

Research Paper

Numerical Investigation of the Erodible Bed Changes Around the Submerged Pipeline affected by the Protective PlateShahab Nayyer¹, Khosrow Hosseini^{2*}, Mehran Kheirkhahan³, Sayed-Farhad Mousavi⁴¹ MSc graduated, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran¹ Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran¹ Ph.D., Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran⁴ Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University[10.22125/IWE.2022.357887.1664](https://doi.org/10.22125/IWE.2022.357887.1664)

Received:
September 29, 2022
Accepted:
December 29, 2022
Available online:
October 3, 2023

Keywords:
Transfer Pipeline,
Scouring,
Sedimentation,
Protective Plate, Flow-
3D.

Abstract

Scouring at the place of submerged pipelines under the effect of eddy currents around the pipe passing through the riverbed leads to the settlement and failure of the pipeline as well as the penetration of the fluid passing through the pipe into the stream. Therefore, efforts to reduce these risks and their effects are always the attention of researchers and engineers. In the current research, scouring and sedimentation around the pipe and its surrounding bed under the effect of a protective plate at different positions and heights have been investigated and analyzed using Flow-3D. Comparison of the simulation results of the present research with the laboratory results showed that the used numerical model with the statistical index $R^2=0.96$ has an acceptable ability in simulating the mentioned phenomenon. Also, the results showed that by installing a plate with a height of $H=1.25D$ (D is the diameter of the pipe) and at a distance of $0.5D$ downstream of the pipe, the scouring depth under the pipe decreases by 60% and also the average level of the bed in the upstream area increases by 82%, which is the most optimal state among different downstream positions. The optimal state of the plate in the upstream corresponds to the height of $H=0.75D$ and at a distance of $1.5D$, which not create scouring, and the average level of the bed between the pipe and the plate in the upstream has increased 4.9 times compared to the state without the plate.

* **Corresponding Author:** Khosrow Hosseini

Address: Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran

Email: khoseini@semnan.ac.ir
Tel: 02331535205

Introduction

The interaction between the erodible bed and the passing pipelines under different conditions of flow and waves will cause the scouring phenomenon to form at the place of the pipe passage. The experiments conducted by (Sumer and Fredsoe, 1991) and (Sumer et al. 2001) showed that the flow leaked to the bed under the pipeline is incremental. As a result, the seepage resulting from the pressure difference between the downstream and upstream of the pipeline is the main factor at the beginning of the scouring phenomenon. Below are the pipelines crossing the river bed and the sea. Other researchers such as (Li and Cheng, 1999, 2001) and (Brors, 1999) searched for the flow and erosion created around pipelines in the form of numerical modeling.

In this research, an attempt was made to use vertical plates upstream and downstream of the submerged pipeline crossing the river and channel, despite the reduction of the inflow to the bed and the reduction of the depth of erosion, in order to trap the sediment around pipeline burial phenomenon.

Materials and Methods

Flow-3D numerical model is one of the powerful models in the field of computational fluid dynamics, which is developed and supported by Flow science, Inc. In order to validate the performance and results of the Flow-3D numerical model, to ensure the accuracy of its results, the model and laboratory results (Sumer et al. 1988) were used. Therefore, in the current research, based on the verification done in comparison with the results of the laboratory model (Sumer et al. 1988), the effect of the presence of the protective plate in the upstream and downstream of the pipe passing through the flow section in order to reduce scour and also increase the conditions of self-burial in the position 0.5D, 1D, 1.5D upstream and downstream of the pipe and also in the position of the plate attached to the pipe and for different heights of 0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D and 1.25D, Flow-3D software is used and compared to the present optimal conditions are applied. The usual turbulence model such as LES, RNG and K- ϵ were used for detecting best model for the main simulations. The comparison of the numerical modeling results with the laboratory values (Sumer et al., 1988) in order to check the validity and determine the error value of the numerical model, which is the result of 1000 seconds of simulating the phenomenon under investigation, is presented in Table (4) and Figure (4).

Results

The Flow-3D numerical model provides acceptable simulation results for the limit values of scour and sedimentation, it is also accurate in simulating the geometry of the scour hole.

Figure (7) shows the conditions of the erodible bed for the plate with a distance of 0.5D in the downstream. As can be seen, with the increase in the height of the plate, the values of the maximum scour depth under the pipe also decreased, and this decrease for the heights of H equal to 0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D and 1.25D is 25, 32, 32, 40 and 60%, respectively.

In figure (8), it is clear that for heights H equal to 0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D and 1.25D, the average level of the bed between the pipe and the upstream plate is 1.3, 3.9, 4.9, 3.1 and 3.4 times increased, which indicates a decrease in erosion. In the cases of height H equal to 1D and 1.25D, sedimentation in the upstream and downstream is less compared to the cases of 0.5D and 0.75D, which can be due to the vortex obtained between the pipe and the plate.

Discussion and Conclusion

- According to the goal of reducing scour depth under the pipe and increasing sedimentation, the plate with a height of $H=1.25D$ and at a distance of 0.5D in the downstream has the best performance among the downstream plates. Also, the plate with a height of $H=0.75D$ and a distance of 1.5D upstream has the best performance among the upstream plates.

- By the increasing in the height of the plate (H) in the downstream with distance of 0.5D, the maximum scour depth under the pipe is also reduced. This reduction is 25, 32, 32, 40 and 60% for the heights of H equal to 0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D and 1.25D, respectively.

- For H heights equal to 0.25D, 0.5D, 0.75D, 1D and 1.25D, the average level of the bed between the pipe and the upstream plate with distance of 1.5D increased by 1.3, 3.9, 4.9, 3.1 and 3.4 times, respectively, which indicates the reduction of erosion around the pipe in the presence of the protective plate.

Six important references

- 1) . Sumer, B.M., H.R. Jensen, Y. Mao and J. Fredsøe. 1988. Effect of lee-wake on scour below pipelines in current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 114(5): 599-614.
 - 2.) Sumer, B.M. and J. Fredsoe. 1991. Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 116(3): 307-323.
 - 3). Sumer, B.M. and J. Fredsoe. 2002. Time scale of scour around a large vertical cylinder in waves. In *The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
 - 4). Sumer, B.M., C. Truelsen, T. Sichmann, J. Fredsøe. 2001. Onset of scour below pipelines and self-burial. *Journal of Coastal Engineering*, 42 (4): 213–235.
 - 5). Nayyer, S., S. Farzin, H. Karami and M. Rostami. 2019. A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(6): 1-11.
 - 6). Flow Science Inc. 2008. *FLOW-3D User's Manual*. 9.3 ed. Los Alamos, NM: Flow Science Inc
-

بررسی عددی تغییرات بستر فرسایش‌پذیر اطراف خط لوله مستغرق تحت اثر صفحه محافظ

شهاب نیر^۱، خسرو حسینی^{۲*}، مهران خیرخواهان^۳، سید فرهاد موسوی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

آبشستگی در محل خطوط لوله مستغرق تحت اثر جریان‌های گردابی اطراف لوله عبوری از بستر رودخانه منجر به نشست و شکست خط لوله و همچنین نفوذ سیال عبوری از لوله به جریان می‌شود. لذا تلاش در راستای کاهش این مخاطرات و اثر آن‌ها، همواره مورد توجه محققان و مهندسين است. در تحقیق حاضر آبشستگی و رسوب‌گذاری اطراف لوله و بستر پیرامون آن تحت اثر یک صفحه محافظ در موقعیت و ارتفاع‌های مختلف با به‌کارگیری مدل عددی Flow-3D مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی مورد استفاده با شاخص آماری $R^2 = 0/96$ توانایی قابل قبولی را در شبیه‌سازی پدیده مذکور داراست. همچنین نتایج نشان داد که با نصب یک صفحه با ارتفاع $H=1.25D$ (D قطر لوله) و در فاصله $0.5D$ پایین‌دست لوله، عمق آبشستگی زیر لوله تا ۶۰ درصد کاهش و همچنین متوسط تراز بستر در محدوده بالادست ۸۲ درصد افزایش می‌یابد، که بهینه‌ترین حالت بین جایگاه‌های مختلف پایین‌دست است. حالت بهینه صفحه در بالادست مربوط به ارتفاع $H=0.75D$ و در فاصله $1.5D$ می‌باشد که علاوه بر عدم ایجاد آبشستگی، متوسط تراز بستر بین لوله و صفحه در بالادست $4/9$ برابر نسبت به حالت بدون صفحه افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: لوله انتقال، آبشستگی، رسوب‌گذاری، صفحه محافظ، Flow-3D.

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
sh.nayyer@semnan.ac.ir

^۲ * نویسنده مسئول و دانشیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
kh Hoseini@semnan.ac.ir

^۳ دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
mehran.kheirkhahan@semnan.ac.ir

^۴ استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
fmousavi@semnan.ac.ir

مقدمه

پیرامون سازه‌های طولی و عرضی در رودخانه و مسیل بر اثر اندرکنش جریان آب و رسوب بستر، پدیده آبشستگی ایجاد می‌شود. این پدیده می‌تواند پایداری سازه‌های مجاور خود را تهدید کند و نهایتاً موجب ناپایداری و تخریب آن‌ها گردد. مطالعات در خصوص اثرات پدیده آبشستگی اهمیت بسزایی دارد زیرا که گاهی ممکن است ناپایداری و تخریب سازه‌های زیربنایی منجر به حوادث جبران‌ناپذیری شود (Nayyer et al. 2019).

توسعه‌ی سریع تجارت و شرایط حاکم بر اقتصاد سبب شده تا همواره در راستای کاهش هزینه‌های جابجایی و حمل و نقل گام برداشته شود. به طور مثال در میدان‌های نفتی جهت جابجایی نفت خام از خطوط لوله‌ی انتقالی از دریا به پالایشگاه ساحلی بهره‌گرفته می‌شود که همگام با تجاری‌سازی و کاهش هزینه‌های بلند مدت است. از طرفی اندرکنش بین بستر فرسایش‌پذیر و خطوط لوله عبوری تحت شرایط مختلف جریان و امواج باعث شکل‌گیری پدیده آبشستگی در محل عبور لوله خواهد شد. وقوع آبشستگی در محل عبور لوله سبب می‌شود تا قسمت‌هایی از لوله و یا کل طول عبوری آن از دریا و یا رودخانه در آب معلق گردد، به نحوی که حفره آبشستگی ایجاد شده در زیر لوله به حد کافی بزرگ و عمیق باشد، ممکن است تحت اثر نوسانات ناشی از عبور جریان دچار گسیختگی و شکست شود. لذا برآورد دقیقی از عمق و طول حفره آبشستگی در محل لوله عبوری و پیش‌بینی راهکاری در راستای کاهش و یا توقف این فرسایش از اهمیت زیادی برخوردار است.

