیاز پژوهشی قلمداد می گردد. با توجه به مزیت های روش های بدون شبکه بندی، در این پژوهش برای اولین بار مدلی برای ارزیابی جریان پیرامون پیگ با بهره گیری از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و با استفاده از مدل k-ε استاندارد برای شبیه سازی آشفتگی جریان ارائه و عملکرد مدل بر اساس نمونه آزمایشگاهی ارزیابی و اعتبارسنجی گردیده است، نتایج حاصل نشان داد که میزان میانگین خطای مدل SPH نسبت به مدل آزمایشگاهی کمتر از ۵٪ بوده که بیانگر دقت بالا و عملکرد قابل قبول مدل پژوهش بوده است. پس از اعتبارسنجی عملکرد مدل پژوهش، شبیه سازی جریان پیرامون پیگ ساکن و متحرک مدل سازی شده و نتایج حاصل با نتایج عددی موجود مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است، علاوه بر این با بهره گیری از الگوریتم فراابتکاری گرگ های خاکستری (GWO) مطالعاتی بر پارامتر قطر نسبی پیگ کنارگذر برای دستیابی به مقادیر بهینه این پارامتر پیاده سازی شده است، نتایج حاصل از مدل بهینه یابی نشان داد که میزان قطر نسبی بهینه پیگ کنارگذر برابر با $d/D=0.418$ بوده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که مدل ارائه شده دارای دقت قابل قبول در مدل سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر در لوله بوده است، همچنین می تواند به عنوان یک مدل مرجع بر پایه روش SPH برای مدل سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر متحرک جهت ارزیابی و انجام مطالعات عملیات پیگرانی در خط لوله به کارگیری شود. | واژه های کلیدی: پیگرانی مدیریت انرژی خط لوله هیدرودینامیک ذرات هموار SPH پیگ کنارگذر الگوریتم بهینه سازی گرگ های خاکستری GWO |
| مقاله علمی پژوهشی | |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱ | |

۱. مقدمه

در صنایع نفت و گاز، خط لوله به‌عنوان اصلی‌ترین زیرساخت برای انتقال فراورده‌های هیدروکربنی از چاه‌های استخراج به سایت‌های نگهداری و مجتمع‌های فراوری بوده‌اند. به‌سبب ماهیت این سیالات (نفت، گاز) خطوط لوله همواره در معرض انباشت رسوبات و ضایعات مختلفی بوده که با گذشت زمان منجر به افزایش ضریب اصطکاک بین سطح داخلی لوله-سیال و همچنین کاهش قطر داخلی لوله می‌گردد. با کاهش قطر داخلی لوله، میزان دبی جریان عبوری از آن کاهش یافته که این امر باعث اتلاف انرژی می‌شود؛ بنابراین در شبکه انتقال صنایع نفت و گاز، همواره خطوط لوله نیازمند بازرسی دوره‌ای و تمیزکاری به هدف مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی بوده‌اند که اصلی‌ترین گام در پیاده‌سازی این مهم، به‌کارگیری تجهیزات متناسب-کارآمد و همچنین ارزیابی خصوصیات جریان سیال درون لوله و در حضور تجهیزات تمیزکاری بوده است [۱].

برای نگهداری و افزایش عمر مفید خط لوله در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی، عملیات پیگ‌رانی^۱ برای بازرسی و تمیزکاری خط لوله در صنایع نفت و گاز به‌کارگیری می‌شود. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط محققان بر ارزیابی عملیات پیگ‌رانی در راستای کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی انرژی و افزایش راندمان کل سیستم در صنایع مختلف نتایج ارزشمندی ارائه شده است. بر این اساس با به‌کارگیری عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله شبکه فاضلاب شهر فورت پیرس فلوریدا مشخص شد که مصرف انرژی سیستم تنها با بهره‌گیری از عملیات پیگ‌رانی ۸۳۰۰ دلار در سال کاهش یافته است [۲]. در مطالعاتی دیگر با بررسی عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله انتقال گاز مشخص شد که ظرفیت یک سیستم جمع‌آوری را می‌توان از طریق پاک‌سازی مکرر خط لوله (پیگینگ) و به حداقل رساندن تجمع مایعات و هیدرات از طریق گرمایش خط یا تزریق مواد شیمیایی افزایش و مقدار انرژی مصرفی را کاهش داد؛ نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که پیگینگ منظم، مقدار انرژی مصرفی را کاهش می‌دهد و همچنین می‌تواند از شعله‌ور شدن گاز جلوگیری کند [۳]. علاوه بر موارد مذکور با ارزیابی نتایج حاصل از به‌کارگیری عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله انتقال نفت مشخص شد که برپاسازی عملیات پیگینگ در سه سال متوالی در خطوط انتقال نفت موجب کاهش ۹۲/۴۱٪ مصرف انرژی در کل شبکه انتقال گردیده است [۴].

پیگ، یک دستگاه استوانه‌ای یا کروی است که در ورودی لوله

کارگذاری می‌شود [۵] و متعاقباً بر اساس جریان سیال در لوله، پیگ حرکت می‌نماید و با طی کردن کل خط لوله، عملیات بازرسی و تمیزکاری لوله را انجام می‌دهد. در یک تقسیم‌بندی کلی پیگ‌ها به دو دسته پیگ معمولی^۲ و پیگ کنارگذر^۳ تفکیک می‌گردند. پیگ معمولی به‌طور کامل خط لوله را طی نموده و با سرعتی معادل با سرعت ایجادشده بر اساس جریان ورودی سیال در لوله حرکت می‌کند. پیگ کنارگذر دارای یک روزنه باز در بدنه خود بوده که سیال می‌تواند از آن عبور کند؛ بنابراین سرعت حرکت پیگ کنارگذر کمتر از سرعت حرکت پیگ معمولی بوده و تابع برابند نیروهای وارد بر پیگ است. بر اساس مطالعات مانی و همکاران، مشخص می‌گردد که کاهش سرعت پیگ هم برای اهداف بازرسی و هم برای تمیز کردن خط لوله مفید بوده است [۶]؛ بنابراین پیگ کنارگذر به‌جهت مزیت‌های بازرسی و تمیزکاری ممتاز نسبت به پیگ معمولی بیشتر مورد توجه بوده است. در عملیات پیگ‌رانی با توجه به سرعت سیال، تغییر مقطع عبوری جریان در بدنه پیگ کنارگذر و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، جریان از نوع آشفته بوده و انجام مطالعات دقیق در راستای شناخت خصوصیات هیدرولیکی جریان پیرامون پیگ بسیار حائز اهمیت بوده است. برپاسازی عملیات پیگ‌رانی در خط لوله که منجر به کاهش مصرف انرژی کل سیستم می‌گردد، نیازمند ارزیابی دقیق جریان سیال پیرامون پیگ برای بهینه‌یابی متغیرهای هندسی پیگ بر پارامترهای حرکت دینامیکی آن در خط لوله است. در این پژوهش مطالعات جامعی بر ارزیابی جریان پیرامون پیگ کنارگذر در لوله با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۴ که دارای مزایای مختلفی نسبت به روش‌های مدل‌سازی بر پایه شبکه‌بندی (تفاضل محدود، حجم محدود) بوده، انجام شده است.

در بحث ارزیابی و مدل‌سازی جریان پیرامون پیگ و عملیات پیگ‌رانی در خط لوله، محققان مختلف پژوهش‌هایی را با در نظر گرفتن رویکردهای آزمایشگاهی و عددی تعریف و نتایج ارزشمندی را ارائه نموده‌اند. پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در عملیات پیگ‌رانی در خط لوله و بهینه‌یابی این متغیرها معطوف بوده است. در این راستا پژوهش‌های نسبتاً جامعی بر ضرورت انجام عملیات پیگ‌رانی به‌سبب مسائل و چالش‌هایی همچون اعمال بار حاصل از عبور سیال از لوله^۵، افزایش

2. Conventional pig

3. by-pass pig

4. Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)

5. liquid loading

مقاومت اصطکاکی^۱ در خط لوله و فعل و انفعالات پیچیده بین سیال و جداره و اتلاف انرژی در خط لوله صنایع نفت و گاز انجام شده است [۷-۱۲]. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که رخداد چالش‌های مذکور سبب کاهش راندمان انتقال سیالات، اتلاف انرژی و عمر مفید بهره‌برداری از خط لوله می‌گردد و انجام فرایند نظارت و تمیزکاری خط لوله، به‌ویژه در صنایع نفت و گاز از اهمیت بالایی در راستای مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی برخوردار بوده است. بر این اساس عملیات پیگرانی به‌عنوان اصلی‌ترین راهکار برای برآورد اهداف افزایش راندمان و کارایی حداکثری خط لوله در انتقال سیالات توسط محققان مختلف ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است [۱ و ۱۳-۱۵]. یکی از پارامترهای اصلی در ارزیابی عملیات پیگرانی، سرعت حرکت پیگ در خط لوله بوده که توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس پژوهش انجام‌شده توسط ژو و همکاران، سرعت پیگ به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای پیاده‌سازی عملیات پیگرانی در راستای دستیابی حداکثری به اهداف نظارتی و تمیزکاری بوده است [۱۳]؛ بنابراین پارامتر سرعت حرکت پیگ به‌عنوان متغیر اصلی در عملیات پیگرانی توسط محققان مختلف ارزیابی شده است [۶، ۱۶-۱۹]. نتایج حاصل از پژوهش‌های مختلف نشان داد که کنترل سرعت پیگ برای اطمینان از عملیات پیگرانی کارآمد از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در راستای تعیین سرعت بهینه پیگ برای پیاده‌سازی عملیات پیگرانی مؤثر می‌توان در یک سرعت ثابت پیگ بین ۲ تا ۷ متر بر ثانیه دستیابی به اهداف حداکثری از عملیات پیگرانی را انتظار داشت؛ همچنین بر اساس این مطالعات سرعت مناسب برای پیگرانی در خط لوله دارای سیال تراکم‌پذیر ۱ تا ۵ متر بر ثانیه و برای لوله‌های دارای سیال تراکم‌ناپذیر ۲ تا ۷ متر بر ثانیه ارائه شده است [۶ و ۱۷]. تحقیقات و پژوهش‌های انجام‌شده بر عملیات پیگرانی با تمرکز بر به‌کارگیری پیگ‌های کنارگذر توسط محققان مختلف مورد توجه قرار گرفته است [۱، ۶، ۱۴ و ۲۱-۲۳]. در این راستا پژوهشگران مختلف مطالعات آزمایشگاهی جامعی بر پارامتر سرعت پیگ کنارگذر در عملیات پیگرانی انجام دادند که متغیرهای مؤثر بر حرکت پیگ در خط لوله مورد ارزیابی قرار گرفت و المان‌های مؤثر بر کاهش سرعت پیگ به‌جهت افزایش راندمان عملیات پیگرانی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۲۴ و ۲۵].

مطالعات عددی انجام‌شده بر عملیات پیگرانی و ارزیابی و

تحلیل جریان پیرامون پیگ‌های کنارگذر عمدتاً با بهره‌گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۵، ۲۷-۲۶]. در مطالعات انجام‌شده ضریب افت فشار^۲ پیگ که به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترهای حاکم بر حرکت پیگ کنارگذر در داخل لوله بوده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. هندریکس در سال ۲۰۱۸ با ارائه مدل یک‌بعدی ساده‌سازی‌شده به توصیف حرکات نوسانی پیگ کنارگذر درون لوله پرداخت؛ نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر روش طراحی بهینه پیگ با تمرکز بر کنترل سرعت و با هدف به حداقل رساندن نوسانات پیگ کنارگذر در عملیات پیگرانی بوده است [۲۸].

سالازار و همکاران مطالعاتی آزمایشگاهی درباره ارزیابی عملکرد پیگ‌های کنارگذر در راستای کنترل سرعت پیگ در عملیات پیگرانی انجام دادند. هدف اصلی از این پژوهش ارائه تکنیکی برای کنترل سرعت پیگ با استفاده از سیستم الکترونیکی کنترل بازشدگی دریچه پیگ کنارگذر برای کاهش یا حذف سرعت‌های بیشینه بود، نتایج حاصل بیانگر سازوکاری جهت پیاده‌سازی عملیات پیگرانی در خط لوله بدون کنترل سرعت حرکت پیگ بوده است [۲۹]. نائینی و سورگی به بررسی آزمایشگاهی فشار نفوذ پیگ در عملیات پیگرانی با ارزیابی نیروی محرک سیال برای پیگ‌های کروی و با حساسیت‌سنجی خصوصیات متریک و نسبت بزرگی پیگ پرداختند؛ نتایج حاصل از این پژوهش ارائه‌کننده یک ابزار سریع و اقتصادی برای پیش‌بینی فشار محرک پیگ در لوله‌های بزرگ جهت پیاده‌سازی عملیات پیگرانی بوده است [۳۰]. لی و همکاران به بررسی عددی عملیات پیگرانی با پیگ کنارگذر در لوله‌های حاوی سیال تراکم‌پذیر (گاز) پرداختند. در این پژوهش یک روش عددی برای مدل‌سازی عملیات پیگرانی با بهره‌گیری از رویکرد لاگرانژی-اویلری معادلات جریان سیال و معادله جنبشی پیگ کنارگذر بر اساس روش شبکه متحرک پیشنهاد گردید؛ نتایج حاصل از این پژوهش که بر اساس مدل آزمایشگاهی تأیید و اعتبارسنجی شد، بیانگر تأثیر پارامتر نیروی اصطکاک اولیه بین پیگ و جداره لوله در بروز تغییرات سرعت حرکت پیگ کنارگذر در خط لوله بوده است [۳۱]. با توجه به سیر تکامل مطالعات انجام‌شده درباره عملیات پیگرانی در سال ۲۰۲۲ نوع جدید از پیگ‌های کنارگذر خودتنظیمی جهت ارتقای راندمان عملیات پیگرانی و بهینه‌سازی سرعت حرکت پیگ ارائه گردید. چن و همکاران در این مطالعات مدل آزمایشگاهی نوع

اندکی بر ارزیابی جریان پیرامون پیگ کنارگذر صورت گرفته است. از طرفی مطالعات عددی انجام شده غالباً با بهره‌گیری از مدل‌های CFD که بر پایه روش‌های شبکه‌بندی، به شبیه‌سازی جریان می‌پردازد، معطوف بوده است. بر این اساس ارائه مدل‌های کارآمد مطالعاتی به جهت شبیه‌سازی دقیق‌تر عملیات پیگرانی دارای ضرورت انجام تحقیقات برجسته‌ای بوده است. در این مقاله هدف اصلی ارائه مدلی کارآمد با بهره‌گیری از روش SPH (با توجه به ویژگی‌های ممتاز روش هیدرودینامیک ذرات هموار نسبت به روش‌های کلاسیک) به منظور شبیه‌سازی عملیات پیگرانی بوده است.

روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) یک روش کاملاً لاگرانژی و مبتنی بر ذرات است که در چند دهه گذشته به دلیل کاربردهای فراوان، سهولت اجرا و مزیت‌های چشمگیر آن نسبت به روش‌های مبتنی بر شبکه‌بندی، بسیار مورد توجه محققان در حل مسائل مختلف حوزه سیالات قرار گرفته است [۳۶-۳۸]. در این روش وضعیت سیال با مجموعه محدودی از ذرات نشان داده می‌شود و خصوصیات فیزیکی سیال همچون: فشار، سرعت، جابه‌جایی و... توسط هر ذره از همسایگان نزدیکش با استفاده از یک تابع درون‌یابی به نام تابع کرنل به دست می‌آید. به این ترتیب ذرات اجازه می‌یابند تا در یک فاصله هموارسازی مشخص (طول هموارسازی یا شعاع هموارسازی) با یکدیگر تعامل کنند. حرکت جمعی حاصل از ذرات، جریان یک سیال را شبیه‌سازی می‌کند و بنابراین می‌توان حرکت سیال را با استفاده از معادلات کلاسیک هیدرودینامیک توصیف نمود. مزیت اصلی روش SPH نسبت به روش‌های اویلری، طبیعت لاگرانژی این روش بوده است. دیدگاه لاگرانژی در روش‌های بدون شبکه‌بندی همچون روش SPH دارای مزایای برجسته‌ای است؛ همچون: ۱. مدل‌سازی با ذرات مجزا و عدم قید حرکت که برای مدل‌سازی در پدیده‌هایی با تغییر شکل بزرگ مناسب‌اند؛ ۲. سهولت برای مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده؛ ۳. ردیابی ذرات و خصوصیات مدنظر؛ ۴. دسترسی آسان به اطلاعات تاریخچه زمانی ذرات.

با بررسی مطالعات صورت‌گرفته توسط محققان پیشین در حوزه ارزیابی جریان آشسته در کانال‌های سربسته و مجاری تحت فشار همچون لوله، مشخص می‌گردد که بهره‌گیری از روش SPH جز چند مورد محدود، پژوهشی انجام نشده است که علت اصلی این موضوع را می‌توان در پیچیدگی روش SPH و به‌کارگیری توأمان معادلات ترم آشفتگی جریان بررسی کرد. در این راستا هو و همکاران (۲۰۱۴) با بهره‌گیری از روش SPH مطالعاتی

جدید پیگ‌های کنارگذر خودتنظیمی مورد ارزیابی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که بهره‌گیری از این نوع پیگ موجب کاهش اتلاف انرژی، نوسانات فشار و در نهایت کاهش تغییرات سرعت پیگ گردیده است [۳۲]. لیو و همکاران در مطالعاتی به ارزیابی عملیات پیگرانی در لوله‌های رایزر دریایی پرداختند. در این پژوهش هدف اصلی بررسی عملیات پیگرانی در رایزرهای دارای اسلاک‌های شدید^۱ در جداره لوله بوده که با بررسی دو نوع پیگ معمولی و کنارگذر مسیر مطالعات پیاده‌سازی شده است؛ نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که پیگ کنارگذر به‌طور قابل توجهی نوسانات فشار را در پایین رایزر و سرعت پیگ را در شرایط وجود اسلاک گسترده در جداره لوله در مقایسه با پیگ معمولی کاهش می‌دهد. علاوه بر این افزایش بازشدگی دریچه پیگ کنارگذر موجب کاهش نوسانات فشار در کف رایزر و سرعت حرکت پیگ در رایزر شده است [۳۳]. یاو و همکاران نوع جدیدی از پیگ‌های خودتنظیمی را با بهره‌گیری از روش‌های نوین یادگیری ماشین برای افزایش راندمان عملیات پیگرانی ارائه کردند. در این مطالعات مکانیسم هوشمند حرکت پیگ و مواجهه با تغییر قطر لوله به‌علت وجود ذرات چسبنده (اسلاک) که عامل اصلی در تغییرات سرعت حرکت پیگ بوده، بر اساس الگوریتم‌های هوش مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت؛ نتایج بیانگر عملکرد بهتر پیگرانی با بهره‌گیری از روش ارائه‌شده بوده است [۳۴]. با بررسی پارامترهای اصلی بر عملیات پیگرانی مشخص می‌گردد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش بازده و بهره‌وری پیگینگ، مدل‌های اصطکاکی تعریف‌شده برای شبیه‌سازی حرکت پیگ در لوله بوده است (برای بررسی توازن بین نیروهای محرک و مقاوم وارد بر پیگ). در این راستا کیم و همکاران در پژوهشی به ارزیابی مدل‌های مختلف برای شبیه‌سازی عددی دقیق‌تر عملیات پیگرانی پرداختند؛ نتایج حاصل از این مطالعات منجر به ارائه دو مدل اصطکاکی جدید برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سرعت در عملیات پیگرانی در خطوط لوله طولانی انتقال گاز بوده است. به‌علاوه این دو مدل اصطکاکی جدید درک واضح‌تری را برای طراحان عملیات پیگرانی فراهم می‌کنند تا حرکت ناپایدار پیگ در شبکه خط لوله را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمایند [۳۵].

با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققان پیشین مشخص می‌گردد که ارزیابی عملیات پیگرانی به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی پژوهشی مدنظر آن‌ها بوده است. علاوه بر این مطالعات نسبتاً

به صورت دوبعدی بر جریان در لوله دارای انحنا انجام دادند؛ نتایج حاصل بیانگر کارایی مناسب روش SPH در مدل سازی جریان بوده است. البته پیچیدگی روش و عدم همگرایی مناسب در گام های حل مسئله گزارش شده است [۳۹]. آلودو رودریگز (۲۰۲۱) مطالعاتی به صورت سه بعدی و با بهره گیری از روش SPH به منظور ارزیابی جریان آشفته در لوله دارای انحنا (با خم ۹۰ درجه) انجام داد [۴۱] و [۴۲]. روسیک و همکاران با هدف ارزیابی قابلیت روش SPH برای مدل سازی جریان فوق بحرانی در لوله ها و به ویژه لوله های دارای انحنا مطالعات جامعی انجام داده اند؛ نتایج حاصل بیانگر کارایی روش SPH در مدل سازی مدنظر بوده است اما پیچیدگی مدل، فرمولاسیون و حل دقیق معادلات و حساسیت بسیار بالای مدل در مرزها که موجب عدم همگرایی نتایج می گردد گزارش شده است [۴۲]. سیگالوتی و همکاران در مطالعاتی با بهره گیری از روش SPH به ارزیابی جریان آرام و آشفته در لوله های دارای انحنا پرداختند. در این مطالعات از مدل آشفته LES^۱ برای حل جمله آشفته جریان استفاده شد؛ نتایج نشان داد که مدل عددی بر پایه روش SPH در مدل سازی جریان آشفته دارای نتایج قابل قبولی بوده است. همچنین نتایج بیانگر عدم شبیه سازی دقیق آشفتهگی جریان در ناحیه نزدیک جداره لوله بوده است [۴۳]؛ بنابراین یکی از چالش های اصلی در به کارگیری این روش، شبیه سازی جریان آشفته در مجاری تحت فشار همچون لوله بوده است و می توان دلیل اصلی عدم مدل سازی عملیات پیگردانی و شبیه سازی جریان پیرامون پیگ را در این مهم بررسی کرد. بر اساس بررسی های صورت گرفته تا به امروز مدلی که بر پایه روش SPH جریان پیرامون پیگ کنارگذر را شبیه سازی نماید، ارائه نشده است. همچنین با بررسی مطالعات صورت گرفته توسط محققان پیشین در حوزه ارزیابی جریان آشفته در لوله مشخص می گردد که بهره گیری از روش SPH جز چند مورد محدود، پژوهشی انجام نشده است؛ علت اصلی این موضوع را می توان در پیچیدگی روش SPH و به کارگیری توأمان معادلات ترم آشفتهگی جریان بررسی کرد. بر این اساس، نوآوری اصلی و جنبه جدید بودن این پژوهش ارائه مدلی بر پایه روش SPH برای شبیه سازی عملیات پیگردانی در خط لوله بوده است که با توجه به ویژگی های ممتاز روش SPH نسبت به روش های کلاسیک مدل سازی جریان سیال، مدل ارائه شده دارای عملکرد دقیق تری بوده و انتظار می رود که در طراحی و پیاده سازی عملیات پیگینگ توسط فعالان به طور گسترده مورد استفاده قرار

گیرد.

در این پژوهش به هدف شبیه سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر مدلی دوبعدی بر اساس روش SPH توسعه داده شده است. در این مدل جمله آشفتهگی معادلات بر اساس مدل دو جمله ای $k - \epsilon$ استاندارد تعریف گردیده و مدل سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر تحت دو شرایط پیگ ساکن و پیگ متحرک انجام شده است. در نهایت عملکرد مدل SPH بر اساس نتایج پژوهش های عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. علت اصلی به کارگیری مدل آشفتهگی دو جمله ای $k - \epsilon$ استاندارد در مدل SPH توسعه داده شده، مزیت های اصلی این مدل نسبت به مدل های آشفتهگی دیگر همچون LES و $k - \omega$ در شبیه سازی آشفتهگی جریان بوده است. علاوه بر این تطابق و عملکرد بهتر این مدل در فرم SPH در مطالعات پادووف و همکاران مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل بیانگر عملکرد قابل قبول مدل آشفتهگی دو جمله ای $k - \epsilon$ استاندارد نسبت به سایر مدل های آشفتهگی در فرم SPH برای شبیه سازی جریان آشفته سیال بوده است [۴۴].

در این مقاله ابتدا عملکرد مدل SPH توسعه داده شده برای شبیه سازی جریان آشفته سیال در لوله مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بخش با مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی یک نمونه آزمایشگاهی عملکرد مدل پژوهش، ارزیابی و اعتبارسنجی شده است. در بخش دوم جریان پیرامون پیگ ساکن مدل سازی شده و نتایج حاصل با نتایج عددی موجود مورد بررسی قرار گرفته است، علاوه بر این در این بخش با بهره گیری از الگوریتم فراابتکاری گرگ های خاکستری (GWO^۲) مطالعاتی بر پارامتر قطر نسبی پیگ کنارگذر جهت دستیابی به مقادیر بهینه این پارامتر که منجر به بهینه سازی عملیات پیگردانی در خط لوله می گردد، پیاده سازی شده است. در نهایت بر اساس الگوریتم عددی ارائه شده بر پایه روش SPH، جریان سیال پیرامون پیگ متحرک مدل سازی گردیده و نتایج مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش انجام تحقیق

۱.۲. معادلات حاکم بر پیگ و حرکت پیگ در لوله

برای ارزیابی معادلات حاکم بر پیگ کنارگذر در لوله، در شکل (۱) پارامترهای اصلی پیگ کنارگذر (دوجته^۳)، جریان سیال و لوله در فضای دوبعدی به صورت طرحواره نمایش داده شده است.

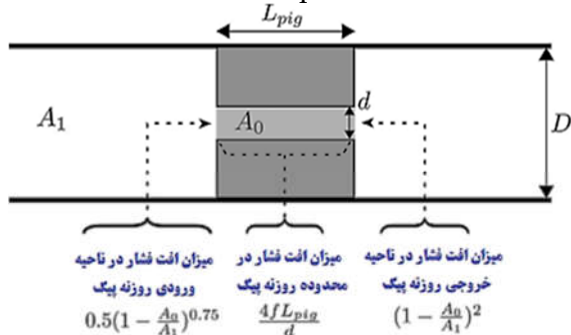
$$K = 0.5 \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^{0.75} + \frac{4fL_{pig}}{d} + \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، A_0 و A_1 ، به ترتیب مساحت مقطع عرضی روزنه پیگ و لوله است که بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. L_{pig} طول پیگ و f ضریب اصطکاک^۱ بوده که بر اساس رابطه چرچیل [۴۶] محاسبه می‌شود. پارامتر f برای پیگ‌های کنارگذر افقی تابعی از عدد رینولدز جریان در روزنه پیگ است.

