

**EXTENDED ABSTRACT**

**Experimental Investigation on Specifications of Scouring Hole Under the Pipelines Across the Waterway Under Steady Flow**

S. Bijanvand<sup>1</sup>, S. M. Kashefipour<sup>2</sup>, M. B. Yarahmadi<sup>3\*</sup>

1- M.Sc. in Civil Engineering, Water & Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Water Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3\* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (*m.bahrami@scu.ac.ir*).

Received: 22 May 2018

Revised: 28 November 2018

Accepted: 2 December 2018

**Keywords:** River, pipeline, Scouring, Pipe diameter, Erosion Bed.

**DOI:** 10.22055/jise.2018.25964.1768.

**Abstract**

Pipelines passing across the river to convey water, gas, and petroleum may develop local scour at the pipeline location. Scour development may cause damage due to pipe failure and disorder in utilization. The eddy currents around the pipe lead to the scouring phenomenon causing the non-uniformity of the pipeline and its fracture which will ultimately have environmental and destructive consequences. In this study, the effect of pipe diameter has been investigated. The experiments were conducted with five diameters (20, 30, 40, 50, and 60 mm) in three Froude numbers (0.2, 0.235, and 0.26) under identical bed conditions. In the following part, scouring profiles were taken and the scouring progresses over time and maximum scour depth were investigated. The results show that scouring under pipe for a diameter of 60 mm has the highest and is the most progressing towards time compared to other diameters.

**Introduction**

Local scour below pipelines, laid on and across the river beds to convey water, oil, gas, or any kind of fluid commonly occurs by the erosive action of flowing stream. Scour may leave a pipeline unsupported over a considerable distance resulting in fatigue failure due to flow-induced oscillation by wake-vortex shedding. Therefore, one of the significant aspects of pipeline design is the prediction of the extent of scour below pipelines. Chiew (1991) gives a comprehensive review of the research on scour below pipelines. Mao (1986) described the role of vortices that were formed on the front and back of the pipe. He examined the leakage flux from the underlying pipe associated with the start of scouring. Beek and Wind (1988) used a numerical method to solve Navier-Stokes equations. They were able to predict the flow equations and the amount of sediment transport around the pipe and the maximum depth of the scour under the pipe. Li and Cheng (1999) used the finite difference method to calculate the scouring profiles. None of the aforementioned studies systematically examined the influences of various parameters on  $d_s$ . The present study aims at an experimental investigation of clear water scour below pipelines in uniform sediments under steady flow.

**Methodology**

In this study, 15 experiments were conducted to investigate the effect of pipe diameter and approach depth on bed scour under the pipeline river crossing (Table1). Moreover, the effect of

five circular cross sections of pipe (20, 30, 40, 50, and 60 mm) was investigated for three Froude numbers of (0.2, 0.235, and 0.26).

The experiments were carried out at the hydraulic laboratory, in a 10 m long glass walled rectangular flume having 0.74 m width. The pipes extended the entire width of the sediment bed in the middle of a sediment recess which was 1.5 m in length and 0.74 m in width; then, the flume was filled with water from downstream.

**Table 1- General pattern of experiments**

Row	Diameter of pipe (mm)	Froude number	Average flow velocity ratio sediment movement threshold velocity	Average flow velocity meters per ) (second	Depth of flow (cm)	Flow discharge cubic ) meters per (second
1	20	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
2	30	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
3	40	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
4	50	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
5	60	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
6	20	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
7	30	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
8	40	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
9	50	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
10	60	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
11	20	0.26	0.95	0.32	14	0.033
12	30	0.26	0.95	0.32	14	0.033
13	40	0.26	0.95	0.32	14	0.033
14	50	0.26	0.95	0.32	14	0.033
15	60	0.26	0.95	0.32	14	0.033

### Results and discussion

Regarding the longitudinal scour profiles, it can be seen that scouring under a pipe with a diameter of 60 (mm) has the highest advance relative to time compared to other diameters. When used with a high diameter pipe, the water level rising upstream and the flow rate decreases, and the pipeline acts as an overflow in the upper diameters and increases the amount of scour. The nondimensional diagram of maximum depth of scour for different Froude numbers is shown in Fig.1. The results show that for a constant Froude number, the scour depth under the pipeline increased by increasing the pipe diameter for different diameters. With an increase in Froude number, the maximum depth of scour and its distance from the axis of the pipeline increase.

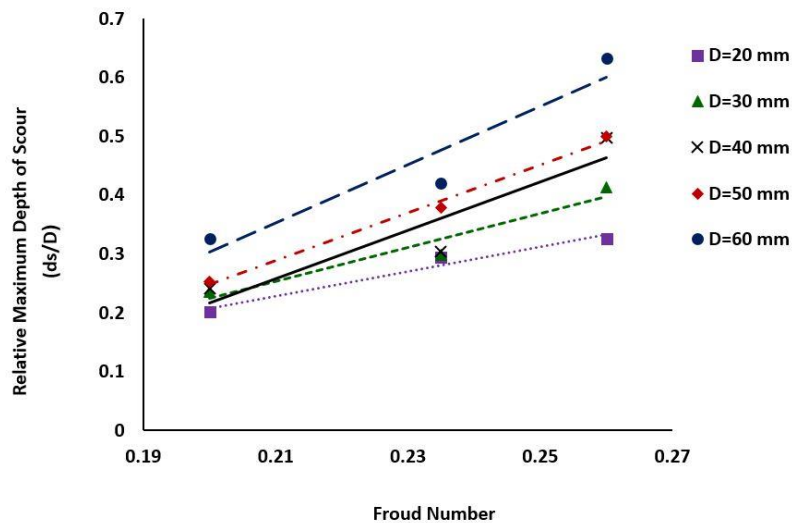


Fig. 1- Normalized diagram of maximum scour depth for various tests

### Conclusion

- With an increase in Froude number, the maximum depth of scour increases.
- With an increase in the pipeline diameter, the maximum scour depth and its distance from the axis of the pipeline increase.
- It is recommended that the pipeline crossing the straight reach of a river be constructed at a reach with subcritical flow. Using a pipeline with the minimum possible diameter would be the other recommendation.

### Acknowledgement

This article has been prepared from the results of the MSc. thesis of the first author and with the support of the university's research unit through the second author's Grant, by which the authors thank and appreciate the university's vice chancellor for research. We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support. The Authors are also grateful to the Center of excellence for the improvement and maintenance of the irrigation and drainage networks for provision a part of data.

### References

- 1- Van Beek, F.A. and Wind, H.G., 1990. Numerical modelling of erosion and sedimentation around offshore pipelines. *Coastal engineering*, 14(2), pp.107-128.
- 2- Chiew, Y.M., 1991. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4), pp.452-466.
- 3- Li, F. and Cheng, L., 1999. Numerical model for local scour under offshore pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), pp.400-406.
- 4- Mao, Y., 1986. *The interaction between a pipeline and an erodible bed. Series paper 39* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis. Tech. Univ. of Denmark



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## بررسی آزمایشگاهی مشخصات چاله‌ی آبستگي زیر خطوط لوله عبوري از عرض آبراهه تحت جريان ماندگار

سجاد بیژنوند<sup>۱</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup> و محمد بهرامی یاراحمدی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

m.bahrami@scu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۱۱

بازنگری: ۹۷/۹/۷

دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱

### چکیده

جریان‌های گردابی اطراف لوله عبوری از بستر رودخانه منجر به بروز پدیده آبستگي شده و موجب نشست غیرهمسان خط لوله و شکستگی آن می‌شوند که در نهایت پیامدهای محیط‌زیستی و مخربی را به دنبال خواهد داشت. در این مطالعه به بررسی تاثیر قطر لوله بر میزان آبستگي پرداخته شد و آزمایش‌ها با پنج قطر ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر در سه عدد فرود ۰/۲، ۰/۲۳۵ و ۰/۲۶ صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش قطر لوله در هر آزمایش ابعاد آبستگي و پیش‌روی پشته‌ی رسوبی تشکیل شده در پایین دست لوله در یک عدد ثابت فرود جریان افزایش می‌یابد، به طوری که در لوله با قطر ۶۰ میلی‌متر بیش‌ترین میزان آبستگي در مقایسه با سایر قطرها مشاهده شد و میزان آن در عدد فرود ۰/۲۶، به مقدار ده درصد نسبت به قطر ۵۰ میلی‌متر، ۱۹ درصد نسبت به قطر ۴۰ میلی‌متر، ۲۰ درصد نسبت به قطر ۳۰ میلی‌متر و ۲۹ درصد نسبت به قطر ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت.