شروع فرسایش در زیر لوله‌ها با نشستن جریان به بستر و ایجاد تفاوت فشار در بالادست و پایین‌دست لوله حاصل می‌شود (Mao, 1986). و (Chiew, 1991) نقش گردابه‌هایی که در بالادست و پایین‌دست لوله ایجاد می‌شوند را در راستای بررسی جریان نشستی آغازگر فرسایش زیر لوله تشریح و تحلیل کردند. ارتباط دقیق بین پدیده رگاب و شروع آبشستگی توسط Sumer and Fredsoe (2002) بررسی گردید. ایشان آزمایش‌هایی را

جهت تعیین شرایط بحرانی آبشستگی ناشی از جریان و امواج را با توجه به عمق فرورفتگی اولیه لوله انجام دادند. آزمایش‌های انجام شده توسط Sumer and Fredsoe (1991) و Sumer et al. (2001) نشان داد که جریان نشستن کرده به بستر زیر لوله افزایشی بوده و در نهایت رگاب حاصل از اختلاف فشار بین پایین‌دست و بالادست لوله، عامل اصلی آغاز پدیده آبشستگی در زیر خطوط لوله عبوری از بستر رودخانه و دریا است. محققان دیگری نظیر (Li and Cheng, 1999, 2001) و همچنین (Brors, 1999) بر روی جریان و آبشستگی ایجاد شده پیرامون خطوط لوله به کمک مدل‌سازی عددی بررسی کردند. Zhao and Wang (2008) با استفاده از مدل عددی Fluent فرآیند آبشستگی و خود دفنی خطوط لوله مستغرق را برای شرایط لوله ساده و با باله بررسی نمودند و بیان کردند که عمق و سرعت جریان عبوری از اطراف لوله بر تنش برشی بستر اثرگذار بوده و باله نصب شده نیز بر تنش برشی اثری ندارد.

Yang et al. (2012) روابطی را در راستای پیش‌بینی عمق آبشستگی با توجه به مشخصات سرعت جریان در زیر لوله مستغرق و برای دو حالت همراه با باله و بدون آن ارائه دادند.

Shan et al. (2015) با استفاده از شبیه‌سازی عددی با Fluent نسبت به بررسی خود دفنی^۱ لوله در حضور باله پرداختند و بیان داشتند که افزایش عدد فرود در مجاورت بستر به افزایش سرعت دفن لوله کمک می‌کند. Yang et al. (2018) با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به تحلیل شرایط جریان اطراف لوله‌های مستغرق پرداختند. تحقیق ایشان حاکی از آن بود که عمق آبشستگی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل عددی از تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی برخوردار است. Li et al. (2019) به بررسی جریان تراوشی و عدد شیلدز در اطراف لوله ثابت و افتاده^۲ پرداختند. نتایج نشان داد که جریان تراوشی نقش اصلی را در ایجاد تونل

¹ Self-Burial

² Sagged Pipeline



شبیه‌سازی عددی مراحل اولیه آبشستگی اطراف یک خط لوله زیردریایی با استفاده از مدل جریان دو فازی با استفاده از روش^۲ (HFD-IB) توسط Tofany and Wirahman (2022) انجام شد. نتایج آن‌ها در شرایط بستر زنده، گرادیان فشار بیشتر در جهت بالادست-پایین‌دست زیر لوله، سرعت جریان جت شدیدتر و شار رسوب بیشتر در مقایسه با شرایط آب شفاف را نشان می‌دهد. ایشان بیان داشتند که این مدل قابلیت امیدوارکننده‌ای را به عنوان یک ابزار پیش‌بینی آبشستگی از خود نشان داده است.

حسینی و همکاران (۱۳۸۵) با بهره‌گیری از مدل‌های عددی و فیزیکی به بررسی مسئله آبشستگی در اطراف خطوط لوله پرداختند. ایشان بیان داشتند که با توجه به نتایج مدل‌های بررسی شده و همچنین مطالعات انجام شده توسط سایر پژوهشگران، حداکثر عمق آبشستگی دقیقاً در زیر مرکز لوله تشکیل می‌شود، به نحوی که افزایش قطر لوله سبب افزایش عمق و حفره آبشستگی می‌گردد. شیب حفره ایجاد شده در بالادست نسبت به پایین‌دست نیز تندتر است. همچنین ایشان افزایش عدد فرود ناشی از کاهش عمق جریان در کانال را یکی از علل افزایش عمق آبشستگی بیان داشتند.

میرعلیزاده و همکاران (۱۳۹۲) با بهره‌گیری از ورق زیرسری نفوذناپذیر فرایند پدیده آبشستگی و فرسایش را در اطراف خط لوله مستغرق در دریا را تحلیل و بررسی کردند. نتایج نشان داد که جهت کاهش رگاب در بستر زیر لوله، استفاده از ورق زیرسری نفوذناپذیر می‌تواند به عنوان راهکاری جهت کاهش آبشستگی و خطرات ناشی از آن باشد. مرادی و همکاران (۱۳۹۷) توسعه زمانی آبشستگی پیرامون خطوط لوله مستغرق را در راستای بهینه‌یابی موقعیت پیگیبک‌لاین^۳ بررسی و تحلیل کردند. نتایج ایشان نشان داد که آبشستگی در حضور پیگیبک‌لاین تا ۲ برابر نسبت به شرایط عدم حضور آن باعث افزایش آبشستگی می‌گردد، که این مقدار برای مقطع مثلثی و در

آبشستگی^۱ زیر لوله ایجاد می‌کند، به نحوی که با افزایش عمق آبشستگی، گردابه‌های تشکیل شده سبب ایجاد نوسانات فشار می‌شوند و بر روی تراوشات به سمت سطح بستر و تغییر در پایداری ذرات بستر اثر قابل توجهی را دارند.

Chen et al. (2020) با استفاده از مدل آشفتگی LES نسبت به شبیه‌سازی جریان عبوری از اطراف خطوط لوله مستغرق اقدام کردند که نتایج ایشان علاوه بر دقت بالای این مدل آشفتگی، حاکی از آن بود که فاصله لوله از بستر، اثر قابل توجهی در شرایط گردابه‌های تشکیل شده اطراف لوله دارد. (Asrari et al. (2021) به بررسی عددی آبشستگی محلی لوله‌های مستغرق با پیگیبک‌لاین با مقطع دایره‌ای به صورت لوله تحت شرایط آب زلال پرداختند. ایشان جهت بررسی عددی از مدل Flow-3D استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله بین دو لوله، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد، اگرچه با افزایش قطر لوله کوچکتر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی بیان داشتند که مدل مورد استفاده ابزار مناسبی جهت شبیه‌سازی پدیده مورد تحقیق است.

در تحقیق انجام شده توسط Yang et al. (2021) بر روی تغییرات شرایط بستر اطراف خطوط لوله مستغرق کوچک و بزرگ مجاور هم نشان داد که در شرایطی که لوله کوچک در بالادست لوله بزرگتر قرار می‌گیرد، نسبت به زمانی که در پایین‌دست آن قرار دارد، اثر کمتری بر مورفولوژی و ابعاد حفره آبشستگی دارد. بررسی عددی آبشستگی اطراف خط لوله مرتعش در شرایط وجود موج در جریان سطح آزاد توسط Ming et al. (2022) مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. پس از اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج رضایت بخشی به دست آمد. سپس مدل عددی برای بررسی آبشستگی محلی اطراف یک خط لوله مرتعش استفاده شد. نتایج عددی حاضر نشان داد که ارتعاش باعث عمیق‌تر شدن عمق آبشستگی در زیر خط لوله می‌گردد و دامنه آبشستگی اطراف خط لوله گسترش می‌یابد.

² The Hybrid Fictitious Domain-Immersed Boundary

³ Piggyback-Line

¹ Tunnel Scour

تله اندازی رسوب در راستای پدیده دفن لوله مستغرق گام برداشته شود

مواد و روش‌ها

مدل عددی Flow-3D یکی از مدل‌های قدرتمند در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که توسط Flow science, Inc توسعه و پشتیبانی می‌گردد. مدل عددی مذکور شامل الگوهای فیزیکی از جمله محیط‌های متخلخل، آشفستگی، آبشستگی و عناوین دیگری نیز است. در کنار قابلیت‌های بیان شده نرم‌افزار توانایی تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی را دارا می‌باشد و از المان‌های متعامد استفاده می‌کند و در ایجاد مانع در برابر جریان، قابلیت‌های قابل توجهی دارد. از قابلیت‌های مدل Flow-3D می‌توان به استفاده از روش حجم محدود و شبکه مستطیلی اشاره کرد. این نرم‌افزار از دو روش VOF^1 و $FAVOR^2$ برای شبیه‌سازی نیز بهره می‌گیرد (نیر و همکاران، ۱۳۹۹). معادلات شامل پیوستگی و مومنوم حاکم بر جریان در این مدل عددی در سیستم متریک در روابط ۱ و ۲ به آن‌ها اشاره شده است

زاویه نصب منفی ۱۳۵ درجه در ذرات درشت دانه تا ۶ برابر بیشتر خواهد شد.

مطالعه با هدف بررسی اثر عمق کارگذاری لوله بر تغییرات زمانی پارامترهای آبشستگی و رسوبگذاری پیرامون خطوط لوله متقاطع با رودخانه توسط بیژنوند و همکاران (۱۴۰۰) مورد تحقیق قرار گرفت. ایشان با در نظر گرفتن سه قطر لوله و همچنین چهار عمق کارگذاری، به این نتیجه رسیدند که بالاترین میزان آبشستگی برای لوله‌ای که در عمق کارگذاری یک چهارم قطر لوله بالای بستر قرار دارد رخ می‌دهد. همچنین حداکثر و حداقل میزان پیش روی عمق آبشستگی به سمت پایین‌دست نسبت به مرکز لوله، به ترتیب در عمق کارگذاری نصف قطر لوله بالای بستر و یک چهارم قطر لوله زیر بستر ایجاد می‌شود.

