

Research Paper

Effect of the Insertion Depth of the Shield on the Pipeline Scour at Different Distances of the Pipe from the Bed

Mohadese. Nakhaee Sedghi¹, Yousef. Ramezani^{2*}, Mehdi. Dastourani³

- M.Sc. Graduate, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
 - Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
- (*- Corresponding Author Email: y.ramezani@birjand.ac.ir)

[10.22125/IWE.2022.358061.1667](https://doi.org/10.22125/IWE.2022.358061.1667)

Received:

June 27, 2022

Accepted:

December 24, 2022

Available online:

October 3, 2023

Keywords:**Clear water, Flow pattern, Pipeline, Scour, Shield.****Abstract**

With the advancement of science, human societies use transmission pipes to transport water and other fluids from the bed of seas, rivers, streams and natural drains. If pipelines pass through rivers and seabeds on their way, great care must be taken in their design. The main purpose of this study is to investigate the effect of the insertion depth of the shield on the pipeline scour at different distances of the pipe from the bed. This study was carried out in a flume with the length of 10 m and the width of 30 cm. Experiments were conducted under clear water condition ($u/u_c=0.95$). Uniform sediment with a median diameter of one millimeter ($D_{50}=1$ mm) was considered. In this research, a PVC pipe with an external diameter of 2.5 cm was used. The distance of the pipe from the bed (G) was considered based on a coefficient of the pipe diameter (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Also, the insertion depth of the shield (D_w) was selected according to a coefficient of the pipe diameter (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 and 2). The results of the experiments showed that in the case that the shield was not used, with the increase in the distance between the pipe and the bed, the maximum scour depth under the pipeline decreases. Also, when the way of working of the pipe and the shield is such that the shield is placed exactly on the surface of the sediment, the maximum scour depth is observed under the pipeline. For example, in the case of $G/D=0.5$ (D is the pipe diameter and G is the distance between the pipe and the bed), at different insertion depths of the shield, the maximum scour depth was observed when $D_w/D=0.5$ (D_w is the insertion depth of the shield). The maximum scour depth in this case was measured to be 60% more than the other cases. Also, with the increase in the insertion depth of the shield compared to the surface of the sediment, a further decrease in the scour depth under the pipeline was observed.

1. Introduction

The passage of the pipeline across the rivers to transport water, gas and oil causes local erosion in the area where the pipeline is located. The presence of the pipe changes the flow pattern around the pipe. These local changes in the flow lead to an increase in bed shear stress. As a result, the sediment transport capacity increases locally around the pipe and causes the sediments under the pipe to be washed away. As a result, the pipe is subject to failure, which can lead to financial and environmental losses. If pipelines pass through rivers and seabeds on their way, great care must be taken in their design. The main purpose of this study is to investigate the effect of the insertion depth of the shield on the pipeline scour at different distances of the pipe from the bed.

2. Materials and Methods

This study was carried out in a flume with the length of 10 m and the width of 30 cm. Experiments were conducted under clear water condition ($u/uc=0.95$). Uniform sediment with a median diameter of one millimeter ($D_{50}=1$ mm) was considered. In this research, a PVC pipe with an external diameter of 2.5 cm was used. The distance of the pipe from the bed (G) was considered based on a coefficient of the pipe diameter (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Also, the insertion depth of the shield (D_w) was selected according to a coefficient of the pipe diameter (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 and 2). The duration of the experiments was until the formed scour hole reached almost the equilibrium state. In this research, according to the observations, the duration of the experiments was considered to be 5 hours. A laser meter with an accuracy of ± 1 mm was used to take the topography in the sedimentary bed.

3. Results

The results of the experiments showed that in the case that the shield was not used, with the increase in the distance between the pipe and the bed, the maximum scour depth under the pipeline decreases. Also, when the way of working of the pipe and the shield is such that the shield is placed exactly on the surface of the sediment, the maximum scour depth is observed under the pipeline. For example, in the case of $G/D=0.5$ (D is the pipe diameter and G is the distance between the pipe and the bed), at different insertion depths of the shield, the maximum scour depth was observed when $D_w/D=0.5$ (D_w is the insertion depth of the shield). The maximum scour depth in this case was measured to be 60% more than the other cases. Also, with the increase in the insertion depth of the shield compared to the surface of the sediment, a further decrease in the scour depth under the pipeline was observed.

4. Discussion and Conclusion

By increasing the insertion depth of the shield compared to the surface of the sedimentary bed, the length of the separation zones in the upstream and downstream of the pipelines decreases. Also, the maximum positive velocities at the top of the pipeline and also the maximum negative velocities at the place of formation of vortices are reduced. As a result, it can be predicted that the shear stress will also decrease. By increasing the insertion depth of the shield compared to the surface of the sedimentary bed, the shear stress decreases, which reduces the scour around the pipeline.

5. Six important references

- 1) Oner, A. A. 2010. The flow around a pipeline with a spoiler. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 224 (1): 109-121.
- 2) Sadeghi, F., Y. Ramezani and H. Khozayemehzad. 2018. Effect of submergence ratio of parallel wall on bridge abutment scour. Alexandria engineering journal, 57 (4), 2659-2665.
- 3) Sumer, B. M. and J. Fredsøe. 1999. Wave scour around structures. Advances in coastal and ocean engineering, 191-249.
- 4) Wu, Y. and Y. M. Chiew. 2013. Mechanics of three-dimensional pipeline scour in unidirectional steady current. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 4 (1): 3-10.
- 5) Yang, L., B. Shi, Y. Guo and X. Wen. 2012. Calculation and experiment on scour depth for submarine pipeline with a spoiler. Ocean Engineering, 55: 191-198.
- 6) Zhang, Z., B. Shi, Y. Guo and L. Yang. 2013. Numerical investigation on critical length of impermeable plate below underwater pipeline under steady current. Science China Technological Sciences, 56 (5): 1232-1240.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank University of Birjand for providing the facilities to carry out the laboratory experiments of this M.Sc. thesis

اثر عمق کارگذاری سپر بر آبشستگی خط لوله در فواصل مختلف لوله از بستر

محدثه نخعی صدقی^۱، یوسف رضانی^{۲*}، مهدی دستورانی^۳

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

چکیده

با پیشرفت علم، جوامع بشری برای عبور آب و سایر سیال‌ها از بستر دریاها، رودخانه‌ها، نهرها و زهکش‌های طبیعی از لوله‌های انتقال استفاده می‌کنند. خطوط لوله اگر در مسیر خود از رودخانه‌ها و بستر دریاها عبور کنند، در طراحی آن‌ها باید دقت فراوانی به کار برده شود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثر عمق کارگذاری سپر بر آبشستگی خطوط لوله در فواصل مختلف لوله از بستر می‌باشد. آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر انجام شدند. همچنین، آزمایش‌های این تحقیق در شرایط آب زلال ($u/u_c = 0/95$) صورت پذیرفت. رسوبات یکنواخت با قطر متوسط یک میلی‌متر ($d_{50} = 1 \text{ mm}$) در نظر گرفته شد. در این پژوهش، یک لوله از جنس PVC با قطر خارجی ۲/۵ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. فاصله لوله از بستر (G) بر اساس ضریبی از قطر لوله (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱) در نظر گرفته شد. همچنین عمق کارگذاری سپر (D_w) با توجه به ضریبی از قطر لوله (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲) انتخاب گردید. نتایج آزمایشات نشان داد که در حالتی که سپر مورد استفاده قرار نگرفت، با افزایش فاصله لوله از بستر، حداکثر عمق آبشستگی زیر خط لوله کاهش می‌یابد. همچنین، زمانی که نحوه کارگذاری لوله و سپر طوری باشد که سپر دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار گیرد، حداکثر عمق آبشستگی زیر خط لوله مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در حالت $G/D = 0/5$ (D قطر لوله و G فاصله لوله از بستر)، در اعماق مختلف کارگذاری سپر، حداکثر عمق آبشستگی زمانی مشاهده گردید که $D_w/D = 0/5$ (D_w عمق کارگذاری سپر) باشد. حداکثر عمق آبشستگی در این حالت ۶۰ درصد بیشتر از حالت‌های مختلف کارگذاری سپر اندازه‌گیری گردید. همچنین، با افزایش عمق کارگذاری سپر نسبت به سطح بستر رسوبی، کاهش بیشتری در عمق آبشستگی زیر خط لوله مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: آب زلال، آبشستگی، الگوی جریان، سپر، لوله