**کلید واژه‌ها:** رودخانه، خط لوله، آبستگي، قطر لوله، جریان ماندگار.

### مقدمه

لوله‌ها فراگیرترین وسیله برای انتقال آب، گاز، نفت خام و هر سیال دیگری از عرض رودخانه می‌باشند. عبور خط لوله از رودخانه‌ها و مسیل‌ها، دارای پتانسیل ایجاد خسارت‌های جدی بر رودخانه و محیط‌زیست می‌باشد. خط لوله در تقاطع رودخانه ممکن است در بالای بستر، روی کف بستر و یا زیر بستر قرار گیرد. وقتی یک خط لوله در تقاطع با رودخانه قرار گرفته و از بستر آن عبور می‌کند، نیروی هیدرودینامیک وارد بر آن و همچنین گرادبان فشار بین بالادست و پایین دست لوله سبب ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که آن گردابه‌ها موجب آبستگي در زیر و اطراف خط لوله می‌گردد. توسعه آبستگي زیر خط لوله ممکن است باعث شکست خط لوله گردد که نتیجه آن منجر به اختلال در بهره‌برداری، هزینه‌های بازسازی و همچنین خسارات محیط‌زیستی می‌شود. به همین علت بررسی سازوکار رخداد این پدیده و پیش‌بینی عمق حداکثر آبستگي اطراف خطوط لوله و پیشنهاد روش‌هایی برای کنترل آبستگي، اهمیت زیادی دارد. Chao و Hennessy (1972) از تئوری پتانسیل جریان برای تخمین سرعت و به دنبال آن دبی درون حفره آبستگي زیر لوله استفاده کردند. روش Chao و Hennessy (1972) فقط مربوط به شرایط بستر زنده بود. آن‌ها همچنین توانستند نیروی برشی درون حفره آبستگي و حداکثر عمق آبستگي را ارزیابی کنند. Hansen (1986) با استفاده از

تئوری پتانسیل جریان، آبستگي زیر لوله را تخمین زدند. وی توانست مدل جامع‌تری نسبت به مدل Chao و Hennessy (1972) معرفی کند که این مدل قادر بود هندسه حفره آبستگي و عمق حفره آبستگي را شبیه‌سازی کند. Mao (1986) نقش گردابه‌هایی که در جلو و پشت لوله ایجاد می‌شدند را تشریح کرد. او همچنین جریان نشت‌یافته در زیر لوله، مرتبط با شروع آبستگي را مورد بررسی قرار داد که این مورد بعدها با جزئیات بیشتر توسط Chiew (1990) مورد بررسی قرار گرفت. Van Beek و Wind (1990) از مدل عددی برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده کردند. آن‌ها توانستند معادلات جریان، میزان حمل رسوبات را در صفحات عمودی اطراف خط لوله و حداکثر عمق آبستگي زیر لوله را پیش‌بینی کنند. Li و Cheng (1999) برای محاسبه پروفیل آبستگي زیر لوله، از روش تفاضل محدود برای حل معادله لاپلاس پتانسیل سرعت استفاده کردند. Singh و Dey (2007) آزمون‌های متعددی را برای محاسبه حداکثر عمق آبستگي در زیر خطوط لوله در شرایط آب صاف، تحت جریان ماندگار با وجود نشت رو به بالا انجام دادند و دریافتند که عموماً عمق آبستگي در زیر خطوط لوله با نشت رو به بالا کمتر از حالت بدون نشت است. Dey و Singh (2008) به بررسی آبستگي زیر خطوط لوله با قطرهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر تحت شرایط آب زلال و جریان ماندگار پرداختند. آن‌ها برای این تحقیق هم از رسوبات یکنواخت و

اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه‌ی کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در فرایند آبشستگی زیر لوله عبوری از عرض رودخانه در رابطه‌ی (۱) ارایه شده‌اند.

$$d_s = f(y, D, B, d_{50}, \rho, V, g) \quad (1)$$

که در آن  $d_s$ : عمق آبشستگی،  $y$ : عمق جریان،  $D$ : قطر لوله،  $B$ : عرض کانال،  $d_{50}$ : اندازه متوسط دانه‌ها،  $\rho$ : چگالی سیال،  $V$ : سرعت متوسط جریان،  $g$ : شتاب ثقل می‌باشد. با توجه به این که در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی مشخصات هندسی کانال از جمله عرض مجرا ثابت است و اندازه رسوبات نیز تغییری نمی‌کند، با تحلیل ابعادی و استفاده از روش پی باکینگهام و در نظر گرفتن  $D$ ،  $V$ ،  $\rho$  به عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{y}{D}, Fr\right) \quad (2)$$

### روش انجام آزمایش‌ها

تمام آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز در یک فلوم مستطیل شکل به طول ۱۰۰۰ سانتی‌متر، عرض ۷۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. جنس دیواره‌های فلوم از شیشه بوده و دارای مخازن ورودی و خروجی و قسمتی برای آرام کردن جریان است. شکل (۱) نمایی از فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه به برنامه آزمایشات یک دستگاه الکترومپم تیپ ۲۳-۲۰۰ پمپیران تهیه شده که با یک دستگاه الکتروموتور ۱۸/۵ کیلووات کویله شده و دبی با حداکثر مقدار ۱۲۰ لیتر در ثانیه را تامین می‌کند. دبی جریان عبوری در کانال توسط دستگاه دبی سنج الکترومغناطیس اندازه‌گیری می‌شد. دبی‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها ۲۰، ۲۶/۵ و ۳۳ لیتر بر ثانیه (به ترتیب معادل اعداد فرود ۰/۲، ۰/۲۳۵ و ۰/۲۶) بود. عمق‌های نرمال به ترتیب معادل ۱۱/۸، ۱۳/۳ و ۱۴ سانتی‌متر بوده که توسط دریچه انتهایی فلوم قابل تنظیم بودند. شکل (۲) نمای فلوم و محل نصب خط لوله را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. برای بررسی پدیده آبشستگی در اطراف لوله عبوری از عرض مجرا، در میانه فلوم در محدوده‌ی  $1/5$  متر و به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر رسوباتی با اندازه متوسط ( $d_{50}$ ) ۰/۷ میلی‌متر، چگالی نسبی ۲/۶۵ و انحراف معیار استاندارد ( $\sigma_g$ ) برابر ۱/۴ ریخته شد. شکل (۳) منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق از لوله‌هایی به قطر ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر و از جنس PVC استفاده گردید که به صورت عمود بر جریان در عرض فلوم در روی بستر نصب می‌شدند. برای جلوگیری از ایجاد فرم بستر در شروع آزمایش، ابتدا دریچه پایین دست فلوم بسته و فلوم پر از آب می‌شد، سپس

