

Experimenting the Effect of Air Injection Pipe Position on Local Scour Reduction Around the Cylindrical Bridge Pier


Mahshad Afsharpour ^{1*}, Seyed Mohsen Sajadi ², Seyed Mahmood Kashefipour ³, Mahmood Shafaei Bajestan ³

1- PhD Student of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

* mahshad-afsharpour@scu.ac.ir

Received: 19 March 2020, Accepted: 24 May 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Local scour is a main factor involved in the destruction of bridge piers in rivers before the life expectancy of these structures. One of the newest indirect methods for reducing the erosion and scour around the bridge piers is the air injection method based on counteracting with a downward flow to create conditions to prevent or reduce the flow impact on the bed and the destruction of bridge piers. Tipireddy and Barkdoll (2019) studied the effect of air injection on controlling bridge pier scour. The results of this study showed that the maximum scour depth decreased with increasing air injection rate until the ratio of air outflow velocity from the pores to flow velocity reached 57.1 and then increased. Using air injection to reduce bridge pier scour has been explored in only one study, considering all parameters except for the constant air outflow rate. The main objective of this study was to investigate the effect of air injection on reducing bridge pier scour considering the number and the location of injection pipes.

Methodology: Experiments were carried out at the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz in a flume 10 m long and 0.74 m wide and 0.6 m deep. The bottom of the flume was covered by sediments with a mean diameter of 0.7 mm with a standard deviation of 1.21 indicating uniform sand. All experiments were done in four Froude numbers of 0.18, 0.2, 0.22, and 0.24 at a constant depth of 15 cm under clear-water conditions. To create these conditions, the flow depth was adjusted so that the ratio of flow velocity to the critical velocity could be less than 95%. In order to determine the appropriate time for the experiments, a 12-hour test at a Froude number of 0.2 was performed and it was observed that about 90% of the scour occurred in the first 3 hours. In order to create an air injection system, porous pipes were selected with an internal diameter of 4 mm. Each pipe had 24 pores with a diameter of 2.2 mm at fixed intervals mounted on the upstream half of the pier and the two ends were connected to the air compressor for injection. Experiments were carried out at an air injection rate of 100 lit/min and in 7 different numbers and positions of aeration pipes on the pier. The pipes were mounted in three general modes: one pipe, two pipes and three pipes. The installation level of the pipe on the pier was considered at three heights of 1/3h, 1/2h, and 2/3h from the bed.

Results and Discussion: A number of four control experiments (without the air injection system) was first performed at four specified Froude numbers. A total number of 28 experiments were performed in the presence of the air injection system at the air injection rate of 100 lit/min. The aeration pipe at the upstream half of the pier provides some protection for the sediments against the horseshoe vortices.

Effect of aeration pipe position on scour depth and scour development around bridge pier

The transverse expansion of the scour hole for the bridge pier was plotted in two general modes using a single aeration pipe and two aeration pipes in four Froude numbers. In the single-pipe mode, a maximum decrease in the scour hole depth in front of the bridge pier (25.5%) was observed at a pipe installation depth of 5 cm beneath the bed and for the Froude number of 0.18. For the use of two pipes with the same injection rate and similar hydraulic conditions, the maximum decrease in scour depth of 11.8% occurred when the pipes were installed at depths of 7.5 and 10 cm beneath the bed.

Effect of aeration pipe on scour depth in scour development around bridge pier

In order to investigate the effect of the number of pipes on the scour depth, the transverse expansion of the scour hole around the bridge pier was plotted in three general modes: single pipe (three mode), two pipes (three modes) and three pipes (one mode). The results showed that a lowest efficiency was observed in the state of the three pipes and the efficiency is in the one state.

Effect of Froude Number on Scour Depth and Scour Expansion around Bridge Pier

The shape of the relative scour depth was plotted against the Froude number for the use of an aeration pipe. The results showed that there is a direct relationship between the scour hole depth and the Froude number and that the scour hole depth increases with the increasing Froude number.

Conclusion: In this study, the effect of air injection system on the scour pattern and sedimentation around the bridge pier under clear-water conditions in a straight flume was experimentally investigated. All experiments were done with four Froude numbers of 0.18, 0.2, 0.22, and 0.24 and 7 different numbers and installation levels of the aeration pipe at the air injection rate of 100 lit/min. The results showed that aeration structure in the flume reduced the scour depth around the pier. The reduction of the scour depth at the front part of the pier in the single-pipe test was 25.5% with an installation level of 5 cm, Froude number of 0.18, and air injection rate of 100 lit/min. The results of comparisons aiming to investigate the effect of the number of aeration pipes on the pier showed that the three-pipe mode had the lowest efficiency. This system reduced the volume of scour hole around the pier. Therefore, it can be concluded that the application of this structure can be an appropriate alternative in comparison to the commonly used protective structures; therefore, further research is suggested with this respect.

Keywords: Cylindrical Bridge Pier, Local Scour, Aeration Pipe, Secondary Current, River Structures.

© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This 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/>)

تأثیر موقعیت کارگذاری لوله هواده بر مدیریت و مهار آبستگي پیرامون پایه پل استوانه‌ای به کمک مدل آزمایشگاهی

مهشاد افشارپور^{۱*}، سید محسن سجادی^۲، سید محمود کاشفی پور^۳، محمود شفاعی بجستان^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* mahshad-afsharpoor@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۴، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: پل‌ها از جمله مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که آبستگي موضعی پیرامون پایه‌های آن‌ها در طول جریان‌های سیلابی یکی از عامل‌ها تهدید پایداری آن‌ها به شمار می‌آید. یکی از روش‌های نوین حفاظت پایه در رودخانه‌ها در مقابل فرسایش موضعی استفاده از لوله هواده است. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر موقعیت لوله هواده بر مدیریت و مهار آبستگي پیرامون پایه پل پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی در شرایط هیدرولیکی مختلف در اعداد فرود 0.118 ، 0.2 ، 0.24 و 0.24 با عمق ثابت و 7 حالت شمار و تراز کارگذاری لوله هواده و در 1 دبی تزریق هوا در شرایط آب زلال انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از این روش فنی بر روی پایه بیشترین عمق آبستگي در جلوی پایه را تا 25 درصد کاهش داده و همچنین حجم آبستگي در پیرامون پایه را کاهش می‌دهد. بهترین حالت یک لوله و در تراز نصب $1/3h$ (یک سوم عمق جریان از بستر) و کمترین بازدهی مربوط به حالتی است که از 3 لوله هواده در سه ارتفاع مختلف استفاده می‌شود، می‌باشد.

کلید واژگان: پایه پل استوانه‌ای، آبستگي موضعی، لوله هواده، جریان ثانویه، سازه‌های رودخانه‌ای.

۱- مقدمه

آبستگي به عنوان یک پدیده طبیعی که به دلیل جریان آب در رودخانه‌ها و رودها رخ می‌دهد، تعریف می‌شود. این پدیده نتیجه عمل فرسایش دهندگی جریان آب است که رسوب‌ها را از بستر و ساحل رودها و همچنین، پیرامون پایه‌های پل فرسایش داده و منتقل می‌کند (Breusers et al., 1997).