۱ - دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲ - دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

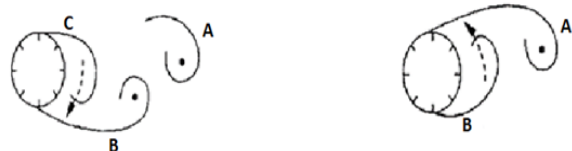
۳ - استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(* - ایمیل نویسنده مسئول: (Email: y.ramezani@birjand.ac.ir)

مقدمه

عبور خط لوله از عرض رودخانه‌ها، برای انتقال آب، گاز و نفت، باعث ایجاد آبشستگی موضعی در محدوده استقرار خط لوله می‌گردد. وجود لوله باعث می‌شود الگوی جریان در اطراف لوله تغییر یابد. این تغییرات موضعی در جریان منجر به افزایش تنش برشی بستر می‌شود. در نتیجه ظرفیت انتقال رسوب به‌طور موضعی در اطراف لوله افزایش یافته و باعث شسته شدن رسوبات زیر لوله می‌شود. در نتیجه لوله در معرض شکست قرار می‌گیرد که می‌تواند منجر به خسارات مالی و زیست محیطی مهلکی شود. بنابر اهمیت موضوع، تاکنون مطالعات زیادی در مورد آبشستگی اطراف خطوط لوله صورت گرفته است و یافتن عوامل تأثیرگذار بر شکل آبشستگی و سرعت پیشروی آن امری مهم به حساب می‌آید.

شکل (۱) میدان جریان در حین رخداد آبشستگی اطراف لوله را نشان می‌دهد. هنگامی که لوله در بستر رودخانه یا دریا قرار داده می‌شود، باعث تغییر الگوی جریان می‌شود. جدایی لایه مرزی توسط گرادیان فشار معکوس که در بخش فوقانی و تحتانی لوله رخ می‌دهد، باعث ایجاد دو لایه برشی در بخش فوقانی و تحتانی لوله می‌شود و زمانی که دو لایه برشی با یکدیگر اندرکنش داشته باشند پدیده گردابه افشانی رخ می‌دهد. یکی از مهمترین پدیده‌هایی که در جریان دنباله اتفاق می‌افتد و در توسعه حفره آبشستگی مؤثر است، وقوع پدیده گردابه افشانی می‌باشد (Sumer and Fredsøe, 1999).



(ب)

(الف)

شکل (۱): میدان جریان در حین رخداد آبشستگی پیرامون خط لوله (Sumer and Fredsøe, 1999)

عطائیان (۱۳۹۰) به بررسی عمق آبشستگی موضعی در اطراف خط لوله متقاطع با یک آبراهه مستقیم پرداخت.

معادله عمومی آبشستگی موضعی با روش تحلیل ابعادی به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد مؤثر نظیر عدد فرود جریان (Fr)، موقعیت عمودی لوله (e/D) و اندازه رسوبات بستر (d_{50}/D)، ارائه داده شد. نتایج نشان داد، هر سه پارامتر Fr ، e/D و d_{50}/D ، تأثیر معنی‌داری بر حداکثر عمق آبشستگی داشته که با افزایش عدد فرود و قطر لوله، افزایش پیدا می‌کند.

خاجه زاده مسلمی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از پوشش گیاهی در اطراف دو خط لوله، میزان آبشستگی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد هر چه تراکم ساقه و برگ پوشش گیاهی بیشتر باشد موجب کاهش آبشستگی و پایداری رسوبات بستر می‌گردد.

میرعلیزاده و همکاران (۱۳۹۲)، فرآیند آبشستگی در اطراف خطوط لوله دریایی با در نظر گرفتن ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر لوله را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد خطوط جریان زیرزمینی شکل گرفته، طولانی‌تر شده و مانع از غلبه گرادیان فشار بر وزن مستغرق ذرات رسوبی بستر و در نتیجه مانع از وقوع پدیده رگاب می‌شوند. محمدی و حکیم زاده (۱۳۹۴) به منظور کاهش آبشستگی در اطراف خطوط لوله فراساحلی، تعدادی آزمایش تجربی جهت بررسی تأثیر اضافه شدن یک تیغه طولی نفوذناپذیر به زیر لوله انجام دادند. هدف از انجام این تحقیق، کاهش دادن گرادیان هیدرولیکی زیر لوله بوده است. مدل فیزیکی این مطالعه شامل سه لوله با قطرهای متفاوت می‌باشد که هر کدام از لوله‌ها را با شش عرض نسبی مختلف تیغه آزمایش شدند. هم‌چنین تعدادی شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل فیزیکی و شبیه‌سازی عددی همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند و نشان‌دهنده کاهش چشمگیر آبشستگی در زیر لوله بعد از یک عرض نسبی مشخص تیغه مورد استفاده بود.

هدایت بهرامی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی کنترل آبشستگی با استفاده از صفحه مستغرق در زیر لوله‌های مستغرق با فاصله‌های مختلف از بستر تحت جریان یک-سویه پرداختند. این آزمایش‌ها در دو حالت (۱) استفاده از صفحه مستغرق (۲) بدون استفاده از صفحه مستغرق انجام شده است. در حالت همراه با صفحه مستغرق از یک صفحه



جدایی اولیه در پایین دست لوله را معادل $2/8D$ برآورد نمودند.

Gao et al., (2006) به بررسی قرارگیری لوله بر روی بستر فرسایش پذیر تحت جریان ثابت و ارتعاشات جریان پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که قرارگیری لوله بر روی بستر فرسایش پذیر و واقع شدن آن در معرض جریان، باعث ایجاد اندرکنش بین جریان، لوله و رسوبات می‌شود. ایجاد آبشستگی در زیر خطوط لوله و یا وجود دهانه آزاد، به دلیل ناهموازی‌های طبیعی بستر دریا، در شرایط خاص می‌تواند باعث بروز پدیده فرافکنش گردابه‌ها و ایجاد ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها در خطوط لوله شود. امروزه به همراه خطوط لوله انتقال، با نصب پیگیبک لاین^۱ مسیری را برای عبور کابل‌های برق و یا مخابرات در نظر می‌گیرند. چنین طرحی ممکن است شرایط آبشستگی اطراف لوله را تحت تأثیر قرار دهد.