هم غیریکنواخت استفاده کردند. آن‌ها ثابت کردند در جریان‌های تعادلی کم‌عمق، عمق تعادلی آبشستگی با افزایش عمق جریان افزایش می‌یابد. هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که برای رسوبات غیریکنواخت، به علت تشکیل لایه آرمور در حفره‌ی آبشستگی، عمق آبشستگی تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

Azamathulla et al. (2014) برای بررسی تأثیر زاویه برخورد خطوط جریان با خط لوله بر آبشستگی زیر آن چهار زاویه ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه را بررسی نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که تغییر زاویه خط لوله نسبت به جریان باعث جابه‌جایی چاله آبشستگی به سمت دیواره کانال می‌گردد. هم‌چنین تغییر زاویه خط لوله تأثیر چندانی بر حداکثر عمق آبشستگی ندارد. Postacchini و Brocchini (2015) طی یک مطالعه عددی تأثیر چسبندگی رسوب بستر بر آبشستگی زیر خط لوله را بررسی نمودند. در این تحقیق با بررسی داده‌های آزمایشگاهی محققین دیگر، مدلی عددی گسترش داده شد. Zhao et al. (2015) به بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشستگی زیر دو خط لوله متوالی و با فواصل مختلف از هم پرداختند. در شرایط بستر متحرک مشاهده گردید که عمق چاله آبشستگی زیر لوله بالادست کمی از چاله آبشستگی زیر لوله منفرد بیشتر است. درحالی‌که عمق چاله آبشستگی زیر لوله پایین دست خیلی بیشتر از عمق آبشستگی در مقایسه با لوله منفرد می‌باشد. طبق مشاهدات این تحقیق عمق چاله آبشستگی در حالت آب زلال بیشتر از حالت بستر متحرک است که علت این مسئله وقوع آبشستگی و عدم جای‌گزینی با رسوبات بالادست در حالت آب زلال است. هم‌چنین هر چقدر که دو خط لوله به هم نزدیک‌تر باشند، حداکثر عمق آبشستگی ناشی از آن‌ها کاهش می‌یابد. Mehrabadi et al. (2017) در یک مطالعه آزمایشگاهی از باله (اسوبلر) جهت تحریک خوددفعی مصنوعی لوله با هدف تامین شرایط ایمن برای خطوط لوله انتقال در بستر فرسایش‌پذیر استفاده کردند، در این پژوهش به بررسی فرایندهای خوددفعی لوله پرداخته شد و مشخص شد که جابه‌جایی لوله عمق آبشستگی را تا ۵۴ درصد نسبت به لوله متصل به فلوم آزمایشگاهی کاهش می‌دهد. با تغییر ارتفاع باله نصب‌شده روی لوله این نتیجه حاصل شد که حداکثر مقدار خوددفعی لوله در حالت ارتفاع باله متناسب با قطر لوله روی می‌دهد.

هدف از این تحقیق بررسی اثر قطر لوله عبوری از عرض آبراهه و عدد فرود بالادست بر الگوی آبشستگی، رسوب‌گذاری در اطراف لوله، مشخصات چاله آبشستگی تشکیل‌شده در پایین دست خط لوله، حداکثر عمق آبشستگی و روند تغییرات زمانی آبشستگی به کمک پردازش اطلاعات از فیلم‌برداری در طول هر آزمایش می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### تحلیل ابعادی و متغیرهای مؤثر

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در آبشستگی زیر خط لوله مؤثر می‌باشند،

۰/۹۵ سرعت آستانه حرکت رسوبات ( $V_c$ ) در نظر گرفته شد تا شرایط آبهستگی آب زلال برقرار گردد. سرعت آستانه حرکت رسوبات با توجه به رابطه Singh و Dey (2007) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{V}{V_{*c}} = 5.571 \log \left( 5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (3)$$

که در این معادله  $V_{*c}$  سرعت آستانه حرکت ذرات است که از دیگرام شیلدز به دست می‌آید.  $d_{50}$  اندازه متوسط ذرات رسوب و  $y$  عمق جریان است. در جدول (۱) مشخصات آزمایش‌ها از جمله دبی، عمق، نسبت سرعت به سرعت بحرانی، عدد فرود و قطر لوله که متغیر آزمایش می‌باشد، نشان داده شده است. شکل (۴) نمایی از فرایند آزمایش و شروع آبهستگی زیر خط لوله و شکل (۵) نمایی از تشکیل چاله آبهستگی زیر خط لوله و پشته‌ی پایین دست خط لوله را نشان می‌دهد.

جریان ورودی از بالادست قطع می‌گردد و لوله روی بستر و عمود بر جهت جریان به طور مناسب و تراز قرار داده می‌شود. لوله به نحوی در عرض فلوم نصب می‌شود که عملاً زیر لوله روی سطح بستر قرار می‌گیرد. به این ترتیب لوله به دیواره فلوم ثابت شد و پس از قرارگیری لوله، جریان بالادست با روشن کردن پمپ شروع به حرکت در فلوم می‌کند. با توجه به سرعت جریان پس از گذشت مدت زمان کمی آبهستگی زیر خط لوله شروع می‌شود. با توجه به این که در این تحقیق هدف مقایسه الگوی آبهستگی در اطراف لوله‌های عبوری از عرض مجرا با قطرهای مختلف و تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت است، بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، زمان انجام آزمایش ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از پایان هر آزمایش پمپ خاموش می‌گردد و زهکش‌های کانال باز می‌شود. Chiew (1991) دریافت که حداکثر آبهستگی در شرایطی روی می‌دهد که تنش برشی مؤثر برابر با تنش برشی بحرانی رسوبات بستر شود. بنابراین کلیه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال صورت گرفت و در این آزمایش‌ها حداکثر سرعت متوسط جریان ورودی ( $V$ ) کوچکتر یا برابر

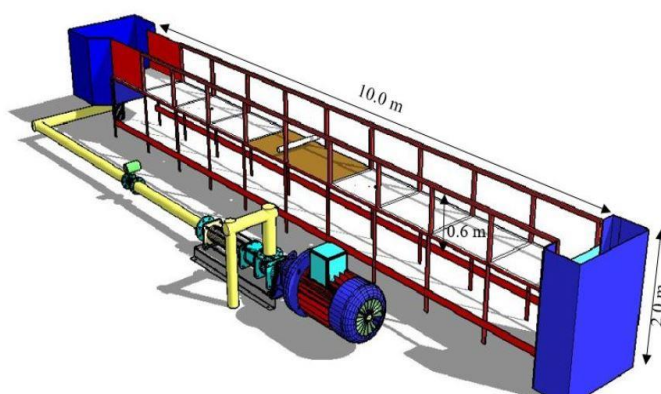


Fig. 1- View of the laboratory flume used in this research.

شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

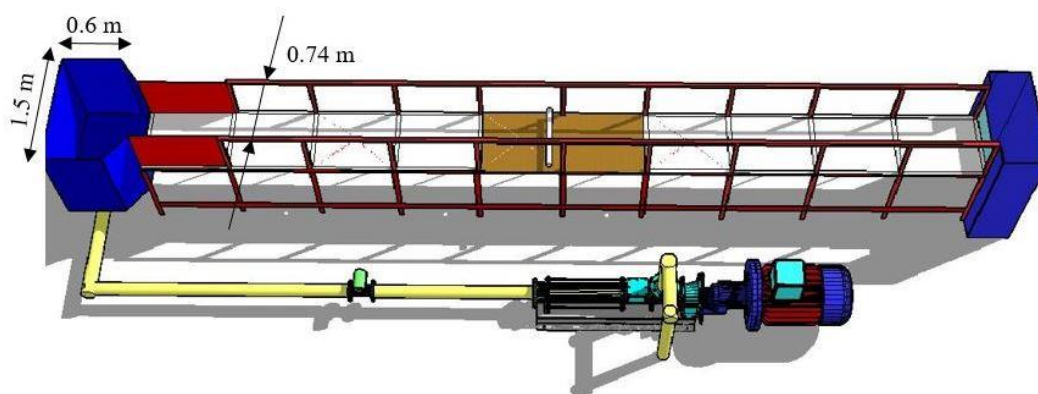


Fig. 2- Schematic installation location of pipe and erodible area.