آبستگي از جمله عامل‌های اصلی در تخریب پایه‌های پل در رودخانه‌ها، پیش از پایان عمر مفید پیش بینی شده آن‌ها می‌باشد. به طور معمول تخریب پل‌ها نه به دلایل سازه‌ای، بلکه به دلیل در نظر نگرفتن نقش عامل‌های هیدرولیکی در طراحی پل‌ها می‌باشد. یکی از دلایل مهم شکست پل‌ها در ایالات متحده و جهان، مربوط به آبستگي می‌باشد. برآوردها گویای آن است که 60 درصد شکست پل‌ها در

نتیجه آبستگي و عامل‌ها هیدرولیکی می‌باشد (Landers, 1992). طراحی پل، شناخت پدیده آبستگي و به کار بردن تمهیدات لازم برای کاهش و مدیریت و مهار آن بسیار ضروری است. گردابه‌ها در پیرامون پایه باعث حفر گودالی شده که حفره آبستگي نامیده می‌شود.

الگوی جریان در پیرامون پایه‌های پل بسیار پیچیده بوده، که این پیچیدگی با تشکیل حفره آبستگي در پیرامون پایه تشدید می‌شود. پس از برخورد جریان به پایه، روی پایه به تناسب سرعت جریان، فشار ایجاد می‌شود و به دلیل توزیع سرعت عمودی جریان که سرعت از بستر به طرف سطح آب زیاد می‌شود، فشار پویای بیشتری نیز در ترازهای بالاتر به پایه وارد شده که باعث بوجود آمدن گردابان فشار از بالا به پائین می‌شود. جریان پس از برخورد به پایه، بدلیل وجود گردابان فشار در جهت قائم، به سمت پایین منحرف

رویاری با آبشستگی وجود دارد، روش‌های اصلاح الگوی جریان که با منحرف کردن جریان پیرامون پایه، از آن محافظت می‌کنند و روش‌های مستقیم که با مقاوم سازی بستر، آبشستگی را مهار می‌کنند. در روش‌های اصلاح الگوی جریان مانند استفاده از شمع‌های حفاظتی (پایه‌های قربانی شونده)، صفحه‌های مستغرق، آستانه و ایجاد شکاف با تغییر الگوی جریان در پیرامون پایه باعث کاهش قدرت عامل‌های فرسایش دهنده مانند جریان‌های ثانویه و گرداب‌ها می‌شوند (Chiew, 1992). بررسی‌های زیادی روی تأثیر هر یک از این روش‌ها در کاهش آبشستگی جلوی پایه انجام شده است.

استفاده از پرده حباب^۴ و تزریق هوا^۵ از جدیدترین روش‌های کاهش فرسایش و آبشستگی است که مبنای کار آن مقابله با جریان پایین رونده و مخرب می‌باشد. از برتری‌های این روش می‌توان به نبود نیاز به احداث سازه و پیشروی در عرض رودخانه اشاره کرد. (Wijbenga et al. 2006) روش جدیدی به نام سامانه تزریق هوا برای کاهش آبشستگی در آبراهه با زاویه قوس ۱۹۳ درجه گزارش کردند که اساس کار آن رویاری با جریان ثانویه ناشی از انحناء برای جلوگیری از رسیدن این جریان به بستر و دیواره قوس خارجی و تخریب آن است. آنان در پژوهشی به بررسی توزیع سرعت و جریان ثانویه بوسیله پرده حباب در قوس آبراهه‌های باز پرداختند و نتایج نشان داد که با توجه به وجود جریان ناشی از حباب‌های صفحه حباب هوا، هسته ماکزیمم تنش برشی بستر به سمت قوس درونی تغییر جهت می‌دهد که باعث افزایش عرض ناوبری می‌شود. بررسی‌های (Blanckaert et al. 2008) نشان داد در جریان مستقیم، حباب‌های ایجاد شده توسط دوران عرضی جریان، گستردگی حدود ۴ برابر عمق آب را پوشش می‌دهد و در جریان با انحنای شدید این گستردگی کمی ضعیف‌تر شده و حدود ۳ برابر عمق آب است. (Dugue et al. 2012) در پژوهشی به بررسی عملکرد پرده حباب پیرامون پایه پل در مدیریت و مهار آبشستگی پرداختند. صفحه ایجاد حباب هوا در قسمت بالادست پایه پل و به دور آن تعبیه شده است.

می‌شود تا از فشار هیدرودینامیک بکاهد و پس از برخورد به کف آبراهه، یک سامانه جریان چرخشی در مقابل پایه شکل می‌گیرد. جریان رو به پایین^۱ همانند یک جت عمودی عمل کرده و پس از برخورد به بستر رودخانه در جلو پایه گودالی را حفر می‌کند که در داخل این گودال جریان چرخشی ایجاد شده و به تدریج عمق حفره اضافه می‌شود. گردابه‌های تولید شده در جلوی پایه دارای محور چرخشی در راستای جریان بوده و در پشت پایه به هم می‌رسند و شکلی به خود می‌گیرد که در پلان شبیه نعل اسب است، از این رو به آن‌ها گرداب نعل اسبی^۲ گفته می‌شود. تشکیل گرداب نعل اسبی درون حفره آبشستگی، باعث تسریع در حفر آن شده و ذرات جدا شده از بستر، توسط جریان اصلی رودخانه به پایین دست حمل می‌شوند (Breusers et al., 1997). حفر حفره‌ی آبشستگی توسط گرداب نعل اسبی آن قدر ادامه می‌یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک کند (Melville and Sutherland, 1988).

از سوی دیگر وجود پایه در مقابل جریان باعث ایجاد لایه مرزی روی جداره آن می‌شود و روی پایه به سمت پایین دست به علت بازشدگی جریان و ایجاد گرداب فشار معکوس پدیده جدایی در لایه مرزی شکل گرفته که این گردابه‌ها دارای محور چرخش قائم بوده و به گرداب برخاستگی^۳ معروفاند (Raudkivi, 1986). گرداب‌های برخاستگی در نزدیک کف با گرداب نعل اسبی باقی مانده از بالادست اندرکنش دارد. این گرداب‌ها ذرات بستر را جدا کرده و در معرض جریان قرار می‌دهند و به انتقال ذرات از جلو و اطراف پایه به سمت پایین دست کمک می‌کنند. حفر گودال آبشستگی توسط گرداب نعل اسبی آن قدر ادامه می‌یابد تا حجم آب درون حفره آبشستگی زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک کند. در این حالت عمق آبشستگی به تعادل می‌رسد (Raudkivi and Ettema, 1983).