اعلمی و همکاران (۱۴۰۱) تأثیر زاویه ارتفاع پایه نگهدارنده و قطر خطوط لوله بر حداکثر گودال آبشستگی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد، زاویه برخورد جریان روی مکان قرارگیری بیشینه عمق آبشستگی و نحوه عملکرد گردابه‌ها مؤثر است، به طوری که با افزایش زاویه برخورد جریان، عمق آبشستگی زیر خط لوله کاهش می‌یابد. همچنین بیان داشتند که قطر لوله بر میزان عمق آبشستگی تأثیر دارد و بدلیل تأثیر روی جریان به سمت پایین و جریان‌های گردابی، هرچه قطر لوله افزایش یابد، عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به مرور مطالعات پیشین می‌توان دریافت که کاهش پدیده رگاب و جلوگیری از نفوذ و نشت جریان به بستر در راستای کاهش عمق آبشستگی در زیر لوله مؤثر است. لذا تلاش در جهت کاهش ورود جریان نشستی به بستر فرسایش‌پذیر زیر لوله بهترین راهکار در راستای کاهش آبشستگی خواهد بود. بدین منظور در تحقیق حاضر سعی گردید به استفاده از یک صفحه عمودی برای جایگاه‌های مختلف در بالادست و یا پایین‌دست لوله مستغرق عبوری از عرض رودخانه و مسیل، علاوه بر کاهش جریان ورودی به بستر و کاهش عمق فرسایش، نسبت به

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area/Volume Obstacle Representation

$$V_F \partial \rho / \partial t + \partial / \partial x (\rho u A_x) + \partial / \partial y (\rho v A_y) + \partial / \partial z (\rho w A_z) = 0 \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} \partial u / \partial t + 1 / V_F \{ u A_x (\partial u / \partial x) + v A_y (\partial u / \partial y) + w A_z (\partial u / \partial z) \} \\ = (-1 / \rho) (\partial p / \partial x) + G_x + f_x - b_x \end{aligned} \quad (۱-۲)$$

$$\begin{aligned} \partial v / \partial t + 1 / V_F \{ u A_x (\partial v / \partial x) + v A_y (\partial v / \partial y) + w A_z (\partial v / \partial z) \} \\ = (-1 / \rho) (\partial p / \partial x) + G_y + f_y - b_y \end{aligned} \quad (۲-۲)$$

$$\begin{aligned} \partial w / \partial t + 1 / V_F \{ u A_x (\partial w / \partial x) + v A_y (\partial w / \partial y) + w A_z (\partial w / \partial z) \} \\ = (-1 / \rho) (\partial p / \partial x) + G_z + f_z - b_z \end{aligned} \quad (۳-۲)$$

G برابر با شتاب بدنه، f شتاب لزج و b افت جریان در محیط‌های متخلخل هستند. معادله انتقال رسوب برای ذرات رسوبی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

در معادلات بالا، ρ چگالی سیال، u و v سرعت جریان در راستای x و y و z ، V_F جز حجمی سیال و همچنین A_x ، A_y و A_z برابر با مساحت کسری محیط به جریان در جهت‌های مذکور هستند (نیر و همکاران، ۱۳۹۹).

$$\phi_n = \frac{q_{b.n}}{[g(s_n - 1)d_n^3]^{0.5}} \quad (۳)$$

$$\phi_n = B_n(\theta_n - \theta_{cr.n})^{1.5} c_{b.n} \quad (۴)$$

در رابطه ۳، $q_{b.n}$ نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و ϕ_n بر اساس رابطه ۴ ارائه شده توسط (Meyer-Peter and Müller, 1948) محاسبه می‌گردد. در رابطه ۴، B_n ضریب بار بستر است که نرخ مختلفی از ۵ برای نرخ انتقال رسوب پایین و ۱۳ برای نرخ انتقال بالا را داراست. $c_{b.n}$ جزء حجمی ذرات رسوب در بستر است. روش ارائه شده توسط فن‌راین^۱ برای محاسبه h_n (ضخامت لایه رسوبی) در رابطه ۵ تعریف شده است (Flow Science Inc., 2008).

¹ Van Rijn



$$h_n = 0.3d_n d_{*n}^{0.7} \left(\frac{\theta_n}{\theta_{cr.n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (5)$$

اساس رابطه (۶) محاسبه می‌گردد (Flow Science Inc., 2008)

شدت آشفتگی نیز یکی دیگر از پارامترهای مورد بحث در تحقیق حاضر است که در نرم‌افزار عددی مورد استفاده بر

$$I = \sqrt{\frac{K_T}{\bar{K}}} \quad (6)$$

که در آن K_T و \bar{K} به شرح زیر هستند:

$$K_T = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (7)$$

$$\bar{K} = \frac{\int_V \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) dV}{\int_V \rho dV} \quad (8)$$

¹Turbulent kinetic energy

²Mass-averaged mean kinetic energy in the domain



معیارهای ارزیابی مدل

برای مقایسه و بررسی عملکرد مدل عددی می‌توان از تجزیه و تحلیل خطاهای باقی‌مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده استفاده کرد. در این تحقیق از ضریب تعیین^۱ (R^2)، میانگین مطلق خطا^۲ (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا^۳ ($RMSE$) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده گردید. روابط مربوط به این آزمون‌ها در رابطه ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

¹The Coefficient of Determination

² Mean Absolute Error

³ Root Mean Square Error

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O - P| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O - P)^2}{n}} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O - P)^2}{\sum_{i=1}^n O^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n P^2}{n} \right)} \right] \quad (11)$$

بلوک‌های مجاور به صورت مرز متقارن^۱ و در مرزهای بیرونی مدل به صورت شرط مرزی دیواره^۲ برای کف و کناره‌ها، سرعت مشخص^۳ در مرز ورود جریان و شرط مرزی فشار^۴ در صفحه خروجی و همچنین مرز متقارن در Zmax جهت ایجاد شرایط تماس با اتمسفر تعریف شده است (جدول ۱). هندسه مدل مورد استفاده در محیط Flow-3D با بهره‌گیری از ابزار FAVOR در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است شبکه حل مورد استفاده به خوبی قادر به شبیه‌سازی هندسه استفاده شده در میدان حل است.

جهت انجام شبیه‌سازی از مدل‌های آشفتگی LES، RNG و K-ε استفاده شد که از مدل‌های آشفتگی پرکاربرد در مدل Flow-3D هستند. مدل مورد استفاده جهت صحت‌سنجی برای مدل‌های آشفتگی مختلف ۱۰۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شد تا شرایط بستر تعادلی برای آن محقق و مشخص گردد. نتایج مقادیر مربوط به معیارهای ارزیابی (روابط ۹، ۱۰ و ۱۱) در جدول (۲) برای مدل‌های آشفتگی مختلف ارائه شده است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل آشفتگی K-ε است که در ادامه از آن جهت انجام سایر شبیه‌سازی‌ها استفاده خواهد شد. تغییرات زمانی این شبیه‌سازی برای مدل آشفتگی بهینه در شکل (۲-ج) ارائه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی با مدل آزمایشگاهی در بخش بحث و نتایج به تفصیل ارائه شده است

در رابطه فوق O و P به ترتیب مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده هستند (Chai and Draxler, 2014).

صحت‌سنجی مدل عددی

جهت صحت‌سنجی عملکرد و نتایج حاصل از مدل عددی Flow-3D در راستای اطمینان از استناد به نتایج آن، از مدل و نتایج پژوهش (Sumer et al. 1988) که یکی از تحقیقات معتبر آزمایشگاهی در خصوص شرایط فرسایش اطراف خط لوله عبوری می‌باشد و همواره در تحقیقات بسیاری از محققین به آن استناد شده است، بهره گرفته شد. ایشان در آزمایش‌های خود جهت بررسی پدیده آب‌سستگی در زیر لوله مستغرق در جریان به قطر ۱۰ سانتی‌متر از یک فلوم آزمایشگاهی به عمق نیم متر، عرض دو متر و طول ۲۳ متر استفاده کردند. بستر از یک لایه رسوب یکنواخت با قطر متوسط ذرات برابر با $D_{50}=0.36$ mm و چگالی $\rho=2650$ kg/m³ تشکیل شده است، به نحوی که مقدار پارامتر شیلدز نیز برابر با $\theta=0.065$ و سرعت جریان ورودی برابر با $V=0.4$ m/s در نظر گرفته شده است. شماتیک و مشخصات فلوم مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود طول بالادست محل قرارگیری لوله به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است (۸/۵ متر) تا شرایط جریان تحت تأثیر بالادست نباشد. مقادیر مربوط به هندسه مدل آزمایشگاهی، ابعاد و شرایط رسوب دقیقاً مطابق با شکل (۱) در نرم‌افزار Flow-3D مدل شد (Sumer et al. 1988).

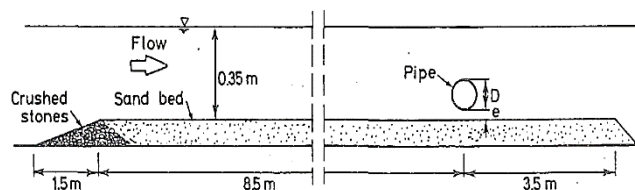
به‌منظور مدل‌سازی جریان اطراف لوله و اندکنش آن با بستر فرسایش‌پذیر با استفاده از سه بلوک مجاور یکدیگر با ابعاد حدود ۷ میلی‌متر اطراف لوله و ۱۳ میلی‌متر در بالادست و پایین‌دست به کار گرفته شد. شرایط مرزی بین

¹ Symmetry

² Wall

³ Specified Velocity

⁴ Pressure



شکل (۱): مشخصات فلوم آزمایشگاهی (Sumer et al. 1988)

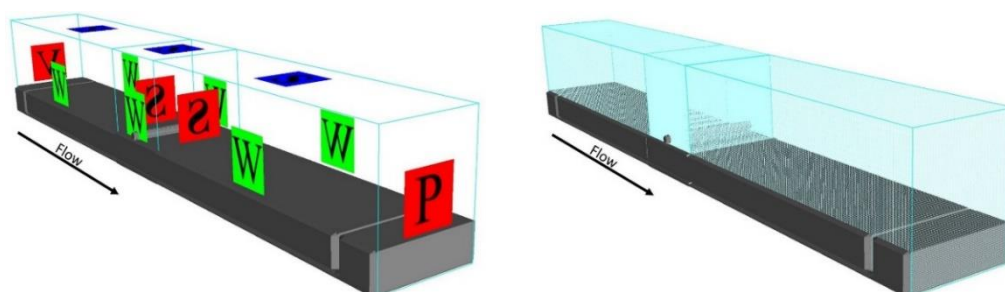
در اطراف لوله نشان می‌دهد. جدول (۳) سناریوهای مختلف را جهت شبیه‌سازی یک صفحه محافظ نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است ابتدا برای صفحه با ارتفاع $H=0.5D$ تمامی موقعیت‌های شبیه‌سازی شد، سپس نسبت به شبیه‌سازی حالات بهینه با ارتفاع‌های مختلف اقدام شد

لذا در پژوهش حاضر با تکیه بر صحت‌سنجی انجام شده در مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی (Sumer et al. 1988) اثر حضور یک صفحه محافظ در جایگاه‌های مختلف حول لوله عبوری از مقطع جریان در راستای کاهش آبشستگی و همچنین افزایش شرایط خود دغنی در موقعیت $0.5D$ ، $1D$ ، $1.5D$ بالادست و پایین‌دست لوله و همچنین در موقعیت صفحه چسبیده به لوله و برای ارتفاع‌های مختلف $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ ، $1D$ و $1.25D$ با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شده و نسبت به ارائه شرایط بهینه اقدام می‌گردد. شکل (۳) نحوه جانمایی