شکل ۲- محل نصب لوله و محدوده قابل فرسایش به صورت شماتیک



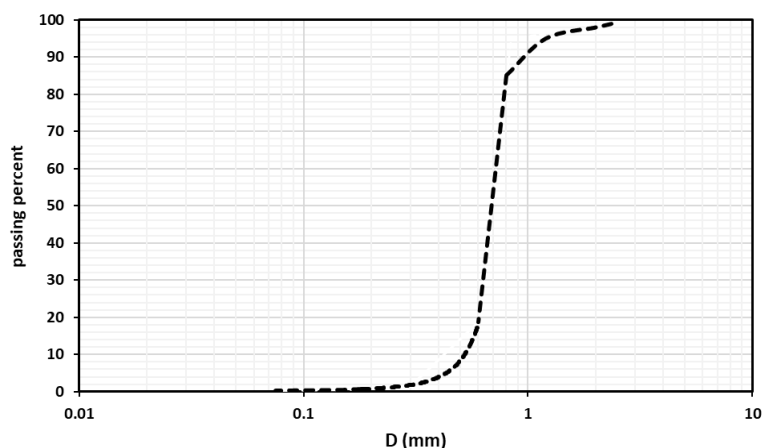


Fig. 3- Sediment granulation curve.

شکل ۳- منحنی دانه بندی رسوبات مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌ها

Table 1- Specifications of experiments.

Row	Diameter of pipe (mm)	Froude number	Average flow velocity ratio sediment movement threshold velocity	Average flow velocity meters per (second)	Depth of flow (cm)	Flow discharge cubic ( meters per (second)
1	20	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
2	30	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
3	40	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
4	50	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
5	60	0.2	0.7	0.23	11.8	0.02
6	20	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
7	30	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
8	40	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
9	50	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
10	60	0.235	0.82	0.27	13.3	0.0265
11	20	0.26	0.95	0.32	14	0.033
12	30	0.26	0.95	0.32	14	0.033
13	40	0.26	0.95	0.32	14	0.033
14	50	0.26	0.95	0.32	14	0.033
15	60	0.26	0.95	0.32	14	0.033

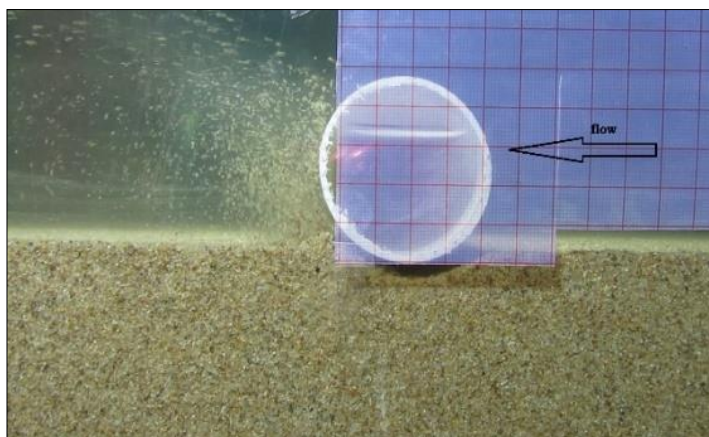


Fig. 4- View of the start of the scouring process under the pipeline.

شکل ۴- نمایی از شروع فرآیند آبهستگی زیر خط لوله

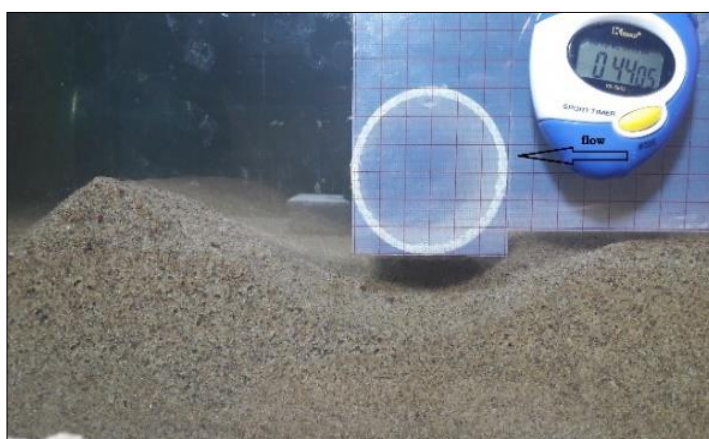


Fig. 5- View of the formation of scour holes under the pipeline.

شکل ۵- نمایی از تشکیل چاله آبهستگی زیر خط لوله

میزان آبهستگی در نیم ساعت ابتدای آزمایش حدود ۴۰ درصد از عمق آبهستگی نهایی اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج حاصل از شکل (۶)، برای عدد فرود  $0.2$  تا  $0.26$  عمق آبهستگی بعد از گذشت ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش برای قطر ۲۰ میلی‌متر به اندازه سه تا ۵/۵ برابر، برای قطر ۳۰ میلی‌متر به اندازه ۴/۵ تا ۸/۵ برابر، برای قطر ۴۰ میلی‌متر به اندازه شش تا ده برابر، برای قطر ۵۰ میلی‌متر به اندازه هشت تا ۱۸ برابر و برای قطر ۶۰ میلی‌متر به میزان ۱۱ تا ۲۲ برابر، نسبت به آبهستگی شروع آزمایش افزایش می‌یابد. با برقراری جریان، گرادیان فشار بین دو سمت لوله به وجود می‌آید. این گرادیان فشار باعث تراوش جریان زیر بستر می‌گردد. با افزایش گرادیان فشار شرایطی به وجود می‌آید که رسوب زیر لوله شروع به جوشش می‌کند که به این حالت آستانه آبهستگی گفته می‌شود (Sumer, 2002). هنگامی که آستانه آبهستگی به وقوع پیوست، مقدار آب تراوش یافته به سرعت افزایش یافته و هم‌زمان سطح رسوب در پایین‌دست خط لوله برآمده می‌شود. در نهایت سطح رسوب زیر لوله گسیخته می‌گردد. که به این حالت آبهستگی حاصل از تراوش یا piping گفته می‌شود. بعد از piping یک شکاف