با توجه به مطالب بیان شده شناخت پدیده آبشستگی، به کار بردن روش‌ها برای کاهش آبشستگی پیرامون پایه پل ضروری به نظر می‌رسد. به طور کلی دو روش اساسی برای

⁴ Air Bubble Screen

⁵ Air Injection

¹ Downflow

² Horseshoe Vortex

³ Wake Vortex

آب برابر ۵۷/۱ باشد و پس از آن افزایش می‌یابد. تنها مطالعه انجام شده در زمینه تاثیر تزریق هوا بر عمق آبشستگی پایه پل، مقاله اشاره شده بالا می‌باشد که همه ی فراسنجه ها به جز دبی خروجی هوا ثابت در نظر گرفته شده است. دبی تزریق هوا فراسنجه بسیار مهمی است، اما نسبت سرعت خروجی هوا به سرعت جریان آب اهمیت بسیار زیادی در مهار آبشستگی دارد. این نسبت را می توان با تغییر سرعت جریان نیز ایجاد کرد. لذا هدف اصلی از این پژوهش بررسی تأثیر عملکرد تزریق هوا روی کاهش آبشستگی پایه پل با در نظر گرفتن متغیرهای شمار لوله-های تزریق (تغییر سرعت خروجی هوا) و موقعیت قرارگیری لوله‌های تزریق می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجزیه و تحلیل ابعادی

فراسنجه های متعددی در عملکرد لوله منفذدار تزریق هوا برای کاهش آبشستگی جلوی پایه مؤثرند. به منظور یافتن رابطه بین عامل های مؤثر بر آبشستگی، تحلیل ابعادی روی فراسنجه های مؤثر انجام شده است. عامل های مؤثر در این زمینه، برابر رابطه ۱ عبارت اند از:

$$Z=f(B, h, Q, q, g, \rho, \rho_s, D, D_{50}, \mu, \sigma_g, D_n, d, L, C_D, n, H) \quad (1)$$

که در این رابطه، Z عمق آبشستگی، B عرض فلوم، h عمق جریان، Q دبی جریان ورودی، q دبی تزریق هوا، g شتاب ثقل، ρ چگالی سیال، ρ_s چگالی ذرات رسوب، D قطر پایه، D_{50} قطر میانگین ذرات بستر، μ لزوجت دینامیکی سیال، σ_g انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر، D_n قطر منفذها بر روی لوله، d فاصله منفذها، L طول لوله منفذدار، C_D ضریب شکل پایه، n شمار لوله‌ها و H تراز قرارگیری لوله از بستر تعریف شده است. با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و با استفاده از روش پای باکینگهام رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\frac{Z}{D} = f\left(\frac{B}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{h}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{D_n}{D}, \frac{d}{D}, \frac{L}{D}, \frac{q}{Q}, \frac{H}{D}, Fr, Re, \sigma_g, C_D, n\right) \quad (2)$$

که در آن Fr و Re به ترتیب عدد فرود و عدد رینولدز جریان

در این تحقیق، آزمایش‌های صفحه ایجاد کننده حباب هوا در دو حالت نیمه جلویی پایه پل و سراسر پایه پل انجام شد و نتایج نشان داد که طوفه کامل ایجاد حباب هوا موثرتر می باشد و عمق آبشستگی را به میزان ۴۰ درصد کاهش داد. (Dugue et al. (2013 با بررسی روی آبراهه با زاویه قوس ۱۹۳ درجه به بررسی کاهش آبشستگی در قوس با در نظر گرفتن ریخت شناسی بستر و الگوهای جریان با استفاده از روش پرده حباب پرداختند. اندازه‌گیری‌های سرعت نشان داد که الگوی جریان ناشی از حباب، جریان ثانویه ناشی از انحنا را در امتداد رو به داخل تغییر می‌دهد و نیروی آن را کاهش می‌دهد و همین طور به طور قابل توجهی شیب ریخت شناسی را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش آبشستگی به میزان ۵۰٪ و دورتر از دیواره بیرونی رخ داده است. بنا بر گزارش‌های Dugue et al. (2015) افزایش حباب‌های هوای تولید شده توسط لوله متخلخل قرار گرفته روی بستر، الگوی جریان عمود بر لوله منفذدار ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که نیرو و اندازه جریان ناشی از حباب، مستقل از سرعت جریان پایه می باشد و با عمق آب افزایش می‌یابد. اندازه و نیروی جریان ناشی از حباب در بستر متحرک بزرگتر از بستر غیر متحرک می‌باشد. (Champagne et al. (2016 بررسی‌های جامعی را برای کاهش آبشستگی حوضچه آرامش پایین دست سرریز به کمک روش تزریق هوا انجام دادند. در این تحقیق تأثیر فراسنجه های مختلف مانند جریان نزدیک شونده، شرایط پایاب، دانه بندی بستر و دبی تزریق هوا برای تعیین شرایط بهینه در کاهش آبشستگی بررسی شد. شرایط تزریق هوا با تغییر فراسنجه های زاویه تزریق، فاصله روزنه‌های هوا و قطر روزنه‌ها، متغیر در نظر گرفته شد. کاهش بهینه آبشستگی به میزان ۳۷٪ در فاصله دورتر از سازه و به میزان ۵۷٪ نزدیک سازه مشاهده شد. بهینه ترین وضعیت در زمانی که تزریق هوا عمود بر جریان بود رخ داد. تنها بررسی انجام شده در زمینه ارزیابی عملکرد تزریق هوا در مهار آبشستگی پایه پل، پژوهش Tipireddy and Barkdoll (2019) می‌باشد. نتایج آن نشان داد که بیشترین عمق آبشستگی با افزایش دبی تزریق هوا کاهش یافته تا زمانی که نسبت سرعت هوای خروجی از منفذها به سرعت جریان



Fig. 1 View of laboratory flume

شکل ۱ نمای از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

شرایط عمق جریان به گونه‌ای تنظیم شد تا در بیشترین سرعت و بالاترین عدد فرود نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی کمتر از ۹۵ درصد شود. پدیده آبستگي در پیرامون پایه پل‌ها، فرآیندی است که با گذشت زمان توسعه یافته و در نهایت به تعادل می‌رسد. شناخت این فرآیند و برآورد عمق آبستگي در طی زمان و به ویژه در زمان رسیدن حفره آبستگي به حالت تعادل برای طراح پل دارای اهمیت می‌باشد. از این رو، به منظور تعیین زمان مناسب برای انجام آزمایش‌ها، یک آزمایش دراز مدت ۱۲ ساعته در عدد فرود ۰/۲ انجام شد و در طی آزمایش، عمق آبستگي در جلو پایه در طول زمان اندازه‌گیری شد و ۹۰ درصد آبستگي در مدت زمان ۳ ساعت آغازین آزمایش‌ها رخ داد. دبی جریان به کمک دبی سنج فراصوت مگاب با دقت ± 1 درصد اندازه‌گیری شد. به منظور ایجاد جت هوا، از یک دستگاه کمپرسور هوا ۲۵۰ لیتری استفاده شد. دبی تزریق هوا توسط یک دستگاه روتامتر اندازه‌گیری می‌شد. به منظور ایجاد سامانه جت هوا، لوله‌های متخلخل به قطر درونی ۴ میلی‌متر انتخاب شد. هر کدام از لوله‌ها دارای ۲۴ منفذ به قطر ۲/۲ میلی‌متر که با فاصله‌های ثابت روی آن تعبیه شده در قسمت نیمه جلویی پایه پل نصب شد و دو سر آن برای تزریق هوا به دستگاه کمپرسور هوا متصل شد. از آغاز آزمایش‌ها هوا با دبی مشخص به صورت یکنواخت وارد لوله کارگذاری می‌شد. آزمایش‌ها در یک دبی تزریق هوا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه و در ۷ حالت مختلف شمار و قرارگیری لوله‌های هواده بر روی پایه، انجام شد. لوله‌ها در حالت کلی یک لوله، دو لوله و سه لوله روی پایه قرار

