

Research Paper

Scour Control around the Inclined Bridge Pier Using Collar

Sadegh Karimifard¹, Javad Zahiri^{2*}, Ahmad Jafari³

¹ Graduate of Water Structures, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, Email: s.karimi9077@gmail.co

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, Email: j.zahiri@asnruk.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, Email: ajafari@asnruk.ac.ir



10.22125/IWE.2022.352311.1654

Received:
August 31, 2022

Accepted:
January 11, 2023

Available online:
August 23, 2023

Keywords:
Bridge stability,
cylindrical piers, Scour,
Circular collar

Abstract

In addition to the strength and stability of the bridges, designers and engineers pay much attention to bridge appearance and scenery, which led to build bridges with inclined piers to the flow. Therefore, studying the hydraulic conditions and scour countermeasure of inclined bridge piers is necessary. In this study, the effect of collar on scour reduction at the base of vertical and angled cylindrical piers was investigated. The collar installed at the surface of the sediment bed for vertical and inclined piers. The result of experiments showed that the highest scour depth belongs to the inclined bridge pier toward the upstream direction, which is 15% more than the vertical pier. However, the maximum scour depth in front of the angled pier toward downstream was measured to be about 30% lower than the vertical pier. For the pier inclined toward the upstream direction, the collar reduced the scour in front of the pier about 63%. The collar for the pier inclined toward the downstream direction decreased the scour by about 67%. The result shows that the installation of collars can have a high effect on reducing the scour depth for inclined piers.

1. Introduction

Scouring around bridge piers is one of the most important causes of bridge failures. Scouring, especially during floods, causes great damage to the bridge piers. According to Melville and Coleman (2000), bridge failure costs approximately 36 million dollars in New Zealand annually. In Iran, numerous financial and human losses have happened due to bridge failure, make this phenomenon one of the most important concerns of hydraulic research. In addition to the strength and stability of the bridges, designers and engineers pay much attention to bridge appearance and scenery, which led to build bridges with inclined piers to the flow. One of the ways to reduce scour around the bridge piers is to use a collar (Karimae and Zarrati, 2012). The collar is a flat sheet with a low thickness that can be installed at the surface of the sediment bed or a short distance from the riverbed. The collar is used to reduce the effect of destructive water vortices around the base. For this reason, some research has been done on how the collar works. According to research by Zarrati et al. (2004), the closer the collar is to the bed, the greater the effect of reducing the depth of scour around the bridge pier. Mashahir et al. (2004) stated that if the collar is applied under the bed in conditions where its distance from the bed

* **Corresponding Author:** Javad Zahiri

Address: Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran

Email: j.zahiri@asnruk.ac.ir
Tel: +989166531896

surface is high, no significant improvement in collar performance could be seen because the sediments above the collar are quickly washed by the scouring process and will be part of the hole itself.

2. Materials and Methods

In this study, the effect of collar on scour reduction at the base of vertical and angled cylindrical piers was investigated. The experiments were performed in a flume with 12 m long, 1.19 m wide and 0.8 m deep. Sediment with a D50 and specific gravity equal to 1.1 mm and 2.65, respectively was used. The circular collars were used with two times the pier diameter. Dargahi (1990) suggested that the collar thickness should be considered low so that the collar edge itself does not cause flow resistance. Therefore, the collar material was selected from 2 mm Plexiglas, which was close to Alabi (2006) study. Based on various criteria in previous studies, sediments with a geometric standard deviation of 1.3 were used. In this study, a 17-hour experiment was performed based on vertical piers to determine the equilibrium time. In the equilibrium test, about 90% of scouring occurred in the first 7 hours, so the time frame for the experiments was considered 7 hours.

3. Results

The result of experiments showed that the highest scour depth belongs to the inclined bridge pier toward the upstream direction, which is 15% more than the vertical pier. However, the maximum scour depth in front of the angled pier toward downstream was measured to be about 30% lower than the vertical pier. The results showed that using pier inclined toward the upstream direction increases the scour depth by 17%, and the inclined pier toward the downstream direction reduces the scour depth by about 33% compared to the vertical pier. For the pier inclined toward the upstream direction, the collar reduced the scour in front of the pier about 63%. The collar for the pier inclined toward the downstream direction decreased the scour by about 67%.

4. Discussion and Conclusion

Using a collar moves the scour hole from near the pier to a farther distance. The scour hole started at a distance of 0.65 of the pier diameter for the pier inclined toward the downstream direction, and for the pier inclined toward the upstream direction, the scour hole started at a distance of more than 0.8 of the pier diameter. The result shows that the installation of collars can have a high effect on reducing the scour depth for inclined piers.

5. Six important references

- 1) Alabi, P. D. 2006. Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar. Doctoral Dissertation, University of Saskatchewan. 7-58.
- 2) Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116: 1197-1214.
- 3) Karimae, T. M. and Zarrati, A. 2012. Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers. *International Journal of Engineering*. 25(1): 11-16.
- 4) Mashahir, M. B., Zarrati, A. R. and Rezayi, M. 2004. Time development of scouring around a bridge pier protected by collar. *Proceeding's 2nd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2)*, Singapore. 14 -17 November.
- 5) Melville, B. W. and Coleman, S. E. 2000. *Bridge scour*. Water Resources Publication.
- 6) . Zarrati, A. R., Gholami, H. and Mashahir, M. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*. 42: 97-103.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan for financial support.

کنترل آبشستگی اطراف پایه پل زاویه‌دار با استفاده از طوقه

صادق کریمی فرد^۱، جواد ظهیری^{۲*}، احمد جعفری^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

مقاله پژوهشی

چکیده

امروزه در ساخت پل‌ها علاوه بر استحکام و پایداری پل، توجه بسیاری به زیبایی ظاهری و منظره‌ی آن دارند. این موضوع باعث شده علاوه بر ساخت پل‌هایی با پایه‌ی قائم، پل‌هایی با پایه‌های زاویه‌دار نسبت به جریان طراحی و احداث گردد. لذا بررسی شرایط هیدرولیکی و پایداری پایه‌های پل زاویه‌دار و روش‌های کاهش آبشستگی در اطراف آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق اثر طوقه دایره‌ای بر کاهش آبشستگی در پایه‌ی پل استوانه‌ای زاویه‌دار بررسی گردید. طوقه‌های مورد استفاده در این تحقیق در سطح بستر نصب شده و اثر آن بر روی عمق آبشستگی پایه‌ی پل استوانه‌ای در حالت زاویه‌دار خلاف جهت جریان و زاویه‌دار در جهت جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات در شرایط بدون طوقه نشان داد که قرار گرفتن پایه‌ی زاویه‌دار خلاف جهت جریان باعث افزایش ۱۵ درصدی عمق آبشستگی و قرار گرفتن پایه‌ی زاویه‌دار در جهت جریان باعث کاهش حدود ۳۰ درصدی عمق آبشستگی نسبت به حالت قائم می‌شود. استفاده از طوقه باعث کاهش آبشستگی در پایه‌ی پل خلاف جهت جریان به میزان ۶۳ درصد و پایه‌ی در جهت جریان به میزان ۶۷ درصد نسبت به حالت بدون طوقه گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نصب طوقه‌ها تاثیر زیادی بر کاهش عمق آبشستگی در پایه‌های پل زاویه‌دار دارد.

کلید واژه‌ها: پایداری پل، پایه استوانه‌ای، آبشستگی، طوقه دایره‌ای

^۱ کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایمیل: s.karimi9077@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایمیل: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایمیل: ajafari@asnrukh.ac.ir

* نویسنده مسئول



مقدمه

پدیده‌ی آبخستگی در این مورد می‌شود احساس می‌گردد.