صفحه را

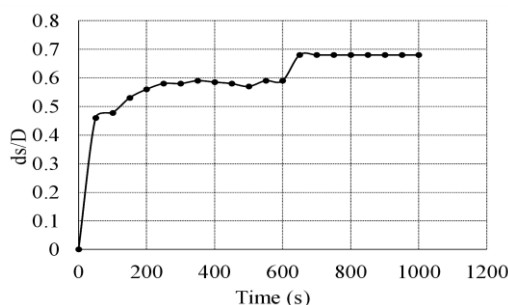
مرزهای مدل						
شماره بلوک	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Z_{min}	Z_{max}
1	Specified Velocity (V)	Symmetry (S)				
2	Symmetry (S)	Symmetry (S)	Wall (w)	Wall (w)	Wall (w)	Symmetry (S)
3	Symmetry (S)	Pressure				

جدول (۱): شرایط مرزی مورد استفاده در مدل‌سازی



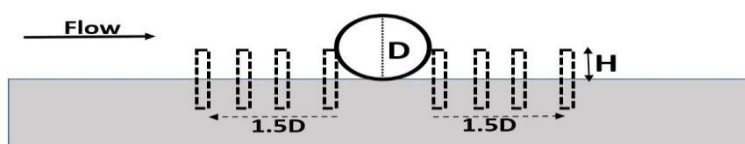
(الف)

(ب)



(ج)

شکل (۲): (الف): نمایش شبکه بندی در ابزار FAVOR، (ب): شرایط مرزی به کار گرفته شده در نرم افزار، (ج): شرایط بستر تعادلی برای مدل آشفتگی بهینه



شکل (۳): جایگاه های مختلف پیش بینی شده برای صفحه محافظ منفرد اطراف لوله

جدول (۲): مقادیر معیارهای ارزیابی مدل عددی برای مدل های آشفتگی

مدل آشفتگی	MAE	RMSE	R^2
LES	0.024	0.02	0.9
RNG	0.02	0.02	0.96
K- ϵ	0.01	0.01	0.97

حفره تشکیل شده ناشی از فرسایش در مدل عددی Flow-3D با دقت مناسب و قابل قبولی حاصل شده است. در این شکل D قطر لوله است که جهت بی بعد سازی طول هندسه مدل سازی شده (X) و مقادیر عمق آبشستگی (d_s) استفاده شده است. مقادیر مربوط به معیارهای ارزیابی (روابط ۹، ۱۰ و ۱۱) در جدول (۴) به منظور مقایسه بین مقادیر حدی آزمایشگاهی و عددی محاسبه و ارائه شده است.

بحث و نتایج

مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی (Sumer et al. 1988) جهت صحت سنجی و مشخص شدن مقدار خطای مدل عددی، در جدول (۴) و شکل (۴) ارائه شده است که نتیجه ۱۰۰۰ ثانیه شبیه سازی پدیده مورد تحقیق می باشد. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، عمق آبشستگی در مدل عددی، محل حداکثر عمق فرسایش یافته و زاویه دیواره

جدول (۳): سناریوهای مختلف جهت شبیه‌سازی صفحه محافظ منفرد

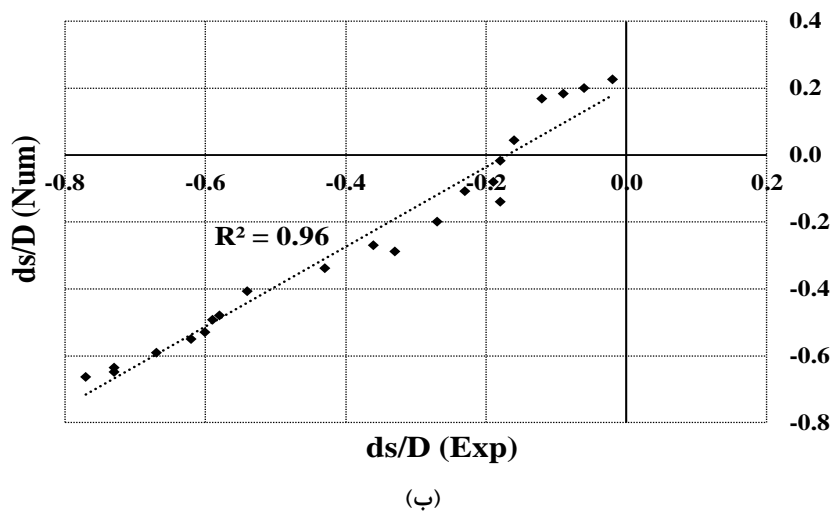
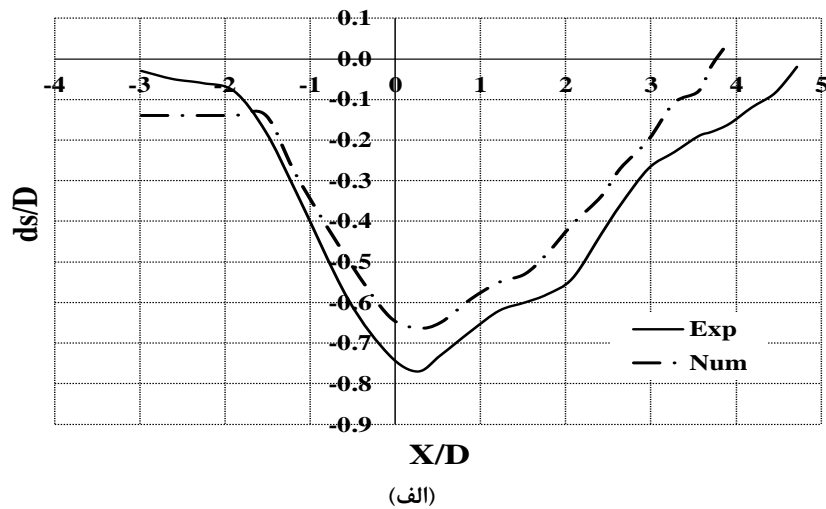
فاصله	جهت	ارتفاع				
		0.25D	0.5D	0.75D	1D	1.25D
چسبیده به لوله	بالادست		■			
0.5D	بالادست		■			
1D	بالادست		■			
1.5D	بالادست	■	■	■	■	■
چسبیده به لوله	پایین دست		■			
0.5D	پایین دست	■	■	■	■	■
1D	پایین دست		■			
1.5D	پایین دست		■			

لوله در نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. با تأیید عملکرد مدل Flow-3D در مدل‌سازی، نتایج حاصل از سایر شبیه‌سازی‌های مورد تحقیق در پژوهش حاضر در بخش‌های مختلف شامل تغییرات بستر فرسایش‌پذیر اطراف لوله و صفحه (عمق آبستگي، رسوب‌گذاری و حفره فرسایش)، خطوط جریان عبوری اطراف لوله و همچنین مقادیر سرعت و عدد فرود جریان برای حالت‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در ادامه اشاره شده است.

همانطور که مشخص است ضریب تبیین $R^2=0.96$ بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی مبین این موضوع است که مدل عددی توانایی قابل قبولی را در شبیه‌سازی پدیده مورد بحث را دارد. لذا با توجه به اینکه علاوه بر شاخص‌های آماری، نحوه روند شبیه‌سازی حفره آبستگي و همچنین دیواره آن حائز اهمیت است، شکل (۴-الف) نیز ارائه شده است. در این شکل مشخص است که حفره آبستگي ایجاد شده در زیر لوله برای مدل آزمایشگاهی و عددی از انطباق خوبی برخوردار هستند.

لذا با توجه به نتایج حاصل از مقایسه‌های صورت گرفته در شکل (۴) و جدول (۴) توانایی مدل عددی Flow-3D در شبیه‌سازی پدیده مورد بحث در تحقیق حاضر قابل قبول و مناسب بوده و با مشخص شدن مقدار خطای ناشی از شبیه‌سازی، اهداف مورد تحقیق در پژوهش حاضر بررسی و مقایسه می‌شوند.

همانطور که بیان شد مدل عددی Flow-3D با دقت قابل قبول و بالایی قادر است عمق فرسایش و شکل حفره آبستگي ناشی از اندرکنش بین بستر فرسایش‌پذیر و جریان عبوری اطراف لوله را شبیه‌سازی کند و نتایج قابل قبولی ارائه دهد که این مسأله با نتایج (Asrari et al. 2021) و (نیبر و همکاران، ۱۳۹۹) مطابقت دارد. لذا در ادامه جهت انجام پژوهش حاضر، مدل‌سازی صفحه محافظ منفرد در موقعیت 0.5D، 1D، 1.5D بالادست و پایین‌دست لوله و همچنین صفحه چسبیده به لوله و برای ارتفاع‌های مختلف (H) برابر با 0.25D، 0.5D، 0.75D، 1D و 1.25D در راستای بررسی اثر آن بر آبستگي اطراف



شکل (۴): مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی (Exp) و عددی (Num)، الف) بستر تعادلی فرسایش یافته در محل لوله، ب) مقادیر کمی بستر فرسایش یافته

جدول (۴): مقادیر معیارهای ارزیابی مدل عددی مقادیر حدی

<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i> ²
0.005	0.022	0.97

چسبیده به لوله بستر فرسایش یافته مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است.

همانطور که در شکل (۵) قابل مشاهده است وجود صفحه محافظ لوله با ارتفاع $H=0.5D$ و در فاصله افقی $0.5D$ پایین‌دست سبب کاهش ۳۲ درصدی عمق آبخستگی شده است. از طرفی افزایش فاصله برای

بررسی موقعیت مکانی صفحه محافظ

همانطور که بیان شد یکی از اهداف اصلی این تحقیق یافتن بهترین موقعیت مربوط به صفحه محافظ است به نحوی که مقادیر آبخستگی کاهش یافته و اثر مثبتی بر شرایط خود دفنی لوله داشته باشد. لذا با بکارگیری یک صفحه محافظ برای حالت‌های مختلف $0.5D$ ، $1D$ ، $1.5D$ بالادست و پایین‌دست لوله و همچنین در موقعیت صفحه



بدون صفحه است، که نشان از رسوبگذاری بسیار زیاد این موقعیت است.

با توجه به اینکه بهترین حالت وجود رسوبگذاری اطراف لوله می‌باشد و بیشترین مقدار رسوبگذاری برای صفحه در موقعیت فاصله $1.5D$ در بالادست لوله نتیجه شده است، نهایتاً این فاصله می‌تواند به عنوان فاصله مناسب جهت حمایت از لوله و بستر فرسایش‌پذیر انتخاب گردد. در ادامه جهت بررسی ارتفاع بهینه از موقعیت‌های $0.5D$ در پایین دست و $1.5D$ در بالادست استفاده می‌گردد.