Dey and Singh (2008) آزمایش‌های زیادی بر روی آبشستگی زیر خطوط لوله قرار گرفته بر روی بستر تحت شرایط آب زلال و جریان ماندگار با استفاده از رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت انجام دادند. مشاهدات آن‌ها نشان داد تا حدی عمق تعادل آبشستگی با افزایش عمق جریان نزدیک‌شونده افزایش یافته، و سپس افزایش عمق تأثیری بر عمق تعادل آبشستگی نخواهد داشت. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که هرچه ماسه از نظر دانه‌بندی غیریکنواخت‌تر باشد، به علت تشکیل لایه سنگفرش در داخل حفره آبشستگی، عمق آبشستگی به میزان زیادی کاهش می‌یابد.

Oner (2010) به بررسی الگوی جریان اطراف خطوط لوله همراه یک اسپویلر پرداخت. او در این پژوهش، با استفاده از یک سرعت‌سنج، جریان دو بعدی، جریان پایدار و جریان متلاطم اطراف یک خط لوله افقی همراه با اسپویلر را به طور آزمایشگاهی بررسی نمود. اثر اسپویلر برای اعداد رینولدزهای ۸۴۰، ۱۵۰۰، ۴۱۵۰ و ۹۵۰۰ بر اساس قطر لوله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد وجود اسپویلر باعث افزایش سرعت آبشستگی، کاهش زمان تعادل و افزایش مناطق جدایی بالادست و پایین دست لوله می‌شود.

مستغرق به ضخامت ۵ میلی‌متر، به طول ۲۵ سانتی‌متر (عرض فلوم) و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر (عمق بستر رسوبی) که بدون فاصله و با فاصله $2D$ از مرکز لوله قرار گرفت، استفاده شد. نتایج نشان داد که وقتی صفحه مستغرق در پایین دست لوله قرار می‌گیرد، آبشستگی در جلوی لوله به طور میانگین حدود ۷۰ درصد کاهش داشت.

مرادی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی توسعه زمانی آبشستگی اطراف خطوط لوله با بهینه‌یابی موقعیت نصب پیگیبک لاین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد آبشستگی لوله به همراه پیگیبک لاین تا ۲ برابر نسبت به لوله ساده افزایش می‌یابد. پیگیبک لاین با شکل مقطع مثلثی و زاویه نصب منفی ۱۳۵ درجه، دارای بهترین عملکرد بود.

بیژنوند و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی آزمایشگاهی مشخصات حفره آبشستگی اطراف خطوط لوله عبوری از عرض رودخانه در شرایط عمق‌های کارگذاری مختلف در جریان ماندگار پرداختند. در این آزمایش‌ها از سه قطر لوله (۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر) و چهار عمق کارگذاری (یک چهارم قطر لوله زیر بستر، روی بستر، یک چهارم قطر لوله بالای بستر و نصف قطر لوله بالای بستر) استفاده کردند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که بالاترین میزان آبشستگی برای لوله‌ای که در عمق کارگذاری یک چهارم قطر لوله بالای بستر قرار داشت، اتفاق افتاد.

Hansen et al., (1991) نحوه توسعه حفره آبشستگی زیر خط لوله را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که اگر لوله در ابتدا کمی زیر بستر قرار داده شود، توسعه حفره آبشستگی را کندتر می‌کند و بر حسب مقدار جایگذاری لوله زیر بستر، ممکن است توسعه حفره آبشستگی متوقف شود. Hatipoglu and Avci (2003) در یک مطالعه آزمایشگاهی، طول نواحی جدایی اولیه در بالادست و پایین دست لوله را مورد بررسی قرار دادند. برای لوله دایره‌ای با زبری معادل $0/5$ میلی‌متر واقع روی بستر، طول ناحیه جدایی به ترتیب برابر $1D$ و $6/7D$ برای عدد رینولدز $Re=26700$ به دست آمد. آن‌ها برای ایجاد شرایط آزمایشگاهی برای لوله دایره‌ای نیمه مدفون، طول ناحیه

آبشستگی پیرامون لوله را تا ۲۱ درصد کاهش اما عمق آبشستگی را ۲۲ درصد افزایش داد. هم‌چنین لوله و اسپویلر زیر آن، عمق آبشستگی را ۵۵ درصد با عرض نسبی ۰/۲۶ و قطر لوله ۴/۸ سانتی متر در $Fr=0/42$ افزایش داد.

Asrari et al., (2021) به بررسی آبشستگی موضعی زیر خطوط پیگیبک لاین تحت شرایط آب زلال پرداختند. خطوط پیگیبک لاین شامل دو لوله بود که لوله کوچکتر روی لوله بزرگتر با فاصله ثابت قرار گرفته بود. هدف این مطالعه بررسی عوامل تأثیرگذار روی آبشستگی شامل قطر لوله ها و فاصله بین آنها در شرایط جریان ماندگار بوسیله مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش فاصله بین لوله‌ها، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. با این حال، افزایش قطر لوله کوچکتر منجر به افزایش حداکثر عمق آبشستگی شد. در مرحله دوم، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل عددی Flow-3D انجام شد که نشان داد مدل عددی مذکور ابزار مناسبی برای بررسی عددی این مطالعه است و نتایج شبیه‌سازی‌های مدل عددی تطابق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی داشت.

با توجه به پیشینه تحقیق ارائه شده، به نظر می‌رسد که بهترین راه حل کنترل آبشستگی در زیر خطوط لوله، جلوگیری از وقوع پدیده‌ی رگاب در زیر آن است. یکی از روش‌های کنترل آبشستگی پیرامون خطوط لوله، استفاده از سپر می‌باشد. هدف این تحقیق، اثر عمق کارگذاری سپر بر آبشستگی خطوط لوله در فواصل مختلف لوله از بستر می‌باشد که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

هدف از آنالیز ابعادی شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر مدل فیزیکی و به دست آوردن نسبت‌های بی‌بعد و بیان ارتباط بین این نسبت‌ها می‌باشد. در این پژوهش، به منظور آنالیز ابعادی متغیرهای مؤثر بر آبشستگی پیرامون خط لوله

(Yang et al., (2012) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که عدد فرود جریان و ارتفاع باله اثرات مؤثری در عمق آبشستگی زیر خطوط لوله افقی دارد. سپس فرمول‌هایی جهت پیش‌بینی عمق آبشستگی بر اساس مشخصات سرعت جریان در زیر خط لوله در دو حالت با باله و بدون باله پیشنهاد دادند.

Zhang et al., (2013) به بررسی عددی کنترل آبشستگی با استفاده از یک صفحه نفوذناپذیر افقی در زیر لوله در جریان یکنواخت پرداختند. این پژوهش با استفاده از روش جدیدی با قرار دادن لوله روی یک صفحه نفوذناپذیر افقی (تخت) انجام شد. دو روش حجم محدود (FVM) و حجم مایع (VOF) برای شبیه‌سازی الگوی جریان و توزیع فشار در عمق‌های مختلف سطح آب استفاده شد. نتایج نشان داد وقتی عمق آب کمتر از $5D$ (قطر لوله) شود، اثر عمق آب در اختلاف فشار قابل توجه است. تفاوت فشار بین دو نقطه انتهایی صفحات با افزایش طول صفحه کاهش می‌یابد.