شکل (۱): نمایی از پل غدیر در اهواز با پایه‌های زاویه‌دار نسبت به جریان

یکی از راه‌های کنترل آبخستگی استفاده از طوقه می‌باشد که صفحه‌ای صاف با ضخامت نسبتاً کم بوده و بر روی بستر و یا زیر بستر در اندازه‌ها و اشکال مختلف نصب می‌گردد و روشی به صرفه از نظر اقتصادی و نیز موثر در کاهش آبخستگی به حساب می‌آید. (Zarrati et al. (2004) به مطالعه عملکرد طوقه در جلوگیری از آبخستگی پایه‌ی مستطیلی با دماغه‌ی دایره‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که هر چه فاصله‌ی طوقه نسبت به بستر نزدیکتر باشد، طوقه تأثیری بیشتری بر کاهش عمق آبخستگی در اطراف پایه پل خواهد داشت. (Mashahir et al. (2004) پژوهشی بر روی توسعه زمانی عمق آبخستگی برای پایه‌های پل همراه با طوق انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که اگر طوقه در شرایطی که در زیر سطح و در شرایطی که فاصله‌ی آن از سطح تراز بستر زیاد باشد به پایه متصل گردد، پیشرفت قابل تاملی در عملکرد طوق دیده نمی‌شود، زیرا مقدار رسوباتی که در بالای طوقه هستند به سرعت بوسیله‌ی فرآیند آبخستگی شسته می‌شوند و خود بخشی از گودال خواهند بود. (Zarrati et al. (2006) با انجام پژوهشی بر روی گروه پایه دایره‌ای با حضور طوقه‌های به هم پیوسته و جدا از هم و

پل‌ها سازه‌هایی هستند که از دوران کهن تا به امروز همواره در زندگی انسان و شهرهای متمدن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سال‌ها است که پل‌های بسیاری در دنیا تخریب و یا دچار آسیب جدی می‌گردند. در اکثر موارد عامل اصلی خرابی پل‌ها عموماً غیرسازه‌ای و در اثر عوامل هیدرولیکی مثل آبخستگی و فرسایش بستر پایه‌ی پل است. بر همین اساس مطالعه‌ی پدیده آبخستگی و شناخت عوامل تأثیرگذار بر آن بسیار مورد توجه می‌باشد.

آبخستگی موضعی که اطراف پایه و تکیه‌گاه پل‌ها صورت می‌گیرد، در نتیجه‌ی شتاب جریان و گسترش سیستم گردابی ناشی از بسته شدن این بخش‌ها در مقابل جریان می‌باشد. این پدیده باعث شکل‌گیری یک مکانیسم سه بعدی جریان گردابی در اطراف سازه گشته و باعث دور شدن ذره‌های رسوب از بستر و آبخستگی می‌گردد. در اکثر موارد عمقی که آبخستگی موضعی ایجاد می‌کند تقریبی به میزان ۱۰ برابر عمقی است که آبخستگی ناشی از ننگ‌شدگی و آبخستگی عمومی ایجاد می‌کند (Kayaturk, 2005). بر طبق تخمین Melville and Coleman (2000) سالانه تقریباً ۳۶ میلیون دلار در کشور نیوزیلند برای مخارج ناشی از آبخستگی صرف می‌گردد. در ایران نیز از این دست خسارات مالی و جانی متعدد ناشی از آبخستگی اتفاق افتاده است. توسعه ساخت پل‌ها و اهمیت موضوع زیباسازی پل‌ها باعث شده که علاوه بر ساخت پل‌هایی با پایه حالت قائم و با مقطع یکنواخت در ارتفاع، پل‌هایی نیز با پایه‌های با مقطع متغیر در ارتفاع و یا پل‌هایی با پایه زاویه‌دار ساخته شوند (شکل ۱). در این میان تحقیقاتی در مورد پایه‌های زاویه‌دار انجام شده که با دقت به پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه پایه‌های پل زاویه‌دار، ضرورت بررسی بیشتری در مورد جلوگیری پدیده‌ی آبخستگی پایه زاویه‌دار که منتج به پیشنهاد روش‌های گوناگونی جهت کنترل یا کاهش

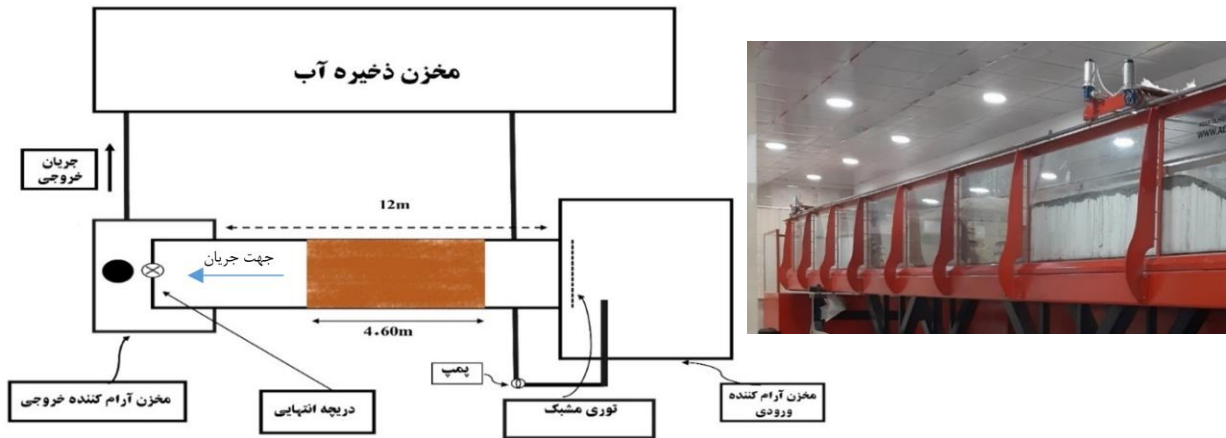
هیدرولیکی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام پذیرفت. آزمایش‌های این مطالعه، در وضعیت آب زلال و با کاربرد رسوبات غیر چسبنده در بستر، با استفاده از فلوم آزمایشگاهی انجام شده است. فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول ۱۲ متر، عرض ۱۱۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر است. کف کانال اصلی از جنس فلز و دیواره‌های کناری آن از جنس شیشه می‌باشد. جریان آب بعد از طی نمودن مسیر اصلی فلوم و گذشتن از دریچه‌ای که در انتهای آن تعبیه گردیده، به مخزن آرام کننده انتهایی وارد گشته و بوسیله‌ی لوله به مخزن ذخیره‌ی آب وارد می‌شود. در شکل ۲ نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده ارائه شده است. فاصله پایه از ورودی مخزن در بالادست برابر با ۶/۵ متر انتخاب گردید. محققان معیارهای گوناگونی برای انتخاب انداره‌ی مناسب پایه جهت انجام آزمایشات ارائه کرده‌اند. (Shen et al. (1969) و Alabi (2006) پیشنهاد نمودند که عرض کانال اصلی حداقل باید ۸ برابر عرض پایه باشد. Chiew and Melville (1987) بیان کردند که عرض پایه نباید بزرگتر از ۱۰ درصد عرض فلوم باشد. در این مطالعه بر طبق نظرات ارائه شده، عرض پایه ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا آزمایشات تحت تاثیر اثر انسداد کناره‌های کانال نباشند. در مورد ضخامت طوقه Dargahi (1990) پیشنهاد کرد که ضخامت طوقه کم در نظر گرفته شود تا لبه‌ی طوقه باعث ایجاد مقاومت در برابر جریان نگردد. بر این اساس جنس طوقه‌ها از جنس پلکسی‌گلاس ۲ میلی‌متر انتخاب شده که نزدیک به آزمایشات (Alabi (2006) بود. همچنین با توجه به پیشنهاد محققین در تحقیقات مختلف از جمله (Singh et al. (2001) و Alabi (2006) و Moncada et al. (2009) در این مقاله از طوقه ۲ برابر قطر پایه با شکل دایره‌ای استفاده شد.