بررسی ارتفاع صفحه محافظ

در بخش قبلی مشاهده شد که حضور صفحه محافظ می‌تواند کمک قابل توجهی به کاهش عمق آبستتگی نماید و حتی سبب افزایش رسوبگذاری اطراف لوله گردد. لذا با توجه به اینکه موقعیت‌های فاصله $0.5D$ پایین دست و $1.5D$ بالادست بهترین عملکرد را از خود نشان دادند، در ادامه نسبت به تعیین ارتفاع بهینه آن برای ارتفاع‌های مختلف (H) برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ و $1D$ اقدام خواهد شد.

شکل (۷) شرایط بستر فرسایش‌پذیر را برای صفحه با فاصله $0.5D$ در پایین دست را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع صفحه مقادیر عمق آبستتگی حداکثری زیر لوله نیز کاهش یافته که این کاهش برای ارتفاع‌های H برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ و $1D$ به ترتیب ۲۵ ، ۳۲ ، ۳۲ ، ۴۰ و ۶۰ درصد است. همچنین برای محدوده $-1 < X/D < 2$ بالادست لوله نیز بستر دارای تغییرات محسوسی است. همانطور که مشاهده می‌شود برای ارتفاع‌های H برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ و $1D$ تراز بستر در محدوده ذکر شده به ترتیب $۱/۸۶$ ، $۱/۳۱$ ، $۱/۱۹$ ، $۰/۲۴$ و $۰/۸۲$ برابر تغییر کرده است، که حاکی از عملکرد مناسب صفحه با ارتفاع $1.25D$ می‌باشد.

ارتفاع رسوبگذاری در پایین دست صفحه نیز با تغییر ارتفاع صفحه تغییر کرده، به نحوی که برای ارتفاع‌های H برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ ، $1D$ و $1.25D$ متوسط تراز بستر به ترتیب ۳ ، $۳/۳$ ، ۳ ، $۲/۸$ و $۳/۷$ برابر افزایش یافته است. نکته قابل توجه عملکرد مناسب‌تر تمامی صفحات از

حالت‌های صفحه در $1D$ و یا در $1.5D$ به سمت پایین دست مقادیر حداکثر آبستتگی نیز تغییر محسوسی نداشته و عمق آبستتگی حداکثر با حالت بدون صفحه یکسان است. نکته قابل توجه دیگر آن است که، در هر صورت وجود صفحه در پایین دست سبب افزایش فرسایش بستر عمومی در بالادست لوله می‌گردد.

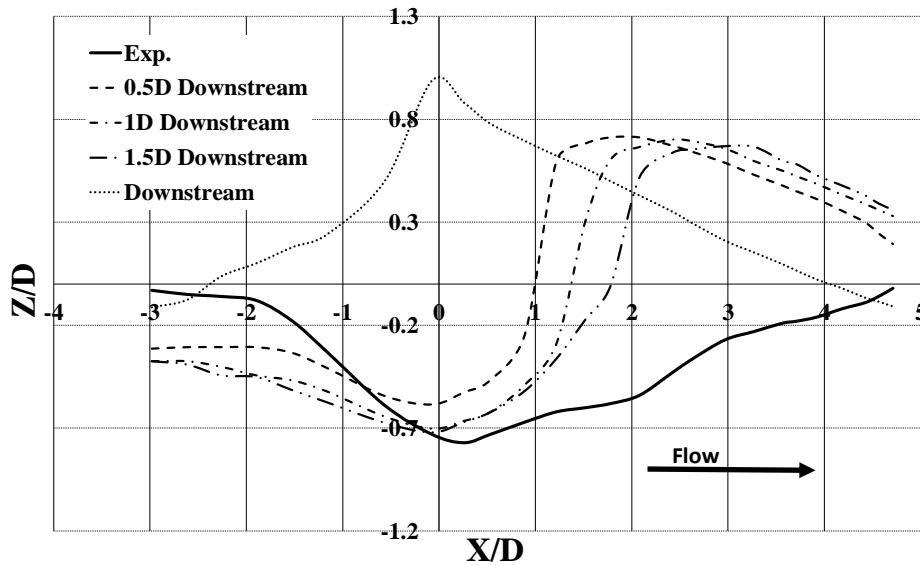
با دقت در محدوده X/D برابر با ۱ تا ۵ محور افقی شکل (۵)، به وضوح رسوبگذاری مشخص است. به نحوی که در هر صورت وجود صفحه سبب رسوبگذاری در پایین دست آن می‌گردد، در حالی که برای شرایط بدون صفحه در آن محدوده آبستتگی رخ می‌دهد. ارتفاع رسوبگذاری با افزایش فاصله از لوله به ازای هر $0.5D$ به سمت پایین دست، در حدود ۵ درصد کاهش یافته است، به نحوی که رسوبگذاری برای صفحه موقعیت $1.5D$ در مقایسه با $0.5D$ در حدود ۱۰ درصد کمتر است.

نکته قابل توجه دیگر در شکل (۵) عملکرد صفحه چسبیده به لوله در پایین دست است (Downstream)، که به دلیل کاهش جریان تراوشی ورودی به بستر زیر لوله و ممانعت از خروج این نوع جریان از بستر زیر لوله است که نه تنها فرسایشی ایجاد نشده، بلکه سبب ایجاد پدیده خود دفنی اطراف لوله شده است. لذا صفحه چسبیده به لوله و صفحه با فاصله $0.5D$ از لوله در پایین دست عملکرد قابل قبولی را در راستای کاهش عمق آبستتگی و افزایش رسوبگذاری را دارند.

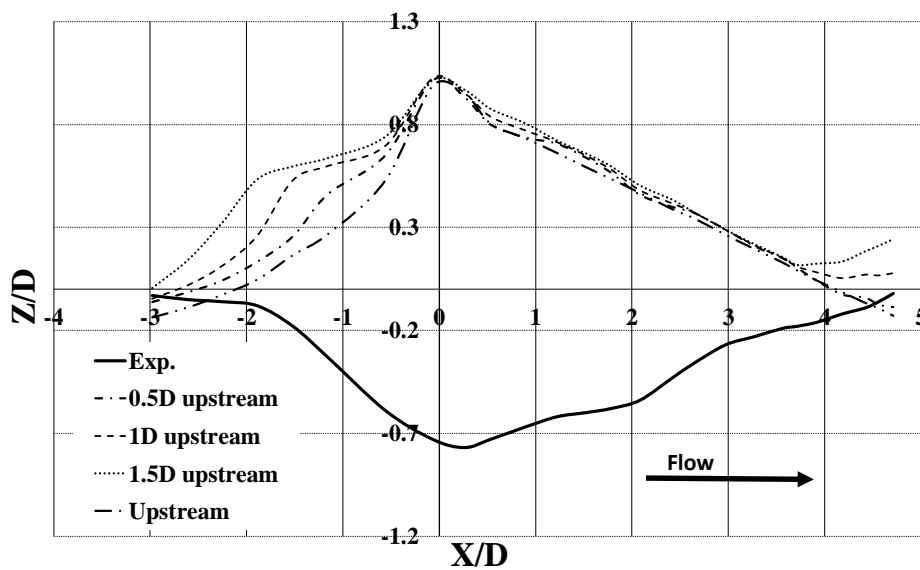
شکل (۶) نیز تغییرات بستر فرسایش یافته یک صفحه با $H=0.5D$ و در بالادست را برای فواصل مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود وجود صفحه در بالادست در هر فاصله‌ای سبب رسوبگذاری اطراف لوله و صفحه می‌گردد. رسوبگذاری در پایین دست لوله برای همه موقعیت‌ها مشابه است، در حالی که در بالادست با افزایش فاصله صفحه از لوله، ارتفاع رسوبگذاری افزایش یافته است. مقایسه بین اثرگذاری صفحات حاکی از افزایش حدود ۴۰ درصدی ارتفاع رسوب در اطراف صفحه $1.5D$ نسبت به صفحه چسبیده به لوله است. تراز حداکثر رسوبگذاری برای صفحه در موقعیت $1.5D$ بالادست، حدود $۴/۳$ برابر بالاتر از تراز بستر فرسایش یافته حالت

روی بستر دارد

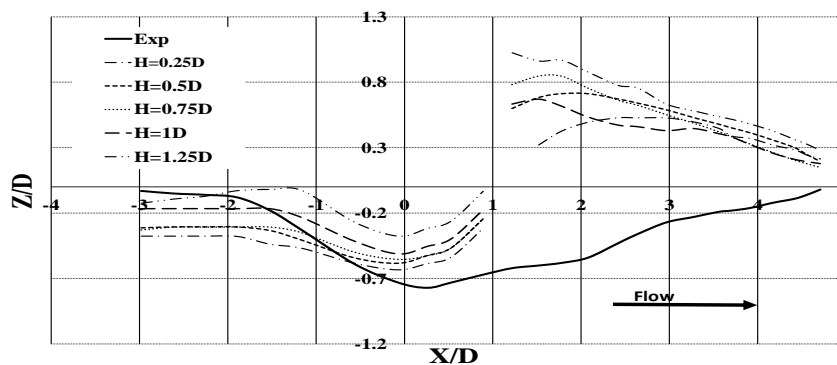
صفحه با ارتفاع $H=1D$ است که ارتفاعی برابر با قطر لوله



شکل (۵): تغییرات بستر فرسایش یافته با حضور صفحه محافظ در پایین دست لوله برای $H=0.5D$



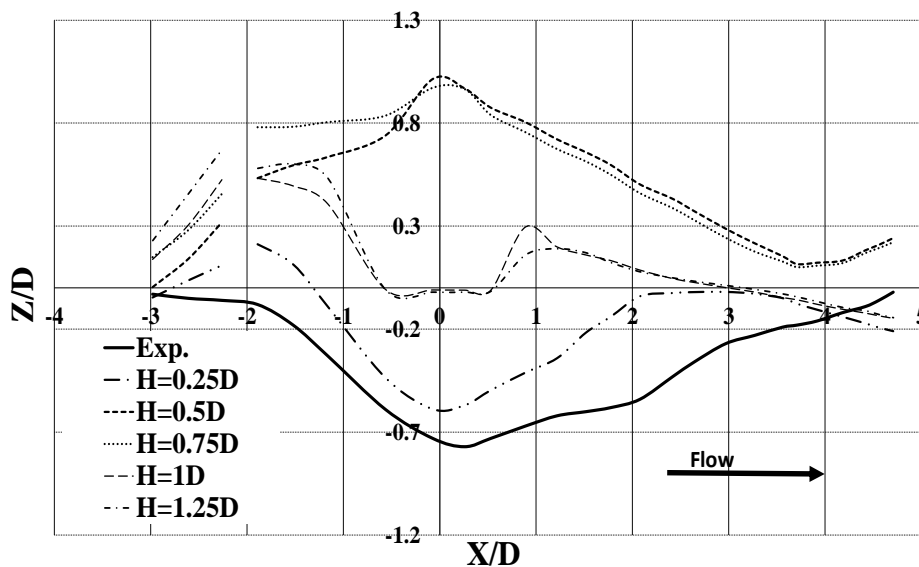
شکل (۶): تغییرات بستر فرسایش یافته با حضور صفحه محافظ در بالادست لوله برای $H=0.5D$