می‌باشند. با توجه به اینکه عدد رینولدز در محدوده انجام این آزمایش‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشد، بنابراین جریان در محدوده آشفته بوده و می‌توان از عدد رینولدز صرف نظر کرد (Chow, 1959). در این تحقیق کمترین عدد رینولدز برابر ۳۳۷۸۴ است. اگر نسبت $B/D \geq 6.25$ ، دیواره آبراهه تأثیری بر آبستگي پایه پل ندارد (Raudkivi and Ettema, 1983)، همچنین اگر $D/D_{50} \geq 20-25$ ، اندازه رسوب‌های بستر تأثیری بر آبستگي پایه پل ندارد (Raudkivi and Ettema, 1983). از سوی دیگر مقادیر σ_g ، L/D ، d/D ، D_n/D ، D_{50}/D ، B/D ، ρ_s/ρ ، h/D و C_D در این تحقیق ثابت در نظر گرفته شده است، لذا فراسنجه‌های نهایی به صورت رابطه ۳ خواهند بود:

$$\frac{Z}{D} = f\left(\frac{q}{Q}, \frac{H}{D}, Fr, n\right) \quad (3)$$

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. آبراهه مورد استفاده به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۷۴ متر و عمق ۰/۶ متر می‌باشد. جنس دیواره‌های فلوم از شیشه بوده و دارای مخزن‌های ورودی و خروجی و یک آرام‌کننده جریان در ابتدا می‌باشد. برای تنظیم عمق جریان از دریچه تنظیمی در انتهای فلوم استفاده شد. کف فلوم از رسوب‌های با قطر میانگین ۰/۷ میلی‌متر با انحراف معیار $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.21$ پوشیده شده که بیانگر شن یکنواخت می‌باشد. برای حذف تأثیر نا یکنواختی رسوب بر کاهش آبستگي موضعی برابر پیشنهاد (Chiew and Melville, 1987) میزان انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی باید از ۱/۳ کمتر باشد. شکل ۱ نمایی از این فلوم را نشان می‌دهد. برای تسطیح سطح رسوب‌ها در طول فلوم، از ارباه‌ای متصل به یک صفحه چوبی متناسب با عرض آبراهه استفاده شد.

پایه با سطح مقطع دایره به قطر ۱۱ سانتی‌متر و به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انتخاب شد. همه آزمایش‌ها در ۴ عدد فرود ۰/۱۸، ۰/۲، ۰/۲۲ و ۰/۲۴ با عمق ثابت ۱۵ سانتی‌متر در شرایط آب زلال انجام گرفت که برای دستیابی به این شرایط

آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به توضیح است، با توجه به دبی تزریق هوا و شمار روزنه‌ها بر روی هر لوله، در شرایط تک لوله سرعت خروج هوا از روزنه ۱۸/۲۷ متر بر ثانیه، دو لوله ۹/۱۳ متر بر ثانیه و در شرایط استفاده از ۳ لوله ۶/۰۹ متر بر ثانیه می‌باشد. نسبت سرعت خروج هوا از روزنه به سرعت جریان در حالت بیشترین عدد فرود و کمترین آن به ترتیب در حالت تک لوله ۶۲/۸ و ۸۳/۷، و در حالت دو لوله ۳۱/۴ و ۴۱/۸، و در حالت ۳ لوله ۲۰/۹ و ۲۷/۹ محاسبه شد.

جدول ۱ محدوده فراسنجه‌های آزمایشگاهی

Table 1 The range of changes in the parameters				
Fr	0.18	0.2	0.22	0.24
q (L/min)	100	100	100	100
	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
H	7/5 cm	7/5 cm	7/5 cm	7/5 cm
	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
	1 Pipe	1 Pipe	1 Pipe	1 Pipe
n	2 Pipe	2 Pipe	2 Pipe	2 Pipe
	3 Pipe	3 Pipe	3 Pipe	3 Pipe
h (cm)	15	15	15	15

گرفت. تراز قرارگیری لوله روی پایه از بستر ۳ ارتفاع 1/3h ، 1/2h و 2/3h در نظر گرفته شد. در شکل ۲ نمایی از پایه نصب شده در آبراهه و قرارگیری لوله هواده در نیمه جلویی آن و عملکرد لوله هواده حین آزمایش را نشان می‌دهد. همه ی آزمایش های در شرایط آب زلال و بدون تغذیه رسوب انجام شد. روش انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که در آغاز هر آزمایش دریچه کشویی در انتهای مجرای آبراهه به طور کامل بسته شده و آب به آرامی به درون فلوم هدایت شد تا از آبستگی ناخواسته سطح بستر جلوگیری شود. پس از ارتفاع گرفتن آب درون فلوم دریچه کشویی پایین دست به آرامی باز شده و همزمان دبی ورودی به فلوم افزایش یافته و با این روند دبی و عمق مورد نظر تنظیم می‌شد. پس از پایان زمان آزمایش، جریان آب ورودی قطع و آب موجود در فلوم به آرامی از راه دریچه انتهایی تخلیه شده و شیر زهکش واقع در زیر فلوم باز شده تا رسوب‌ها به طور کامل زهکشی شوند. پس از تخلیه کامل آب، عوارض بستر توسط دستگاه لیزری برداشت کف با دقت $\pm 0/1$ میلی متر برداشت و مختصات نقطه‌ها ثبت می‌شد. روش برداشت کف به این صورت بود که ۵۷ سانتی متر درعرض و ۸۲ سانتی متر در طول فلوم اندازه گیری شد. شرایط



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Air injection pipe with holes around the upstream half of the pier, (b) Air injection during the experiment

شکل ۲ (a) نمایی از قرار گیری لوله هواده بر روی پایه، (b) سازه هواده‌ی در آبراهه در زمان انجام آزمایش

گردابی پیرامون پایه پل و برداشت عمق بیشترین آبستگی برای مقایسه با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های با حضور سامانه تزریق هوا انجام گرفته است. در همه آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی و عمق جریان، بی درنگ در پیرامون پایه گردابه‌ها تشکیل و آبستگی با سرعت بسیار بالا آغاز

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش‌های شاهد

در آغاز ۴ آزمایش شاهد (بدون حضور سامانه تزریق هوا) در ۴ عدد فرود در نظر گرفته شده، انجام گرفت. آزمایش‌های این بخش به منظور مشاهده تأثیر جریان‌های

گرداب نعل اسبی ایجاد می‌کند.

درصد کاهش آبشستگی با استفاده از نتایج آزمایش‌های شاهد و آزمایش‌های در حضور سامانه تزریق هوا از رابطه (۴) محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است.

$$R(\%) = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه بالا d_1 بیشترین عمق آبشستگی در آزمایش شاهد و d_2 بیشترین عمق آبشستگی در حضور سامانه تزریق هوا می‌باشد. در ادامه با بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل ابعادی صورت پذیرفته، نتایج مربوط به جدول ۲ در سه بخش بررسی شد.

۳-۲-۱- تأثیر q/Q بر Z/D در توسعه آبشستگی پیرامون پایه

در شکل ۴ میانگین عمق آبشستگی نسبی در مقابل نسبت دبی تزریق هوا به دبی جریان در سه حالت کلی استفاده از لوله‌های هواده رسم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بین عمق حفره آبشستگی و دبی جریان (با توجه به اینکه هوا تنها با یک مقدار درون لوله‌ها تزریق شد) رابطه مستقیم وجود دارد و عمق حفره آبشستگی با افزایش دبی جریان، افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی جریان تأثیر هواده‌ی بر مهار آبشستگی، کاهش می‌یابد زیرا هرچه دبی جریان افزایش می‌یابد قدرت جریان پایین‌رونده هم افزایش می‌یابد.

