

Research Paper

Experimental Study of the Effect of Protective Plates Lengths on Reducing the Depth of the Cylindrical Bridge Pier

Benyamin Daniyari¹, Ebrahim Nohani^{2*}

1. Former M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Dezful Branch, Iran

2. Assistant Professor, Department of civil Engineering, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: 2019/04/28

Revised: 2019/09/23

Accepted: 2021/12/27

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.21410.2153

Keywords:

Scour, Cylindrical bridge pier, Protective protection, Laboratory model.

Abstract

Introduction: Local scouring that occurs due to human construction of structures in the course of rivers flow can lead to erosion of the river's bottom and threatens to change the natural flow of the river.

One of the indirect methods of reducing scouring is the use of protective structures.

Methods: In this research, the effect of protective sheet length on the scour depth reduction of cylindrical base was investigated.

Findings: The results of the experiments showed that the laying of protective plates could reduce the scour depth to 69.50%. Also, the best relative length (the length of the protective plate to the width of the bridge base, L / b) of the protective plates is equivalent to one, and with the increase in the length of the protective plates, the effect of the plate length on the scour depth reduction was reversed, so that reducing the scour depth for the relative length of 5.0 and 2 are respectively, 50% and 60% more than the control (without protective plates), and in all experiments, the relative depth of scour has increased with increasing the flow rate.

Citation: Daniyari B, Nohani E. Experimental Study of the Effect of Protective Plates Lengths on Reducing the Depth of the Cylindrical Bridge Pier. Water Resources Engineering Journal. 2022; 15(53): 1- 12.

***Corresponding author:** Ebrahim Nohani

Address: Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

Tell: +061- 42420601

Email: nohani_e@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Local scour occurs as a result of the direct impact of water flow on human-made structures such as bridge foundations. Several hydraulic factors cause the scouring phenomenon to intensify in the place of water structures that are built on the banks of the rivers. Erosion and sedimentation studies provide this possibility so that, while knowing the morphological behavior of the river, the effects of various management measures on the behavioral performance of the river can be evaluated quantitatively and qualitatively, and in this way, it is possible to identify instability factors and apply appropriate protection standards and engineering measures, made it possible in advance. The main cause of this type of scouring is due to the formation of horseshoe eddies around the foundations of the bridge. Obstruction of the flow by the bases causes the flow to stagnate in front of it. A downward hydraulic gradient develops in front of the foundations, which causes the downward flow to be directed towards the riverbed. While digging the bed in front of the base, the downward flow penetrates into the cavity and turns upstream and creates a vortex. The rotation of the flow around the foundation causes a local increase in speed and concentration of stress around the foundation. Water circulation also develops inside the pit in front of the foundation to both sides and creates a vortex in total, which is called a horseshoe vortex.

One of the methods of weakening the vortex system is the use of protective plates. The protective plate is a thin plate that is installed at a certain height from the base of the bridge and thus prevents the direct contact of the downward current in front of the bridge with the river bed. And it weakens the activity of horseshoe vortices. Also, in these types of foundations, the scouring speed is reduced, or in other words, the scouring start time is delayed. The difference between these plates and the collar is that they are installed in front of the base and separately from the base, while the collar is installed on the base, and usually when it is possible to install the collar due to

operational reasons or construction limitations, protective plates are used in front of the base. Therefore, in the present research, by using protection plates with different lengths and comparing their performance, the amount of water wash reduction around the bridge base was studied in a laboratory.

Materials and Methods

In order to conduct experiments in this research, a laboratory flume with a length of 7.5 meters, width of 30 cm, depth of 45 cm with a variable slope and a glass body (to observe the hydraulic conditions of the formed flow) was used. The flume used in this research consists of a rectangular open channel with a glass wall, a calming pond at the beginning of the flume, an outlet channel at the end of the flume, a water tank, an inlet tank, a water pump, as well as valves, water outlet drains and devices. Flow rate measurement, the main purpose of which is to create a flow with different depth, speed and flow rates to perform experiments (Figure 2). The skeleton of the flume structure is metal and the walls are made of fiberglass, and the maximum flow that enters the flume is considered to be about 48 liters per second. The slope of the flume floor can be adjusted by a hydraulic jack, and the bed sediments were considered at a height of 14 cm from the flume floor, and the height of the water on the bed sediments was considered to be 10 cm according to the threshold flow rate (12 liters per second in this research).

Findings

In order to investigate the effect of protective plates on the amount of scour reduction of the bridge foundation, dimensionless diagrams were drawn from the test results for different Froude numbers (0.21, 0.23, and 0.26) and protective plates with different lengths (2.5, 5, and 10 cm). The effect of protective plates was drawn as a longitudinal profile of scouring at constant Froude numbers. As can be seen, the use of protective plates has reduced local erosion around the bridge base. By protecting the bed against horseshoe and downward currents, these plates reduce the power of

digging a scour hole around the base and with proper performance against the eddies attacking the base, according to the dimensions of the plates, they depreciate and prevent more and more holes become scouring pits. Also, the greater the scour depth in front of the foundation (control test), the higher the height of the sediment pile behind the bridge foundation, and on the contrary, if the scour is well controlled by protective plates, the height of the sediment pile behind the bridge foundation will be lower. protective plates have been effective in reducing scouring of the bridge base.