## نتایج و بحث

### توسعه‌ی زمانی آبهستگی

شکل (۶) (الف تا ه) توسعه‌ی زمانی آبهستگی و اندازه‌ی آبهستگی را در طول زمان برای هر یک از قطرهای تحت اعداد فرود  $0.2$ ،  $0.235$  و  $0.26$  نمایش می‌دهد. با توجه به تغییرات زمانی حفره‌ی آبهستگی ارایه شده، در لحظات اولیه، گسترش حفره‌ی آبهستگی سریع‌تر بوده و شیب تغییرات آبهستگی بسیار زیاد می‌باشد و بخش قابل توجهی از توسعه‌ی ابعاد حفره‌ی آبهستگی در همان ساعت ابتدایی اتفاق می‌افتد. به تدریج از سرعت گسترش حفره‌ی آبهستگی کاسته می‌شود و در نهایت به صفر میل کرده و چاله آبهستگی به تعادل می‌رسد. در برخی آزمایش‌ها فاز سریع گسترش حفره آبهستگی غالب بوده و در برخی دیگر فاز کند غالب می‌باشد به طوری که می‌توان دریافت هنگامی که نمودار آبهستگی در مقابل زمان نشان‌دهنده‌ی شیب زیاد است، فاز سریع گسترش حفره‌ی آبهستگی غالب می‌شود. در آزمایش‌های با دبی بالا، نرخ آبهستگی در لحظات ابتدایی شدیدتر بوده به طوری که با توجه به شکل (۶) (الف) برای قطر ۲۰ میلی‌متر در جریان با عدد فرود  $0.2$



می‌شود. به دنبال فرسایش تونلی فرم بستر دون در پایین دست لوله تشکیل شده و به تدریج به سمت پایین دست حرکت می‌کند. در حین مراحل فوق تنش برشی جریان افزایش یافته اما با افزایش اندازه چاله آبستگي به تدریج تنش برشی کاهش می‌یابد و در نهایت زمانی که تنش برشی جریان به میزان تنش برشی آستانه حرکت رسوبات کاهش پیدا کرد، عمق تعادلی آبستگي تشکیل می‌گردد (Dey, 2014).

کوچک بین خط لوله و بستر به وجود می‌آید که مقدار قابل توجهی از جریان وارد آن می‌شود. این مسئله باعث افزایش سریع تنش برشی زیر خط لوله تا بیش از سه برابر تنش برشی جریان نزدیک شونده می‌گردد (Jensen et al., 1990). در نتیجه مقدار زیادی از رسوبات زیر خط لوله دچار آبستگي شده و شکاف به وجود آمده بزرگ‌تر گشته و مخلوط آب و رسوب از آن خارج می‌گردد. این روند آبستگي به فرسایش تونلی معروف است. با افزایش اندازه شکاف، سرعت در شکاف کاهش یافته و فرسایش تونلی به تدریج متوقف

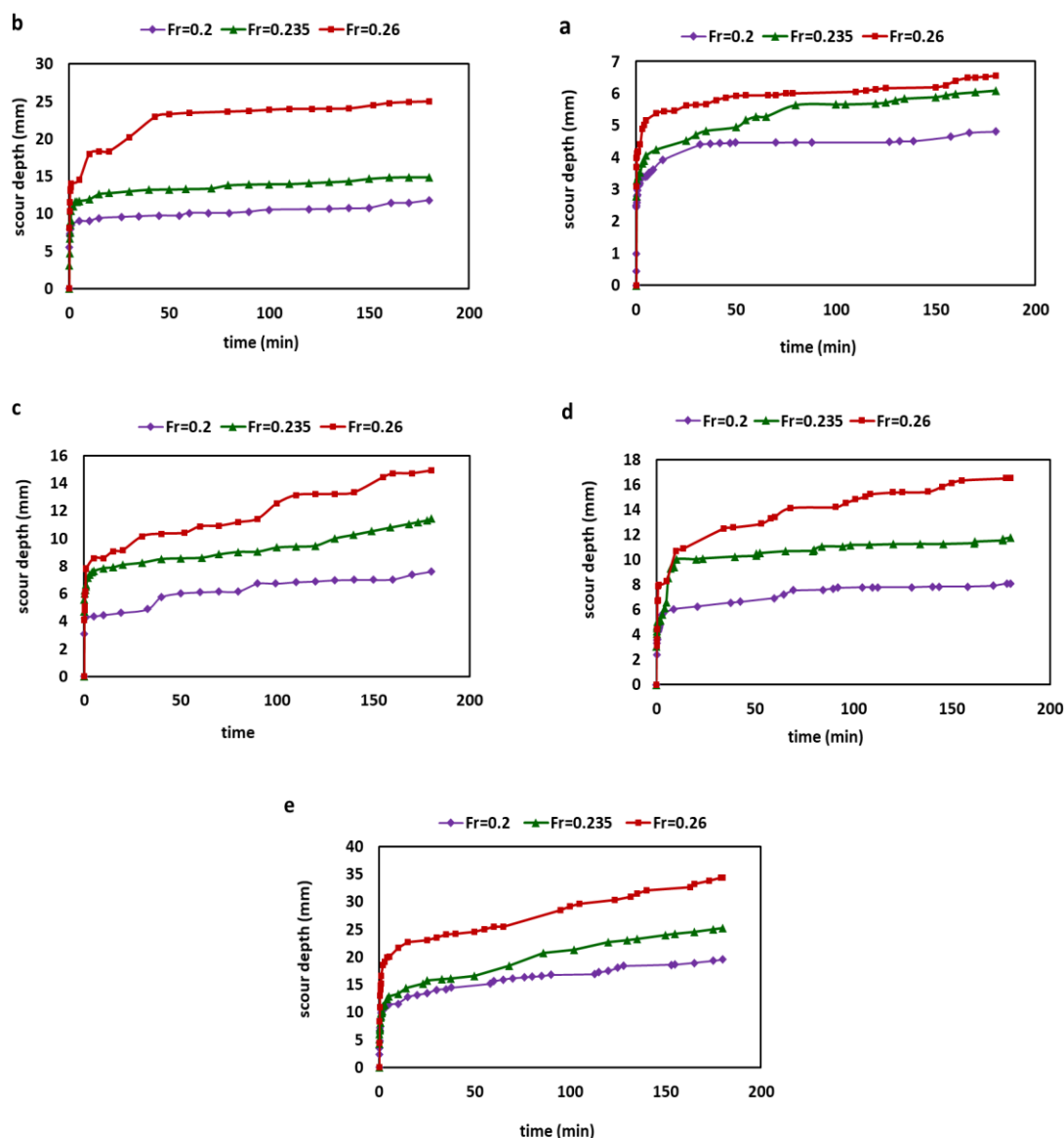


Fig. 6- Temporal scour development for different diameters. a) 20 mm, b) 30 mm, c) 40 mm, d) 50 mm and e) 60 mm

شکل ۶- توسعه‌ی زمانی آبستگي برای قطرهای مختلف (الف) ۲۰ میلی‌متر، (ب) ۳۰ میلی‌متر، (ج) ۴۰ میلی‌متر، (د) ۵۰ میلی‌متر و (ه) ۶۰ میلی‌متر