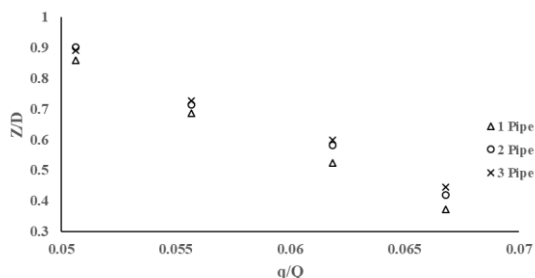


Fig. 4 The effect of the ratio of air injection flow to flow discharge on Z/D

شکل ۴ تأثیر نسبت دبی تزریق به دبی جریان بر نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه

می‌شد. در این حالت آبشستگی از جلوی پایه و به صورت متقارن نسبت به محور پایه آغاز شده و مواد رسوبی از جلو و پیرامون پایه شسته و به صورت پشته در پشت پایه جمع شدند. این پشته‌ها به تدریج به طرف پایین دست انتقال می‌یافت. پس از توسعه حفره آبشستگی و عمیق شدن آن امکان جا به جایی ذرات رسوب توسط گردابه‌ها کاهش می‌یابد و رسوب‌ها تنها درون حفره آبشستگی حرکت کرده و دیگر به پایین دست انتقال نمی‌یابند. در شکل ۳ توسعه عرضی حفره آبشستگی برای پایه پل در ۴ عدد فرود در آزمایش‌های شاهد نشان داده شده است. محور افقی نمایشگر فاصله نقاط برداشت شده از دیواره است که نسبت به عرض برداشت شده بی بعد شده و محور عمودی آن عمق بیشترین آبشستگی نسبی است.

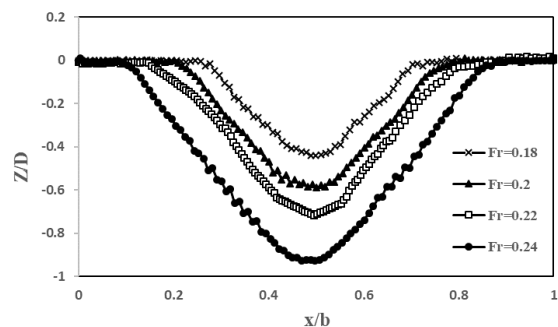


Fig. 3 Cross-section scour hole development around the cylindrical bridge pier without air injection

شکل ۳ توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل استوانه‌ای در آزمایش‌های شاهد

همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش عدد فرود، عمق حفره آبشستگی افزایش یافته است. البته این نتیجه بدیهی است، چرا که عمق جریان ثابت است و تغییر عدد فرود مربوط به تغییر دبی جریان می‌باشد. لذا با افزایش دبی و بالا رفتن سرعت جریان تنش برشی و همچنین نیروی گردابه‌های برخاستگی و نعل اسبی بیشتر و در نتیجه با افزایش عدد فرود آبشستگی افزایش می‌یابد.

۳-۲-۲- آزمایش‌های با حضور سامانه تزریق هوا

تعداد ۲۸ آزمایش با حضور سامانه تزریق هوا در یک دبی تزریق ۱۰۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. وجود لوله هواده در نیمه جلویی پایه نوعی حفاظت برای رسوب‌ها در مقابل

جدول ۲- عمق آبشستگی و درصد کاهش آبشستگی با حضور سامانه تزریق هوا

Table 2 Scour depth & scour depth reduction with air injection

Fr=0.24			Fr= 0.22			Fr= 0.2			Fr=0.18			H	n
%	d ₂ (cm)	d ₁ (cm)	%	d ₂ (cm)	d ₁ (cm)	%	d ₂ (cm)	d ₁ (cm)	%	d ₂ (cm)	d ₁ (cm)		
8.8	9.3	10.2	10.8	7.4	8.3	21.7	5.4	6.9	25.5	3.8	5.1	1/3 h	1
5.9	9.6	10.2	7.7	7.7	8.3	10.1	6.2	6.9	13.7	4.4	5.1	1/2 h	
6.9	9.5	10.2	8.4	7.6	8.3	17.4	5.7	6.9	19.6	4.1	5.1	2/3 h	
3.9	9.8	10.2	7.2	7.7	8.3	8.7	6.3	6.9	8.8	4.6	5.1	1/3 h & 1/2 h	2
1.0	10.1	10.2	2.4	8.1	8.3	3.6	6.6	6.9	5.9	4.8	5.1	1/3 h & 2/3 h	
3.0	9.9	10.2	6.0	7.8	8.3	8.7	6.3	6.9	11.8	4.5	5.1	1/2 h & 2/3 h	
3.9	9.8	10.2	3.6	8.0	8.3	4.3	6.6	6.9	3.9	4.9	5.1	1/3 h & 1/2 h & 2/3 h	3

دهنده آن است که تزریق هوا علاوه بر کاهش عمق آبشستگی، باعث تغییر در الگو و شکل فرسایش نیز شده است. با مقایسه دو شکل مذکور ملاحظه می‌شود که در نتیجه تزریق هوا افزون بر اینکه آبشستگی قابل توجهی در بالادست پل رخ نداده، بلکه رسوبگذاری در پایین دست پایه در نزدیکی پایه صورت گرفته است. در حالی که در حالت بدون سامانه تزریق هوا، رسوبگذاری در فاصله‌ای دورتر از پایه در پایین دست روی داده و پایین دست پایه دچار فرسایش شده است. لذا این امر بیانگر تأثیر تزریق هوا در کاهش نیروی گردابه‌های برخاستگی که عامل اصلی انتقال ذرات رسوبی به پایین دست است، می‌باشد. لازم به یادآوری است در همه آزمایش‌ها الگوی فرسایش مشابه یکدیگر و تنها تفاوت آنها در بیشترین عمق آبشستگی بود که به دلیل اختلاف در عدد فرود جریان رخ داد.

۳-۲-۳- تأثیر n در توسعه آبشستگی پیرامون پایه

آزمایش‌ها با حضور سامانه تزریق هوا در سه حالت کلی یک لوله (سه ارتفاع)، دو لوله (سه حالت) و سه لوله (یک حالت) انجام شد. به منظور بررسی تأثیر شمار لوله بر عمق آبشستگی، در شکل ۸ توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل در بهترین بازده یک لوله، دو لوله و سه لوله هواده نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، کمترین بازده سامانه هواده در مهار آبشستگی مربوط به حالت استفاده از ۳ لوله و بهترین آن مربوط به استفاده از یک لوله می‌باشد. دلیل این نکته مورد بحث و بررسی کلی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۳- تأثیر H/D بر Z/D در توسعه آبشستگی پیرامون پایه

برای بررسی تأثیر موقعیت کارگذاری لوله هواده روی پایه سه ارتفاع مختلف روی پایه در نظر گرفته شد. در حالت تک لوله، لوله هواده در سه ارتفاع مختلف ب روی پایه قرار گرفت. در حالت به کارگیری همزمان دو لوله، لوله‌ها در ۳ حالت در همان ۳ ارتفاع نصب شدند. به کارگیری سامانه تزریق هوا بر توپوگرافی بستر و هم بر میزان آبشستگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشت. شکل‌های (۵) و (۶) توسعه عرضی حفره آبشستگی برای پایه پل در دو حالت کلی به کارگیری یک لوله هواده و دو لوله هواده را در ۴ عدد فرود نشان می‌دهند. به طور مثال در حالت تک لوله برای ۴ عدد فرود میزان عمق حفره آبشستگی جلوی پایه پل، در شرایط هیدرولیکی مشابه، در حالت قرارگیری لوله در ارتفاع ۵ سانتی‌متر (1/3 h) از بستر و در عدد فرود ۰/۱۸، میزان عمق آبشستگی از ۵/۱ سانتی‌متر به ۳/۸ سانتی‌متر کاهش یافت که بیشترین کاهش و میزان ۲۵/۵ درصد را نشان داد. در حالت به کارگیری دو لوله با میزان تزریق هوا و شرایط هیدرولیکی مشابه بیشترین کاهش عمق آبشستگی به میزان ۱۱/۸ درصد، هنگامی رخ داد که لوله‌ها در تراز ۷/۵ (1/2 h) و ۱۰ سانتی‌متر (2/3h) از بستر قرار داشتند.