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{4}\pi d^2 \\ A_1 = \frac{1}{4}\pi D^2 \\ f = f(U_{bp}d/\nu) \end{cases} \quad (4)$$

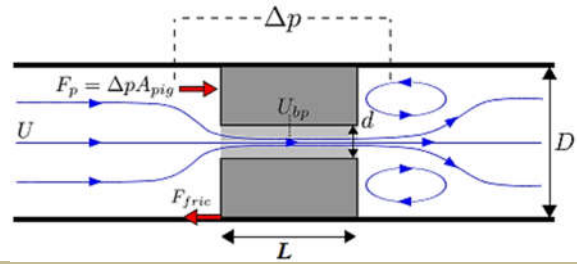
برای محاسبه ضریب افت فشار در پیگ کنارگذر دوجبه با در نظر گرفتن رابطه (۳) مشخص می‌گردد که این رابطه از سه جمله مجزا برای محاسبه افت فشار تشکیل شده است (۱) ناحیه ورودی جریان به روزنه پیگ؛ ۲) ناحیه روزنه پیگ؛ ۳) ناحیه خروجی جریان از روزنه پیگ کنارگذر که جزئیات آن در شکل (۲) نمایش داده شده است [۵].

$$\Delta p_t = \frac{1}{2}\rho U_{bp}^2 \times \left(0.5 \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^{0.75} + \frac{4fL_{pig}}{d} + \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2\right) \quad (5)$$



شکل (۲): جمله‌های رابطه ضریب افت فشار (K) در پیگ کنارگذر

دینامیک حرکت پیگ کنارگذر در خط لوله بر اساس میزان تغییرات افت فشار به‌عنوان نیروی محرک پیگ (F_p) و نیروی اصطکاک بین پیگ و دیواره لوله (F_{fric}) به‌عنوان نیروی مقاوم مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد ($F_t = F_p - F_{fric}$). بر اساس مطالعات عددی و آزمایشگاهی صورت‌گرفته مشخص می‌شود که در شروع عملیات پیگرانی بر اساس برابری نیروی‌های وارد بر پیگ کنارگذر، حرکت پیگ یک حرکت شتابدار در جهت جریان سیال بوده است. در این شرایط، میزان نیروی محرک (F_p) بیشتر از میزان نیروی مقاوم (F_{fric}) بوده که سبب ایجاد حرکت شتابدار پیگ شده است. با گذشت زمان و برقراری تعادل بین جریان سیال و حرکت پیگ کنارگذر در لوله، میزان نیروی محرک F_p تقریباً برابر با میزان



شکل (۱): طرح‌واره پیگ کنارگذر در لوله در فضای دوبعدی به همراه پارامترهای مؤثر در عملیات پیگرانی [۲]

با توجه به شکل (۱)، پارامتر D معرف قطر لوله، پارامتر d معرف قطر روزنه پیگ کنارگذر بوده است، همچنین میزان نیروی رانش (نفوذ) پیگ در لوله با پارامتر F_p و نیروی مقاوم در مقابل رانش (نیروی اصطکاک) با پارامتر F_{fric} نمایش داده شده است.

$$F_p = \Delta p A_{pig} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامتر Δp بیانگر اختلاف فشار (افت فشار) سیال پیرامون پیگ است. در شکل (۱) پارامتر A_{pig} معرف مساحت بخش جلویی پیگ بوده که عمدتاً معادل با مساحت مقطع عرضی لوله در نظر گرفته می‌شود [۵]. با توجه به رابطه (۱) مشخص می‌گردد که میزان نیروی وارد بر پیگ به‌صورت مستقیم با Δp (افت فشار) متناسب بوده است. برای ارزیابی میزان افت فشار و در نتیجه میزان نیروی وارد بر پیگ پارامتر ضریب افت فشار K به شرح رابطه (۲) فرمول‌بندی می‌شود:

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_{bp}^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ρ معرف چگالی سیال و U_{bp} میزان سرعت سیال در روزنه پیگ کنارگذر نسبت به حرکت پیگ است. با توجه به رابطه (۲) مشخص می‌گردد که ضریب افت فشار K به‌اندازه روزنه پیگ و همچنین به طراحی هندسه پیگ کنارگذر بستگی دارد که بسته به کاربرد پیگ می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین برای ارزیابی حرکت پیگ کنارگذر یکی از پارامترهای مؤثر نسبت قطر روزنه پیگ به قطر لوله بوده است ($d/D =$ قطر نسبی پیگ). برای فرمول‌بندی پارامتر ضریب افت فشار محققان مختلف مطالعات جامعی با بهره‌گیری از روش عددی انجام داده‌اند [۲۷]. در این پژوهش با به‌کارگیری روش CFD رابطه‌ای را بر اساس پارامترهای هندسی پیگ برای ضریب افت فشار در پیگ‌های کنارگذر دوجبه ارائه شده است. همچنین هندبوک مقاومت هیدرولیکی [۴۵]، رابطه‌ای به شرح رابطه (۳) ارائه کرده است؛ در این رابطه فرض بر آن است که روزنه پیگ به‌اندازه کافی ضخیم باشد و شرط ($L_{pig}/d > 3$) ارضا گردد.

نیروی اصطکاک F_{fric} می‌گردد. در این شرایط پیگ با سرعت ثابت حرکت می‌کند. بر اساس مطالعات انجام شده میزان سرعت جابه‌جایی پیگ کنارگذر در وضعیت حرکت با سرعت ثابت بر اساس رابطه (۶) فرمول‌بندی می‌گردد [۲۵].

$$U_{pig} = U - \frac{d^2}{D^2} \sqrt{\frac{F_{fric}}{k \frac{\pi}{8} \rho D^2}} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، U سرعت جریان در لوله است؛ بنابراین پس از برقراری تعادل در نیروهای وارده بر پیگ کنارگذر ($F_p \sim F_{fric}$) و حرکت پیگ با سرعت ثابت، میزان سرعت پیگ بر اساس رابطه (۶) قابل محاسبه بوده است.

۲.۲. معادلات حاکم و رویکرد حل عددی روش SPH

مدل پژوهش با بهره‌گیری از روش SPH توسعه داده شده است. به صورت کلی روش SPH دارای دو رویکرد اصلی مدل‌سازی بوده است: ۱. رویکرد WC-SPH که در این رویکرد سیال با تراکم‌پذیری کم در نظر گرفته می‌شود و اساس حل بر مبنای تغییرات چگالی جریان بوده؛ در این شرایط میزان فشار ذرات در هر گام زمانی بر اساس معادله حالت حل می‌گردد. ۲. رویکرد I-SPH که در آن، سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است و میزان فشار ذرات در هر گام زمانی بر اساس معادله پواسون حل می‌گردد. در این پژوهش از رویکرد WC-SPH استفاده شده که معادلات حاکم در این رویکرد در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

به‌طور کلی معادلات حاکم بر جریان سیال برگرفته از معادلات ناور-استوکس است که با فرض سیال ایدئال، بر اساس دو قانون بقای جرم^۱ و بقای اندازه حرکت (مومنتوم)^۲، حرکت سیال به شرح روابط (۷ و ۸) فرمول‌بندی می‌شود.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla V \quad (7)$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 V + g \quad (8)$$

که پارامتر ρ بیانگر چگالی سیال، ν بردار سرعت سیال، P فشار سیال، ν لزجت سینماتیک^۳ آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده که معادل است با $(\nu = 1.005 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ و g شتاب گرانش است. در رویکرد WCS-SPH فشار از معادله حالت بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$p = p_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (9)$$

که γ برای سیال آب معادل با ۷ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_{b=1}^n m_b (V_a - V_b) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (10)$$

در این رابطه، پارامتر W_{ab} معرف تابع کرنل بوده که داریم: $W_{ab} = (|x_a - x_b|, h_a)$. پارامتر h_a نیز بیانگر طول هموارسازی ذره a -ام است. همچنین m_b جرم ذره b -ام است که در شعاع هموارسازی ذره a می‌باشد.

$$\begin{aligned} \frac{dV_a}{dt} &= -\frac{1}{\rho_a} \sum_{b=1}^n \frac{m_b}{\rho_b} (p_a + p_b) W_{ab} \\ &+ 4\nu \sum_{b=1}^n m_b \frac{V_a - V_b}{\rho_a - \rho_b} \frac{x_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{|x_{ab}|^2 + \epsilon^2} \\ &+ \sum_{b=1}^n m_b \left(\frac{T_a}{\rho_a^2} + \frac{T_b}{\rho_b^2} \right) \cdot \nabla_a W_{ab} + g \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، $x_{ab} = x_a - x_b$ ، $\epsilon = 0.01 h_a^2$ است.

جمله سوم نیز بیانگر خصوصیات جریان آشفته بوده و پارامتر T تانسور تنش برشی آشفته^۴ است.

$$T_i = \mu_T S_i \quad (12)$$

برای محاسبه پارامتر T رویکردهای مختلفی برای حل این جمله که بیانگر آشفته‌گی جریان بوده، ارائه شده است. در مدل ارائه شده از روش $k - \epsilon$ استاندارد به‌کارگیری شده است. بر این اساس پارامتر μ_T که معرف ویسکوزیتی دینامیکی گردابه^۵ است از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد:

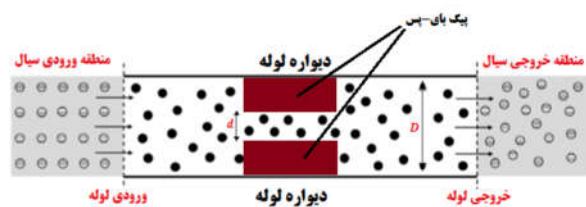
$$\mu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

با توجه به رابطه (۱۳) مشخص می‌گردد که ویسکوزیتی دینامیکی گردابه بر اساس دو پارامتر k (انرژی کینماتیک آشفته^۶) و ϵ (نرخ پراکنش آشفته^۷) که بیانگر مؤلفه‌های مدل

4. Turbulent Shear Stress Tensor
5. Dynamic Eddy Viscosity
6. Turbulent Kinetic Energy
7. Turbulent Dissipation Rate

1. Conservation of Mass
2. Conservation of Momentum
3. kinematic Viscosity

حوزه محاسباتی در اطراف دیواره لوله قرار می گیرند. این ذرات مرزی بیرونی به عنوان ذرات مایع معمولی در نظر گرفته می شوند. اگرچه آن ها با استفاده از معادله (۱۱) به روزرسانی می شوند، مجبورند ثابت بمانند و موقعیت های اولیه خود را حفظ کنند. چگالی دیواره و ذرات مرزی خارجی با چگالی همه ذرات سیال همسایه که در حوزه پشتیبانی (شعاع هموارسازی) آن ها قرار دارند تعیین می شود. برای جلوگیری از نفوذ ذرات در سراسر دیواره لوله، ذرات دیواره نیروهای دافعه مصنوعی به ذرات سیال مجاور اعمال می کنند. بدنه پیگ دارای شرایط مرز غیرقابل نفوذ بوده، بنابراین برای ذرات تشکیل دهنده بدنه پیگ کنارگذر نیروی دافعه مصنوعی تعریف شده است که مانع از نفوذ ذرات سیال به داخل بدنه پیگ می گردد. علاوه بر این برای جلوگیری از تأثیر منفی نیروی دافعه ذرات بدنه پیگ کنارگذر بر ذرات سیال دورتر از بدنه پیگ، فاصله تأثیرگذاری آن ها محدود به ذراتی در فاصله یک و نیم برابر شعاع هموارسازی تعریف شده است. شایان ذکر است که ذرات تشکیل دهنده بدنه پیگ در هر گام زمانی کاملاً در مکان اولیه، ثابت و بدون حرکت بوده اند و بر اساس محاسبات انجام شده در گام زمانی بعدی، به مکان جدید منتقل می گردند. ورودی و خروجی لوله به عنوان شرایط مرزی باز در نظر گرفته می شود. شرایط مرزی مناسب ورودی با قرار دادن یک ناحیه ورودی در پشت ورودی لوله اجرا می شود، همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است. منطقه ورودی با پنج ستون از ذرات به طور منظم توزیع شده، پر شده و دارای طولی برابر با $5\Delta x_0$ است که در آن Δx_0 فاصله اولیه ذرات است. سپس به ذرات ورودی اجازه داده می شود تا در صورت نیاز با چگالی و سرعت تعیین شده به داخل لوله جریان پیدا کنند. به این ترتیب اطلاعات مرزی در حوزه جریان منتشر می شود زیرا ذرات سیال نزدیک به ورودی لوله از اطلاعات ذرات ورودی مجاور که در حوزه پشتیبانی آن ها قرار دارند استفاده می کنند.



شکل (۳): شرایط مرزی حاکم در مدل SPH پژوهش

شرایط مرز خروجی با استفاده از شرایط مرزی جریان خروجی غیر منعکس کننده^۳ اعمال می گردد. این روش مستلزم تعیین منطقه جریان خروجی در خروجی لوله با طول همسان با

آشفتهگی دو جمله ای استاندارد $\varepsilon - k$ بوده، محاسبه می گردد.

$$\frac{dk_i}{dt} = p_{k_i} + \frac{1}{\sigma_k} \sum_{j=1}^n m_j \frac{vT_i + vT_j}{\rho_i + \rho_j} \frac{k_i + k_j}{r_{ij}^2 + 0.01h^2} \cdot \nabla W_{ij} \quad (14)$$

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_i}{k_i} p_{k_i} + \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \sum_{j=1}^n m_j \frac{vT_i + vT_j}{\rho_i + \rho_j} \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_j}{r_{ij}^2 + 0.01h^2} \cdot \nabla W_{ij} - \varepsilon_i + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon_i}{k_i} \sum_{j=1}^n m_j \frac{\varepsilon_j}{\rho_j} W_{ij} \quad (15)$$

که پارامتر r_{ij} بیانگر فاصله بین دو ذره است. سایر پارامترهای موجود نیز ثابت حل عددی معادله بوده که بر اساس پیشنهاد ویولو و عیسی [۴۷]، دارای مقادیری به شرح جدول (۱) است:

| جدول (۱): مقادیر پارامترهای معادله آشفتهگی دو جمله ای $k - \varepsilon$ | | | |
|---|----------------------|---------------------|---------------------|
| σ_k | σ_ε | $C_{\varepsilon 1}$ | $C_{\varepsilon 2}$ |
| ۱ | ۱/۳ | ۱/۴۴ | ۱/۹۲ |

تابع درون یاب کرنل به کارگیری شده در این پژوهش، بر اساس نتایج حاصل از مطالعات پیشین تابع کرنل Wendland C2^۱ بوده که معادله آن به شرح رابطه (۱۶) است [۴۸ و ۴۹]:

$$W(q, h) = \frac{21}{2\pi h^3} (1 - q)^4 (1 + 4q) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) مقدار q معادل است با: $q = |x_a - x_b|/h$. در مدل توسعه داده شده در این تحقیق، برای جلوگیری از رشد خطاهای عددی ناشی از ناهمسانگردی در شرایط خاص (توزیع های خاص ذرات)، حرکت ذرات در امتداد لوله بر اساس رابطه ارائه شده در مقاله واکندیو و همکاران [۵۰]، که به شرح رابطه (۱۷) است، پیاده سازی شده است.

$$\frac{dx_a}{dt} = V_a + \frac{\beta x_0 V_{max}}{M} \sum_{b=1}^n m_b \frac{x_{ab}}{(x_{ab} \cdot x_{ab})^{3/2}} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، پارامتر $\beta = 0.04$ ، V_{max} : ماکزیمم سرعت سیال، M : کل جرم سیال در لوله و پارامتر x_0 به شرح رابطه (۱۸) است:

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n (x_{ab} \cdot x_{ab})^{1/2} \quad (18)$$