نتایج آزمایشگاهی حداکثر عمق آبستگي حاصل از ۱۵ آزمایش برای پنج قطر لوله، با اعماق جریان نزدیک شونده متفاوت ۱۱/۸، ۱۳/۳ و ۱۴ سانتی‌متر به ترتیب معادل اعداد فرود (۰/۲)، ۰/۲۳۵ و ۰/۲۶) در شکل (۹) نشان داده شده است. محور عمودی بیانگر حداکثر عمق آبستگي بی‌بعد ( $\frac{d_s}{y}$ ) و محور افقی نشان‌دهنده‌ی عمق استغراق نسبی ( $\frac{y}{D}$ ) است. نتایج شکل (۹) نشان می‌دهد که در اعماق استغراق زیاد، قطر لوله روی فرسایش تاثیر کمی دارد. به نحوی که ملاحظه می‌گردد، در قسمت انتهایی نمودار به ازای نسبت‌های استغراق زیاد، کلیه نقاط افقی شده‌اند. این نکته بیانگر این است عملاً قطر لوله تأثیری بر روی فرسایش ندارد. توجه این مسئله این است که در شرایطی که عمق استغراق بالاست مقدار عمق جریان نسبت به قطر لوله خیلی زیادتر بوده و عمده جریان از روی لوله عبور می‌کند. در اعماق استغراق کم، قطر لوله به شدت روی فرسایش اثرگذار بوده و همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود، شیب تغییرات فرسایش نسبت به عمق استغراق به خصوص مقادیر کمتر از ۳/۵ بسیار شدید است. دلیل این امر این است که ضخامت عبور جریان از روی لوله کاهش یافته و باعث افزایش سرعت و در نتیجه افزایش تنش برشی شده و نهایتاً افزایش عمق آبستگي می‌گردد. برای بررسی مشخصات چاله‌ی آبستگي، پیش‌روی حداکثر عمق آبستگي نسبت به محور مرکزی لوله و طول چاله‌ی آبستگي مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۰) مشخصات چاله‌ی آبستگي زیر خط لوله را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد که در آن  $L$  فاصله حداکثر عمق آبستگي از مرکز لوله و  $S$  طول چاله آبستگي می‌باشد. شکل (۱۱) پیش‌روی حداکثر عمق آبستگي نسبت به محور مرکزی لوله را در مقابل عدد فرود جریان نشان می‌دهد. در این شکل محور عمودی بیانگر فاصله‌ی حداکثر عمق آبستگي از محور مرکزی لوله و محور افقی نشان‌دهنده عدد فرود جریان است. در همه آزمایش‌ها حداکثر آبستگي در پایین دست لوله واقع گردید. با دقت در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود که در هر قطر لوله، با افزایش عدد فرود جریان فاصله حداکثر عمق آبستگي از محور مرکزی لوله افزایش یافت که این حاصل از دیاد قدرت گردابه‌های مخرب در اطراف لوله به ازای افزایش عدد فرود جریان می‌باشد. علاوه بر این، شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش قطر لوله حداکثر عمق آبستگي در فاصله دورتری از مرکز لوله تشکیل می‌گردد به گونه‌ای که کمترین و بیشترین فاصله حداکثر عمق آبستگي از مرکز لوله به ترتیب در لوله‌هایی با قطر ۲۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر رخ داد. نتایج نشان داد که به طور متوسط فاصله حداکثر عمق آبستگي از محور مرکزی لوله در لوله‌هایی با قطر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب ۳/۹، ۷/۹، ۱۱/۴ و ۲۶/۶ درصد بیش از لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر است.

نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش قطر لوله در هر آزمایش ابعاد آبستگي و پیش‌روی پشته‌ی رسوبی تشکیل شده در پایین دست لوله در یک عدد ثابت فرود جریان افزایش می‌یابد، به طوری که در لوله با قطر ۶۰ میلی‌متر بیشترین میزان آبستگي در مقایسه با سایر قطرهای مشاهده شد و میزان آن در عدد فرود ۰/۲۶، به مقدار ده درصد نسبت به قطر ۵۰ میلی‌متر، ۱۹ درصد نسبت به قطر ۴۰ میلی‌متر، ۲۰ درصد نسبت به قطر ۳۰ میلی‌متر و ۲۹ درصد نسبت به قطر ۲۰ میلی‌متر افزایش یافت. نتایج حاصل از این آزمایش حاکی از این است که در قطرهای متوالی ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر اختلاف میزان آبستگي اندک است، ولی در قطرهای متوالی ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر و همچنین ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر اختلاف بسیاری در میزان آبستگي نمایان شد که ناشی از این پدیده است که با توجه به عمق جریان رودخانه، هنگامی که از لوله با قطرهای بالا استفاده شود، سطح آب در بالادست بالا آمده و سرعت جریان کم می‌شود و خط لوله در قطرهای بالا به صورت یک سرریز عمل می‌کند و موجب بیش‌تر شدن میزان آبستگي می‌شود.

#### حداکثر عمق آبستگي

در اطراف سازه‌هایی که در مسیر جریان رودخانه قرار می‌گیرند همواره آبستگي روی می‌دهد. مقدار و گسترش آبستگي به شرایط جریان و شرایط هندسی سازه‌ی مورد نظر بستگی دارد. شکل (۷) (الف تا ج) پروفیل‌های آبستگي زیر خط لوله را برای قطرهای مورد آزمایش در شرایط هیدرولیکی مختلف نشان می‌دهد. با دقت در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد که در هر عدد فرود، با افزایش قطر لوله میزان آبستگي در اطراف لوله هم از نظر عمقی و هم از نظر طولی بیش‌تر می‌گردد به گونه‌ای که کمترین و بیش‌ترین آبستگي به ترتیب در اطراف لوله‌هایی با قطر ۲۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر رخ داد. گسترش طولی چاله آبستگي بیش‌تر در پایین دست لوله صورت گرفته است. رسوبات حاصل از فرسایش، در پایین دست لوله و بعد از چاله‌ی آبستگي تشکیل یک پشته رسوبی را داده که با افزایش میزان آبستگي ابعاد پشته رسوب‌گذاری نیز بزرگ‌تر می‌گردد. در شکل (۸) نمودار حداکثر عمق آبستگي نسبی زیر خط لوله برای قطرهای مورد آزمایش در شرایط هیدرولیکی مختلف جریان ارایه شده است. محور افقی آن عدد بی بعد فرود جریان و محور عمودی، نسبت بی‌بعد حداکثر عمق آبستگي به قطر لوله می‌باشد. شکل (۸) نشان می‌دهد که در هر قطر لوله، با افزایش عدد فرود جریان، به علت افزایش تنش برشی و قدرت گردابه‌های مخرب در اطراف لوله، حداکثر عمق آبستگي افزایش می‌یابد به گونه‌ای که کمترین و بیش‌ترین عمق آبستگي در اعداد فرود ۰/۲ و ۰/۲۶ اتفاق افتاد. نتایج نشان داد که به طور متوسط حداکثر عمق آبستگي در لوله‌هایی با قطر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب ۱/۵، ۵، ۸ و ۱۷ درصد نسبت به لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر افزایش یافته است.