Wu and Chiew (2013) خصوصیات جریان اطراف لوله را در محدوده اعداد رینولدز 780 تا $10^6 \times 1/15$ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش PIV جهت اندازه‌گیری میدان سرعت و سری زمانی سرعت استفاده نمودند. با بررسی میدان جریان برای عدد رینولدز 780 مشاهده شد که در محدوده $0/3 \leq e/D \leq 0$ در بالادست لوله، گردابه‌ای در مجاورت بستر و لوله شکل می‌گیرد. با کاهش e/D ، اندازه گردابه و فاصله قائم مرکز گردابه و بستر افزایش می‌یابد. در مواردی که اندازه گردابه بزرگ باشد، این گردابه به‌صورت مانعی در برابر جریان عمل کرده و با جلوگیری از ورود جریان به زیر لوله، سبب ضعیف شدن جریان زیر لوله می‌شود.

Jabari et al., (2021) عملکرد کنترل آبشستگی یک اسپویلر نصب شده در زیر یک لوله غوطه‌ور که روی بستر رودخانه گذاشته شده بود را از طریق آزمایشات در یک فلوم پلکسی گلاس مستقیم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌ها را با چهار اندازه لوله مختلف، چهار دبی جریان و چهار عرض اسپویلر در شرایط آب زلال انجام دادند. نتایج آن‌ها حاکی از کارایی اسپویلر متصل در کاهش طول پروفیل آبشستگی اما افزایش عمق آبشستگی بود. به طور میانگین اسپویلر متصل شده، آبشستگی طولی پروفیل



آشفته بودن جریان در این محدوده، می‌توان عدد رینولدز و اثر لزجت را نادیده گرفت.

$$f\left(\frac{d_s}{D}, \frac{D_w}{D}, \frac{G}{D}\right)=0 \quad (3)$$

فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بیرجند انجام شد (شکل ۲). جریان آب توسط یک الکتروپمپ گریز از مرکز به قدرت ۵/۵ kw و حداکثر پمپاژ ۱۸۶ متر مکعب بر ساعت از مخزن اصلی وارد فلوم می‌شود. دبی آب توسط یک شیر ورودی تنظیم و توسط دبی‌سنج الکترومغناطیس، اندازه‌گیری می‌گردد. عمق آب با استفاده از یک دریچه انتهایی تنظیم می‌شود. بستر رسوبی مورد استفاده شده به طول ۲/۲ متر و عمق ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۳). نمای جانبی بستر رسوبی مورد استفاده در پژوهش نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. فاصله ابتدای فلوم تا ابتدای بستر رسوبی، ۳/۹ متر در نظر گرفته شد. این فاصله باعث می‌شود که جریان کاملاً توسعه یافته شود. فاصله انتهایی بستر رسوبی تا انتهای فلوم نیز ۳/۹ متر در نظر گرفته شد. این فاصله باعث می‌شود نیم‌رخ سطح آب روی بستر رسوبی تحت تأثیر دریچه نباشد و سبب یکنواختی نیم‌رخ سطح آب روی بستر رسوبی می‌شود. جهت کاهش تلاطم جریان ورودی به فلوم نیز از یک صفحه آرام کننده در ابتدای فلوم استفاده شد.

از روش پای - باکینگهام^۱ استفاده شد. مطابق تئوری پای - باکینگهام، چنانچه در یک پدیده هیدرولیکی تعداد n متغیر دخیل باشد و این متغیرها دارای m بعد باشند، در آن صورت می‌توان تعداد $n-m$ پارامتر بی‌بعد را به وجود آورد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۵).

به طور کلی پارامترهای مؤثر در این پژوهش را می‌توان به صورت رابطه ۱ خلاصه کرد:

$$f(u, u_c, D, D_w, G, d_s, D_{50}, g, \gamma, \rho, \rho_s, \mu)=0 \quad (1)$$

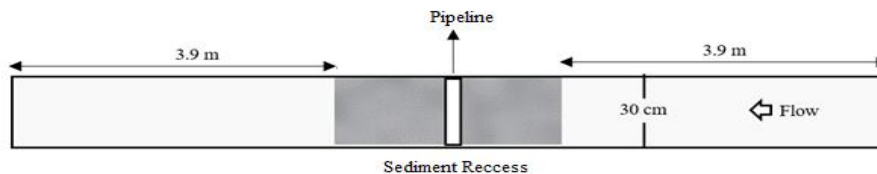
که در آن u سرعت جریان، u_c سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوبات، D قطر لوله، D_w عمق کارگذاری سپر، G فاصله لوله از بستر، d_s حداکثر عمق آبشستگی، D_{50} قطر رسوب، g شتاب گرانش، γ عمق آب، ρ جرم مخصوص آب، ρ_s جرم مخصوص ذره رسوب و μ لزجت دینامیکی است. تعداد ۱۲ متغیر تأثیرگذار در این پژوهش به ۹ پارامتر بی‌بعد تبدیل شدند (رابطه ۲):

$$f\left(\frac{u}{\sqrt{gD}}, \frac{u_c}{\sqrt{gD}}, \frac{D_w}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{\gamma}{D}, \frac{G}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\mu}{\rho\sqrt{gD^3}}\right)=0$$

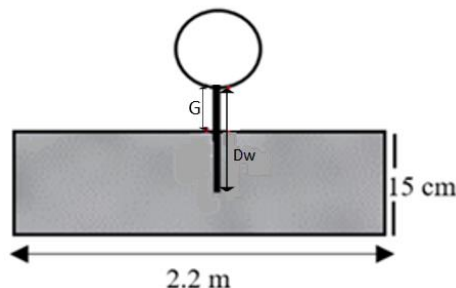
با انجام آنالیز ابعادی و استفاده از تئوری پای - باکینگهام و همچنین حذف متغیرهای تکراری و بی‌تأثیر در این تحقیق رابطه ۳ استخراج گردید. لازم به ذکر است در این تحقیق دبی جریان، عمق آب و قطر متوسط ذرات رسوبی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین عدد رینولدز نیز بیشتر از ۲۰۰۰ محاسبه گردید که به دلیل



شکل (۲): نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل (۳): نمای پلان فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش



شکل (۴): نمای جانبی بستر رسوبی مورد استفاده در پژوهش

کشیده شد. روند پایین کشیدن دریاچه انتهایی تا جایی ادامه پیدا کرد که حرکت عمومی رسوبات در بستر رسوبی مشاهده شود. در این پژوهش، دبی ۱۶ لیتر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. در این دبی، آستانه حرکت رسوبات در عمق آب ۱۹/۱ سانتی‌متر مشاهده شد. عمق انجام آزمایش نیز بر مبنای $\frac{u}{u_c} = 0.95$ برابر $\frac{20}{1}$ سانتی‌متر انتخاب گردید.

رسوب

رسوبات یکنواخت با قطر متوسط یک میلی‌متر ($d_{50} = 1 \text{ mm}$) در نظر گرفته شد. معیار یکنواختی رسوب بر اساس مقدار انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی (σ_g) است. انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی (σ_g) به صورت رابطه ۴ به دست می‌آید:

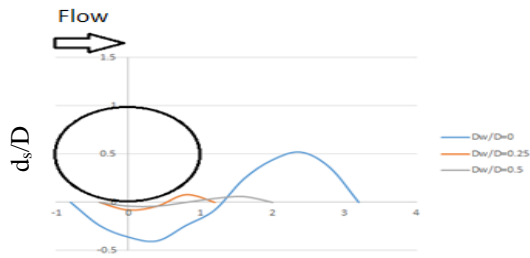
$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (4)$$

طبق نتایج تحقیقات دی و باربویا، رسوبات در صورتی یکنواخت در نظر گرفته خواهند شد که انحراف معیار هندسی آن‌ها کمتر از ۱/۴ باشد. انحراف معیار هندسی در این پژوهش $\sigma_g = 1/27$ به دست آمد که خود نشان‌دهنده یکنواختی ذرات رسوبی است (Dey and Barbhuiya, 2005).