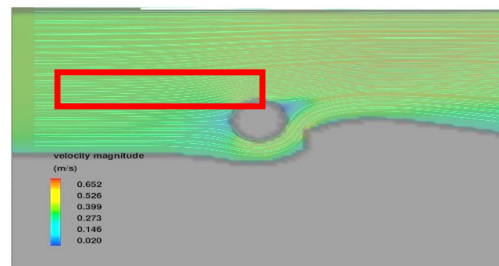
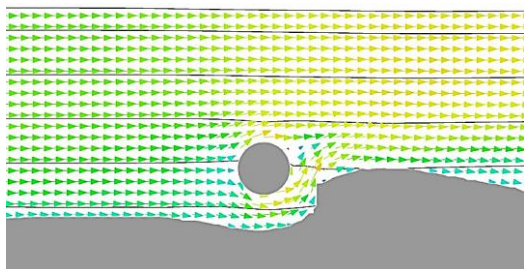
شکل (۷): تغییرات بستر فرسایش یافته برای ارتفاع‌های مختلف صفحه محافظ در فاصله $0.5D$ پایین دست لوله

در شکل (۸) تغییرات بستر فرسایش یافته برای صفحات با ارتفاع مختلف و در فاصله $1.5D$ در بالادست ترسیم شده است. ارتفاع (H) صفحه برابر با $0.25D$ ، $1D$ و $1.25D$ است. ارتفاع‌هایی هستند که بستر زیر لوله دچار فرسایش می‌شود اگرچه که برای ارتفاع $1D$ و $1.25D$ آبخستگی اندک است. در سایر ارتفاع‌ها ورودی جریان به بستر زیر لوله کاهش یافته و رسوبگذاری اتفاق افتاده است. مشاهده می‌شود که برای ارتفاع‌های H برابر با

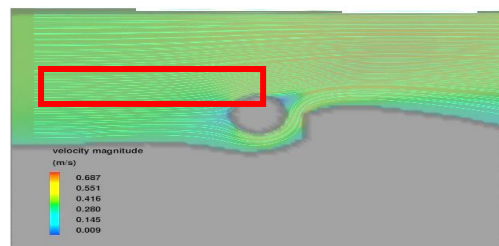
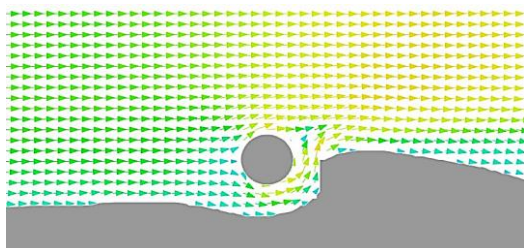
شکل (۷): تغییرات بستر فرسایش یافته برای ارتفاع‌های مختلف صفحه محافظ در فاصله $0.5D$ پایین دست لوله

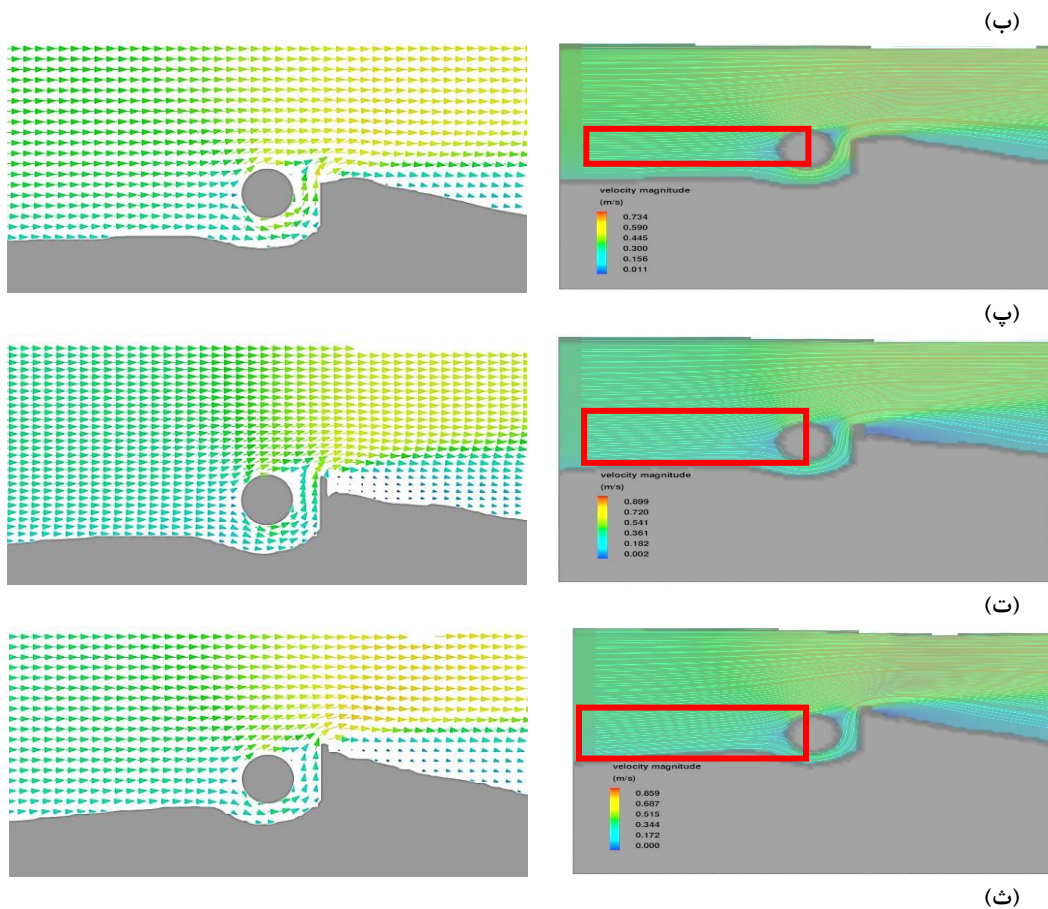


شکل (۸): تغییرات بستر فرسایش یافته برای ارتفاع‌های مختلف صفحه محافظ در بالادست لوله در فاصله $1.5D$



(الف)





شکل (۹): خطوط جریان و بردار بزرگای سرعت اطراف لوله در بستر فرسایش یافته برای فاصله $0.5D$ در پایین دست و برای ارتفاع H برابر با الف ($0.25D$ ، ب $0.5D$ ، پ $0.75D$ ، ت $1D$ ، ث $1.25D$)

تنش برشی و عمق آبشستگی نیز می‌گردد. محل تشکیل مقادیر سرعت حداقلی به دلیل حضور صفحه اندکی جابجا شده به نحوی که در پایین دست لوله حدود زاویه 45° درجه و در بالادست با برخورد به بدنه لوله در زاویه 180° درجه تشکیل می‌گردد.

ناحیه جدایی جریان در پایین دست بین خطوط جریان عبوری از روی لوله و زیر لوله به وضوح قابل مشاهده می‌باشد که با کادر قرمز رنگ مشخص گردیده است. این ناحیه برای ارتفاع‌های (H) برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ و $0.75D$ نسبت به صفحات با ارتفاع $1D$ و $1.25D$ بدلیل اثر کمتر جریان اصلی، بیشتر می‌باشد، که سبب بازتر شدن خطوط جریان و در نتیجه فشردگی کمتر می‌گردد. در صفحات با ارتفاع $H=1D$ و $H=1.25D$ فشردگی بیشتری در خطوط جریان و ناحیه جدایی ملاحظه می‌شود که ناشی از اثر

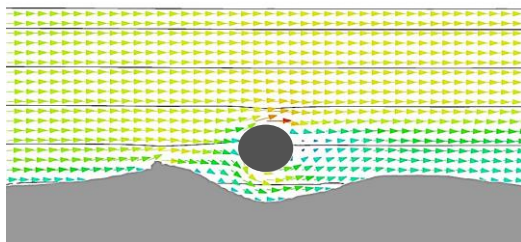
الگوی جریان اطراف لوله و صفحه محافظ

شکل (۹) خطوط جریان و مقادیر بزرگای سرعت ارتفاع‌های مختلف صفحه در حالت بهینه فاصله $0.5D$ در پایین دست را نشان می‌دهد. برای حالتی که صفحه در پایین دست واقع شده جریان با برخورد به لوله به دو بخش تقسیم گردیده است. بخشی از جریان به سمت زیر لوله حرکت می‌کند، که در محل حداکثر عمق آبشستگی متراکم شده و سپس با برخورد به صفحه به سمت

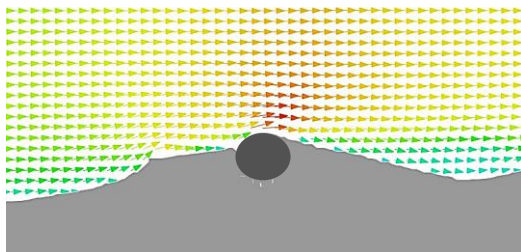
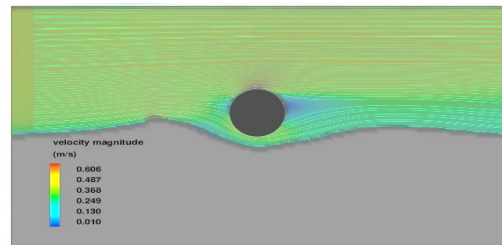
ترازهای بالاتر جریان می‌یابد محل تشکیل مقادیر حداکثری سرعت نیز در تراز بالای صفحه و همچنین در تراز بالا لوله (زاویه 90° درجه) و پایین لوله (زاویه 270° درجه) می‌باشد، که ناشی از تراکم جریان است. لازم به ذکر است بزرگای سرعت زیر لوله با افزایش ارتفاع صفحه کاهش می‌یابد که سبب کاهش

۹۰ و ۲۷۰ درجه) تشکیل شده و مقادیر سرعت حداقلی نیز در زاویه صفر درجه و ۱۸۰ درجه است. برای صفحه با ارتفاع‌های (H) برابر با $1D$ و $1.25D$ شرایط متفاوت می‌باشد. ارتفاع صفحات به نحوی است که مانع از تشکیل مقادیر سرعت حداکثری اطراف لوله می‌شود و بالادست و پایین‌دست لوله نیز جریان چرخشی را تشکیل می‌دهد. این جریان چرخشی اگرچه که بسیار ضعیف است اما اثر اندکی در ایجاد آبشستگی در زیر لوله می‌گذارد. در ارتباط با دو ارتفاع بحث شده اخیر این نکته قابل توجه است که علیرغم اینکه به طور قابل قبولی مانع از ایجاد آبشستگی در زیر لوله می‌گردند، اما رسوب‌گذاری قابل توجهی را ندارند. بررسی شرایط جریان با حضور صفحات با ارتفاع‌های (H) برابر با $0.5D$ و $0.75D$ فشرده‌گی خطوط جریان در تراز بالای لوله و صفحه را نشان می‌دهد. این دو ارتفاع به نحوی هستند که جریان عبوری کمتر وارد محدوده بین صفحه و رسوب شده، و تمام محدوده بین صفحه و لوله را رسوب‌گذاری کرده و هیچ فرسایش و آبشستگی را ندارند.