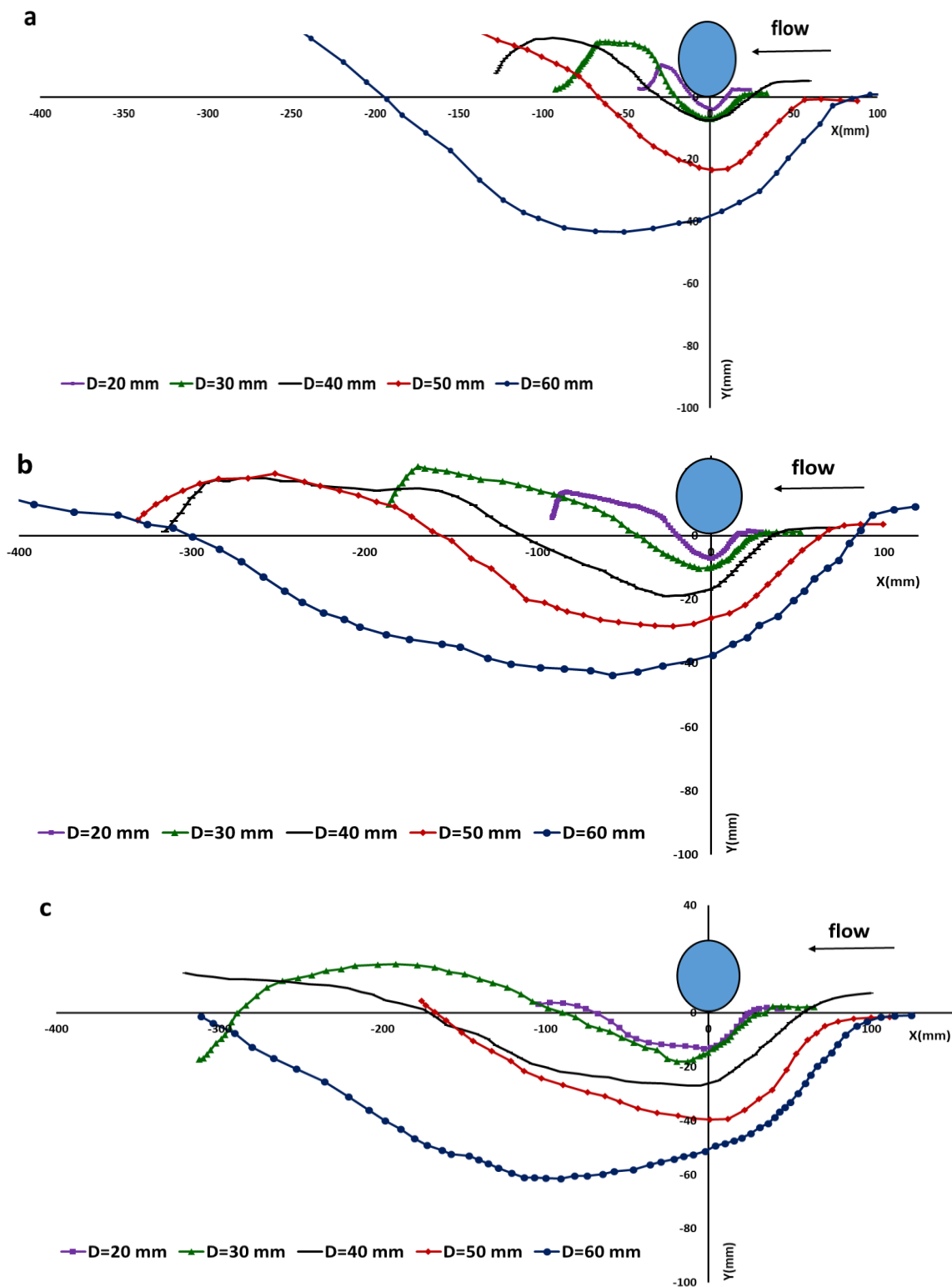


Fig. 7- Final scour profiles under different hydraulic conditions for three Froude numbers. a) 0.2, b) 0.235 and c) 0.26

شکل ۷- پروفیل‌های نهایی آبستنگی در شرایط هیدرولیکی متفاوت برای سه عدد فرود الف) ۰/۲، ب) ۰/۲۳۵ و ج) ۰/۲۶

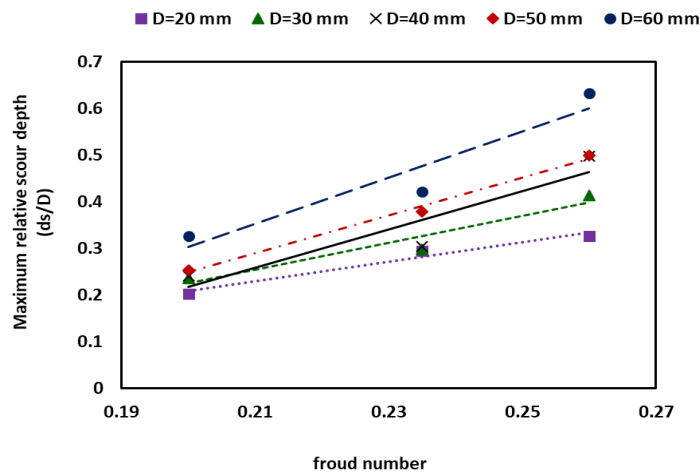


Fig. 8- Dimensionless diagram of the maximum scour depth under the pipe for different Froude numbers.

شکل ۸- نمودار بی بعد حداکثر عمق آبشستگی زیر لوله به ازای اعداد فرود متفاوت

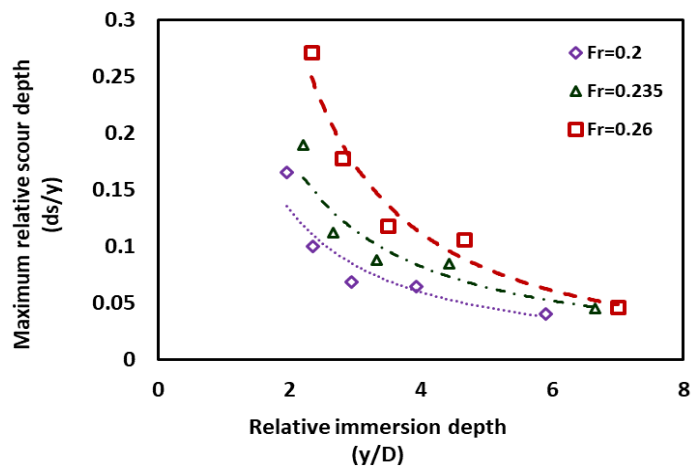


Fig. 9-Dimensionless diagram of the maximum scour depth under the pipe relative to the relative immersion depth.

شکل ۹- نمودار بی بعد حداکثر عمق آبشستگی زیر لوله نسبت به عمق استغراق نسبی

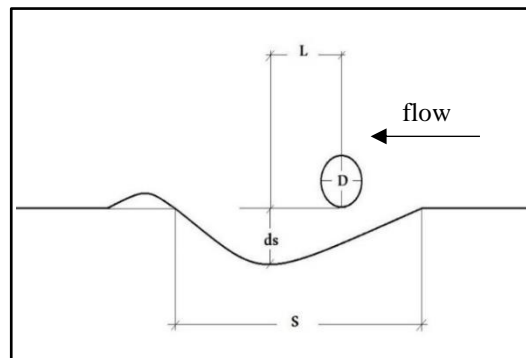


Fig. 10-Schematic of scour hole characteristics.

شکل ۱۰- شماتیک مشخصات چاله آبشستگی

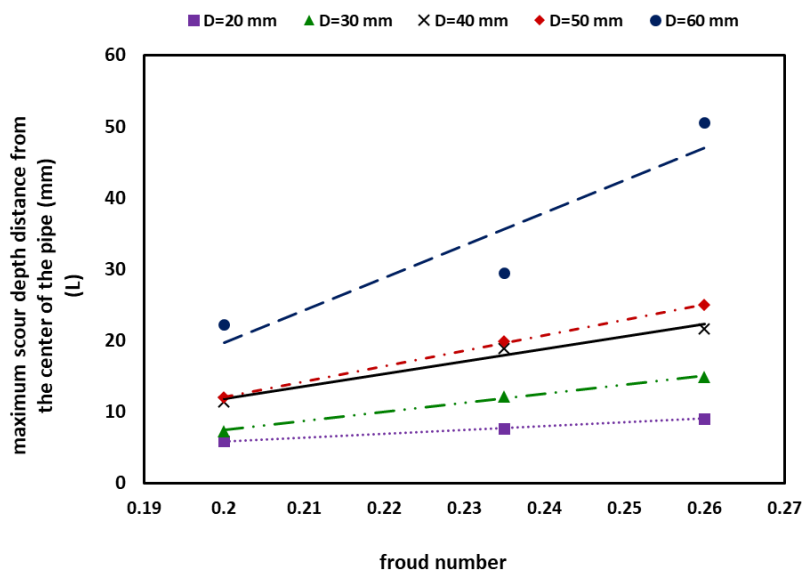


Fig. 11-Changes in the maximum scour depth distance from the center of the pipe for different Froude numbers.