انتخاب لوله، عمق کارگذاری سپر و فاصله لوله از

شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در حد آستانه حرکت رسوبات ($\frac{u}{u_c} = 0.95$) انجام شد. دلیل انتخاب شرایط آب زلال این است که در این شرایط، حداکثر عمق آبشستگی بدست می‌آید. دلیل انتخاب $\frac{u}{u_c} = 0.95$ هم این است که هر چه این نسبت به ۱ نزدیک‌تر باشد زمان تعادل عمق آبشستگی کمتر خواهد بود. هر چه صادقی و همکاران بیان کردند آبشستگی آب زلال زمانی اتفاق می‌افتد که حرکت رسوبات از بالادست سازه رخ ندهد. به عبارت بهتر مواد رسوبی انتقال یافته از حفره آبشستگی دوباره جایگزین نشود (Sadeghi et al., 2018). از طرف دیگر، آلابی بیان کرد آبشستگی بستر زنده زمانی رخ می‌دهد که انتقال رسوب در کل بستر رسوبی صورت گیرد و رسوبات جابجا شده از حفره آبشستگی به طور پیوسته توسط رسوبات حمل شده از بالادست جریان، جایگزین شود (Alabi, 2006). آزمایش آستانه حرکت رسوب در آزمایشگاه انجام شد. بدین منظور ابتدا بستر رسوبی (بدون حضور لوله در فلوم) کاملاً مسطح شده و همچنین دریاچه انتهایی کاملاً بالا کشیده شد. در ادامه فلوم با نرخ کم (به منظور جلوگیری از آبشستگی ناخواسته ناشی از جریان ورقه‌ای) و به آرامی به وسیله آب پر شد و سپس دبی مورد نظر تنظیم گردید. پس از تنظیم دبی، دریاچه انتهایی به آرامی پایین



شکل (۵): پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده پیرامون لوله در $G/D=0$ و در $D_w/D=0, 0.25$ و 0.5

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود کارگذاری سپر در زیر لوله نسبت به حالت بدون استفاده از سپر، باعث کاهش عمق آبشستگی در زیر خط لوله شده است. وجود سپر در زیر لوله مانع عبور جریان از زیر لوله شده و همچنین باعث کاهش پدیده رگاب و فرسایش تونلی بر اثر اختلاف فشار در بالادست و پایین دست لوله می‌شود. در 0.25 و 0.5 ، $D_w/D=0$ ، عمق بی‌بعد آبشستگی زیر لوله (d_s/D) به ترتیب 0.36 ، 0.08 و 0.04 اندازه‌گیری گردید. همچنین، در 0.5 و 0.25 ، $D_w/D=0$ ، موقعیت قرارگیری حداکثر عمق پروفیل آبشستگی به ترتیب در $x/D=0.4$ ، صفر و صفر مشاهده شد. حداکثر عمق پروفیل آبشستگی نیز به ترتیب 0.4 ، 0.08 و 0.04 برابر قطر لوله اندازه‌گیری شد. همچنین، پیشروی پروفیل طولی آبشستگی به ترتیب $3/2$ ، $1/2$ و 2 برابر قطر لوله و ارتفاع تپه رسوبگذاری نیز به ترتیب 0.52 ، 0.08 و 0.06 برابر قطر لوله اندازه‌گیری شد.

شکل ۶ پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده پیرامون لوله در $G/D=0.5$ و در $1/5$ و $1/25$ ، 1 ، 0.75 ، 0.5 ، 0.25 ، $D_w/D=0$ را نشان می‌دهد.

بستر

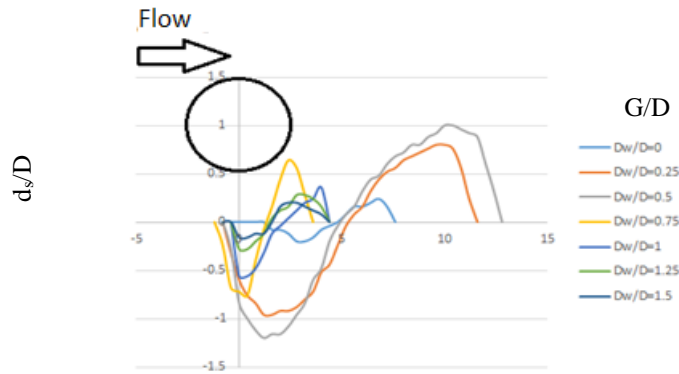
در این پژوهش، یک لوله از جنس PVC با قطر خارجی $2/5$ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. فاصله لوله از بستر (G) بر اساس ضریبی از قطر لوله (0 ، 0.25 ، 0.5 ، 0.75 ، 1) در نظر گرفته شد. سپر مورد استفاده در این پژوهش از جنس پلگسی گلاس می‌باشد. همچنین عمق کارگذاری سپر (D_w) با توجه به ضریبی از قطر لوله (0 ، 0.25 ، 0.5 ، 0.75 ، 1 ، 1.25 ، 1.5 ، 1.75 و 2) انتخاب گردید. مدت آزمایش‌ها تا زمانی بود که حفره آبشستگی ایجاد شده تقریباً به حالت تعادل رسیده باشد. در این پژوهش با توجه مشاهدات صورت گرفته، امکانات آزمایشگاهی موجود و مقایسه‌ای بودن نتایج تحقیق، مدت زمان انجام آزمایش‌ها ۵ ساعت در نظر گرفته شد. بعد از اتمام هر آزمایش، شیر ورودی تنظیم دبی به آرامی بسته و سپس پمپ خاموش می‌شد. برای برداشت توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی از یک مترلیزری با دقت ± 1 mm استفاده شد.

نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا به مقایسه و بررسی پروفیل طولی آبشستگی پیرامون خط لوله در حالات مختلف پرداخته می‌شود. سپس، اثر عمق بی‌بعد کارگذاری سپر (D_w/D) و اثر فاصله بی‌بعد لوله از بستر (G/D) بر عمق بی‌بعد آبشستگی زیر خط لوله (d_s/D) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مقایسه و بررسی پروفیل طولی آبشستگی پیرامون خط لوله

شکل ۵ پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده پیرامون لوله در $G/D=0$ و در 0.5 و 0.25 ، $D_w/D=0$ را نشان می‌دهد. محور افقی نیز x/D می‌باشد. x فاصله طولی پروفیل آبشستگی است.