۳.۲. شرایط مرزی در مدل SPH

شرایط مرزی شامل چهار بخش مجزاست: ۱. شرط مرزی دیواره لوله؛ ۲. شرط مرزی بدنه پیگ کنارگذر؛ ۳. شرط مرزی ورودی جریان سیال به لوله؛ ۴. شرط مرزی خروج سیال از لوله. شرایط مرزی بدون لغزش ($v = 0$) در دیوار جامد با استفاده از روش ذرات مرزی متحرک تعریف می شود. در این پژوهش، لایه ای از ذرات معرف دیواره لوله بوده و دو لایه ذرات شیخ^۲ در خارج از

1. Wendland Kernel Function
2. Ghost particles

حل عددی با بهره‌گیری از روش SPH ارائه شده است. شایان ذکر است که در مدل‌سازی حرکت پیگ فرض می‌گردد که زبری دیواره لوله کاملاً یکنواخت بوده و ضریب اصطکاک بین پیگ و دیواره لوله در سراسر لوله ثابت و به طبع آن نیروی اصطکاک (F_{fric}) در هر گام حل بدون تغییر بوده است. با توجه به رابطه (۱) مشخص می‌شود که اصلی‌ترین پارامتر در تعیین نیروی محرک پیگ کنارگذر، نیروی رانش (F_p) بوده که میزان این نیرو بر اساس ضریب افت فشار K و سرعت جریان در ناحیهٔ روزهٔ پیگ U_{bp} تعیین می‌گردد (رابطه ۵). بنابراین برای مدل‌سازی حرکت پیگ در لوله نیاز است تا در هر گام زمانی ابتدا میزان نیروی محرک (F_p) بر اساس رابطه (۱) تعیین گردد. در مرحلهٔ بعد بر اساس مقدار نیروی محرک محاسبه‌شده و همچنین با توجه به میزان نیروی اصطکاک که بر اساس ضریب اصطکاک لوله تعیین می‌گردد، میزان کل نیروی وارد بر پیگ محاسبه می‌شود ($F_t = F_p - F_{fric}$). با طی نمودن گام‌های مذکور در صورتی که نیروی کل (F_t) دارای مقادیر بزرگ‌تر از صفر باشد، پیگ دارای حرکت شتاب‌دار بوده است و میزان جابه‌جایی آن بر اساس رابطهٔ حرکت شتاب‌دار بر پایهٔ میزان شتاب محاسبه می‌شود. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته مشخص شد که حرکت پیگ کنارگذر در لوله در ابتدای برپاسازی عملیات پیگری دارای حرکت شتاب‌دار و با گذشت زمان و با متعادل شدن نیروی محرک و نیروی اصطکاک ($F_t \sim 0$)، دارای حرکت با سرعت ثابت بوده است؛ بنابراین در گام زمانی که میزان کل نیروی وارده معادل مقدار تقریبی صفر گردید، پیگ با سرعت ثابت حرکت می‌نماید و میزان سرعت پیگ بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌گردد. در فرایند انجام محاسبات مذکور، موقعیت ذرات پیگ کنارگذر در هر گام زمانی (برای مثال گام زمانی n -ام) کاملاً ثابت بوده است و بر اساس میزان جابه‌جایی به‌دست‌آمده در گام زمانی n -ام، موقعیت ذرات پیگ در گام زمانی $n+1$ -ام تعیین می‌گردد. چالش اصلی در جابه‌جایی ذرات پیگ در هر گام زمانی، برهم‌نهی ذرات پیگ و ذرات سیال بوده است که با در نظر گرفتن مقادیر کوچک برای گام زمانی (Δt) این مسئله حل‌وفصل شد. بنابراین در مدل‌سازی حرکت پیگ کنارگذر در لوله برای تعیین مقدار گام زمانی علاوه بر ارضای شرط کورانت (CFL)، باید این مهم مدنظر قرار گیرد و حتی‌الامکان از گام‌های زمانی کوچک‌تری برای پایداری حل بهره برد. به‌منظور روشن‌تر شدن الگوریتم حل عددی حرکت پیگ کنارگذر در لوله، در شکل (۵) روندنمای الگوریتم حل عددی دینامیک پیگ کنارگذر ارائه شده است.

منطقهٔ ورودی است. ذرات سیالی که وارد منطقهٔ خروجی می‌شوند با حل معادلهٔ موج خروجی جابه‌جا می‌شوند (رابطه ۱۹).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + v_x \frac{\partial V}{\partial x} - V \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (19)$$

که پارامتر v بیانگر سرعت جابه‌جایی ذرات و معادل ($V = v_x, v_y, v_z$) است. همچنین فرض بر این است که جریان در راستای محور x در حال حرکت می‌باشد. فرمت پایدار SPH رابطه (۱۹) به صورت ذیل فرمول‌بندی می‌شود:

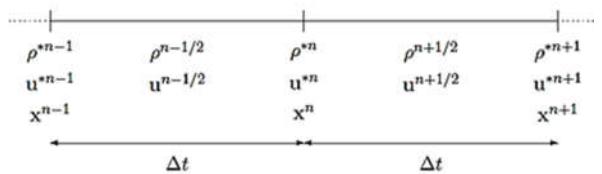
$$\frac{\partial v_{x,0}}{\partial t} = -v_{x,0} \sum_{b=1}^n \frac{m_b}{\rho_{ob}} (V_b - V_0) \frac{\partial W_{ob}}{\partial x_0} + 2v \sum_{b=1}^n \frac{m_b}{\rho_b} \frac{(V_b - V_0)}{(x_{ob}^2 + \epsilon^2)} \left(y_{ob} \frac{\partial W_{ob}}{\partial y_0} + z_{ob} \frac{\partial W_{ob}}{\partial z_0} \right) \quad (20)$$

در رابطه (۲۰) داریم: $\rho_{ob} = (\rho_o + \rho_b)/2$ ، پایداری عددی معادله را می‌توان بهبود بخشید اگر سرعت جریان ذرات خروجی ($V_{x,0}$)، مطابق با رابطه (۲۱) محاسبه گردد.

$$v_{x,0} = \sum_{b=1}^n \frac{m_b}{\rho_b} v_{x,b} W_{ob} \quad (21)$$

۴.۲. روش حل معادلات با رویکرد عددی

روش SPH یک روش صریح^۱ بوده که برای دستیابی به نتایج و خروجی‌های مجموع زمانی^۲ می‌توان از یکی از روش‌های عددی مجموع‌سازی استفاده کرد. در این پژوهش از روش Leap-Frog برای این منظور استفاده شده است. همچنین برای پایداری معادلات و انتخاب گام‌های زمانی مناسب برای حل روابط حاکم شرط کورانت (Courant-Friedrichs-Levy (CFL)) برای تعیین گام زمانی (Δt) در نظر گرفته شده است. در روش WCSPH پارامترهای وابسته‌ای که در هر گام زمانی باید برای تمام ذرات محاسبه شوند، عبارت‌اند از: سرعت ذرات u ، موقعیت ذرات x و چگالی ذرات ρ ، پارامتر فشار مستقل بوده و در هر گام زمانی بر اساس معادلهٔ حالت محاسبه می‌گردد. در شکل (۴) طرح‌وارهٔ روش حل نمایش داده شده است.



شکل (۴): رویهٔ حل در روش Leap-Frog

۵.۲. الگوریتم دینامیک پیگ در لوله به روش SPH

برای شبیه‌سازی حرکت پیگ کنارگذر در لوله، با توجه به معادلات حاکم بر دینامیک پیگ و فعل-انفعالات بین پیگ و سیال، الگوریتم

1. Explicit method
2. Time Integration

گرگ α نام‌گذاری می‌کنند. در نتیجه، دومین و سومین راه‌حل‌های بهتر به ترتیب گرگ β و δ نامیده شدند. راه‌حل‌های باقی‌مانده فرض می‌شود که ω هستند. لذا در الگوریتم GWO بهینه‌سازی با α و β و δ رهبری می‌شود و گرگ‌های ω از این سه دسته پیروی می‌کنند؛ بنابراین الگوریتم GWO بر اساس فرایند شکار گرگ‌های خاکستری که شامل سه مرحله اصلی جست‌وجو، محاصره و حمله بوده، پیاده‌سازی گردیده که در ادامه، مراحل و فازهای اصلی شکار گرگ خاکستری به همراه روابط ریاضی در هر مرحله ارائه شده است.

مرحله جست‌وجو: ردگیری، وادار به فرار کردن و نزدیک شدن به شکار، روابط ارائه‌شده برای مرحله جست‌وجو عبارت است از:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (22)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}\vec{D} \quad (23)$$

در روابط (۲۲ و ۲۳) پارامتر t تکرار فعلی، A و C بردار ضرایب، X_p بردار موقعیت طعمه و X بردار موقعیت یک گرگ خاکستری است.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (24)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (25)$$

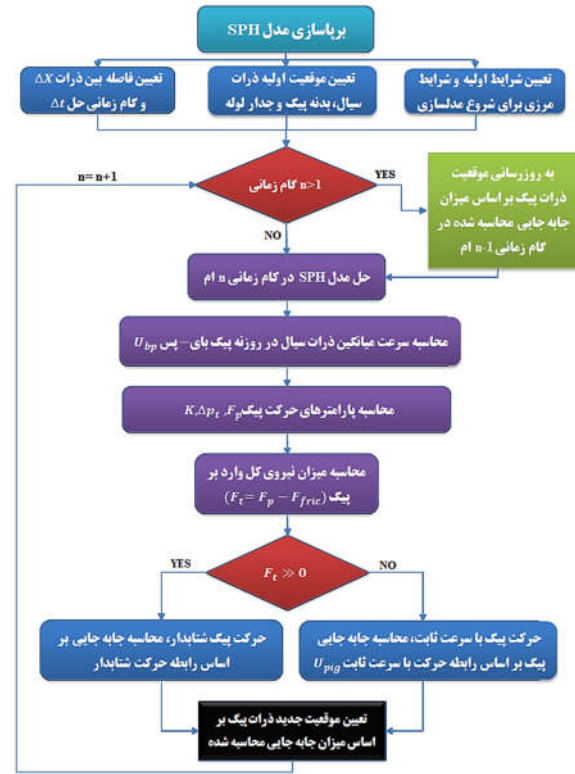
در رابطه (۲۴) مؤلفه‌های a به صورت خطی با بالا رفتن تعداد تکرار (از ۲ تا صفر) کاهش می‌یابد و r_1 و r_2 بردارهای تصادفی (بین ۰ و ۱) هستند. یک گرگ خاکستری در موقعیت (X, Y) می‌تواند موقعیت خود را بر اساس موقعیت یک طعمه (X^*, Y^*) به روزرسانی نماید. بر اساس این الگوریتم مکان‌های مختلف پیرامون بهترین جواب می‌تواند بر اساس تنظیم مقدار بردارهای A و C حاصل گردد.

مرحله محاصره: تعقیب، محاصره کردن، برهم زدن حرکت شکار تا اینکه از حرکت بایستد.

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \end{aligned} \quad (27)$$

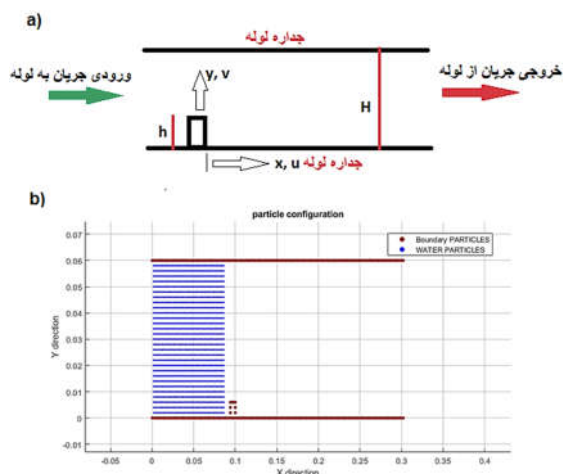
$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (28)$$



شکل (۵): الگوریتم حل عددی حرکت پیگ در لوله به روش SPH

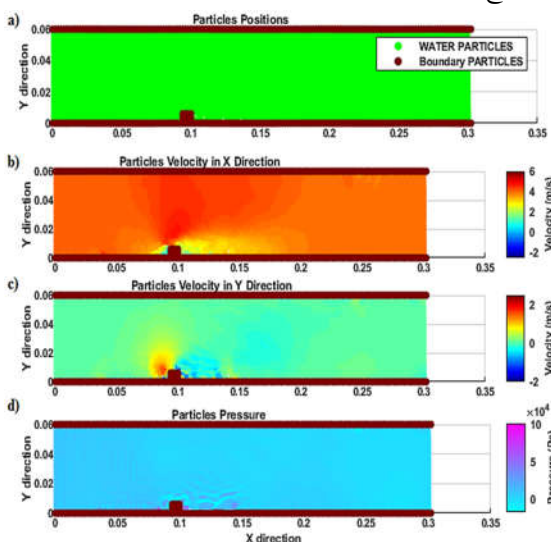
۶.۲. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری (GWO)

الگوریتم گرگ‌های خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴) بر مبنای شکار دسته‌جمعی گرگ‌ها ارائه شده است [۵۱]. در ادامه محققان با به‌کارگیری این الگوریتم بهینه‌سازی، در حل مسائل مختلف مهندسی بر کارآمدی و عملکرد بی‌نظیر آن صحنه گذاشته‌اند [۵۲]. بر طبق سلسله‌مراتب زندگی گروهی گرگ‌های خاکستری، گرگ α (آلفا)، گرگ حاکم در گروه بوده، آلفاها اساساً مسئول تصمیم‌گیری درباره شکار، جای خواب، زمان حرکت و مانند آن هستند. دومین سطح درجه‌بندی گرگ‌های خاکستری بتا (β) است، بتاها گرگ‌های تحت امر آلفا هستند که به آلفا در تصمیم‌گیری و دیگر فعالیت‌های گروه کمک می‌کنند. گرگ بتا، احتمالاً بهترین کاندیدا برای آلفا شدن است و نقش یک معاون را برای آلفا و ناظم را برای گروه بازی می‌کند. پایین‌ترین طبقه گرگ خاکستری، گرگ امگا (ω) است. گرگ‌های امگا نقش قربانی را برای سایر اعضای گروه دارند. آن‌ها آخرین گرگ‌هایی هستند که اجازه خوردن غذا را دارند. اگر گرگی آلفا، بتا یا امگا نباشد، فرمان‌بردار یا دلتا (δ) نامیده می‌شود. گرگ‌های دلتا از آلفاها و بتاها تبعیت می‌کنند و به امگاها حکمرانی می‌کنند. برای مدل‌سازی ریاضی حکومت اجتماعی گرگ‌ها هنگام طراحی الگوریتم GWO، شایسته‌ترین راه‌حل را



شکل (۶): خصوصیات هندسی مدل جریان آشفته در لوله دارای دیوار قائم، a: طرح‌واره مدل آزمایشگاهی، b: مدل عددی

بر اساس مشخصات هندسی و پارامترهای اولیه مدل آزمایشگاهی، مدل عددی SPH اجرا می‌گردد (شکل ۲- a)، پارامترهای مدل عددی SPH در این مدل‌سازی عبارت‌اند از: فاصله اولیه ذرات $\Delta x = 0.001$ ، گام زمانی حل بر اساس ارضای شرط کورانت $\Delta t = 0.00004$ ، شعاع هموارسازی $(h = 1.4 \Delta x)$. در شکل (۷) کانتورهای جابه‌جایی، سرعت برداری و فشار ذرات بر اساس اجرای مدل SPH ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل با بررسی تغییرات سرعت برداری مشخص می‌گردد که سرعت افقی ذرات (u) در منطقه برخورد با مانع افزایش یافته است. همچنین مقادیر اندازه سرعت قائم ذرات پیرامون دیوار قائم (قبل و بعد از مانع) افزایش می‌یابد.