همچنین کاربرد هم‌زمان طوقه‌ی پیوسته و سنگچین اظهار داشتند که کاربرد هم‌زمان طوقه به هم پیوسته و سنگ چین باعث می‌شود آبشستگی پایه حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کمتر گردد. Karimae and Zarrati (2012) در مطالعه‌ای اثر طوقه‌هایی به عرض سه برابر عرض پایه بر سطح تراز بستر در پیرامون پایه‌ی دایره‌ای شکل به قطر چهار سانتی‌متر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات این محققین نشان داد که عمق آبشستگی به میزان ۲۰ درصد کاهش یافته و گستره‌ی گودال آبشستگی ۱۵ درصد افزایش یافته است. در تحقیقی که بر روی تاثیر طوقه بر میزان آبشستگی اطراف پایه‌های پل در شرایط جریان همراه با آشغال‌های معلق صورت گرفت، مشخص گردید که وجود طوقه باعث کاهش ۳۹ درصدی عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون طوقه می‌شود. با حضور آشغال‌های معلق در اطراف پایه پل میزان کارایی طوقه تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد (Hamidifar et al. 2022). مطالعات صورت گرفته بر روی هیدرولیک جریان در اطراف پایه‌های پل در حضور طوقه نشان می‌دهد، حضور طوقه از طریق حفاظت از کناره‌های پایه، جایی که تنش برشی از تنش بحرانی ذرات رسوبی فراتر می‌رود، باعث حذف آبشستگی در بالادست پایه استوانه‌ای می‌شود. علاوه بر این توزیع سرعت جریان در منطقه میان پایه و دیواره‌های کناری کانال نشان می‌دهد که استفاده از طوقه باعث جداشدگی جریان در نقطه با فاصله زیاد در بالادست پایه می‌گردد (Williams et al. 2022).

در مطالعه حاضر سعی شده است تا تاثیر زاویه‌دار شدن پایه پل و نیز کاربرد طوقه بر روی پایه‌های با زاویه خلاف جهت جریان و در جهت جریان مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

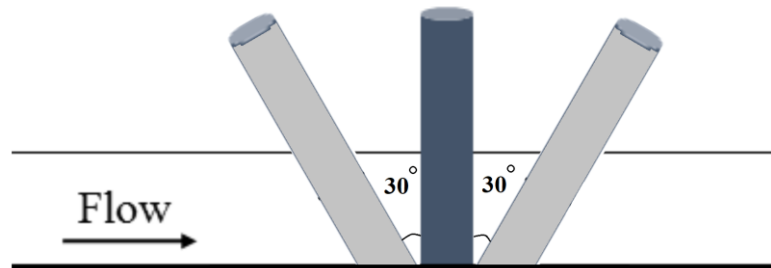
پژوهش حاضر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و



شکل (۲): نمای از فلوم مورد استفاده و سامانه چرخش آب در فلوم

گردید. شکل ۳ طرح شماتیک نحوه‌ی قرارگیری پایه در زوایای مختلف و مدل فیزیکی پایه‌ی استوانه‌ای به همراه طوقه در آزمایشات را نشان می‌دهد.

در این تحقیق از سه زاویه: قائم، ۳۰ درجه نسبت به راستای قائم در جهت جریان و ۳۰ درجه نسبت به راستای قائم خلاف جهت جریان استفاده



شکل (۳): طرح شماتیک از نحوه‌ی قرارگیری پایه در حالت زاویه‌دار و مدل واقعی پایه‌ی استوانه‌ای همراه با طوقه

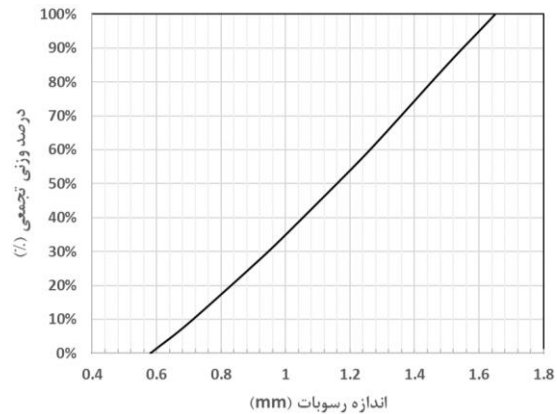
باشد، می‌توان از اثر غیریکنواختی دلنه‌بندی چشم پوشی کرد. ضریب یکنواختی دانه‌های رسوب استفاده شده برابر با $1/3$ اندازه‌گیری شد. در شکل ۴ نمودار دانه‌بندی ذرات و نمایی از دانه‌های رسوب مورد استفاده نشان داده شده است.

اگر محدوده‌ی عمق جریان در آزمایشات به شکل مناسب انتخاب نگردد، می‌تواند بر وضعیت آبشستگی اثرگذار باشد. در این زمینه Melville and Sutherland (1988) اظهار کرده‌اند که اگر نسبت عمق جریان به قطر پایه بزرگتر یا مساوی $2/5$ باشد، اثر عمق جریان بر آبشستگی از بین خواهد رفت. در ضمن Melville (1997) مقدار $1/4$ برای نسبت عمق

در این تحقیق بر اساس معیارهای مختلف ارائه شده در تحقیقات گذشته، رسوبات با ضریب یکنواختی $1/3$ و قطر D_{50} برابر با $1/1$ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. (Breusers and Raudkivi (1991) و Raudkivi and Ettema (1983) پیشنهاد کرده‌اند که قطر میانگین دانه‌بندی رسوب بستر باید بیشتر از $0/7$ میلی‌متر باشد. (Chiew و Raudkivi (1991) و Melville (1987) بیان داشتند که اگر نسبت عرض پایه به قطر میانگین دانه‌بندی بیشتر از 50 باشد می‌توان از تاثیر قطر دانه‌ها بر آبشستگی چشم پوشی کرد، که این شاخص در تحقیق حاضر حدود 55 محاسبه گردید. شفاعی بجستان (۱۳۹۴) اظهار داشت که اگر ضریب یکنواختی ذرات دانه‌بندی کمتر از $1/3$

آبشستگی در گام‌های زمانی کوتاه ۵ دقیقه‌ای و سپس گام‌های زمانی ۱۰ و ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای تا پایان چهار ساعت اول صورت گرفت و سپس تا پایان آزمایش، برداشت‌ها با گام ۱ ساعته انجام گرفت تا هنگامی که در ۲ ساعت پایانی انجام آزمایش نوسان آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر گردید. در این آزمایش حدود ۷۰ درصد عمق آبشستگی در ۶۰ دقیقه‌ی ابتدایی آزمایش رخ داد که این زمان کمتر از ۱۰ درصد زمان تعادل می‌باشد. همچنین ۸۰ درصد عمق تعادل در دامنه‌ی زمانی ۳ ساعت اول که برابر با ۲۰ درصد زمان تعادل می‌باشد، رخ داد که با تحقیقات Melville and Chiew (1999) نشان دادند ۸۰ درصد عمق آبشستگی در بازه‌ی ۵ تا ۴۰ درصدی زمان تعادل رخ می‌دهد، همخوانی دارد. پارامترهای مرتبط با هیدرولیک جریان و رسوبات در جدول ۱ ارائه شده است.

جریان به پایه را مناسب دانست. بر این اساس عمق ۱۵ سانتی‌متری جهت انجام آزمایشات انتخاب گردید.