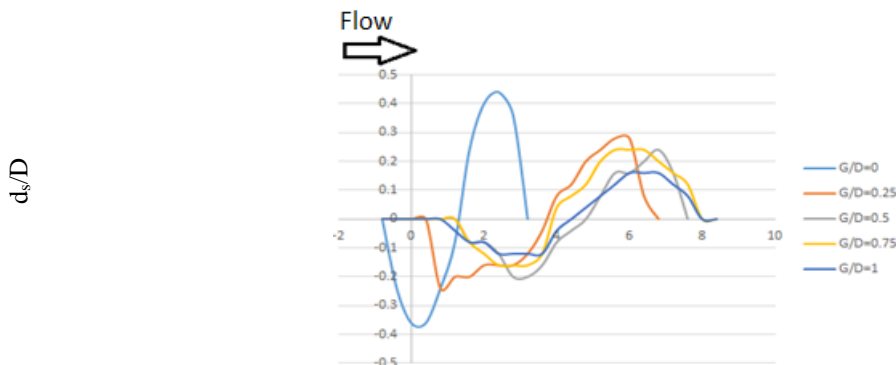


شکل (۶): پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده پیرامون لوله در $G/D=0/5$ و در $0/5$ ، $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $D_w/D=0$

عمق آبشستگی زیر لوله مشاهده می‌شود. همچنین موقعیت قرارگیری حداکثر عمق پروفیل آبشستگی به ترتیب در x/D $0/4$ ، $0/4$ ، $0/4$ ، $0/4$ ، $1/2$ ، $1/6$ ، $3/2$ ، $0/76$ ، $0/2$ ، $0/96$ ، $1/2$ ، $0/76$ ، $0/56$ ، $0/28$ و $0/16$ برابر قطر لوله اندازه‌گیری شد. همچنین، پیشروی پروفیل طولی آبشستگی به ترتیب $0/76$ ، $1/16$ ، $12/8$ ، $3/6$ ، $4/4$ ، $4/4$ ، $4/4$ و $4/4$ برابر قطر لوله و ارتفاع تپه رسوبگذاری نیز به ترتیب $0/24$ ، $0/8$ ، 1 ، $0/64$ ، $0/36$ ، $0/28$ و $0/2$ برابر قطر لوله اندازه‌گیری گردید.

شکل ۷ پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده پیرامون لوله در حالت بدون استفاده از سپر ($D_w/D=0$) و در 1 و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶، در شرایط $D_w/D=0$ ، با افزایش فاصله لوله از بستر، کاهش در عمق بی‌بعد آبشستگی مشاهده می‌شود. در $1/5$ و $1/25$ ، 1 ، $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $D_w/D=0$ عمق بی‌بعد آبشستگی زیر لوله (d_s/D) به ترتیب صفر، $0/6$ ، $0/84$ ، $0/72$ ، $0/56$ ، $0/28$ و $0/16$ اندازه‌گیری گردید. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش عمق کارگذاری سپر در زیر لوله، فضای بین بستر رسوبی و سپر کاهش پیدا کرده که منجر به افزایش سرعت جریان و فرسایش تونلی در زیر لوله می‌شود. همچنین این روند تا زمانی که سپر دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار گیرد، ادامه پیدا می‌کند. با رفتن سپر در زیر بستر رسوبی، کاهش



شکل (۷): پروفیل طولی آبشستگی ایجاد شده پیرامون لوله در حالت بدون استفاده از سپر ($D_w/D=0$) و در 1 و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، $G/D=$

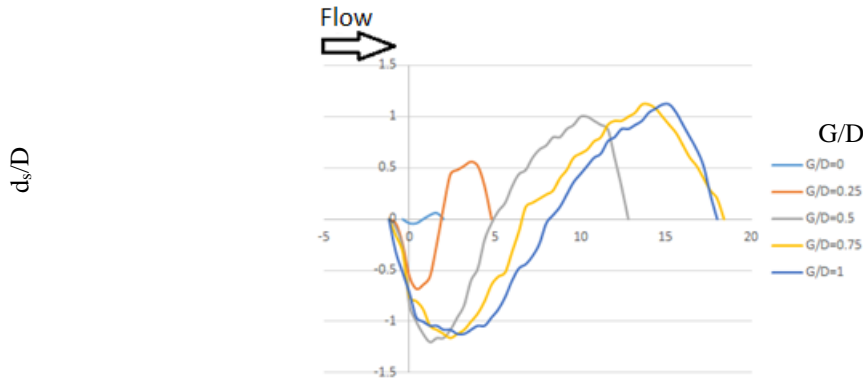
است که لوله دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار گیرد. موقعیت قرارگیری حداکثر عمق پروفیل آبشستگی به ترتیب در x/D $0/4$ ، $0/8$ ، $3/2$ ، $0/16$ و $0/12$ مشاهده گردید. حداکثر عمق پروفیل آبشستگی نیز به ترتیب $0/36$ ، $0/24$ ، $0/2$ و $3/2$ و $3/6$ برابر قطر لوله اندازه‌گیری شد. همچنین،

در شکل ۷، افزایش فاصله لوله از بستر باعث کاهش عمق بی‌بعد آبشستگی زیر لوله می‌شود. با توجه به شکل ۷، در 1 و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، $G/D=0$ عمق بی‌بعد آبشستگی زیر لوله به ترتیب صفر، صفر، صفر و صفر مشاهده شده است. حداکثر عمق بی‌بعد آبشستگی زیر لوله در حالتی



شکل ۸، به بررسی پروفیل طولی آبستتگی ایجاد شده پیرامون لوله در حالت $D_w/D=0.5$ و در ۱ و 0.75 ، 0.5 ، 0.25 و 0.0 می پردازد.

پیشروی پروفیل طولی آبستتگی به ترتیب $0.3/2$ ، $0.6/18$ ، $0.7/6$ و $0.8/4$ و $0.8/4$ برابر قطر لوله و ارتفاع تپه رسوبگذاری نیز به ترتیب $0.44/0.28$ ، $0.24/0.24$ و $0.16/0.16$ برابر قطر لوله اندازه گیری گردید.



شکل (۸): پروفیل طولی آبستتگی ایجاد شده پیرامون لوله در حالت $D_w/D=0.5$ و در ۱ و 0.75 ، 0.5 ، 0.25 و 0.0

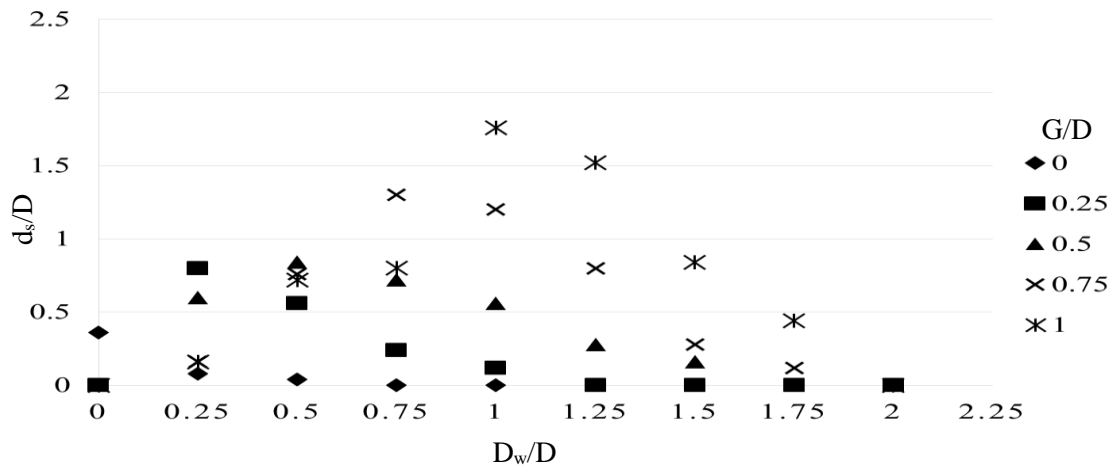
پروفیل طولی آبستتگی به ترتیب ۲، $4/8$ ، $12/8$ ، $18/4$ و ۱۸ برابر قطر لوله مشاهده گردید. ارتفاع تپه رسوبگذاری نیز به ترتیب $0.06/0.56$ ، $0.1/1.12$ و $1/1.12$ برابر قطر لوله اندازه گیری شد.