در شکل ۷ توسعه طولی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل در آزمایش شاهد (بدون حضور سامانه تزریق هوا) و آزمایش با حضور سامانه تزریق هوا با یک لوله در ارتفاع ۵ سانتی‌متر از بستر و به ازای عدد فرود ۰/۱۸ و دبی تزریق هوا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. نتایج الگوی فرسایش نشان

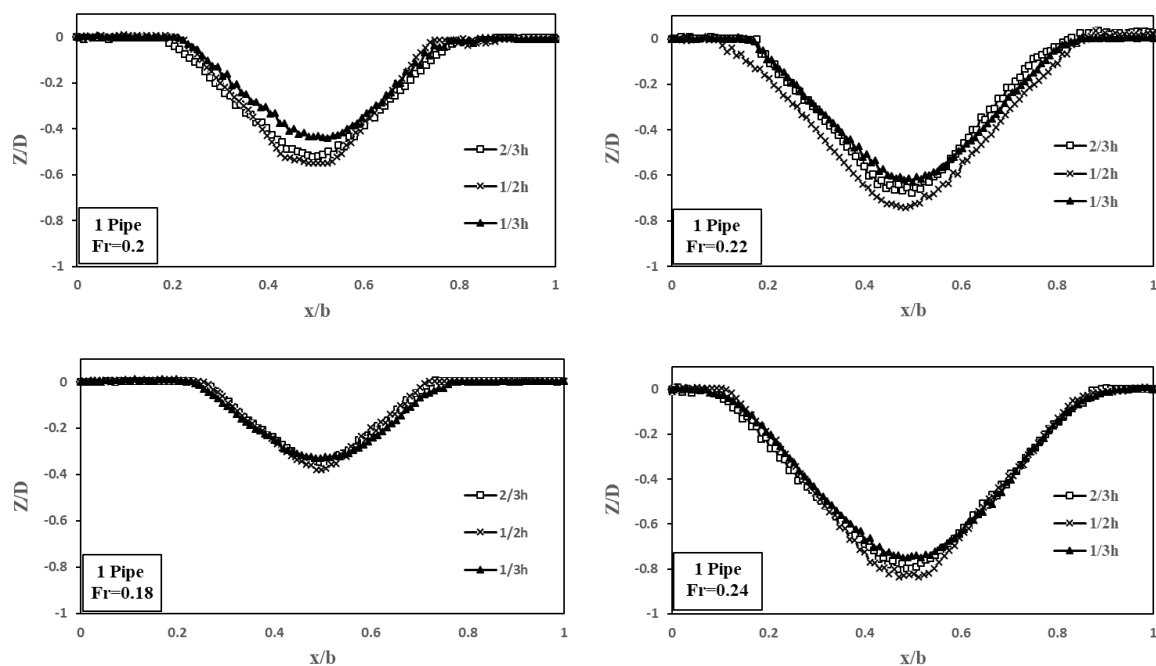


Fig. 5 Cross-section scour hole development around bridge pier with one air-injection pipe

شکل ۵ توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل با یک لوله هوا

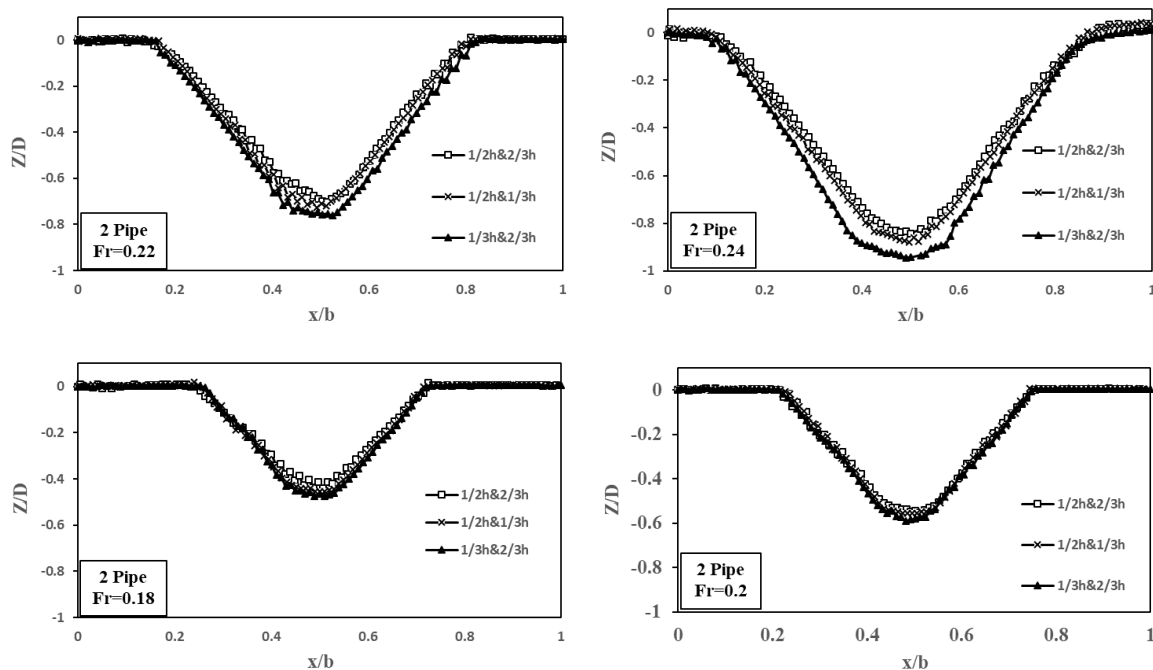


Fig. 6 Cross-section scour hole development around bridge pier with two air-injection pipes.