شکل (۴): نمودار دانه‌بندی ذرات مورد استفاده در تحقیق

جهت تعیین زمان تعادل در این تحقیق، آزمایش ۱۷ ساعته بر روی پایه استوانه‌ای حالت قائم صورت پذیرفت. از آنجا که نوسان عمق آبشستگی در آغاز آزمایش شدید است، در بازه‌ی ابتدایی آزمایش، عمق

جدول (۱): مشخصات جریان و مدل در آزمایشات

پارامتر	y(m)	V(m/s)	Q(lit/s)	V/V _c	Fr	D ₅₀	D(m)
	۰/۱۵	۰/۳۴	۶۱	۰/۹۵	۰/۲۸	۱/۱	۰/۰۶

$$f\left(\theta, \sigma, \frac{d_s}{y}, \frac{D}{y}, \frac{D_{50}}{y}, \frac{h_c}{y}, \frac{W}{y}, \frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot y}, \frac{g \cdot y}{V^2}, \frac{V}{V_c}\right) = 0 \quad (2)$$

در پارامترهای رابطه (۲) می‌توان عدد رینولدز و فرود را مشاهده کرد. علاوه بر این با ترکیب برخی از اعداد بدون بعد بدست آمده می‌توان نوشت:

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\theta, \sigma, \frac{W}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{h_c}{D}, Re, Fr, \frac{V}{V_c}\right) \quad (3)$$

حال با توجه به ثابت بودن مشخصات رسوبات، سیال و تراز قرارگیری طوقه تعدادی از پارامترها که در طول آزمایشات ثابت می‌باشند، می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد. با توجه به شرایط آشفته بودن جریان از عدد رینولدز صرف نظر می‌گردد. رابطه‌ی نهایی بدست آمده با حذف پارامترهای اشاره شده به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d_s}{D} = f(\theta, Fr) \quad (4)$$

آنالیز ابعادی

بر اساس نظریه‌ی پی-باکینگهام و با توجه به پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی اطراف پایه‌های پل می‌توان رابطه زیر را نوشت:

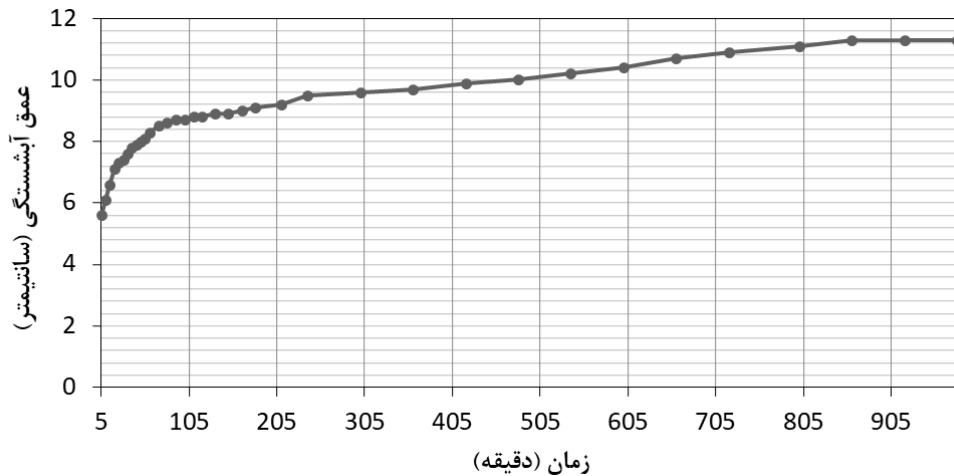
$$f(d_s, \rho, \mu, g, V, D, D_{50}, y, \sigma, W, h_c, \theta, V_c) = 0 \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱) d_s عمق آبشستگی، ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، g شتاب ثقل، V سرعت جریان، D عرض پایه، D_{50} قطر میانگین دانه‌ها، y عمق جریان، σ ضریب یکنواختی ذرات رسوبی، W عرض طوقه، h_c نسبت تراز طوقه، θ زاویه‌ی پایه با جریان و V_c سرعت بحرانی می‌باشند. با بهره‌گیری از روش باکینگهام و انتخاب ρ ، V و y به عنوان متغیرهای تکراری و پس از انجام محاسبات، فاکتورهای بدون بعد به صورت زیر بدست آمدند:

زمانی برای انجام آزمایشات ۷ ساعت در نظر گرفته شد. در شکل ۵ دیاگرام توسعه‌ی زمانی آبشستگی ارائه شده است.

نتایج و بحث

در آزمایش تعادل حدود ۹۰ درصد آبشستگی در ۷ ساعت ابتدایی رخ داد، بر این اساس دامنه‌ی



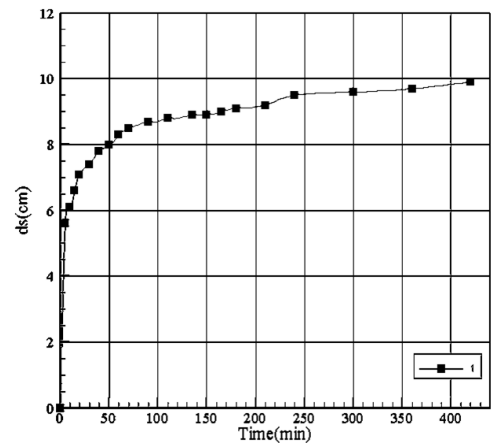
شکل (۵): نمودار گسترش زمانی آبشستگی در آزمایش زمان تعادل

پایین‌رونده این‌گونه می‌توان گفت که در ۱۸۰ دقیقه‌ی ابتدایی یعنی از زمانی که سرعت جریان به شرایط آستانه‌ی حرکت رسیده تا ۱۸۰ دقیقه پس از آن حدود ۹/۱ سانتی‌متر آبشستگی مشاهده شد که این میزان حدود ۹۰ درصد آبشستگی در ۷ ساعت اول آزمایش و ۸۰ درصد آبشستگی در طی ۹۸۰ دقیقه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد در بازه‌ی زمانی ابتدایی آزمایش قدرت گردابه‌های نعل‌اسبی و جریان پایین‌رونده بسیار بالا می‌باشد اما با گذشت زمان از قدرتش کاسته می‌شود. همانطور که در هنگام آزمایش هم مشاهده شد در بازه‌ی پایانی آزمایش نهایت نیرو و توان گردابه‌ها بر دانه‌های رسوب این بود که آن‌ها را در درون گودال آبشستگی وادار به لغزش کنند ولی توان خارج ساختن آنها از گودال را نداشته که در این حالت می‌شود گفت عمق تعادل ایجاد شده است. در شکل ۶-الف نمودار گسترش عمق حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان در جلوی پایه، شکل ۶-ب تصویر از بستری شکل گرفته پس از آزمایش و در شکل ۶-ج نقشه کانتور مربوط به آبشستگی ارائه شده است.