شکل (۷): نتایج حاصل از مدل‌سازی جریان در کانال دارای مانع قائم، a: موقعیت ذرات، b: سرعت برداری ذرات (u)، c: سرعت برداری ذرات (v)، d: فشار ذرات

گرگ‌های خاکستری این توانایی را دارند تا محل یک طعمه را تشخیص دهند و آن‌ها را احاطه کنند. شکار معمولاً توسط گرگ آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا ممکن است در شکار در بعضی مواقع مشارکت داشته باشند. باین حال در یک فضای جست‌وجوی محدود، هیچ ایده‌ای درباره محل بهینه (طعمه) نداریم. برای شبیه‌سازی ریاضی‌وار رفتار شکارگونه گرگ‌های خاکستری، فرض می‌کنیم که آلفا (بهترین جواب)، بتا و دلتا اطلاع خوبی درباره پتانسیل محل طعمه دارند. بنابراین ما ۳ جواب بهتر به دست آمده تاکنون را ذخیره کرده و بقیه عوامل جست‌وجو را مجبور می‌کنیم تا موقعیت‌های خود را بر اساس موقعیت عوامل بهتر به روزرسانی کنند (روابط ۲۶ تا ۲۸).

مرحله حمله: شروع حمله نهایی به سمت شکار

گرگ‌های خاکستری شکار را با حمله به طعمه زمانی که از حرکت بازمی‌ایستد خاتمه می‌دهند. به‌منظور اینکه ریاضی‌وار نزدیک شدن به طعمه را مدل کنیم، مقدار a را کاهش می‌دهیم. توجه شود که محدوده نوسان بردار A نیز برحسب a کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر a یک مقدار تصادفی است در بازه $[-2a, 2a]$ جایی که a از ۲ تا صفر با بالا رفتن تعداد تکرار کاهش می‌یابد. زمانی که مقادیر تصادفی A در بازه $[-1, 1]$ هستند، موقعیت بعدی یک عامل جست‌وجو می‌تواند در هر موقعیتی بین موقعیت کنونی و موقعیت طعمه باشد.

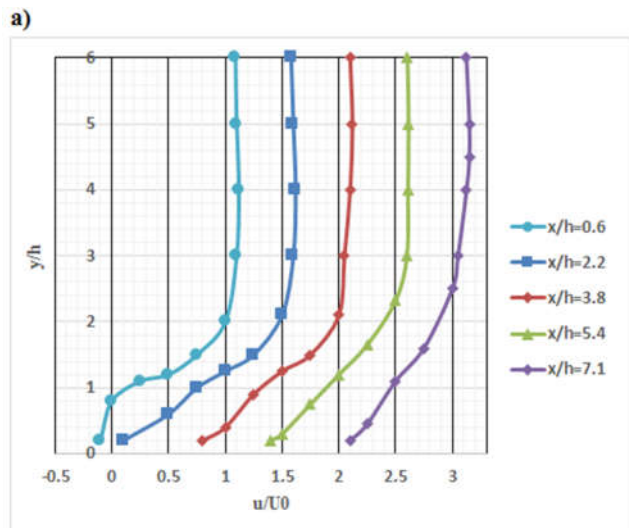
۳. نتایج و بحث

۱.۳. ارزیابی عملکرد مدل SPH پژوهش

برای ارزیابی عملکرد مدل SPH توسعه‌داده‌شده در این پژوهش، یک مدل آزمایشگاهی جریان آشفته در لوله دارای مانع مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل بر اساس مطالعات آزمایشگاهی [۵۳] که به ارزیابی جریان آشفته در کانال در برخورد با مانع انجام شده، تعریف و مدل عددی بر اساس مشخصات مدل آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده است. در شکل (۶) خصوصیات هندسی مدل تجربی و مدل عددی SPH و در جدول (۲) خصوصیات مدل ارائه شده است.

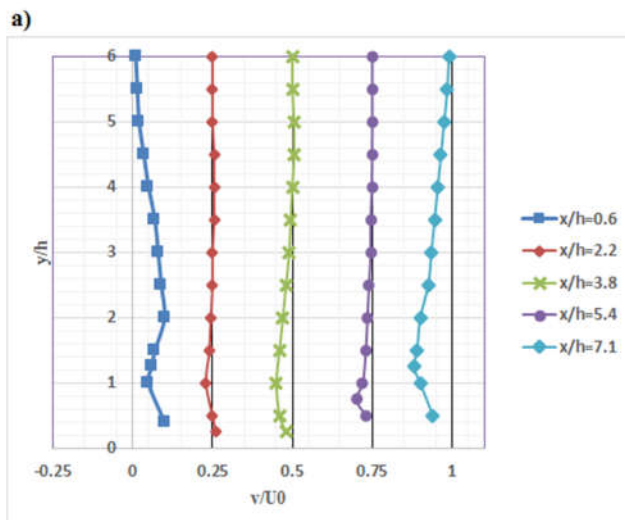
جدول (۲): جزئیات پارامترهای مدل جریان در کانال دارای

| مانع قائم | | |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| $U_0 \left(\frac{m}{s}\right)$ | $h \text{ (mm)}$ | $H \text{ (mm)}$ |
| ۳/۶ | ۶/۳۵ | ۶۱ |



| میزان خطای مدل Error % | مدل عددی U/U0 NUM. | مدل آزمایشگاهی U/U0 EXP. | X Velocity |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|
| 4.571 | 1.05 | 1.002 | x/h=0.6 |
| | | | y/h=2 |
| 2.818 | 1.1 | 1.069 | x/h=0.6 |
| | | | y/h=4 |
| 5.217 | 1.15 | 1.09 | x/h=0.6 |
| | | | y/h=5 |
| 6.1875 | 1.6 | 1.501 | x/h=2.2 |
| | | | y/h=2 |
| 2.709 | 1.55 | 1.508 | x/h=2.2 |
| | | | y/h=4 |
| 6.79 | 1.62 | 1.51 | x/h=2.2 |
| | | | y/h=5 |
| 4.75 | 2 | 1.905 | x/h=3.8 |
| | | | y/h=2 |

شکل (۸): مقایسه نتایج سرعت برداری جریان در راستای محور X (پارامتر u) در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی SPH در شبیه‌سازی جریان در کانال دارای دیوار قائم، a: نتایج مدل آزمایشگاهی، b: نتایج مدل SPH



| میزان خطای مدل Error % | مدل عددی U/U0 NUM. | مدل آزمایشگاهی U/U0 EXP. | Y Velocity |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|
| 3.5 | 0.1 | 0.0965 | x/h=0.6 |
| | | | y/h=2 |
| 4 | 0.05 | 0.048 | x/h=0.6 |
| | | | y/h=4 |
| 8.34 | 0.03 | 0.0275 | x/h=0.6 |
| | | | y/h=5 |
| 5 | 0.26 | 0.247 | x/h=2.2 |
| | | | y/h=2 |
| 3.2 | 0.25 | 0.258 | x/h=2.2 |
| | | | y/h=4 |
| 2 | 0.25 | 0.255 | x/h=2.2 |
| | | | y/h=5 |
| 1.46 | 0.48 | 0.473 | x/h=3.8 |
| | | | y/h=2 |

شکل (۹): مقایسه نتایج سرعت برداری جریان در راستای محور Y (پارامتر v) در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی SPH در شبیه‌سازی جریان در کانال دارای دیوار قائم، a: نتایج مدل آزمایشگاهی، b: نتایج مدل SPH

نتایج حاصل مشخص می‌گردد که بیشترین میزان خطای محاسباتی در مدل SPH معادل با ۶/۸٪ بوده است، علاوه بر این در شکل (۹) میزان خطای محاسباتی سرعت قائم جریان در مدل SPH با نتایج مدل تجربی آپاریا و همکاران (۱۹۹۴) مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که میانگین خطای مدل‌سازی کمتر از ۵٪ و بیشترین میزان خطای محاسباتی توسط مدل SPH معادل با ۸/۳۴٪ است. با ارزیابی نتایج ارائه‌شده (مقایسه بردار سرعت (u, v)) به‌وضوح مشخص می‌گردد که مدل SPH ارائه‌شده دارای دقت قابل قبول در شبیه‌سازی جریان آشفته در لوله دارای دیوار قائم در جداره است.

برای ارزیابی مدل عددی پژوهش که بر اساس روش SPH توسعه داده شده است، نتایج حاصل با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته است. به این منظور مقادیر سرعت برداری جریان در دو راستای X, Y در موقعیت‌های اندازه‌گیری‌شده در تست آزمایشگاهی با مقادیر سرعت ذرات در همان موقعیت‌ها در مدل عددی پژوهش مورد مقایسه قرار گرفته و میزان دقت مدل عددی برآورد شده است (شکل ۸ و ۹). در شکل (۸) نتایج سرعت برداری جریان در راستای محور X (پارامتر u) در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی SPH در شبیه‌سازی جریان در لوله دارای دیوار قائم نمایش داده شده است. بر اساس

۲.۳. مدل‌سازی پیگ ساکن

بر اساس معادلات حاکم بر پیگ کنارگذر در لوله، مشخص می‌گردد که یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی عملکرد پیگ، قطر نسبی پیگ (نسبت قطر روزنه پیگ کنارگذر به قطر لوله d/D) بوده است. همان‌طور که اشاره شد، تغییر در مقادیر قطر نسبی پیگ موجب کاهش و یا افزایش میزان نیروی وارد بر پیگ و طبعاً تأثیر مستقیم بر راندمان عملیات پیگرانی می‌گذارد. علاوه بر این، یکی از اقدامات اصلی و اولیه در برپاسازی عملیات پیگرانی تعیین قطر نسبی بهینه پیگ برای دستیابی به بازده بیشینه و کنترل سرعت پیگ بوده است. بر این اساس مدل‌سازی برای شرایط پیگ ثابت با متغیر در نظر گرفتن قطر نسبی پیگ تعریف شده و با بهره‌گیری از مدل SPH، مطالعات انجام شده است. در این مدل‌سازی پیگ کاملاً ثابت و مقید در مکان اولیه در نظر گرفته شده و بر اساس خصوصیات جریان سیال در لوله، میزان نیروی وارد بر پیگ تحت هریک از مقادیر مختلف قطر نسبی پیگ، محاسبه و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور کالیبره بودن مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد مدل SPH، مشخصات هندسی و شرایط مدل‌سازی با بهره‌گیری از مطالعات [۵۴] با مقیاس ۱:۱۰ پیاده‌سازی شده است. در جدول (۳) مشخصات کلی مدل‌سازی در شرایط پیگ ثابت ارائه شده است.

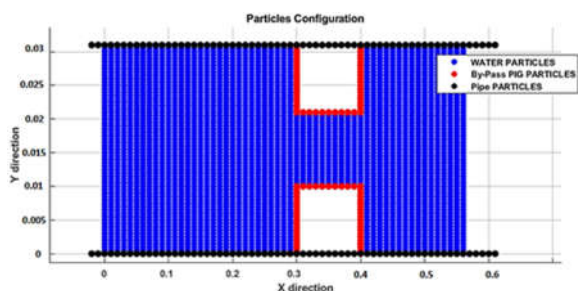
جدول (۳): مشخصات کلی مدل‌سازی تحت شرایط پیگ ثابت

| پارامتر | طول لوله | قطر لوله (D) | قطر روزنه پیگ (d) | چگالی سیال (ρ) | سرعت سیال |
|---------|----------|--------------|-------------------|------------------------|-----------|
| مقادیر | ۶۰ cm | ۳ cm | ۲/۱ - ۰/۶ | ۱۰۰۰ kg/m ^۳ | ۰/۵ m/s |

در شکل (۱۰) طرح‌واره کلی از هندسه مدل ایجادشده بر اساس روش SPH در شرایط پیگ ثابت در لوله، نمایش داده شده است. در این مدل‌سازی برای ارزیابی تأثیر پارامتر قطر نسبی پیگ بر میزان نیروی محرک، شبیه‌سازی تحت شش وضعیت مختلف قطر روزنه پیگ کنارگذر (جدول ۴) انجام شده است.