شکل ۶ توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل با دو لوله هواده

فرود جریان رابطه مستقیمی وجود دارد و عمق حفره آبشستگی با افزایش عدد فرود جریان، افزایش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود جریان تأثیر هواده‌ی بر کاهش عمق آبشستگی، کاهش می‌یابد زیرا

۳-۲-۴- تأثیر عدد Fr در توسعه آبشستگی پیرامون پایه در شکل ۹ عمق آبشستگی نسبی در مقابل عدد فرود برای حالت استفاده از یک لوله هواده رسم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بین عمق حفره آبشستگی و عدد

آبشستگی کاهش می‌یابد. به طور مثال در ردیف اول میزان تأثیر در کاهش آبشستگی از ۲۵/۵ درصد به ۸/۸ درصد کاهش یافته است. نکته دوم مکان قرار گرفتن تک لوله است که در جدول ملاحظه می‌شود، بیشترین تأثیر هوادهی برای کاهش آبشستگی هنگامی است که لوله هوادهی در پایین ترین نقطه قرار گیرد. علتش این است که با تزریق هوا از نزدیک کف، ارتفاع پرده و حباب های هوا بیشتر شده و همین امر باعث می‌شود که در جریان حرکتی رو به پایین

هرچه عدد فرود افزایش می‌یابد نیروی جریان پایین رونده هم افزایش می‌یابد و نیاز به جریان ثانویه با نیروی بیشتری است.

۳-۳- بحث کلی

یک نگاه افقی به جدول ۲ یعنی در جهت افزایش عدد فرود ملاحظه می‌شود ضمن تایید دوباره اینکه آبشستگی افزایش می‌یابد، اما تأثیر هوادهی به جریان برای رویارویی با

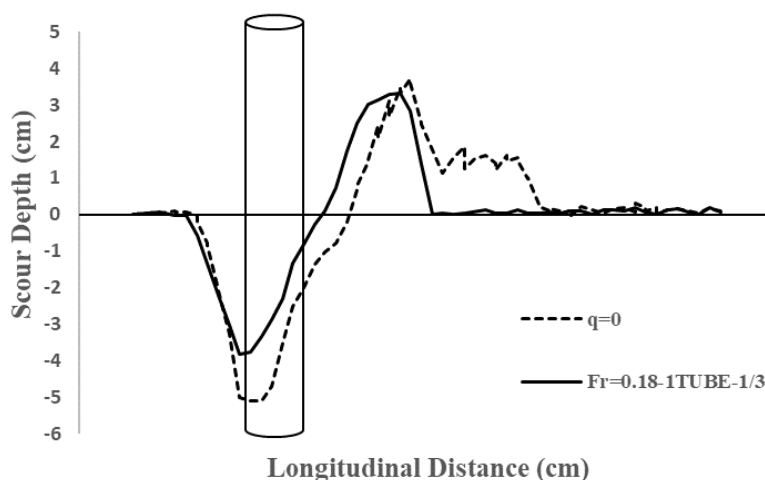


Fig. 7 Longitudinal-section of scour hole development around bridge pier
 شکل ۷ توسعه طولی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل

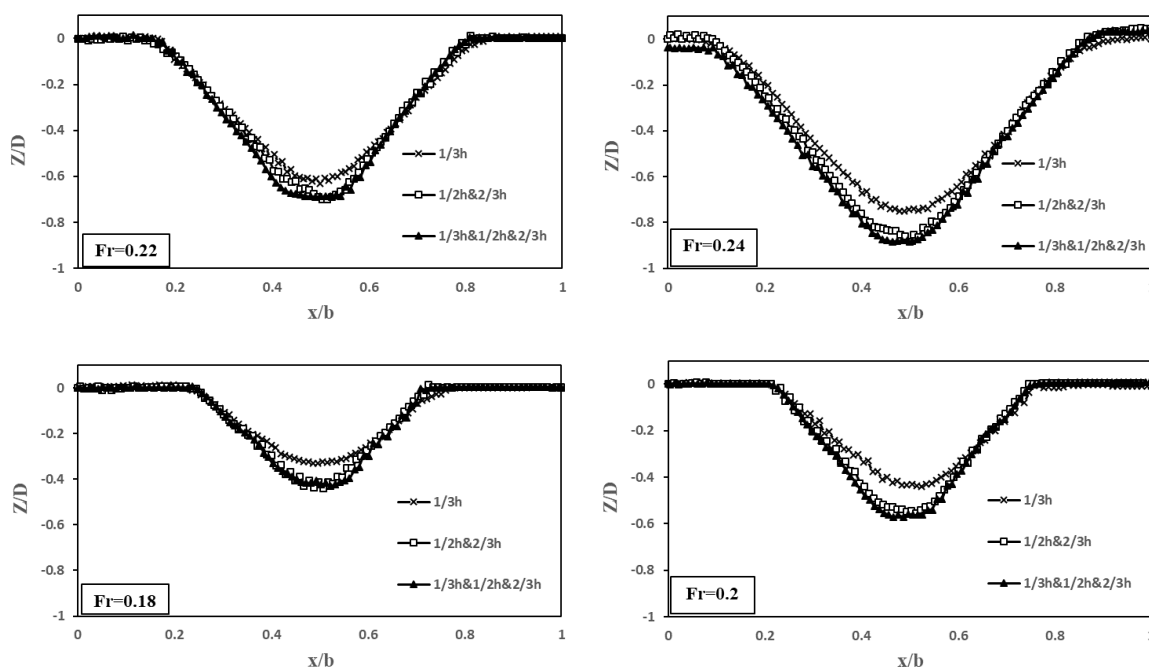


Fig. 8 Cross-section of scour hole development around bridge pier for different number of air-injection pipes
 شکل ۸ توسعه عرضی حفره آبشستگی پیرامون پایه پل برای شمار متفاوت لوله هوادهی

گزارش شده است. نگاهی به شکل ۳ آن مقاله نشان می‌دهد که بیشترین تاثیر سامانه هواده در نسبت سرعت هوای خروجی به سرعت جریان معادل ۵۷/۱ بر کاهش آبشستگی معادل ۰/۶۷ (نسبت عمق آبشستگی با سامانه هواده به عمق آبشستگی بدون استفاده از این سامانه) است. در این تحقیق بیشترین تاثیر در نسبت این سرعتها معادل ۸۳/۱ با میزان ۰/۷۴۵ بدست آمد. نکته قابل بحث این است که با میزان هایی که در مقاله یاد شده داده شده مانند دبی تزریق هوا، شمار روزنه و قطر آنها، نسبت سرعتها معادل ۱۱۵/۵ محاسبه می‌شود. در این حالت تاثیر سامانه هواده در کاهش آبشستگی پیرامون پایه پل با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.

نکته دیگری که ممکن است مورد بحث باشد اینکه در اصل سامانه هواده چقدر می‌تواند قابل اعتماد باشد. به طور مثال وجود ذرات ریز رسوب معلق در رودخانه می‌تواند باعث گرفتگی سوراخ‌های لوله‌های هواده شود. البته این نکته بسیار مهمی در این گونه سامانه‌های حفاظتی است، اما از آنجا که سرعت خروج هوا چند برابر سرعت جریان آب است این امکان کمتر ایجاد می‌شود. با این حال این سامانه ارزان و به سادگی قابل جایگزینی است و در مقایسه با سازه‌های حفاظتی دیگر در برابر آبشستگی که گاهی با وجود نیاز به سرمایه گذاری زیاد عمر مفیدی نیز دارند، شاید به صرفه تر باشد.