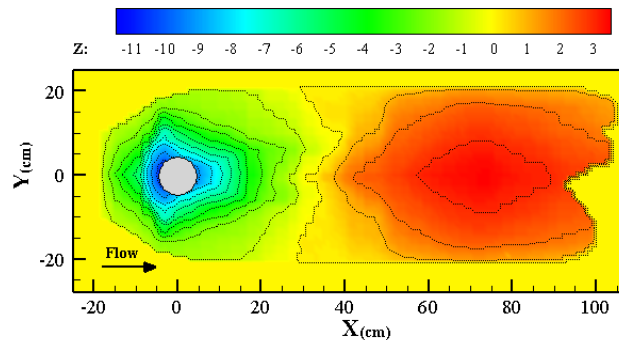
در ابتدای آزمایش پایه استوانه‌ای قائم، رسوبات بستر از کناره‌های پایینی پایه‌ی پل به حرکت درآمده و گردابه‌های برخاستگی توسعه می‌یابند. در ادامه با رسیدن شرایط جریان به حالت آستانه‌ی حرکت شیارهایی در کناره‌ی پایه ملاحظه می‌شود که تقریباً به اندازه‌ی ۳ میلی‌متر رسوبات کنار پایه برش خورده‌اند و جابجا شده‌اند. با پایدار شدن جریان در وضعیت پیش‌بینی شده مشاهده می‌شود علاوه بر کناره‌ها در پشت پایه هم ذرات رسوب به حرکت درآمده‌اند که نشان می‌دهد گردابه‌های برخاستگی با توان بیشتری بر بستر رسوبی پشت پایه نیرو وارد می‌کنند که این باعث می‌شود رسوبات جدا شده از پشت پایه کم‌کم بر روی هم‌دیگر انباشته و به شکل یک پشته در آیند. گردابه‌های نعل‌اسبی و جریان پایین‌رونده در جلوی پایه نیز حفره‌ای کوچک که به سرعت در حال بزرگ شدن می‌باشد را شکل داده و رسوبات خروجی از درون این حفره به سمت پشت‌های شکل‌گرفته در پشت پایه حرکت می‌کنند و مدام بر طول پشته و ارتفاع آن افزوده می‌شود. درباره‌ی توان گرداب نعل‌اسبی و جریان



ب



الف



ج

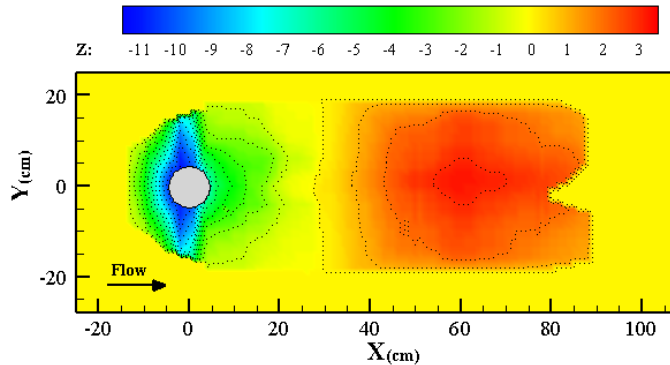
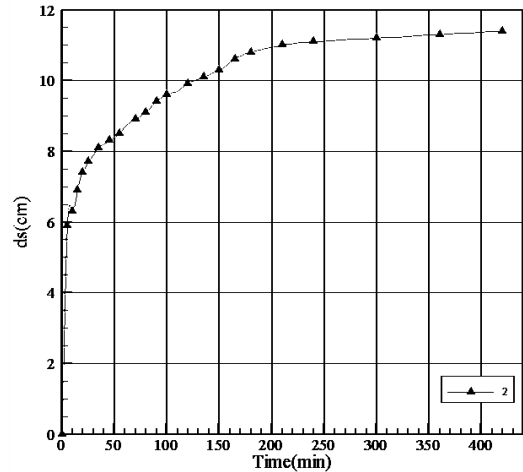
شکل (۶): الف) نمودار گسترش حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان، ب) توپوگرافی ایجاد شده‌ی بستر، ج) نقشه‌ی کانطور برای پایه پل استوانه‌ای در حالت قائم

رسوبی می‌شود. رسوبات به سرعت از حفره خارج می‌شوند و به شکل پشته‌ای در می‌آیند که برآمدگی آن در مرکز پشته که با شیب منظمی به سمت کناره‌های پشته در جهت عرضی بوده و به صورت طولی در سمت پایین دست جریان است، گسترش می‌یابد. مکانیزم و فرآیند آبشستگی در این حالت قرارگیری پایه همانند پایه در حالت قائم می‌باشد با این تفاوت که در این حالت، زاویه دار بودن پایه به سمت بالادست باعث متمرکز شدن جریان پایین رونده می‌گردد. این تمرکز در جریان پایین رونده باعث افزایش نیروی آب و شسته شدن رسوبات در جلوی پایه‌ی پل و در نتیجه افزایش عمق نهایی می‌شود. در سه ساعت ابتدایی آزمایش حدود ۱۰/۸ سانتی‌متر یعنی نزدیک ۱۰ درصد عمق آبشستگی جلوی پایه بیشتر از آبشستگی در مدت هفت ساعت در حالت قائم رخ می‌دهد. در حالت کلی در این

در آزمایش مربوط به پایه زاویه دار ۳۰ درجه خلاف جهت جریان در ابتدا مشاهده گردید که جریان پایین رونده هر چند با توان کم شروع به فعالیت می‌کند اما به تدریج بر قدرت آن افزوده می‌شود. اولین نشانه‌های آبشستگی در کناره‌های پایه دیده می‌شود و در ادامه با نزدیک شدن شرایط جریان به حالت پیش‌بینی شده گردابه‌های نعل اسبی با فعالیت‌های خود باعث برش خوردن رسوبات بستر در جلوی پایه می‌شوند. در ادامه حفره‌ی آبشستگی در پشت پایه هم شروع به گسترش می‌کند که نشان دهنده‌ی فعالیت‌های گردابه‌های برخاستگی می‌باشد. با رسیدن عمق جریان به ۰/۱۵ متر و سرعت به ۰/۳۴ متر بر ثانیه و برقراری شرایط پایدار جریان، گردابه‌های پیرامون پایه با قدرت بالا به فعالیت خود ادامه می‌دهند که باعث شکل‌گیری حفره‌ی کامل پیرامون پایه و گسترش پشته‌ی

کاهش پیدا می‌کنند. در شکل ۷-الف نمودار گسترش عمق حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان در جلوی پایه، شکل ۷-ب تصویری از بستر شکل گرفته پس از آزمایش و در شکل ۶-ج نقشه کانتور چاله آبشستگی ارائه شده است.

آزمایش ۱۵ درصد آبشستگی بیشتر از حالت قائم رخ داده است. در این آزمایش ۹۵ درصد عمق آبشستگی در سه ساعت اول رخ داده است که نشان می‌دهد قدرت گردابه‌های پیرامون پایه پس از گذشت زمان و رسیدن به عمق تعادل به شدت

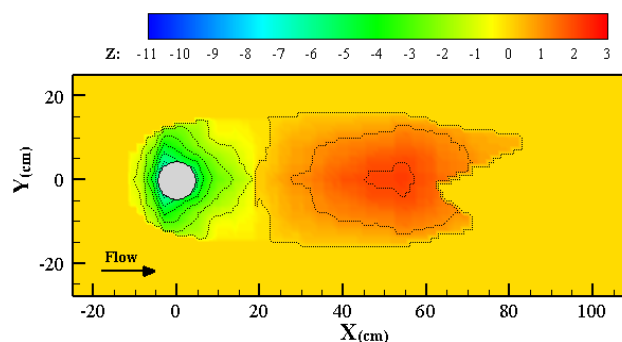
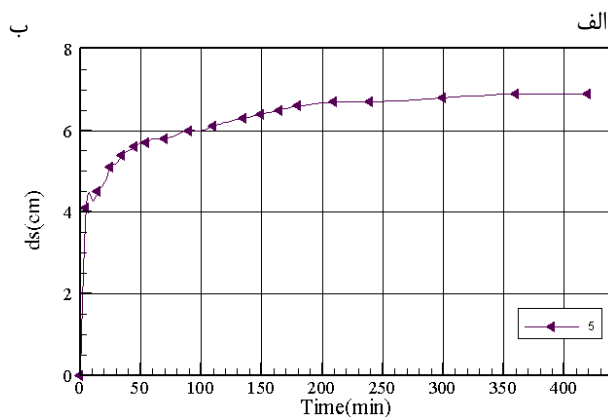