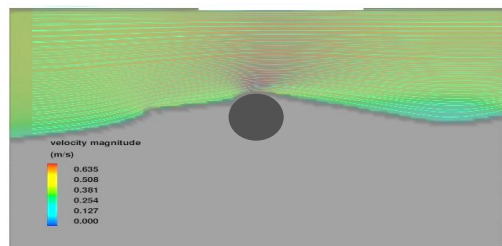
تغییرات گرادیان فشار جریان عبوری از زیر و روی لوله بر آن می‌باشد. پایین‌دست این صفحات ناحیه‌ای با بزرگی سرعت حداقلی و چرخشی ایجاد می‌شود که مسبب حرکت ذرات رسوب و فرسایش پایین‌دست صفحه است. شکل (۱۰) خطوط جریان و مقادیر بزرگی سرعت در اطراف لوله را برای حالت بهینه صفحه در فاصله $1.5D$ در بالادست برای ارتفاع‌های مختلف صفحه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برای صفحات در بالادست شرایط متفاوت می‌باشد. در واقع ارتفاع صفحه اثر قابل توجهی بر جریان عبوری از روی لوله دارد، به نحوی که برای ارتفاع‌های مختلف این اثر متفاوت بوده و نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهد. در شرایطی که ارتفاع صفحه (H) برابر با $0.25D$ ، $1D$ و $1.25D$ باشد بستر زیر لوله دچار فرسایش می‌شود اگرچه که مقدار آن برای صفحه با ارتفاع $0.25D$ بسیار بیشتر از $1D$ و $1.25D$ است. جریان با برخورد به لوله در شرایطی که ارتفاع صفحه $H=0.25D$ باشد، به دو قسمت تقسیم شده و به سمت بالا و پایین حرکت می‌کند، و در بالادست و زیر لوله شرایطی تقریباً مشابه با حضور صفحه در پایین‌دست را دارد. مقادیر حداکثری بزرگی سرعت در بالا و پایین لوله (زاویه

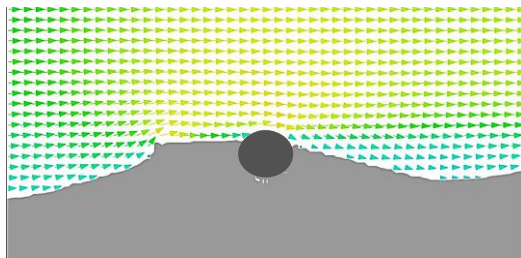


(الف)

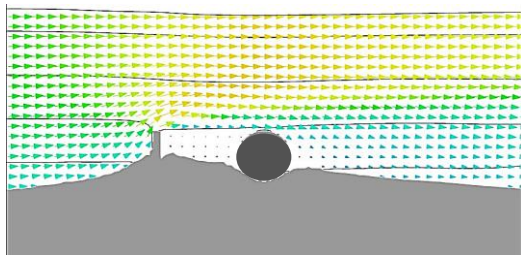
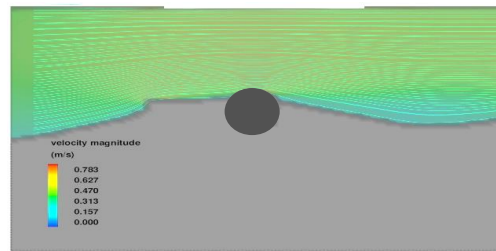


(ب)

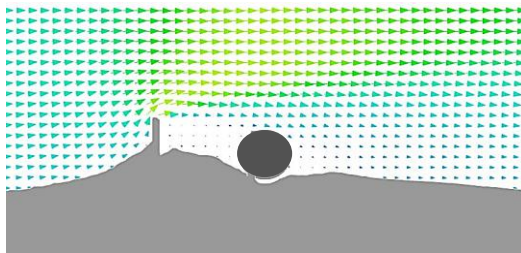
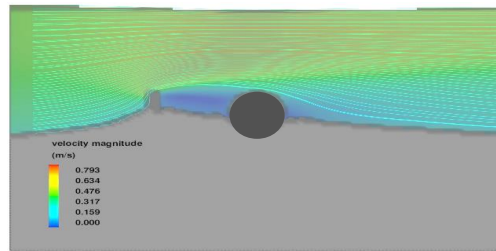




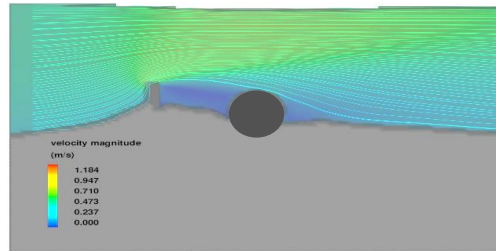
(ب)



(ت)



(ث)



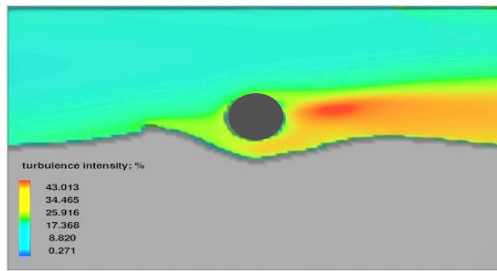
شکل (۱۰): خطوط جریان و بردار بزرگای سرعت اطراف لوله در بستر فرسایش یافته برای فاصله $1.5D$ در بالادست و برای ارتفاع H برابر با الف) $0.25D$ ، ب) $0.5D$ ، پ) $0.75D$ ، ت) $1D$ ، ث) $1.25D$

شدت آشفتگی جریان عبوری

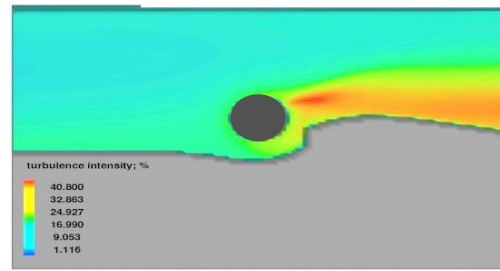
محل تشکیل شدت آشفتگی حداکثر یکی از مشخصه‌هایی است که می‌توان با استفاده از آن محل‌های مستعد فرسایش را شناسایی و پیش‌بینی کرد (Nayyer et al. 2019). در واقع بررسی شرایط شدت آشفتگی نشان می‌دهد که ادامه روند فرسایش و ترسیب در کدام محدوده در اطراف صفحه محافظ و لوله محتمل‌تر است.

شدت آشفتگی جریان عبوری از روی لوله و صفحه برای حالات مختلف موقعیت قرارگیری ارتفاع صفحه در شکل (۱۱) ارائه شده است. در شرایطی که صفحه در پایین‌دست نصب شده باشد، مقادیر حداکثری شدت آشفتگی در پایین‌دست لوله تشکیل می‌شود، به نحوی که برای ارتفاع‌های (H) برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ و $0.75D$ این مقدار در نزدیکی لوله و در تراز بالای صفحه می‌باشد. با افزایش ارتفاع صفحه به $H=1D$ و $H=1.25D$ محدوده مقادیر شدت آشفتگی حداکثری در پایین‌دست صفحه

دید می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع صفحه سبب افزایش مقدار حداکثر شدت آشفتگی و همچنین سبب کاهش شدت آشفتگی در زیر لوله می‌گردد، به نحوی که شدت آشفتگی حداکثر برای ارتفاع $H=1.25D$ در حدود $2/4$ برابر ارتفاع $0.25D$ در حالت فرسایش یافته است. هنگامی که صفحه در بالادست لوله نصب شده است، مانند شرایطی که در بخش قبلی ذکر شد، برای هر ارتفاع شرایطی متفاوت حاکم است. هنگامی که ارتفاع صفحه $H=0.25D$ باشد مقادیر حداکثری شدت آشفتگی در پایین‌دست و زیر لوله مشاهده می‌شود. با افزایش ارتفاع تا $H=0.75D$ مقادیر حداکثری از محل لوله فاصله گرفته و به پایین‌دست جابجا می‌گردد. اما برای حالات ارتفاع‌های (H) برابر با $1D$ و $1.25D$ مقدار حداکثری در محدوده بین صفحه و لوله تشکیل می‌گردد. این مقدار برای ارتفاع $H=1.25D$ حدود $2/75$ برابر شدت آشفتگی اطراف لوله و ارتفاع صفحه $H=0.25D$ در حالت فرسایش یافته است.

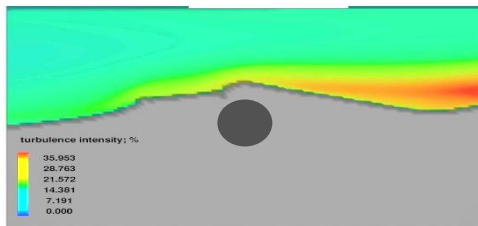


بالادست

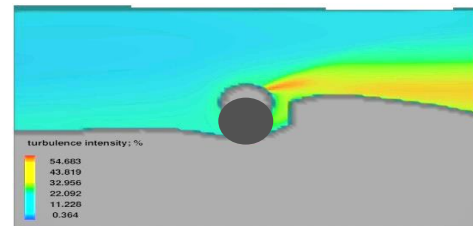


پایین دست

(الف)

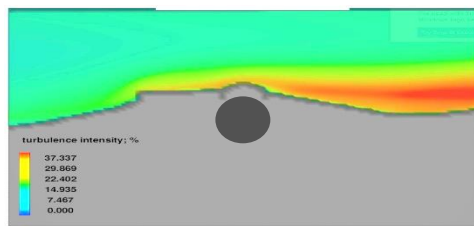


بالادست

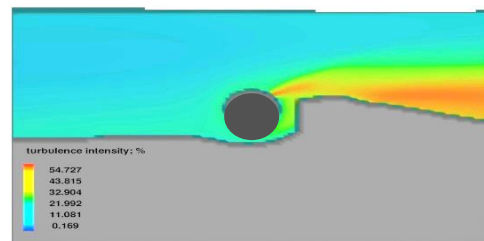


پایین دست

(ب)