جدول (۴): جزئیات مطالعات پارامتریک بر میزان متغیر کنارگذر

| تحت شرایط مدل‌سازی پیگ ثابت | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| مدل | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
| قطر نسبی (d/D) | ۰/۲ | ۰/۳ | ۰/۴ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۰/۷ |
| قطر روزنه پیگ (d) | ۰/۶ cm | ۰/۹ cm | ۱/۲ cm | ۱/۵ cm | ۱/۸ cm | ۲/۱ cm |

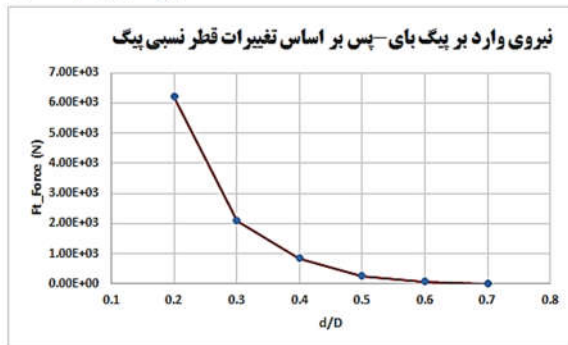


شکل (۱۰): طرح‌واره مدل SPH در شبیه‌سازی پیگ ثابت

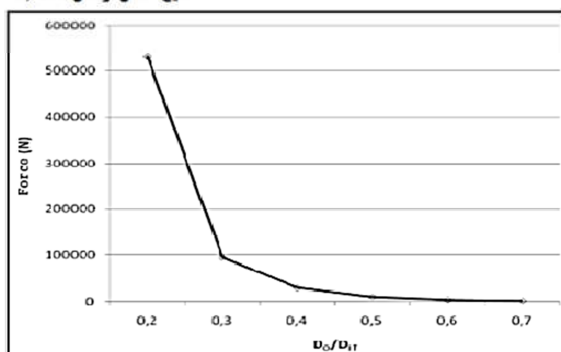
در مدل‌سازی پیگ ساکن بر اساس روش SPH ابتدا شرایط اولیه برای مدل بر اساس جدول (۳) تعیین و موقعیت اولیه ذرات (شکل ۱۰) پیاده‌سازی شده است. پس از شروع مدل‌سازی جریان سیال (ذرات سیال)، از ورودی لوله (سمت چپ) وارد و از خروجی لوله (سمت راست) خارج می‌گردد. در این شرایط پیگ کاملاً مقید بوده و صرفاً میزان تغییرات نیروی محرک وارد بر پیگ (F_p) در شش وضعیت مختلف قطر نسبی پیگ کنارگذر (بر اساس جدول ۴) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شرایط پیگ ساکن شامل تغییر موقعیت، سرعت برداری و تغییرات فشار ذرات سیال بوده است. در شکل (۱۱) کانتورهای تغییرات سرعت برداری (سرعت در راستای محور X ، سرعت قائم ذرات در راستای محور Y) و همچنین تغییرات فشار ذرات در وضعیت $d/D = 0.4$ (بر اساس جدول ۴ مدل M3) نمایش داده شده است. شایان ذکر است که نتایج حاصل پس از رسیدن جریان به وضعیت تکامل‌یافته ارائه شده و با ادامه روند مدل‌سازی، پارامترهای اصلی ذرات همچون سرعت و فشار تقریباً ثابت و بدون تغییرات قابل توجه بوده است. در شکل (۱۱-a) و (۱۱-b) کانتورهای سرعت برداری سیال در دو جهت اصلی (X : در امتداد طول لوله افقی، Y : در راستای قائم) نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۱۱-c) کانتور تغییرات فشار سیال پیرامون پیگ ثابت نمایش داده شده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص شد که میزان سرعت ذرات سیال در ناحیه روزنه پیگ کنارگذر دارای مقادیر بیشتری نسبت به ناحیه پشت پیگ دارد و ذرات سیال پس از عبور از روزنه با سرعت قابل توجهی به سمت انتهای لوله حرکت می‌کنند. همچنین در جلوی پیگ جریان چرخشی ایجاد شده که در کانتورهای سرعت افقی و سرعت قائم مشخص است. با بررسی کانتور تغییرات فشار ذرات سیال مشخص می‌گردد که در منطقه پشت و جلوی پیگ میزان تغییرات فشار دارای مقادیر قابل توجهی است. همچنین از بررسی نرخ تغییرات سرعت ذرات سیال مشخص می‌گردد که در جلوی پیگ جریان چرخشی ایجاد شده است.

چگالی سیال و همچنین مقادیر سرعت اولیه متفاوت بین مدل پژوهش (SPH) و مدل CFD بوده است.

a) نتایج حاصل از مدل SPH



b) نتایج حاصل از مدل CFD

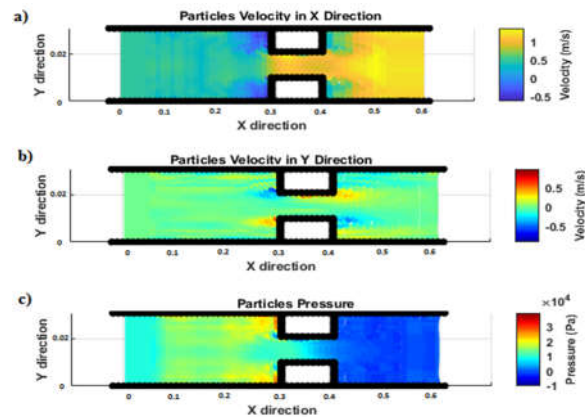


شکل (۱۲): ارزیابی تغییرات میزان نیروی وارد بر پیگ کنارگذر ثابت، (a) نتایج حاصل از مدل SPH، (b) نتایج حاصل از مدل CFD [۵۴]

۳.۳. بهینه‌یابی قطر نسبی پیگ بر اساس الگوریتم GWO

در این بخش به منظور بهینه‌یابی پارامتر قطر نسبی پیگ و ارزیابی نتایج حاصل از بخش ۲.۳، با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری گرگ‌های خاکستری (GWO) مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده است. به طور کلی در یک فرایند بهینه‌یابی بر اساس اهداف مدنظر مسئله (بهینه‌سازی تک‌هدفه یا چندهدفه) نیاز به یک یا چند معادله اصلی بوده که هدف اصلی مدل، بهینه‌یابی (کمینه‌یابی یا بیشینه‌یابی) مقادیر معادله یا معادلات اصلی است. علاوه بر این کرانه تغییرات متغیرهای موجود در معادله اصلی باید تعیین گردد. همچنین با توجه به شرایط موجود قیود حاکم بر مسئله بهینه‌سازی که عمدتاً بر اساس محدودیت‌ها و الزامات طراحی تعیین می‌گردد، به صورت روابطی در مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، هدف اصلی در بهینه‌یابی قطر نسبی پیگ کنارگذر (d/D)، کمینه‌سازی میزان نیروی محرک وارد بر پیگ بوده تا پیگ با سرعت ثابت در خط لوله حرکت نموده و بیشترین بازده از عملیات پیگرانی برآورد گردد. بنابراین معادله اصلی در مدل بهینه‌سازی، میزان نیروی وارد بر پیگ (رابطه ۱) بوده

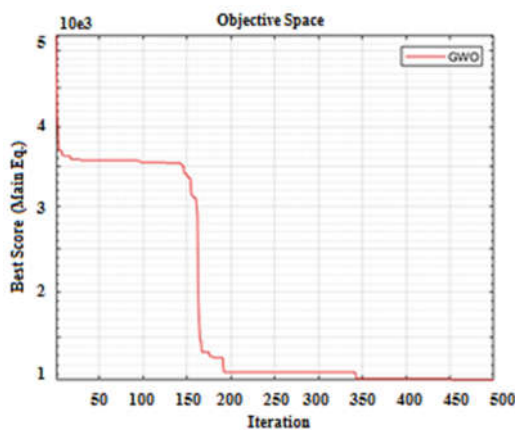


شکل (۱۱): نتایج حاصل از مدل SPH در شرایط پیگ ثابت، (a) سرعت ذرات سیال در راستای محور x، (b) سرعت قائم ذرات سیال، (c) فشار ذرات سیال

در این مدل‌سازی برای ارزیابی تغییرات میزان نیروی محرک نسبت به تغییرات قطر نسبی پیگ کنارگذر، مقادیر نیروی محرک بر اساس رابطه (۱) برای هر شش وضعیت (M1-M6) بر اساس جدول (۴) محاسبه شده و نتایج حاصل از تغییرات نیروی کل وارد بر پیگ کنارگذر برای شش وضعیت مختلف قطر نسبی پیگ در شکل (۱۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل (۱۲) مشخص می‌گردد که میزان برآیند نیروهای وارد بر پیگ با افزایش قطر نسبی پیگ کنارگذر کاهش یافته که دلیل اصلی این رخداد در افزایش قطر روزنه پیگ کنارگذر و به طبع آن کاهش اختلاف فشار در جلو و عقب پیگ بوده است. علاوه بر این با افزایش قطر روزنه پیگ سطح مؤثر بدنه پیگ در برابر جریان کاهش یافته که موجب کاهش میزان نیروی محرک وارد بر پیگ بوده است. با توجه به نتایج حاصل در شکل (۱۲-a) با افزایش قطر نسبی پیگ به $0/6$ میزان برآیند نیروهای وارد بر پیگ به صفر میل می‌نماید و پیگ با سرعت ثابت حرکت می‌کند. در عملیات پیگرانی عملاً دستیابی به حرکت پیگ با سرعت ثابت از ابتدای حرکت پیگ دست‌نیافتنی بوده است؛ بنابراین مقدار بهینه برای قطر نسبی پیگ که هم میزان برآیند نیروهای وارده کمینه باشد و هم شرایط متعادل اجرایی را برآورد نماید، با توجه به نتایج $d/D > 0.4$ بوده است. در شکل (۱۲-a) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برآیند نیروهای وارد بر پیگ از مدل SPH و در شکل (۱۲-b) نتایج حاصل از مدل CFD بر اساس پژوهش [۵۴] ارائه شده است. با مقایسه نتایج حاصل مشخص می‌شود که تغییرات میزان نیروی برآیند وارد بر پیگ در هر دو مدل، دارای روند یکسانی بوده و با افزایش قطر نسبی پیگ کنارگذر میزان نیروی برآیند کاهش یافته است. مقادیر نیروی برآیند محاسبه‌شده در شش شرایط مختلف قطر نسبی پیگ در دو مدل دارای اختلاف‌هایی بوده است که علت اصلی این امر تفاوت در

مقادیر بهینه قطر نسبی پیگ ارائه شده است. شایان ذکر است که برای برقراری قیود و ارضای معادلات ارائه شده تحت قیدهای مسئله بهینه سازی، از تکنیک مجازات (پنالتی) استفاده می گردد، به این صورت که بر اساس مقادیر به دست آمده برای متغیرهای مسئله بهینه سازی در هر اجرای مدل، اگر قیدی نقض گردید یک مقدار نسبتاً بزرگ به جواب نهایی معادله اصلی بهینه سازی اضافه می گردد و بر این اساس جواب هایی که قیدهای مسئله را نقض نموده اند، از مجموعه جواب های مسئله خارج می گردد.

رویه پیاده سازی و الگوریتم GWO در بخش ۳.۳ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس این الگوریتم فراابتکاری در شروع مدل سازی دو پارامتر اصلی تعداد عامل های جست و جو (گرگ ها) و تعداد تکرار جهت همگرایی و دستیابی به بهینه ترین جواب تعیین می گردد. در مدل بهینه سازی توسعه داده شده، تعداد عامل های جست و جو معادل با ۳۰ و تعداد تکرار معادل با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۳) میزان مقادیر حاصل از تابع اصلی مدل بهینه یابی بر اساس تعداد تکرار و روند بهینه یابی ارائه شده است.



شکل (۱۳): روند بهینه یابی در مدل پژوهش

در شکل (۱۳) روند بهینه یابی مدل ارائه شده است. با توجه به نمودار مشخص می شود که مقادیر معادله اصلی از دوره تکرار اول تا ایتريشن ۳۵۰ کاهش یافته و عملاً از ایتريشن ۳۵۰ تا ۵۰۰ مقادیر ثابت گردیده و مقدار کمیته محاسبه شده برای نیروی محرک پیگ بر اساس مدل بهینه یابی معادل با ۹۸۰ نیوتن بوده است. نتایج حاصل نشان داد که مقدار بهینه قطر نسبی پیگ بر اساس مدل بهینه یابی برابر با $d/D = 0.418$ بوده است.

۴.۳. مدل سازی پیگ متحرک

در مدل پیگ متحرک با بهره گیری از الگوریتم حل عددی ارائه شده در روندنمای شکل (۵)، مدل SPH برپاسازی شده است. پارامترهای

است، با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۱.۲ و با در نظر گرفتن روابط (۲ تا ۶) رابطه نیروی وارد بر پیگ که به عنوان معادله اصلی مسئله بهینه سازی مدنظر بوده، به شرح رابطه (۲۹) بازنویسی شده است.

$$F = \frac{1}{2} \rho U_{bp}^2 \times \left(0.5 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{0.75} + \frac{4fL_{pig}}{d} + \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^2 \right) \times A_{pig} \quad (29)$$

با توجه به رابطه (۴) و جای گذاری مقادیر در رابطه (۲۹)، معادله اصلی بهینه سازی به شرح رابطه (۳۰) فرمول بندی می گردد.

$$\min f: F = \frac{1}{2} \rho U_{bp}^2 \times \left(0.5 \left(1 - \frac{\frac{1}{4}\pi d^2}{\frac{1}{4}\pi D^2} \right)^{0.75} + \frac{4(U_{bp}d/v)L_{pig}}{d} + \left(1 - \frac{\frac{1}{4}\pi d^2}{\frac{1}{4}\pi D^2} \right)^2 \right) \times \left(\frac{1}{4}\pi D^2 \right) \quad (30)$$

در رابطه (۳۰) پارامتر d (قطر روزنه پیگ) به عنوان متغیر اصلی بهینه یابی و پارامتر U_{bp} سرعت جریان در روزنه بوده که بر اساس قطر روزنه، مقادیر بیشینه و کمیته آن تعیین می گردد. دیگر پارامترهای موجود در این رابطه همچون قطر لوله، طول پیگ، چگالی سیال و... بر اساس نوع مسئله به عنوان ثابت در نظر گرفته شده است. کرانه تغییرات پارامتر قطر روزنه پیگ (d) با توجه به مدل بررسی شده در بخش ۲.۳ فضای پیوسته بین $[0.5, 2.2]$ سانتی متر در نظر گرفته شده است. قیدهای اصلی مسئله بهینه سازی شامل دو قید اصلی بر اساس میزان نیروی کل و سرعت بیشینه بوده که به شرح روابط (۳۱) و (۳۲) فرمول بندی شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل مشخص شد که از نقطه نظر اجرایی عملاً دستیابی به نیروی صفر در اجرا و پیاده سازی عملیات پیگرانی فرض محال بوده است؛ از طرفی میزان نیروی محرک بیشینه باید کمتر مساوی میزان نیروی مقاوم (نیروی اصطکاک F_{fric}) که بر اساس ضریب اصطکاک محاسبه می گردد، باشد؛ بنابراین قید اول عبارت است از:

$$G1: 0 < F \leq F_{fric} \quad (31)$$

با توجه به پژوهش های انجام شده، سرعت حرکت پیگ و به طبع آن سرعت جریان در روزنه پیگ دارای محدودیت مقادیر بیشینه بوده که بر اساس رابطه (۶)، قید دوم مسئله بهینه سازی به شرح رابطه (۳۲) فرمول بندی شده است.