شکل ۱۱- تغییرات فاصله حداکثر عمق آبشستگی از مرکز لوله به ازای اعداد فرود متفاوت

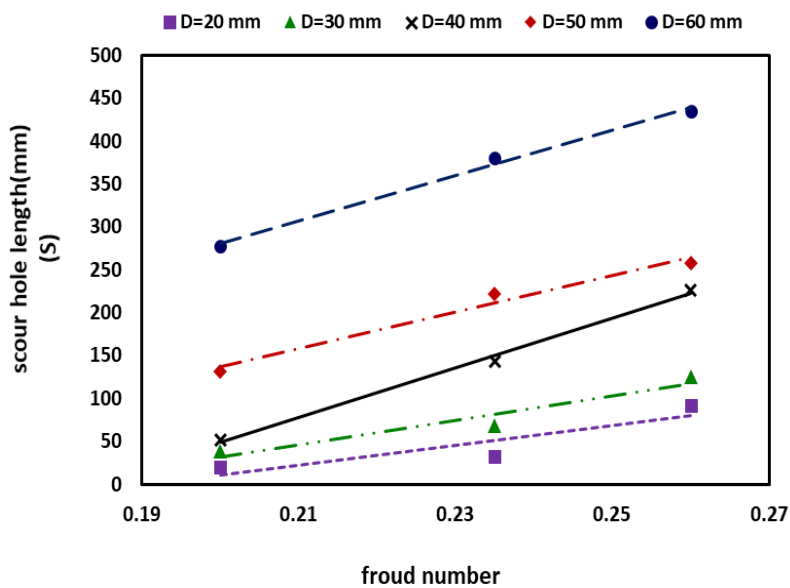


Fig. 12-Changes in scour hole length for different Froude numbers.

شکل ۱۲- تغییرات طول چاله آبشستگی به ازای اعداد فرود متفاوت



### طول چاله آبستگي

در شکل (۱۲) روند تغییرات طول چاله آبستگي (S) برای آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان داد که توسعه چاله آبستگي به ازای تغییرات عدد فرود جریان و قطر لوله در پایین دست لوله اتفاق افتاده است. با افزایش عدد فرود جریان طول چاله آبستگي ازدیاد یافت. کمترین و بیشترین طول چاله به ترتیب در اعداد فرود ۰/۲ و ۰/۲۶ نمایان گردید. در ضمن، با ازدیاد قطر لوله گسترش چاله آبستگي به طرف پایین دست لوله و در نتیجه طول چاله آبستگي افزایش یافت. کمترین و بیشترین طول چاله آبستگي در لوله‌هایی با قطر ۲۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر اتفاق افتاد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط طول چاله آبستگي در لوله‌هایی با قطر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب ۹۲/۵، ۱۵۶/۲ و ۳۱۶/۵ درصد بیش تر از قطر ۲۰ میلی‌متر است.

### نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر قطر لوله بر آبستگي زیر خط لوله عبوری از عرض آبراهه در شرایط خط لوله روی بستر است، بدین جهت داده‌های حاصل از آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج کلی این تحقیق را می‌توان بدین صورت بیان کرد که قطر لوله یکی از عوامل بسیار موثر بر حداکثر عمق آبستگي می‌باشد. بالاترین میزان آبستگي در لوله با قطر ۶۰ میلی‌متر و تحت جریان با عدد فرود ۰/۲۶ مشاهده شده است. کمترین میزان آبستگي در زیر لوله در لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر و تحت جریان با عدد فرود ۰/۲ مشاهده گردیده است. با توجه به پروفیل‌های طولی برداشت شده، می‌توان دریافت که چاله آبستگي زیر لوله با قطر ۶۰

میلی متر دارای بیشترین میزان پیش‌روی نسبت به زمان در مقایسه با دیگر قطرها (قطرهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی متر) می‌باشد به‌گونه‌ای که به‌طور متوسط فاصله حداکثر عمق آبستگي از محور مرکزی لوله در لوله‌هایی با قطر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب ۳/۹، ۹/۷، ۱۱/۴ و ۲۶/۶ درصد بیش از لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر است. هنگامی که از لوله با قطرهای بالا استفاده شود سطح آب در بالادست بالا آمده و سرعت جریان کم می‌شود و خط لوله در قطرهای بالا به‌صورت یک سرریز عمل می‌کند و موجب بیش تر شدن میزان آبستگي می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌شود - گردد برای خطوط لوله عبوری از عرض و بستر رودخانه در حالتی که لوله به‌طور کامل روی بستر قرار دارد، تا حد امکان از قطرهای پایین تر برای طراحی و اجرای خط لوله استفاده گردد تا شاهد کاهش فرار رسوبات و مواد بستری رودخانه در زیر خط لوله باشیم. کاهش پارامترهای ذکر شده از جمله حداکثر عمق آبستگي و پیش‌روی آن، منجر به افزایش ضریب اطمینان در طراحی و عدم نشست نامتقارن زیر خط لوله خواهد شد.

### قدردانی

این مقاله از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول و با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌کنند. ضمناً از حمایت معنوی قطب علمی "بهسازی و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی می‌گردد.

### References

- 1- Azamathulla, H.M., Yusoff, M.A.M. and Hasan, Z.A., 2014. Scour below submerged skewed pipeline. *Journal of Hydrology*, 509, pp.615-620.
- 2- Chao, J.L. and Hennessy, P.V., 1972. Local scour under ocean outfall pipelines. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 44(7), pp.1443-1447.
- 3- Chiew, Y.M., 1990. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), pp.515-529.
- 4- Chiew, Y.M., 1991. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4), pp.452-466.
- 5- Dey, S. and Singh, N.P., 2007. Clear-water scour depth below underwater pipelines. *Journal of Hydro-Environment Research*, 1(2), pp.157-162.
- 6- Dey, S. and Singh, N.P., 2008. Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), pp.588-600.
- 7- Dey, S., 2014. Bed-Load Transport. *Fluvial Hydrodynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 261-326

- 8- Hansen, E.A., 1986. Two-dimensional scour below pipelines. In *Proc. 5th Int. Symp. Offshore Mechanic and Arctic Engineering*, ASME, Tokyo, Japan, 1986.
- 9- Jensen, B.L., Sumer, B.M., Jensen, H.R. and Fredsoe, J., 1990. Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 112(3), pp.206-213.
- 10-Li, F. and Cheng, L., 1999. Numerical model for local scour under offshore pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), pp.400-406.
- 11-Mao, Y., 1986. *The interaction between a pipeline and an erodible bed. Series paper 39*, Doctoral dissertation, Ph. D. thesis. Tech. University of Denmark.
- 12-Mehrabadi, J., Gahraman, B. And Esmaili, K., 2017. Experimental analysis of the interaction between the unidirectional flow and spoiler on mechanism of selfburial pipelines. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, (11), pp. 960-971.(in Persian).
- 13-Postacchini, M. and Brocchini, M., 2015. Scour depth under pipelines placed on weakly cohesive soils. *Applied Ocean Research*, 52, pp.73-79.
- 14-Sumer, B.M., 2002. *The mechanics of scour in the marine environment* (Vol. 17). World Scientific Publishing Company.
- 15-Van Beek, F.A. and Wind, H.G., 1990. Numerical modelling of erosion and sedimentation around offshore pipelines. *Coastal Engineering*, 14(2), pp.107-128.
- 16-Zhao, M., Vaidya, S., Zhang, Q. and Cheng, L., 2015. Local scour around two pipelines in tandem in steady current. *Coastal Engineering*, 98, pp.1-15.