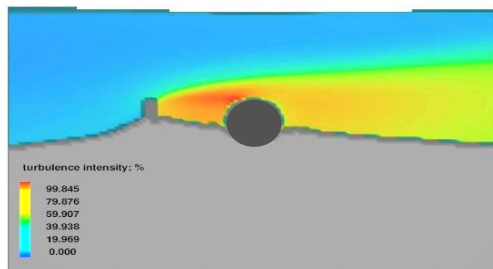


بالادست

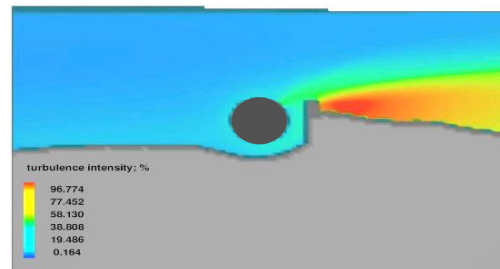


پایین دست

(پ)

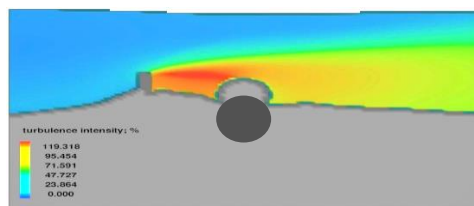


بالادست

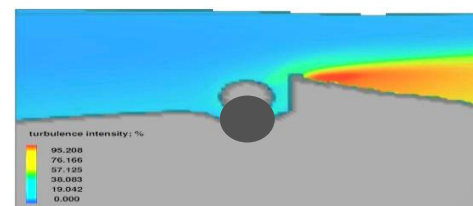


پایین دست

(ت)



بالادست



پایین دست

(ث)

شکل (۱۱): شدت آشفتگی برای ارتفاع H برابر با الف) $0.25D$ ، ب) $0.5D$ ، پ) $0.75D$ ، ت) $1D$ ، ث) $1.25D$ در بالادست و

پایین دست

نتیجه گیری

- با افزایش ارتفاع صفحه (H) با فاصله $0.5D$ در پایین دست، مقادیر عمق آبشستگی حداکثری زیر لوله نیز کاهش یافته است، این کاهش برای ارتفاعهای H برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ ، $1D$ و $1.25D$ به ترتیب ۲۵، ۳۲، ۴۰ و ۶۰ درصد است. همچنین تراز بستر در محدوده بالادست لوله نیز به ترتیب $1/86$ ، $1/31$ ، $1/19$ ، $0/24$ و $0/82$ برابر تغییر کرده است. با توجه به هدف کاهش عمق آبشستگی زیر لوله و افزایش رسوب گذاری، صفحه با ارتفاع $H=1.25D$ و در فاصله $0.5D$ در پایین دست بهترین عملکرد را در بین صفحات پایین دست دارد.

- در فاصله $1.5D$ صفحه در بالادست ارتفاعهای (H) برابر با $0.25D$ ، $1D$ و $1.25D$ حالت هایی هستند که بستر زیر لوله دچار فرسایش می شود و در سایر ارتفاعها رسوب گذاری اتفاق افتاده است. برای ارتفاعهای H برابر با $0.25D$ ، $0.5D$ ، $0.75D$ ، $1D$ و $1.25D$ متوسط تراز بستر بین لوله و صفحه در بالادست به ترتیب $1/3$ ، $3/9$ ، $4/9$ ، $3/1$ و $3/4$ برابر افزایش یافته، که حاکی از کاهش فرسایش اطراف لوله در حضور صفحه محافظ است. با توجه به هدف کاهش عمق آبشستگی زیر لوله و افزایش رسوب گذاری، صفحه با ارتفاع $H=0.75D$ و در فاصله $1.5D$ در بالادست بهترین عملکرد را در بین صفحات بالادست دارد.

- وجود صفحه محافظ در پایین دست لوله سبب کاهش عمق آبشستگی در زیر لوله می گردد. از طرفی محل شروع حفره آبشستگی به سمت بالادست حرکت می کند. وجود صفحه محافظ لوله با ارتفاع $H=0.5D$ و در فاصله افقی $0.5D$ پایین دست سبب کاهش ۳۲ درصدی عمق آبشستگی شده است. از طرفی افزایش فاصله برای حالت های صفحه در $1D$ و یا در $1.5D$ به سمت پایین دست مقادیر حداکثر آبشستگی نیز تغییر محسوسی نداشته و عمق آبشستگی حداکثر با حالت بدون صفحه یکسان است. اما ارتفاع رسوب گذاری با افزایش فاصله از لوله به ازای هر $0.5D$ به سمت پایین دست، در حدود ۵ درصد در پشت صفحه محافظ کاهش می یابد، لذا بهترین حالت برای صفحات پایین دست، فاصله $0.5D$ است.

- در شرایطی که ارتفاع صفحه ها (H) یکسان است، مقایسه بین اثرگذاری صفحات حاکی از افزایش حدود ۴۰ درصدی ارتفاع رسوب در اطراف صفحه $1.5D$ نسبت به صفحه چسبیده به لوله است. تراز حداکثر رسوب گذاری برای صفحه در موقعیت $1.5D$ بالادست، حدود $4/3$ برابر بالاتر از تراز بستر فرسایش یافته حالت بدون صفحه است. لذا بهترین حالت برای صفحات بالادست، فاصله $1.5D$ است.

منابع

- . اعلامی، ن.، صانعی، م. و حاجی کندی، ه. ۱۴۰۱. تأثیر زاویه ارتفاع پایه نگهدارنده و قطر خطوط لوله بر حداکثر گودال آبشستگی. مجله علوم آب و خاک، دوره بیست و ششم، شماره ۱، ص ۸۵-۱۰۰.
- بیژنوند، س.، کاشفی پور، س. م. و بهرامی یار احمدی، م. ۱۴۰۰. مطالعه ی اثر عمق کارگذاری لوله بر تغییرات زمانی پارامترهای آبشستگی و رسوبگذاری پیرامون خطوط لوله متقاطع با رودخانه. نشریه هیدرولیک، دوره شانزدهم، شماره ۳، ص ۵۳-۴۱۳. حسینی، د.، ح. حکیم زاده و ر. غیائی. ۱۳۸۵. بررسی مسائل آبشستگی موضعی در اطراف خطوط لوله با استفاده از مدل های عددی و فیزیکی. مهندسی دریا، دوره سوم، شماره ۵، ص ۵۳-۳۷.
- . مرادی، س.، ک. اسماعیلی و س. خدانشناس. ۱۳۹۷. بررسی توسعه زمانی آبشستگی اطراف خطوط لوله با بهینه یابی موقعیت نصب پیگیبک لاین. علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۴۱، شماره ۴، ص ۱۸۷-۱۷۳.



. میرعلیزاده، ا.، س. م. لطف‌اللهی‌یقین، م. حسین‌زاده دلیر و ح. علی‌حکیم‌زاده. ۱۳۹۲. بررسی مسئله‌ی فرایند آبستنگی در اطراف خطوط لوله‌ی دریایی با در نظر گرفتن ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر لوله. مهندس عمران مدرس، دوره سیزدهم، شماره ۳، ص. ۱۳۶-۱۲۵.

نیر، ش.، م. خیرخواهان و خ. حسینی. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عددی اثر زاویه دریاچه کشویی بر جریان و اندرکنش آن با بستر فرسایش پذیر پایین دست. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره چهاردهم، شماره ۲، ص ۵۶۹-۵۵۹.

Asrari, S., H. Hakimzadeh and N. Kardan. 2021. Investigation on the local scour beneath piggyback pipelines under clear-water conditions. *China Ocean Engineering*, 35(3): 422-431.

Brors, B. 1999. Numerical modeling of flow and scour at pipelines. *Journal of Hydraulics Engineering, ASCE*, 125(5): 511-523.

Chai, T. and R. R. Draxler. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geo-Sci*, 7:1247-1250.

Chen, L., S.J. Hulshoff and Y. Wang. 2020. 2D residual-based LES of flow around a pipeline close to a flat seabed. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 363, 112788.

Chiew, Y.M. 1991. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (4): 515-529.

Flow Science Inc. 2008. *FLOW-3D User's Manual*. 9.3 ed. Los Alamos, NM: Flow Science Inc.

Li, F., L. Cheng. 1999. Numerical model for local scour under offshore pipelines. *Journal of Hydraulics Engineering, ASCE*, 125(4): 400-406.

Li, F., L. Cheng. 2001. Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, 127(2): 106-112.

Li, K., Z. Guo, L. Wang and H. Jiang. 2019. Effect of seepage flow on shields number around a fixed and sagging pipeline. *Ocean Engineering*, 172: 487-500.

Mao, Y. 1986. The interaction between a pipeline and an erodible bed. Series Paper No. 39, Inst., of Hydrodynamics and Hydr., Engrg., Tech. Univ., of Denmark, Lyngby, Denmark.

Meyer-Peter, E. and R. Müller. 1948. Formulas for bed-load transport. In IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2: 39-64.

Ming-Ming, L., W. Hao-Cheng, S. Fei-Fei, J. Xin, T. Guo-Qiang and Y. Fan. 2022. Numerical investigation of local scour around a vibration pipeline under free surface wave condition. *Ocean Engineering*, 245: 110556.

Nayyer, S., S. Farzin, H. Karami and M. Rostami. 2019. A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(6): 1-11.

Shan, D., Y. Liu and Y. LI. 2015. Numerical Simulation of Submarine Pipeline Self-Buried on Sediment Seabed. *Advances in Petroleum Exploration and Development* 10(1): 44- 50.

Sumer, B.M., H.R. Jensen, Y. Mao and J. Fredsøe. 1988. Effect of lee-wake on scour below pipelines in current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 114(5): 599-614.

. Sumer, B.M. and J. Fredsoe. 1991. Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 116(3): 307-323.

. Sumer, B.M. and J. Fredsoe. 2002. Time scale of scour around a large vertical cylinder in waves. In *The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro.

. Sumer, B.M., C. Truelsen, T. Sichmann, J. Fredsøe. 2001. Onset of scour below pipelines and self-burial. *Journal of Coastal Engineering*, 42 (4): 213-235.

Tofany, N. and T. Wirahman. 2022. Numerical simulation of early stages of scour around a submarine pipeline using a two-phase flow model. *Ocean Engineering*, 264: 112503.

Yang, J., Y.M. Low, C.H. Lee and Y.M. Chiew. 2018. Numerical simulation of scour around a submarine pipeline using computational fluid dynamics and discrete element method. *Applied Mathematical Modelling*, 55: 400-416.

Yang, L., Y. Guo, B. Shi, C. Kuang, W. Xu and S. Cao. 2012. Study of scour around submarine pipeline with a rubber plate or rigid spoiler in wave conditions. *Journal of waterway, port, coastal, and Ocean Engineering*, 138(6): 484-490.



Yang, S., Y. Guo, B. Shi, G. Yu, L. Yang and M. Zhang. 2021. Numerical investigation of the influence of the small pipeline on local scour morphology around the piggyback pipeline. *Ocean Engineering*, 240: 109973.

Zhao, J. and X. Wang. 2008. CFD Numerical Simulation of the Submarine Pipeline with Spoiler. In *ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 21- 27.