نتایج پژوهش حاضر تطابق خوبی با نتایج عطائیان (۱۳۹۰) و هدایت بهرامی و همکاران (۱۳۹۵) داشته و بیانگر آن می باشد که افزایش فاصله لوله از بستر باعث کاهش عمق آبستتگی می شود.

بررسی اثر عمق کارگذاری سپر و فاصله لوله از بستر بر عمق آبستتگی زیر لوله

در شکل ۹ اثر عمق کارگذاری سپر بر عمق آبستتگی زیر لوله در فواصل مختلف لوله از بستر نشان داده شده است.

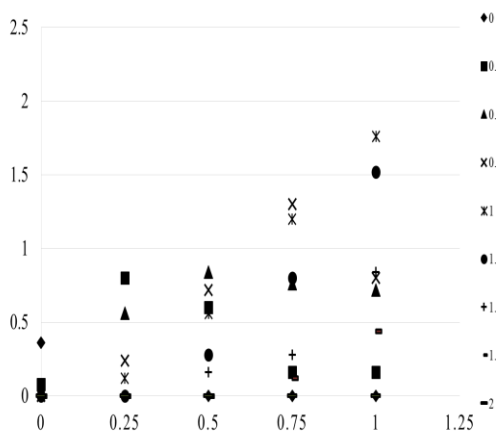
با توجه به شکل ۸، وقتی سپر دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار گیرد، حداکثر عمق بی بعد آبستتگی در زیر لوله مشاهده می شود. با افزایش فاصله لوله از بستر، عمق بی بعد آبستتگی زیر لوله کمتر می شود. علت این امر آن است که هر چه فاصله کمتر باشد، سرعت جریان عبوری بیشتر شده و تنش برشی نیز افزایش می یابد. با افزایش فاصله بین لوله و بستر، تنش برشی نیز کاهش می یابد. کاهش تنش برشی با کاهش عمق بی بعد آبستتگی زیر لوله همراه است. با توجه به شکل ۸، در ۱ و 0.75 ، 0.5 ، 0.25 و $G/D=0$ ، عمق بی بعد آبستتگی زیر لوله به ترتیب $0.04/0.56$ ، $0.076/0.84$ و 0.072 اندازه گیری شد. موقعیت قرارگیری حداکثر عمق پروفیل آبستتگی به ترتیب در x/D $0.2/0.4$ ، $0.14/0.8$ ، $0.3/3$ مشاهده شد. حداکثر عمق پروفیل آبستتگی نیز به ترتیب $0.04/0.68$ ، $0.1/1.2$ و $1/1.12$ برابر قطر لوله اندازه گیری گردید. همچنین، پیشروی



شکل (۹): اثر عمق کارگذاری سپر بر عمق آبستنگی زیر لوله در فواصل مختلف لوله از بستر

مشاهده شد. در $D_w/D=1/5$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب صفر، صفر، $0/16$ ، $0/28$ و $0/84$ اندازه گیری گردید. در $D_w/D=1/75$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب صفر، صفر، صفر، $0/12$ و $0/44$ مشاهده گردید. همچنین، در $D_w/D=2$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله در همه حالات صفر مشاهده گردید.

در شکل ۱۰ اثر فاصله لوله از بستر بر عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله در اعماق مختلف کارگذاری سپر نشان داده شده است.



شکل (۱۰): اثر فاصله لوله از بستر بر عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله در اعماق مختلف کارگذاری سپر

با توجه به شکل ۹، نتایج نشان می دهد در حالت $D_w/D=0$ ، با افزایش G/D ، عمق بی بعد آبستنگی (d_s/D) زیر لوله کاهش می یابد. افزایش فاصله لوله از بستر باعث کاهش عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله می شود. همچنین در یک عمق کارگذاری سپر ثابت، با افزایش G/D ، فضای بین بستر رسوبی و سپر افزایش پیدا کرده که باعث کاهش سرعت جریان عبوری و کاهش تنش برشی و همچنین کاهش فرسایش تونلی می شود. همچنین حداکثر عمق بی بعد آبستنگی در حالتی مشاهده می شود که لوله دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار دارد. بنابراین در $D_w/D=0$ ، در حالت ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/12$ ، صفر، صفر و صفر اندازه گیری شد. در $D_w/D=0/25$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/08$ ، $0/18$ ، $0/16$ و $0/16$ مشاهده گردید. در $D_w/D=0/5$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/04$ ، $0/56$ ، $0/84$ ، $0/76$ و $0/72$ اندازه گیری گردید. در $D_w/D=0/75$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب صفر، $0/24$ ، $0/72$ ، $1/3$ و $0/8$ مشاهده گردید. همچنین، در $D_w/D=1$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب صفر، $0/12$ ، $0/56$ ، $1/2$ و $1/76$ اندازه گیری شد. در $D_w/D=1/25$ و در ۱ و $0/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، 0 ، $G/D=$ عمق بی بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب صفر، صفر، $0/28$ ، $0/8$ و $1/52$



۰/۱۶، ۰/۷۲، ۰/۸، ۰/۷۶، ۱/۵۲، ۰/۸۴، ۰/۴۴ و صفر اندازه-

گیری گردید.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی حداکثر عمق آبستنگی در زیر خط لوله در فواصل مختلف لوله از بستر و در اعماق مختلف کارگذاری سپر انجام شد. نتایج نشان داد، در فواصل مختلف لوله از بستر در حالت بدون استفاده از سپر، با افزایش فاصله لوله از بستر، عمق آبستنگی زیر خط لوله کمتر می‌شود. زمانی که نحوه کارگذاری لوله و سپر طوری باشد که سپر دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار گیرد، حداکثر عمق آبستنگی زیر خط لوله مشاهده می‌شود. در شرایطی که لوله مماس بر بستر رسوبی باشد، با کارگذاری سپر در زیر لوله، عمق آبستنگی در زیر خط لوله کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عمق کارگذاری سپر نسبت به سطح بستر رسوبی، کاهش بیشتری در عمق آبستنگی زیر خط لوله مشاهده می‌گردد. با افزایش عمق کارگذاری سپر نسبت به سطح بستر رسوبی، مقادیر طول نواحی جدایی در بالادست و پایین‌دست خطوط لوله کاهش می‌یابد. همچنین مقدار سرعت‌های بیشینه مثبت در بالای لوله و نیز سرعت‌های بیشینه منفی در محل تشکیل گردابه‌ها کاسته می‌شود. در نتیجه می‌توان پیش‌بینی نمود که تنش برشی نیز کاهش خواهد یافت. با افزایش عمق کارگذاری سپر نسبت به سطح بستر رسوبی مشکلات ناشی از فرسایش و آبستنگی کاهش خواهد یافت. با افزایش عمق کارگذاری سپر نسبت به سطح بستر رسوبی، میزان تنش برشی کاهش می‌یابد که موجب کمتر شدن میزان فرسایش و آبستنگی در اطراف خط لوله می‌شود.