لازم به اضافه کردن این نکته می‌باشد که برای اینکه از این سامانه‌های مهار آبشستگی در عمل به کار برد بایستی شمار آزمایشها را بیشتر کرد تا تمام جوانب موضوع بررسی و ارزیابی گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر سامانه تزریق هوا بر الگوی آبشستگی و رسوبگذاری در پیرامون پایه پل در شرایط آب زلال در یک آبراهه مستقیم پرداخته شد. تمامی آزمایشها با ۴ عدد فرود ۰/۱۸، ۰/۲، ۰/۲۲ و ۰/۲۴ و ۷ حالت شمار و تراز کارگذاری لوله هواده در دبی تزریق هوا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. نتایج نشان داد وجود سازه هواده در آبراهه موجب کاهش آبشستگی در پیرامون پایه می‌شود. میزان

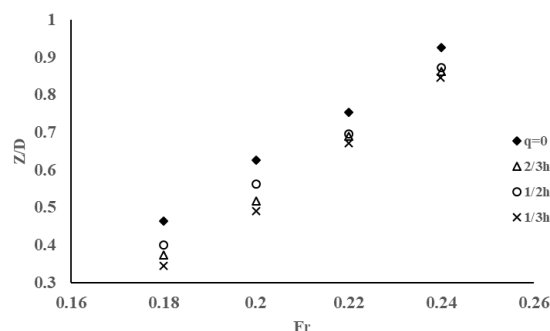


Fig. 9 The effect of Froude number on Z/D

شکل ۹ تاثیر عدد فرود بر نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه

آب و تشکیل گردابه نعل اسبی اخلاص بیشتری ایجاد شود، ضمن اینکه حباب‌های هوا در پشت پایه که فشار کمتر می‌شود ترکیده و باعث کاهش تأثیر جدایی آب از بدنه کم گردد و در نتیجه از نیروی گردابه‌های برخاستگی نیز کم شود. نکته سوم قابل ملاحظه در این جدول این است که با افزایش شمار لوله به دلیل تقسیم شدن هوا و کاهش نسبت دبی خروجی هوا از هر لوله به دبی جریان یا به عبارتی کاهش نسبت سرعت خروجی هوا به سرعت جریان، تاثیر سامانه هواده‌ی بر روی مدیریت و مهار آبشستگی به شدت پایین می‌آید. این نکته در اعداد فرود کمتر بسیار به چشم می‌خورد، در حالیکه برای اعداد فرود بالاتر به دلیل کاهش کلی اثر سامانه هواده‌ی در مهار آبشستگی کمتر دیده می‌شود. به نظر می‌رسد سرعت خروجی هوا جزء فراسنجه‌های مهم می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهد نسبت سرعت هوای خروجی از روزنه (۱۸/۳ متر بر ثانیه) به سرعت جریان برای اعداد فرود متفاوت در نظر گرفته شده در این تحقیق معادل ۸۳/۱، ۷۶/۲، ۶۷/۷ و ۶۳/۰ می‌باشند. نسبت عمق آبشستگی در شرایط تزریق هوا به عمق آبشستگی در شرایط بدون تزریق هوا برای اعداد فرود ۰/۱۸، ۰/۲۰، ۰/۲۲ و ۰/۲۴ به ترتیب معادل ۰/۷۴۵، ۰/۷۸۳، ۰/۸۹۲ و ۰/۹۱۲ محاسبه شد (جدول ۲ - ارتفاع کارگذاری یک سوم عمق از کف).

در اینجا مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق با تنها نتایج مندرج در مقاله خیلی جدید و جامع موجود در ادبیات موضوعی (Tipireddy and Barkdoll, 2019) انجام گرفته است. در نتایج یاد شده قطر میانگین ذرات کف ۰/۵۶ میلی متر و عدد فرود ۰/۲۳ و سرعت جریان ۰/۳۲ متر بر ثانیه

channels by means of a bubble screen laboratory experiments, *J. of Hydr. Eng.*, 134(2), 184-195.

Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W. (1997). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 211-252.

Champagne, T.M., Barlock, R.R., Ghimire, S.R., Barkdoll, B.D., Gonzalez, J.A. and Deaton, L. (2016). Scour reduction by air injection downstream of stilling basins: Optimal configuration determination by experimentation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 142 (12), 04016067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001108](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001108).

Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.

Chiew, Y.-M. (1992). Scour Protection at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1260-1269.

Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill civil engineering series.

Dugué, V., Blanckaert, K., Chen, Q. and Schleiss, A.J. (2015). Influencing flow patterns and bed morphology in open-channels and rivers by means of an air-bubble screen. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014070.

Dugué, V., Blanckaert, K., Chen, Q. and Schleiss, A.J. (2013). Reduction of bend scour with an air-bubble screen-Morphology and flow patterns. *Int. J. Sediment Res.*, 28(1), 15-23.

Dugué, V., Izadinia, E., Rigaud, S. and Schleiss, A.J. (2012). Preliminary study on the influence of an air-bubble screen on local scour around a bridge pier. In *Proceedings of the 2nd European IAHR Congress (No. CONF, p. C9)*.

Landers, M.N. (1992). Bridge scour data management. *Proceedings of the Hydraulic Engineering, August 2-6, Maryland*. Published by American Society of Civil Engineers.

Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 114(10), 1210-1226.

Raudkivi, A.J. (1986). Function trends of scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(5), 1-3.

Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109(3), 338-350.

Tipireddy, R.T.R. and Barkdoll, B.D.B. (2019). Scour Reduction by Air Injection at a Cylindrical Bridge Pier: Experimental Determination of Optimal

کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه در آزمایش تک لوله در تراز نصب ۵ سانتی متر با عدد فرود ۰/۱۸ و در دبی تزریق ۱۰۰ لیتر بر دقیقه به ۲۵/۵ درصد رسید. مقایسه‌ای برقرارگیری شمار لوله هواده روی پایه انجام شد، که نتایج نشان داد حالت سه لوله کمترین بازده را دارد. وجود این سامانه باعث کاهش حجم آبشستگی پیرامون پایه شد. لذا بررسی‌ها نشان می‌دهد وجود این سازه می‌تواند جایگزین مناسبی نسبت به سازه‌های حفاظتی معمول مورد استفاده باشد لذا ضرورت دارد بررسی‌ها و ارزیابی‌های جامع و بیشتری در این زمینه انجام شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	عرض آبراهه
C _D	ضریب شکل پایه
D	قطر پایه
D ₅₀	قطر میانگین ذرات بستر
D _n	قطر منافذ روی لوله هواده
Fr	عدد فرود
H	تراز قرارگیری لوله منفذ دار از بستر
L	طول لوله منفذدار
Q	دبی جریان ورودی
Re	عدد رینالدز
d	فاصله منفذ های روی لوله هواده
d ₁	بیشترین عمق آبشستگی در آزمایش شاهد
d ₂	بیشترین عمق آبشستگی در حضور سامانه تزریق هوا
g	شتاب ثقل
n	شمار لوله‌های هواده
q	دبی تزریق هوا
ρ	چگالی سیال
ρ _s	چگالی ذرات رسوب
h	عمق جریان
μ	لزوجة دینامیکی سیال
σ _g	انحراف معیار هندسی توزیع ذرات بستر

۶- منبع‌ها

Blanckaert, K., Buschman, F.A., Schielen, R. and Wijnbenga, J.H.A. (2008). Redistribution of velocity and bed-shear stress in straight and curved open

Configuration. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 145(1), 06018016-1.

Wijbenga, J.H.A., Schielen, R., Blanckaert, K. and Buschman, F. (2006). Secondary flow and velocity redistribution by bubble screens in open channel bend. Int Conf. on Fluvial Hydraulics, LISBON, PORTUGAL, 6–8 September.