شکل (۷): الف) نمودار گسترش حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان، ب) توپوگرافی ایجاد شده‌ی بستر، ج) نقشه‌ی کانتور برای پایه زاویه‌دار خلاف جهت جریان

۷ که البته از یک طرف کشیده‌تر است، در می‌آید. با مقایسه‌ی سرعت افزایش عمق آبشستگی در این پایه با حالت قائم و خلاف جهت جریان این نکته مشاهده می‌شود که سرعت پیشرفت عمق در این حالت نسبت به دو آزمایش مذکور کمتر می‌باشد، به طوری که در ۳ ساعت ابتدایی در این آزمایش ۶/۶ سانتی‌متر عمق آبشستگی رخ داده است که در مقایسه با زمان مشابه در آزمایش شماره یک (حالت قائم) حدود ۲۸ درصد کاهش و در مقایسه با زمان مشابه در آزمایش شماره دو (زاویه‌دار خلاف جهت

در آزمایش پایه پل زاویه‌دار در جهت جریان، ابتدا جدا شدن ذرات رسوب از کناره‌های پایه صورت گرفته که با بالا رفتن دبی، شیارها و حفره‌های ایجاد شده در کناره‌ها به سرعت به سمت جلوی پایه گسترش یافته و دانه‌های رسوب به طرف پایین دست جریان منتقل می‌شوند. در ادامه با گذشت زمان و پایداری جریان در شرایط مشخص شده، حفره‌ی جلوی پایه بزرگتر می‌شود و به شکل نیم‌دایره در می‌آید، در حالی که در پایین دست پایه پشته‌ی رسوبی تشکیل شده که بخش انتهایی آن به صورت

آزمایش ۶/۹ سانتی متر اندازه گیری شد. نمودار روند توسعه‌ی زمانی آبشستگی، تصویری از بستر شکل گرفته پس از آزمایش و توپوگرافی دوبعدی بستر در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل (۸): الف) نمودار گسترش حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان، ب) توپوگرافی ایجاد شده‌ی بستر، ج) نقشه‌ی کانور برای پایه زاویه‌دار در جهت جریان

در آزمایش پایه زاویه‌دار در خلاف جهت جریان همراه با طوقه، در دقایق آغازین هیچ حرکتی در جلوی پایه از سوی ذرات بستر دیده نمی‌شود. اما به مرور زمان با افزایش دبی در سمت گوشه‌های پایینی طوقه ذرات شروع به حرکت می‌کنند که نشان دهنده‌ی فعالیت‌های گردابه‌های برخاستگی می‌باشد. فعالیت گردابه‌ها با نزدیک شدن سرعت جریان به سرعت آستانه‌ی حرکت قدرت بیشتری پیدا می‌کنند و حفره‌ها در کناره‌های پایینی طوقه نمایان‌تر می‌شوند و افتادن و چرخش دانه‌های رسوب بوسیله‌ی گردابه‌ها رویت می‌شود. با رسیدن دبی به ۶۱ لیتر بر ثانیه و سرعت ۰/۳۴ متر بر ثانیه رسوبات

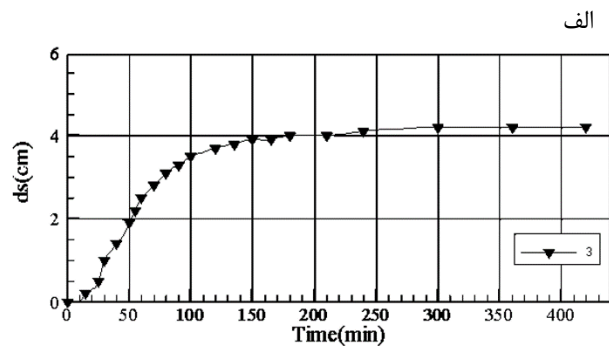
در حالت لرزش بوده اما آبشستگی در پشت پایه شروع به گسترش می‌کند. سرانجام پس از گذشت ۱۵ دقیقه از رسیدن جریان به شرایط پایدار، در جلوی پایه هم بر اثر نیروی گردابه‌های پایین‌رونده رسوبات شسته و آبشستگی اندک اندک رخ می‌دهد اما هنوز حفره‌ی آبشستگی در جلو و پشت پایه به هم نرسیده‌اند. در ادامه و بعد از حدود ۳۰ دقیقه حفره‌ها و شیارهای کوچک ایجاد گشته و در پیرامون پایه به هم متصل می‌شوند و پشت‌های رسوبی نیز ارتفاعش بوسیله‌ی رسوبات تخلیه‌شده از حفره‌ها بالاتر می‌رود. در حفره‌ی پشت پایه دو مسیر جداگانه وجود دارد که نسبت به دیگر نقاط حفره‌ی

۵۷ درصدی آبشستگی شده است. در این آزمایش ۹۵ درصد آبشستگی در ۱۸۰ دقیقه ابتدایی زمان تعادل رخ داده است. شکل ۹ نمودار گسترش عمق حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان در جلوی پایه، ۹- ب تصویر از بستر شکل گرفته پس از آزمایش و شکل ۹-ج نقشه کانتور مربوط به آبشستگی صورت گرفته در اطراف پایه زاویه دار خلاف جهت جریان همراه با طوقه را نشان می‌دهد.

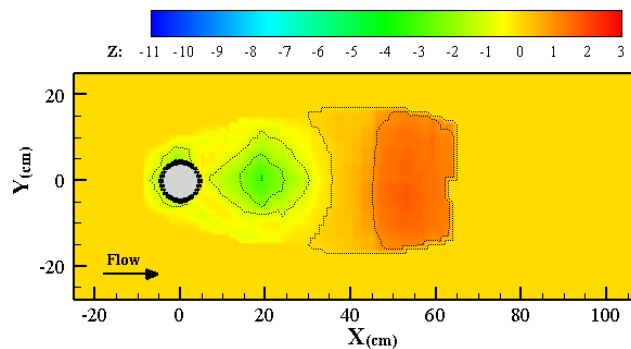
پشت پایه دارای عمق کمتری می‌باشند و به حالت برجستگی درون گودال مشخص می‌باشند که می‌توان آن را از اثرات طوقه بر حفره‌ی آبشستگی دانست. در ۴ ساعت ابتدایی آزمایش عمق آبشستگی در جلوی پایه حدود ۴/۲ سانتی متر بوده که در مقایسه با مدت مشابه در حالت بدون طوقه حدود ۶۴ درصد آبشستگی کمتری رخ داده است. در پایان آزمایش مشخص گردید که وجود طوقه باعث کاهش



ب



الف



ج

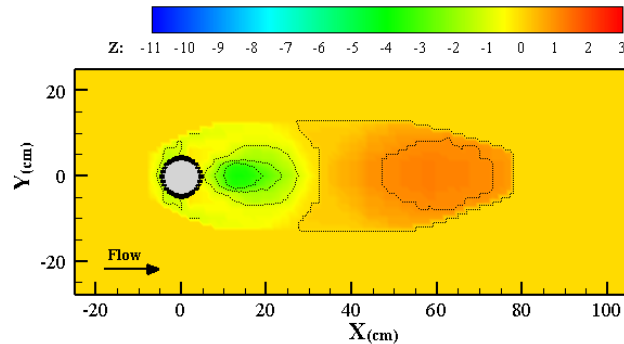
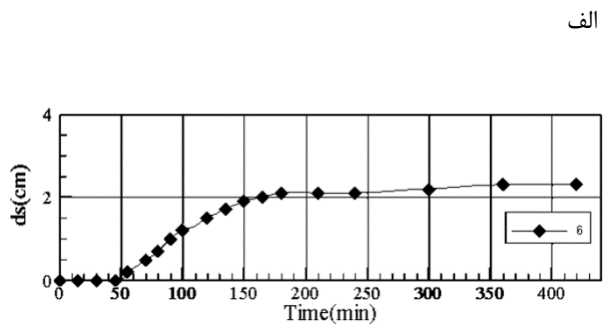
شکل (۹): الف) نمودار گسترش حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان، ب) توپوگرافی ایجاد شده‌ی بستر، ج) نقشه‌ی کانتور برای پایه زاویه‌دار خلاف جهت جریان همراه با طوقه