$$G2: U_{pig} \leq U - \frac{d^2}{D^2} \sqrt{\frac{F_{fric}}{K \frac{\pi}{8} \rho D^2}} \quad (32)$$

بر اساس معادله اصلی، کرانه تغییرات متغیرهای معادله اصلی و قیدهای مسئله بهینه سازی، مدل بهینه یابی قطر نسبی پیگ ایجاد گردیده و با بهره گیری از الگوریتم فراابتکاری GWO مدل در بستر نرم افزار MATLAB کدنویسی شده و پس از اجرای مدل

در شکل (۱۵) نتایج حاصل از مدل‌سازی پیگ متحرک بر اساس نمودارهای میزان نیروی کل وارد بر پیگ، شتاب و سرعت پیگ در گام‌های زمانی مختلف نمایش داده شده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که با پیشروی زمان حل مدل، پیگ در راستای حرکت جریان جابه‌جا شده است، به گونه‌ای که در گام زمانی ۰/۱ ثانیه مرکز پیگ در موقعیت ۰/۱۵ و در گام زمانی ۰/۹ ثانیه موقعیت مرکز پیگ در ۰/۴۵۲ از ابتدای لوله بوده است. همچنین میزان سرعت پیگ در حین جابه‌جایی و افزایش زمان حل افزایش یافته و حرکت پیگ که در ابتدا به صورت شتاب‌دار بوده، در انتهای گام زمانی حل با سرعت ثابت جابه‌جا شده است. با توجه به کانتورهای سرعت نمایش داده‌شده در شکل (۱۴) مشخص می‌گردد که در جلوی پیگ جریان چرخشی با گردابه‌هایی با ابعاد متفاوت پدیدار شده است. همچنین طول منطقه جریان چرخشی با توجه به موقعیت پیگ و بر اساس خصوصیات و شرایط جریان در بالادست تغییر نموده است.

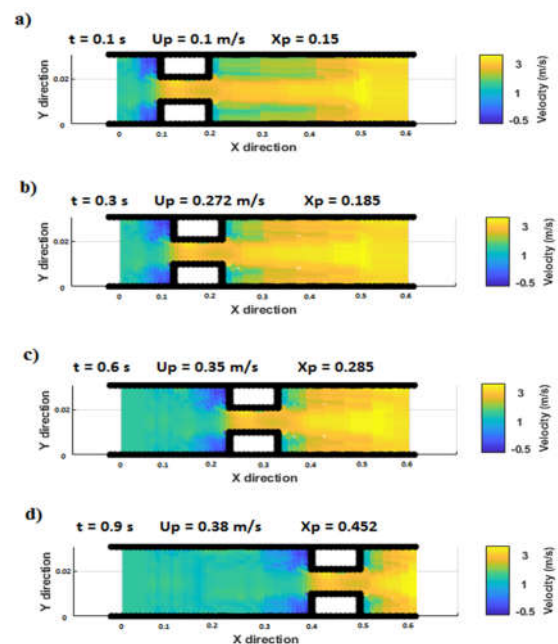
در شکل (۱۵-a) برایند نیروهای وارد بر پیگ بر اساس گام‌های زمانی حل ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که میزان برایند نیروهای وارد بر پیگ با گذشت زمان مدل‌سازی روند کاهشی داشته و تقریباً از گام زمانی $t=0.8s$ به بعد برایند نیروهای وارد بر پیگ نزدیک به صفر بوده است. همچنین شتاب پیگ در شروع مدل‌سازی دارای مقادیر بیشینه و با پیشروی روند حل مدل، کاهش یافته تا در نهایت به مقدار صفر رسیده است (شکل ۱۵-b). بنابراین جابه‌جایی پیگ در شروع مدل‌سازی شتاب‌دار بوده و با افزایش زمان مدل‌سازی به حرکت با سرعت ثابت تبدیل گردیده است. در نمودار شکل (۱۵-c) سرعت حرکت پیگ بر اساس زمان مدل‌سازی ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که سرعت پیگ در شروع مدل‌سازی دارای مقدار صفر بوده و تقریباً تا زمان $t=0.75s$ روند تغییرات سرعت پیگ بیانگر حرکت شتاب‌دار و از زمان $t=0.75s$ تا انتهای مدل‌سازی $t=1s$ حرکت پیگ با سرعت ثابت بوده است. با توجه به مطالعات انجام‌شده روند تغییرات برایند نیروهای وارد بر پیگ و به طبع آن شتاب پیگ در عملیات پیگرانی با پیگ‌های کنارگذر دارای روندی منطبق با نتایج به‌دست‌آمده از مدل SPH بوده است. علاوه بر نتایج ارائه‌شده و بحث و بررسی درخصوص پارامترهای محاسبه‌شده از مدل SPH، برای ارزیابی عملکرد مدل پیگ متحرک در لوله، با تمرکز بر الگوی تغییرات جریان سیال، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل SPH و مدل CFD بر اساس

هندسی و هیدرولیکی مدل و همچنین شرایط اولیه مدل‌سازی بر اساس جدول (۳) پیاده‌سازی گردیده است. مدل پیگ متحرک بر اساس شرایط قطر نسبی پیگ ($d/D = 0.4$) که دارای مقادیر بهینه در عملیات پیگرانی بر اساس نتایج بخش قبل (۳.۳) بوده، انتخاب شده است. در مدل SPH پیگ متحرک، پارامترها و متغیرهای اصلی حل عددی بر اساس جدول (۵) تعریف شده است.

جدول (۵): پارامترها و متغیرهای حل عددی در مدل پیگ متحرک

| فاصله بین ذرات (Δx) | گام زمانی حل (Δt) | شعاع هموارسازی (h) | زمان مدل‌سازی (T) | ضریب اصطکاک (μ_{fric}) | قطر نسبی (d/D) |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------|
| mm ۰/۱ | ۰/۰۰۰۰۰۱ | $1/4 \Delta x$ | ۱ s | ۰/۲۵ | ۰/۴ |

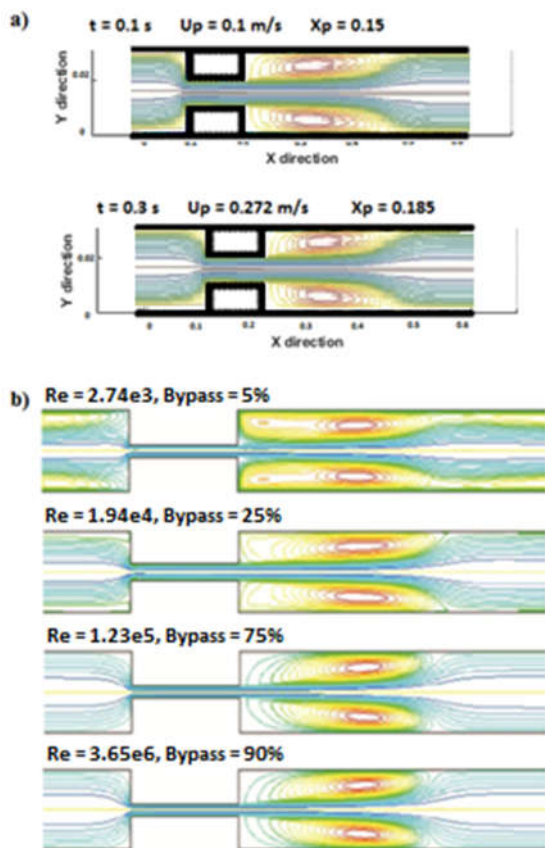
با توجه به توضیحات ارائه‌شده و بر اساس شرایط مدل‌سازی و همچنین تعیین پارامترهای حل عددی (جدول ۵) مدل اجرا گردیده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در گام‌های مختلف زمانی استخراج شده است. یکی از اصلی‌ترین نتایج حاصل از مدل‌سازی پیگ متحرک در لوله، میزان تغییرات نیروی کل وارد بر پیگ بوده که به صورت مستقیم بر جابه‌جایی پیگ مؤثر بوده است. همچنین میزان تغییرات شتاب و سرعت پیگ در هر گام زمانی حائز اهمیت است. در شکل (۱۴) نتایج حاصل از مدل‌سازی پیگ متحرک بر اساس سرعت پیگ، موقعیت پیگ و کانتور سرعت سیال در گام‌های زمانی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ ثانیه ارائه شده است.



شکل (۱۴): نتایج حاصل از مدل‌سازی پیگ متحرک بر اساس گام زمانی، سرعت پیگ، موقعیت پیگ و سرعت سیال

این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و به‌عنوان یک نیاز پژوهشی قلمداد می‌گردد. بر این اساس در این پژوهش برای نخستین بار، مدلی برای شبیه‌سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر با بهره‌گیری از روش هیدرودینامیک ذرات هموار SPH ارائه شده است.

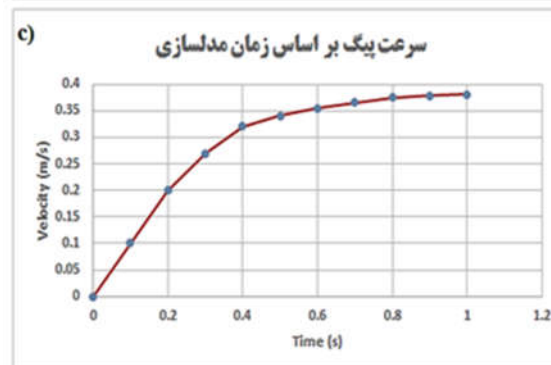
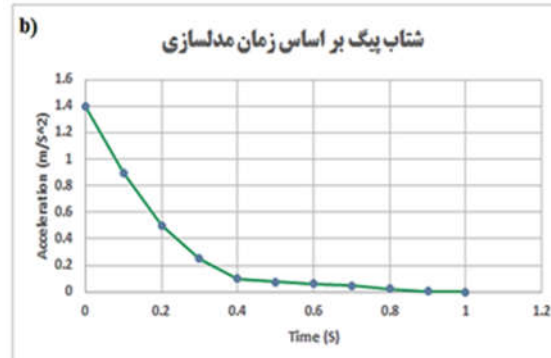
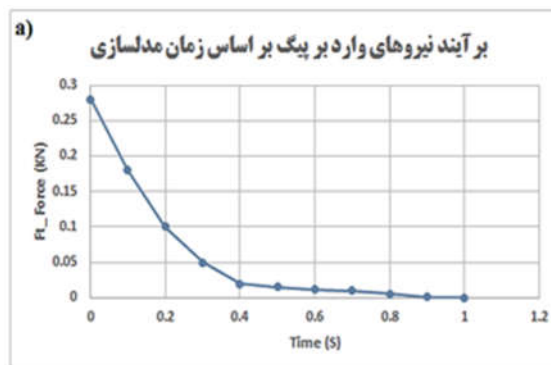
پژوهش [۲۷]، ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۵) و ارزیابی الگوهای جریان پیرامون پیگ مشخص می‌گردد که مدل SPH دارای عملکرد قابل قبولی برای شبیه‌سازی حرکت پیگ در لوله بوده و بحث آشفتگی جریان پیرامون پیگ کنارگذر که یکی از اصلی‌ترین چالش‌های مدل‌سازی حرکت پیگ در لوله است، به‌خوبی در مدل SPH شبیه‌سازی شده است.



شکل (۱۵): مقایسه تغییرات الگوی جریان در مدل‌سازی پیگ متحرک، (a) نتایج حاصل از مدل SPH، (b) نتایج حاصل از مدل CFD [۲۷]

در این مدل با استفاده از رویکرد WCSPH و بهره‌گیری از روش $k-\epsilon$ استاندارد برای حل جمله آشفتگی در معادله بقای مومنتوم، الگوریتمی برای مدل‌سازی عددی دینامیک پیگ بر پایه روش SPH ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی با محاسبه برآیند نیروهای وارد بر پیگ، نوع حرکت پیگ (شتاب‌دار-سرعت ثابت)، میزان سرعت و درنهایت میزان جابه‌جایی پیگ محاسبه می‌شود. در این پژوهش مدل‌سازی تحت دو شرایط (پیگ ساکن و پیگ متحرک) انجام شده و نتایج حاصل از مدل SPH با نتایج مدل‌های عددی مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این پژوهش ابتدا عملکرد مدل SPH توسعه داده شده برای شبیه‌سازی جریان آشفته سیال در لوله مورد ارزیابی قرار گرفته است، در این بخش با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی یک نمونه



شکل (۱۰): نتایج مدل‌سازی پیگ متحرک بر اساس زمان شبیه‌سازی، (a) برآیند نیروهای وارد بر پیگ، (b) شتاب پیگ، (c) سرعت پیگ

۴. جمع‌بندی

با توجه به اهمیت عملیات پیگ‌رانی در خط لوله برای مقاصدی همچون نظارت-تمیزکاری که منجر به افزایش عمر مفید شبکه انتقال و مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی (کاهش بیش از ۵۰٪ انرژی در خط لوله آب-فاضلاب، کاهش بیش از ۹۰٪ انرژی در شبکه انتقال نفت-گاز) می‌گردد، ارائه مدل‌های مطالعاتی دقیق در

0.418 بوده است. در نهایت بر اساس الگوریتم عددی ارائه شده بر پایه روش SPH، جریان سیال پیرامون پیگ متحرک مدل‌سازی گردیده و نتایج مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. با بررسی نتایج حاصل از این پژوهش و مقایسات انجام شده بین خروجی‌های مدل SPH با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مشخص می‌گردد که مدل ارائه شده دارای دقت قابل قبول در مدل‌سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر تحت هر دو شرایط شبیه‌سازی پیگ ساکن و همچنین پیگ متحرک در لوله بوده است. علاوه بر این، مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان یک مدل مرجع برای مدل‌سازی جریان پیرامون پیگ کنارگذر بر پایه روش SPH برای ارزیابی و انجام مطالعات عملیات پیگ‌رانی در خط لوله به هدف مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی به کارگیری شود.