با توجه به شکل ۱۰، با افزایش عمق کارگذاری سپر نسبت به حالت بدون استفاده از سپر، از میزان عمق آبستنگی زیر لوله کاسته می‌شود. با افزایش عمق کارگذاری سپر در زیر لوله، فضای بین بستر رسوبی و سپر کاهش پیدا کرده که منجر به افزایش سرعت جریان عبوری می‌شود. این روند تا زمانی که سپر دقیقاً روی سطح بستر رسوبی قرار گیرد ادامه پیدا می‌کند. در $G/D=0$ و در ۲ و $1/25$ ، $1/5$ ، $1/25$ ، 1 ، $1/75$ ، $0/5$ ، $0/25$ ، $D_w/D=0$ ، عمق بی‌بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/36$ ، $0/08$ ، $0/04$ ، صفر، صفر، صفر، صفر و صفر اندازه‌گیری گردید. براساس آن می‌توان گفت وجود سپر در زیر بستر رسوبی در شرایط $G/D=0$ ، مانع عبور جریان از زیر لوله شده و باعث کاهش عمق آبستنگی زیر لوله شده و در نتیجه کاهش پدیده رگاب و فرسایش تونلی بر اثر اختلاف فشار در بالادست و پایین‌دست لوله مشاهده می‌شود. در $G/D=0/25$ و در ۲ و $1/25$ ، $1/5$ ، $1/75$ ، $0/5$ ، $D_w/D=0$ ، عمق بی‌بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/12$ ، $0/24$ ، $0/56$ ، $0/8$ ، صفر، صفر و صفر اندازه‌گیری شد. در $G/D=0/5$ و در ۲ و $1/25$ ، $1/5$ ، $1/75$ ، $0/5$ ، $D_w/D=0$ ، عمق بی‌بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/6$ ، $0/84$ ، $0/72$ ، $0/56$ ، $0/28$ ، $0/16$ ، صفر و صفر مشاهده گردید. در $G/D=0/75$ و در ۲ و $1/25$ ، $1/5$ ، $1/75$ ، $0/5$ ، $D_w/D=0$ ، عمق بی‌بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب $0/16$ ، $0/76$ ، $0/13$ ، $0/12$ ، $0/8$ ، $0/28$ ، $0/12$ و صفر اندازه‌گیری شد. در $G/D=1$ و در ۲ و $1/25$ ، $1/5$ ، $1/75$ ، $0/5$ ، $D_w/D=0$ ، عمق بی‌بعد آبستنگی زیر لوله به ترتیب صفر،

منابع

- بیژنوند، س.، س. م. کاشفی پور و م. بهرامی یاراحمدی. ۱۴۰۰. مطالعه‌ی اثر عمق کارگذاری لوله بر تغییرات زمانی پارامترهای آبستنگی و رسوبگذاری پیرامون خطوط لوله متقاطع با رودخانه. نشریه هیدرولیک، دوره ۱۶، شماره ۳، ص ۴۱-۵۳.
- خاچه زاده مسلمی، ا.، ه. حاجی کندی و ش. سلیمانی. ۱۳۹۱. بررسی هندسه آبستنگی در دو لوله مستغرق موازی در اثر وجود پوشش گیاهی. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه، دانشگاه ارومیه.
- شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۵. مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی (چاپ سوم). اهواز: انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- عطائیان، آ. ۱۳۹۰. برآورد عمق آبستنگی موضعی زیر یک خط لوله در تقاطع با رودخانه. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشگاه ارومیه.



- محمدی، ع. ر. و ح. حکیمزاده. ۱۳۹۴. محافظت از خطوط لوله فراساحلی با اضافه نمودن یک تیغه طولی نفوذناپذیر به زیر لوله. نشریه مهندسی دریا، دوره ۱۱، شماره ۲۲، ص ۲۵-۳۸.
- مرادی، س.، ک. اسماعیلی و س. ر. خدائشناس. ۱۳۹۷. بررسی توسعه زمانی آبستنگی اطراف خطوط لوله با بهینه‌یابی موقعیت نصب پیچیک لاین. علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۴۱، شماره ۴، ص ۱۷۳-۱۸۷.
- میرعلیزاده اورنگ، س. م. ر.، م. ع. لطف‌اللهی یقین، ع. حسینزاده دلیر و ح. حکیمزاده. ۱۳۹۲. بررسی مسئله‌ی فرایند آبستنگی در اطراف خطوط لوله دریایی با در نظر گرفتن ورق زیرسری نفوذناپذیر در زیر لوله. مجله علمی - پژوهشی عمران دانشگاه مدرس، دوره ۱۳، شماره ۴، ص ۱۲۵-۱۳۶.
- هدایت بهرامی، پ.، ع. حسینزاده دلیر و د. فرسادیزاده. ۱۳۹۵. کنترل آبستنگی با استفاده از صفحه مستغرق در زیر لوله‌های مستغرق با فاصله‌های مختلف از بستر تحت جریان یک سویه. نشریه دانش آب و خاک دانشگاه تبریز، دوره ۲۶، شماره ۲، ص ۱۷۹-۱۹۰.
- هدایت بهرامی، پ.، س. س. کاتورانی، ع. حسینزاده دلیر و د. فرسادزاده. ۱۳۹۵. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زاویه برخورد جریان در آبستنگی زیر لوله‌های مستغرق. نشریه دانش آب و خاک، سال بیست و ششم، شماره ۴، ص ۱۳۳-۱۲۳.
- Alabi, P. D. 2006. Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar (Doctoral dissertation).
- 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.
- Dey, S. and A. K. Barbhuiya. 2005. Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32 (1): 213-232.
- Dey, S. and N. P. Singh. 2008. Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of hydraulic engineering*, 134 (5): 588-600.
- Gao, F. P., B. Yang, Y. X. Wu and S. M. Yan. 2006. Steady current induced seabed scour around a vibrating pipeline. *Applied Ocean Research*, 28 (5): 291-298.
- Hansen, E. A., C. Staub, J. Fredsøe and B. M. Sumer. 1991. Time-development of scour induced free spans of pipelines. In Proc., 10th Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Pipeline Technology, 5: 25-31.
- Hatipoglu, F. and I. Avci. 2003. Flow around a partly buried cylinder in a steady current. *Ocean Engineering*, 30 (2): 239-249.
- Jabari, V., A. Masjedi, M. Heidarnejad, A. Kamanbedast and A. Bordbar. 2021. Scour control around Submerged pipeline on the river bed using an impermeable Spoiler. *Ain Shams Engineering Journal*, 12 (1): 37-45.
- Oner, A. A. 2010. The flow around a pipeline with a spoiler. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224 (1): 109-121.
- Sadeghi, F., Y. Ramezani and H. Khozaymehnezhad. 2018. Effect of submergence ratio of parallel wall on bridge abutment scour. *Alexandria engineering journal*, 57 (4), 2659-2665.
- Sumer, B. M. and J. Fredsøe. 1999. Wave scour around structures. *Advances in coastal and ocean engineering*, 191-249.
- Wu, Y. and Y. M. Chiew. 2013. Mechanics of three-dimensional pipeline scour in unidirectional steady current. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 4 (1): 3-10.
- Yang, L., B. Shi, Y. Guo and X. Wen. 2012. Calculation and experiment on scour depth for submarine pipeline with a spoiler. *Ocean Engineering*, 55: 191-198.
- Zhang, Z., B. Shi, Y. Guo and L. Yang. 2013. Numerical investigation on critical length of impermeable plate below underwater pipeline under steady current. *Science China Technological Sciences*, 56 (5): 1232-1240.