کناره‌های پایه شسته شدن رسوبات و حرکت آن‌ها به سمت پایین دست دیده می‌شود. این حفره‌های کوچک در کناره‌ها و پشت پایه پس از گذشت ۲۰ دقیقه از پایداری جریان در وضعیت پیش‌بینی شده به هم متصل شدند. این گسترش عمق از کناره‌ها و پشت پایه همچنان ادامه دارد، اما در امتداد مرکز جلوی پایه هیچ حرکتی مشاهده نمی‌شود. پس از گذشت حدود یک ساعت از پایداری جریان، دانه‌های

در آزمایش پایه زاویه‌دار در جهت جریان همراه با طوقه، در ابتدا حرکتی در دانه‌های رسوب مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش دبی جریان حرکت ذرات رسوب در پشت پایه و بعد از آن در کناره‌های پایه آغاز می‌شود. به تدریج با نزدیک شدن به شرایط هیدرولیکی پیش‌بینی شده، حفره‌ای کوچک که در قسمت پایین دست و در امتداد مرکز پایه از لبه‌ی طوقه شروع به گسترش می‌کند. در ادامه از

کنترل شده است. بیشترین مقدار آبشستگی در این آزمایش که ناشی از اثر جریان‌های پایین‌رونده می‌باشد حدود ۳/۸ سانتیمتر است که در مقایسه با بیشترین عمق آبشستگی در پایه‌ی بدون طوقه حدود ۴۵ درصد کاهش عمق آبشستگی می‌باشد. نمودار روند توسعه‌ی زمانی آبشستگی، تصویری از بستر شکل گرفته پس از آزمایش و نقشه کانتور بستر در حالت پایه در جهت جریان همراه با طوقه در شکل ۱۰ ارائه شده است.

رسوب در جلوی پایه شروع به جدا شدن می‌کنند و شیارهای تشکیل شده در کناره‌ها هم بهم پیوسته و نیم دایره‌ی جلویی پایه و زیر طوقه به طور کامل شسته می‌شود. در این آزمایش بیشترین مقدار آبشستگی در ناحیه جلویی پایه حدود ۲/۳ سانتی متر بود. این میزان آبشستگی در مقایسه با آبشستگی آزمایش بدون طوقه حدود ۶۷ درصد کاهش را در جلوی پایه نشان می‌دهد، که نشان می‌دهد قدرت جریان‌های پایین‌رونده و نعل‌اسبی



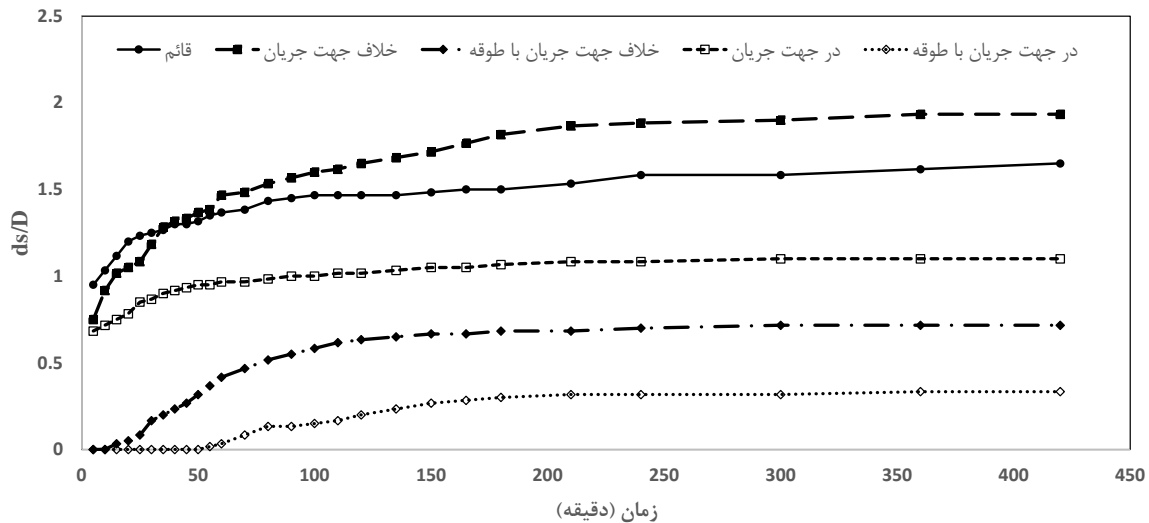
شکل (۱۰): الف) نمودار گسترش حفره‌ی آبشستگی نسبت به زمان، ب) توپوگرافی ایجاد شده‌ی بستر، ج) نقشه‌ی کانتور برای پایه زاویه‌دار در جهت جریان همراه با طوقه

در جلوی پایه‌هایی که شامل طوقه بودند در حالت زاویه‌دار خلاف جهت جریان با حدود ۵۷ درصد کاهش و برای آزمایش حالت زاویه‌دار در جهت جریان با حدود ۷۷ درصد کاهش نسبت به حالت قائم روبرو شدند. بیشترین فاصله‌ی لبه‌ی جلویی حفره متعلق به آزمایش پایه خلاف جهت جریان بدون طوقه که حدود ۱۷ درصد از حالت زاویه‌دار در

بیشترین عمق آبشستگی در بین همه‌ی آزمایش‌ها متعلق به آزمایش پایه‌ی پل زاویه‌دار خلاف جهت جریان بوده که به میزان ۱۵ درصد نسبت به پایه‌ی قائم بیشتر است. این در صورتی است که بیشینه عمق آبشستگی در جلوی پایه‌ی زاویه‌دار در جهت جریان حدود ۳۰ درصد کمتر از پایه‌ی حالت قائم اندازه‌گیری گردید. عمق آبشستگی

اتفاق افتاد در حالیکه در حالت در جهت جریان این تاخیر حدود ۵۵ دقیقه به درازا انجامید. در شکل ۱۱ نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه ($\frac{d_s}{D}$) برای حالت‌های مختلف ارائه شده است.

جهت جریان، پیشروی بیشتری داشته است. از طرف دیگر حفره ایجاد شده در پشت پایه خلاف جهت جریان عریض‌تر از پایه در جهت جریان بوده است. شروع آبشستگی در آزمایش پایه خلاف جهت جریان همراه با طوقه پس از ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش



شکل (۱۱): نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه ($\frac{d_s}{D}$) برای کلیه آزمایشات انجام شده

آبشستگی به میزان ۵۷ درصد نسبت به حالت قائم کاهش داشته است. به عبارتی در این حالت طوقه باعث کاهش ۶۳ درصد در میزان آبشستگی نسبت به حالت بدون طوقه شده است که این میزان برای حالت در جهت جریان برابر با ۶۷ درصد می‌باشد.