آزمایشگاهی عملکرد مدل پژوهش، ارزیابی و اعتبارسنجی گردیده است؛ نتایج حاصل نشان داد که میزان میانگین خطای مدل SPH توسعه داده شده نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی کمتر از ۵٪ بوده که بیانگر دقت بالا و عملکرد قابل قبول مدل پژوهش بوده است. پس از اعتبارسنجی عملکرد مدل پژوهش، شبیه‌سازی جریان پیرامون پیگ ساکن مدل‌سازی شده و نتایج حاصل با نتایج عددی موجود مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این در این بخش با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری گرگ‌های خاکستری (GWO) مطالعاتی بر پارامتر قطر نسبی پیگ کنارگذر برای دستیابی به مقادیر بهینه این پارامتر که منجر به بهینه‌سازی عملیات پیگ‌رانی در خط لوله می‌گردد، پیاده‌سازی شده است، نتایج حاصل از مدل بهینه‌یابی نشان داد که میزان قطر نسبی پیگ کنارگذر برابر با $d/D =$

مراجع

- [1] Wu, H. L., Van Spronsen, G., "Slug reduction with high by-pass pigs—a mature technology", in 12th International Conference on Multiphase Production Technology. 2005: OnePetro.
- [2] Ly, K. T., Blumer, D. J., Bohon, W. M., Chan, A., "Novel chemical dispersant for removal of Organic/Inorganic schmoos in produced water injection systems", in CORROSION 98. 1998: OnePetro.
- [3] Exhibit, O. C. D., "Reducing Methane Emissions: Best Practice Guide", 2019.
- [4] Tao, Y., Chuanxian, L., Lijun, L., Hongjun, C., Peng, G., Wanyu, Z., Wenping, D., "Research on Closed-Loop Safety Production System of Hot Oil Pipeline Based on Big Data Mining", In ASME Asia Pacific Pipeline Conference, 2019, Vol. 58912: American Society of Mechanical Engineers, p. V001T11A001, <https://doi.org/10.1115/appc2019-7609>.
- [5] Hendrix, M. H. W., Liang, X., Breugem, W. P., Henkes, R. A. W. M., "Characterization of the pressure loss coefficient using a building block approach with application to by-pass pigs", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 150, pp. 13-21, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.11.009>.
- [6] Money, N., Cockfield, D., Mayo, S., Smith, G., "Dynamic speed control in high velocity pipelines", Pipeline Gas J, Vol. 239, No. 8, pp. 30-38, 2012.
- [7] Ayala, L. F., Adewumi, M. A., "Low-liquid loading multiphase flow in natural gas pipelines", J. Energy Resour. Technol., Vol. 125, No. 4, pp. 284-293, 2003, <https://doi.org/10.1115/1.1616584>.
- [8] Davoudi, M., Heidari, Y., Mansoori, S. A. A., "Field experience and evaluation of the South Pars sea line pigging, based on dynamic simulations", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 18, pp. 210-218, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.02.013>.
- [9] Jamshidi, B., Sarkari, M., "Simulation of pigging dynamics in gas-liquid two-phase flow pipelines", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 32, pp. 407-414, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.018>.
- [10] Li, Q., Duan, M., Gao, Q., "Severe slugging in deepwater risers: A coupled numerical technique for design optimisation", Ocean Engineering, Vol. 152, pp. 234-248, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.070>.
- [11] Xu, X. X., Gong, J., "Pigging simulation for horizontal gas-condensate pipelines with low-liquid loading", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 48, No. 3-4, pp. 272-280, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.06.005>.
- [12] Zhu, H., Gao, Y., Zhao, H., "Experimental investigation on the flow-induced vibration of a free-hanging flexible riser by internal unstable hydrodynamic slug flow", Vol. 164, pp. 488-507, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.071>.
- [13] Groote, G. A., van de Camp, P. B., Veenstra, P., Broze, G., Henkes, R. A., "By-pass pigging without or with speed control for gas-condensate pipelines", in Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2015: OnePetro, <https://doi.org/10.2118/177819-ms>.
- [14] Olaniyan, Y., & Larrey, D., "Bypass pig modeling-

- A three phase gas condensate pipeline field case*", in 9th North American Conference on Multiphase Technology, 2014: OnePetro.
- [15] Van Spronsen, G., Entaban, A., Mohamad Amin, K., Sarkar, S., Henkes, R. A. W. M., "Field experience with by-pass pigging to mitigate liquid surge", in 16th International Conference on Multiphase Production Technology, 2013: OnePetro.
- [16] Mirshamsi, M., & Rafeeyan, M., "Speed control of pipeline pig using the QFT method", Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, Vol. 67, No. 4, pp. 693-701, 2012, <https://doi.org/10.2516/ogst/2012008>.
- [17] Nguyen, T. T., Kim, S. B., Yoo, H. R., Rho, Y. W., "Modeling and simulation for pig with bypass flow control in natural gas pipeline", KSME International Journal, Vol. 15, No. 9, pp. 1302-1310, 2001, <https://doi.org/10.1007/bf03185671>.
- [18] Nguyen, T. T., Yoo, H. R., Rho, Y. W., & Kim, S. B., "Speed control of PIG using bypass flow in natural gas pipeline", in ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570), 2001, Vol. 2: IEEE, pp. 863-868, <https://doi.org/10.1109/isie.2001.931581>.
- [19] Zhu, X., Zhang, S., Tan, G., Wang, D., & Wang, W., "Experimental study on dynamics of rotatable bypass-valve in speed control pig in gas pipeline", Measurement, Vol. 47, pp. 686-692, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.060>.
- [20] Entaban, A., Ismail, A., Jambari, M., Ting, P., Amin, K. M., Ping, Zou, S., van Spronsen, G., "By-Pass pigging-a'simple'technology with significant business impact", in International Petroleum Technology Conference, 2013: OnePetro, <https://doi.org/10.2523/iptc-16905-ms>.
- [21] Lee, H. S., Agustian, D., Jati, K. I., Aulia, M., Thomas, S. A., Appleyard, S. P., "Bypass pigging operation experience and flow assurance study", in Offshore Technology Conference. 2012: OnePetro, <https://doi.org/10.4043/23044-ms>.
- [22] Park, S., Kim, M., Nydal, O. J., Lee, I. B., "Mitigation of pig-induced slugs by combination of by-pass pig and inlet separator dual control valves", in Offshore Technology Conference Asia. 2016: OnePetro, <https://doi.org/10.4043/26550-ms>.
- [23] Van Spronsen, G., Entaban, A., Mohamad Amin, K., Sarkar, S., Henkes, R. A. W. M., "Field experience with by-pass pigging to mitigate liquid surge", in 16th International Conference on Multiphase Production Technology, 2013: OnePetro.
- [24] Chen, J., Luo, X., Zhang, H., He, L., Chen, J., Shi, K., "Experimental study on movement characteristics of bypass pig", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 59, pp. 212-223, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.08.023>.
- [25] Chen, J., He, L., Luo, X., Zhang, H., Li, X., Liu, H., He, S., Lu, L., "Characterization of bypass pig velocity in gas pipeline: An experimental and analytical study", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 73, p. 103059, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103059>.
- [26] Azpiroz, J. E., Hendrix, M. H. W., Breugem, W. P., Henkes, R. A. W. M., "CFD modelling of bypass pigs with a deflector disk", in 17th International Conference on Multiphase Production Technology, 2015: OnePetro.
- [27] Singh, A., Henkes, R. A. W. M., "CFD modeling of the flow around a by-pass pig", in 8th North American conference on multiphase technology, 2012: OnePetro.
- [28] Hendrix, M. H. W., IJsseldijk, H. P., Breugem, W. P., Henkes, R. A. W. M., "Experiments and modeling of by-pass pigging under low-pressure conditions", Journal of Process Control, Vol. 71, pp. 1-13, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.08.010>.
- [29] Salazar, A. O., Araujo, V. G., Lima, G. F., Freitas, V. C., "Study and speed control of a Pipeline Inspection Gauge (PIG)", in 2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2021: IEEE, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/intercon52678.2021.9532931>.
- [30] Naeini, H. S., Soorgee, M. H., "Experimental investigation on sphere pig movement in multiple thickness pipe", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 95, p. 104152, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104152>.
- [31] Li, X., He, L., Luo, X., Liu, H., He, S., Li, Q., "Numerical simulation and experimental study of bypass pigging slippage", Ocean Engineering, Vol. 230, p. 109023, 2021, <https://doi.org/j.oceaneng.2021.109023>.
- [32] Chen, J., Luo, X., He, L., Liu, H., Lu, L., Lü, Y., Yang, D., "An improved solution to flow assurance in natural gas pipeline enabled by a novel self-regulated bypass pig prototype: An experimental and numerical study", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 107, p. 104776, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104776>.
- [33] Liu, Y., Zhu, X., Song, J., Wu, H., Zhang, S., Zhang, S., "Research on bypass pigging in offshore riser system to mitigate severe slugging", Ocean Engineering. Vol. 246, p. 110606, 2022,

- <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110606>.
- [34] Yao, B., He, Z., Lu, N., Zhang, S., "A novel PIG and an intelligent pigging scheme based on Deep-learning technology", International Journal of Pressure Vessels and Piping. Vol. 200, p. 104803, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104803>.
- [35] Kim, S., Yoo, K., Koo, B., Kim, D., Yoo, H., Seo, Y., "Speed excursion simulation of PIG using improved friction models", Journal of Natural Gas Science and Engineering. Vol. 97, p. 104371, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104371>.
- [36] Monaghan, J. J., "Smoothed particle hydrodynamics", Annual review of astronomy and astrophysics, Vol. 30, pp. 543-574, 1992, <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.30.090192.002551>.
- [37] Monaghan, J. J., "Smoothed particle hydrodynamics and its diverse applications", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 44, pp. 323-346, 2012, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101220>.
- [38] Liu, M. B., Liu, G., "Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments", Archives of computational methods in engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 25-76, 2010, <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9040-7>.
- [39] Hou, Q., Kruisbrink, A. C. H., Pearce, F. R., Tijsseling, A. S., Yue, T., "Smoothed particle hydrodynamics simulations of flow separation at bends", Computers & Fluids, Vol. 90, pp. 138-146, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.019>.
- [40] Alvarado-Rodríguez, C. E., Sigalotti, L. D., Klapp, J., Fierro-Santillán, C. R., Aragón, F., Uribe-Ramírez, A. R., "Smoothed Particle Hydrodynamics Simulations of Turbulent Flow in Curved Pipes With Different Geometries: A Comparison With Experiments", Journal of Fluids Engineering, Vol. 143, No. 9, 2021, <https://doi.org/10.1115/1.4050514>.
- [41] Alvarado-Rodríguez, C. E., Klapp, J., Sigalotti, L. D. G., Domínguez, J. M., de la Cruz Sánchez, E., "Nonreflecting outlet boundary conditions for incompressible flows using SPH", Computers & Fluids, Vol. 159, pp. 177-188, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.09.020>.
- [42] Rosić, N. M., Kolarević, M. B., Savić, L. M., Đorđević, D. M., Kapor, R. S., "Numerical modelling of supercritical flow in circular conduit bends using SPH method", Journal of Hydrodynamics, Vol. 29, No. 2, pp. 344-352, 2017, [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(16\)60744-8](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(16)60744-8).
- [43] Sigalotti, L. D., Alvarado-Rodríguez, C. E., Klapp, J., Cela, J. M., "Smoothed particle hydrodynamics simulations of water flow in a 90 pipe bend", Water, Vol. 13, No. 8, p. 1081, 2021, <https://doi.org/10.3390/w13081081>.
- [44] De Padova, D., Mossa, M., Sibilla, S., "SPH modelling of hydraulic jump oscillations at an abrupt drop", Water, Vol. 9, No. 10, p. 790, 2017, <https://doi.org/10.3390/w9100790>.
- [45] Idelchik, I. E., "Handbook of hydraulic resistance", in Fuel and Energy Abstracts, 1995, Vol. 4, No. 36, p. 302, [https://doi.org/10.1016/0140-6701\(95\)95890-h](https://doi.org/10.1016/0140-6701(95)95890-h).
- [46] Churchill, S. W., "Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes", 1977.
- [47] Violeau, D., Issa, R., "Numerical modelling of complex turbulent free-surface flows with the SPH method: an overview", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 53, No. 2, pp. 277-304, 2007, <https://doi.org/10.1002/flid.1292>.
- [48] Wendland, H., "Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree", Advances in computational Mathematics, Vol. 4, No. 1, pp. 389-396, 1995, <https://doi.org/10.1007/bf02123482>.
- [49] Dehnen, W., Aly, H., "Improving convergence in smoothed particle hydrodynamics simulations without pairing instability", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 425, No. 2, pp. 1068-1082, 2012, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21439.x>.
- [50] Vacondio, R., Rogers, B. D., Stansby, P. K., Mignosa, P., Feldman, J. "Variable resolution for SPH: a dynamic particle coalescing and splitting scheme", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 256, pp. 132-148, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.12.014>.
- [51] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A., "Grey wolf optimizer", Advances in engineering software, Vol. 69, pp. 46-61, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [52] Emmanuel, D. A., Joseph, S., Oyewola, D., Fadele, A. A., Chiroma, H., "Application of grey wolf optimization algorithm: recent trends, issues, and possible horizons", Gazi University Journal of Science, Vol. 35, No. 2, pp. 485-504, 2021, <https://doi.org/10.35378/gujs.820885>.
- [53] Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T. A., Baker, R. S., "Turbulent flow past a surface-mounted two-dimensional rib", (1994), <https://doi.org/10.1115/1.2910261>.
- [54] Ramírez, R., Dutra, M., "Evaluating drag force and geometric optimisation of pipeline inspection gadget (PIG) body with bypass", Ingeniería e Investigación, Vol. 31, No. 2, pp. 152-159, 2011, <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v31n2.23474>.