در جدول ۲ درصد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه‌های زاویه‌دار نسبت به جریان در مقایسه با پایه استوانه‌ای قائم ارائه شده است. بر اساس جدول ۲، قرارگیری پایه در خلاف جهت جریان باعث افزایش ۱۵ درصدی حداکثر آبشستگی نسبت به پایه قائم شده ولی با قرار دادن طوقه میزان

جدول (۲): میزان تغییرات حداکثر عمق آبشستگی زوایای مختلف قرارگیری پایه پل

آزمایش	جهت پایه	حداکثر عمق آبشستگی (سانتیمتر)	$\frac{d_s}{D}$	درصد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبت به حالت قائم	درصد تغییرات حالت زاویه‌دار با طوقه نسبت به حالت بدون طوقه
۱	-	۹/۹	۱/۶۵	-	-
۲	خلاف جهت جریان	۱۱/۴	۱/۹	↑٪۱۵	-
۳	خلاف جهت جریان با طوقه	۴/۲	۰/۷	↓٪۵۷	↓٪۶۳
۵	در جهت جریان	۶/۹	۱/۱۵	↓٪۳۰	-
۶	در جهت جریان با طوقه	۲/۳	۰/۳۸	↓٪۷۷	↓٪۶۷

میزان آبشستگی در اطراف پایه‌های زاویه‌دار نسبت به جهت جریان مورد بررسی قرار گیرد. بر همین اساس از طوقه‌های دو برابر قطر پایه بر روی بستر استفاده گردید. نتایج آزمایشات صورت گرفته نشان می‌دهد که زاویه‌دار کردن پایه به سمت پایین دست جریان باعث کاهش اثرات مخرب جریان پایین رونده در جلوی پایه‌ی پل می‌شود به طوری که حداکثر عمق آبشستگی در پایه در جهت جریان به میزان ۴۰ درصد کمتر از حالت خلاف جهت جریان اندازه‌گیری گردید. استفاده از طوقه باعث تاخیر در شروع زمان آبشستگی در جلوی پایه می‌شود. در آزمایش پایه زاویه‌دار خلاف جهت جریان تاخیر ۱۵ دقیقه‌ای و در آزمایش زاویه‌دار در جهت جریان تاخیر ۵۵ دقیقه‌ای را در شروع آبشستگی در جلوی پایه شاهد بودیم. که نشان می‌دهد پایه در حالت زاویه‌دار در جهت جریان به همراه طوقه‌ی ۲ برابر قطر پایه توانایی بالاتری در کنترل جریان‌های پایین رونده و مهار گردابه‌های نعل اسبی نسبت به دیگر آزمایشات دارد. طوقه شاید از رانترین شیوه برای کنترل گردابه‌های پیرامون پایه نباشد، اما نتایج آزمایشات نشان می‌دهد یکی از بهترین روش‌ها برای کنترل و به تاخیر انداختن اثر گردابه‌های مخرب نعل اسبی و پایین رونده اطراف پایه پل می‌باشد. به طوری که در دو حالت خلاف جهت جریان و در جهت جریان وجود طوقه به ترتیب باعث کاهش ۶۳ و ۶۷ درصدی حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه شده است.

(Singh et al (2001) اظهار داشتند که اثر طوقه‌ی دو برابر قطر پایه بر کاهش آبشستگی در حالتی که بر روی بستر نصب شده باشد ۶۸ درصد می‌باشد، که این میزان کاهش آبشستگی با نتایج حاصله از تحقیق حاضر نزدیکی دارد. در مطالعه حاضر، در حالت زاویه‌دار در جهت جریان کاهش حدود ۶۷ درصدی و برای حالت زاویه‌دار خلاف جهت جریان کاهش ۶۳ درصدی مشاهده گردید. نتایج Moncada et al (2009) نشان می‌دهد که تاثیر طوقه‌ی ۲ برابر قطر پایه بر میزان کاهش آبشستگی در شرایط مختلف جریان بین ۵۵ تا ۹۶ درصد می‌باشد. این محققین در شرایطی که طوقه‌ی ۲ برابر قطر پایه بر سطح بستر نصب شده بود، برای عمق جریان ۱۹/۱۰ سانتی‌متر، ۵۵/۲۴ درصد کاهش، برای عمق جریان ۱۴/۲۴ سانتی‌متر، ۷۹ درصد کاهش و برای عمق جریان ۱۲/۳۱ سانتی‌متر، ۹۶/۵۴ کاهش آبشستگی را گزارش کردند. نتایج تحقیق حاضر مطابقت نزدیکی با نتایج این محققین دارد. مسجدی و غلامزاده محمودی (۱۳۹۰) میزان کاهش آبشستگی را با حضور طوقه‌ی ۲ برابر قطر پایه، ۶۲ درصد گزارش کردند. با توجه به تفاوت در زاویه قرارگیری پایه و شرایط متفاوت جریان و مدل مورد استفاده توسط این محققین مانند دبی جریان و اندازه ذرات بستر، می‌توان گفت که نتایج به دست آمده تطابق بالایی با تحقیق حاضر دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده است اثر طوقه بر روی



منابع

- شفاعی بجنستان، م. ۱۳۹۴. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۴۸۱-۵۰۵.
- مسجدی، ع. و غلام زاده محمودی، م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۱۵، شماره ۵۵، ص ۳۸-۲۷.
- Alabi, P. D. 2006. Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar. Doctoral Dissertation, University of Saskatchewan. 7-58.
- Breusers, H. and Raudkivi, A. 1991. Scouring. IAHR, Hydraulic Structures Design Manual, AA Balkema. Rotterdam. 2.
- Chiew, Y. M. and Melville, B. W. 1987. Local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Research. 25: 15-26.
- Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring. Journal of Hydraulic Engineering. 116: 1197-1214.
- Hamidifar, H., Shahabi-Haghighi, S.M.B. and Chiew, Y.M. 2022. Collar performance in bridge pier scour with debris accumulation. International Journal of Sediment Research. 37(3): 328-334.
- Karimaee, T. M. and Zarrati, A. 2012. Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers. International Journal of Engineering. 25(1): 11-16.
- Kayaturk, Ş. Y. 2005. Scour and scour protection at bridge abutment. Doctoral Dissertation. METU University.
- Mashahir, M. B., Zarrati, A. R. and Rezayi, M. 2004. Time development of scouring around a bridge pier protected by collar. Proceeding's 2nd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2), Singapore. 14 -17 November.
- Melville, B. and Sutherland, A. 1988. Design method for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 114: 1210-1226.
- Melville, B. W. and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 125: 59-65.
- Melville, B. W. and Coleman, S. E. 2000. Bridge scour. Water Resources Publication.
- Melville, B.W., 1997. Pier and abutment scour: Integrated Approach. Journal of Hydraulic Engineering. 123(2): 125-136.
- Moncada-M, A.T., Aguirre-Pe, J., Bolivar, J.C. and Flores, E.J. 2009. Scour protection of circular bridge piers with collars and slots. Journal of Hydraulic Research. 47(1): 119-126.
- Raudkivi, A. 1991. Loose boundary hydraulics 3rd Edition. Technical Report, Pergamon Press, Oxford.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering. 109: 338-350
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of hydraulic engineering. 109(3): 338-350.
- Singh, C.P., Setia, B. and Verma, D.V.S. 2001. Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. In Proceedings of the Congress-international Association for Hydraulic Research, pp. 202-209.
- Shen, H. W., Schneider, V. R. and Karaki, S. 1969. Local scour around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division. 95: 1919-1940.
- Williams, P., Balachandar, R., Roussinova, V. and Barron, R. 2022. Particle image velocimetry evaluation of flow-altering countermeasures for local scour around a submerged circular cylinder. International Journal of Sediment Research. 37(4): 411-423.



Zarrati, A. R., Gholami, H. and Mashahir, M. 2004. Application of Collar to Control Scouring Around Rectangular Bridge Piers. Journal of Hydraulic Research. 42: 97-103.

Zarrati, A., Nazariha, M. and Mashahir, M. 2006. Reduction of Local Scour in the Vicinity of Bridge Pier Groups Using Collars and Riprap. Journal of Hydraulic Engineering. 132: 154-162