Discussion

The results showed that the amount of abrasion has changed with a slight difference from each other and the protective plate with length $L=b$ compared to the rest of the protective plates has caused a further decrease in the depth of abrasion, which indicates that the increase in the length of the protective plates up to a certain ratio of the base diameter. The bridge can have an effect on the reduction of the relative depth of scouring, and more than that, it will reduce the impact on the relative depth of scouring. Also, the hydraulic reason is that the effect of the downward currents in front of the base is up to a certain radius from the base, and a further increase in the length of the protective plate will have less effect. Figure (6) shows the comparison between the longitudinal profile of the relative scour changes around the base of the cylindrical bridge in relation to the change of the descent number of the flow in the fixed lengths of the protection plates. Due to the fact that the control test was carried out in the Froude Astana number (0.26), it has the highest relative scour depth, but in the case where protective plates were used, the relative depth of scour in the Froude Astana number has been greatly reduced. It can be seen in all cases of Figure 6. According to Figure 6, with the increase in the flow rate, the relative scour depth has increased, and the rate of this increase has decreased if protective plates are used. Next, in order to more closely examine the effect of protective plates on reducing scour depth compared to

the control test, a column chart was drawn for all tests.

Conclusion

The laboratory results showed that, if the number of flow descent increases and the length of protection plates is constant, the effect of protection plates on the reduction of the relative scour depth is reduced, and for the protection plate with a length of 2 times the diameter of the bridge base, the percentage of reduction in scour depth is 60% for the descent number. The current equivalent to 0.26 has decreased to 29.54% for the Froude number of 0.21 and 50% of the impact of the protection plate has been reduced. Also, the greatest effect of the protective plate is related to the protective plate with the length equal to the diameter of the bridge base, which is equivalent to 69.54%. According to the obtained results, with the increase in the length of the protection plates up to $L=b$, the scouring depth decreases, but with a further increase in the relative length of the protection plates, due to the collision of more downward flow lines and the creation of horseshoe vortices, it increases. It can increase the destruction power of the sediments around the bridge base and has reduced the effect of this structure. Also, in all the tests in the vicinity of the protective plates, the scouring depth decreased significantly (maximum 69.54 percent and minimum 29.54 percent) compared to the control test condition, and according to the observations, it can be concluded that the use of protective plates by affecting the downward flow lines and horseshoe vortices, it is effective as a suitable structure to reduce the scour depth around the bridge foundations.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تاثیر طول صفحات حفاظتی بر کاهش عمق آبشستگی پایه پل استوانه‌ای شکل

بنیامین دانیاری^۱، ابراهیم نوحانی^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران سازه‌های هیدرولیکی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

۲. استادیار گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

چکیده

مقدمه: آبشستگی موضعی که به دلیل سازه‌های ساخت بشر در مسیر جریان رودخانه‌ها به وقوع می‌پیوندد، می‌تواند به فرم‌های مختلف باعث فرسایش کف رودخانه شده و تهدیدی در جهت تغییر رژیم طبیعی جریان رودخانه محسوب می‌شود. یکی از روش‌های غیر مستقیم کاهش آبشستگی استفاده از سازه‌های حفاظتی است. صفحه حفاظتی عبارتست از صفحه‌ای نازک که در یک ارتفاع مشخص از پایه پل نصب شده و به این وسیله مانع از تماس مستقیم جریان پایین رونده در جلوی پل با بستر رودخانه می‌گردد و فعالیت گرداب‌های نعل اسبی را تضعیف می‌کند همچنین در این نوع پایه‌ها سرعت آبشستگی کاهش یافته و یا به عبارت دیگر زمان شروع آبشستگی به تأخیر می‌افتد.

روش: در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تاثیر طول صفحات حفاظتی بر میزان کاهش عمق آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای پرداخته شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها نشان داد که قرارگیری صفحات حفاظتی توانست تا ۶۹ درصد باعث کاهش عمق آبشستگی شود. همچنین بهترین طول نسبی (نسبت طول صفحه حفاظتی به عرض پایه پل)، $\frac{L}{b}$ صفحات حفاظتی معادل یک می‌باشد و با افزایش بیشتر طول صفحات حفاظتی، تاثیر طول صفحه بر کاهش عمق آبشستگی معکوس شد بطوریکه کاهش عمق آبشستگی برای طول نسبی ۰/۵ و ۲ به ترتیب ۵۰٪ و ۶۰٪ بیشتر از حالت شاهد (بدون حضور صفحات حفاظتی) می‌باشد. همچنین در کلیه آزمایش‌ها با افزایش عدد فرود جریان، عمق نسبی آبشستگی افزایش پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش طول صفحات حفاظتی تا $L=b$ روند کاهش عمق آبشستگی زیاد بوده ولی با افزایش بیشتر طول نسبی صفحات حفاظتی، به علت برخورد تعداد بیشتر خطوط جریان رو به پایین و ایجاد گرداب‌های نعل اسبی بیشتر می‌تواند باعث افزایش قدرت تخریب رسوبات اطراف پایه پل شود و اثر این سازه را کاهش داده است. همچنین در تمام آزمایش‌ها در مجاورت صفحات حفاظتی، عمق آبشستگی به میزان قابل توجهی (حداکثر ۶۹/۵۴ درصد و حداقل ۲۹/۵۴ درصد) نسبت به حالت آزمایش شاهد کاهش پیدا کرده و با توجه به مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از صفحات حفاظتی با تاثیر بر روی خطوط جریان رو به پایین و گرداب‌های نعل اسبی به‌عنوان سازه‌ی مناسبی در جهت کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل موثر است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۸

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2021.21410.2153

واژه‌های کلیدی:

آبشستگی، پایه پل استوانه‌ای، صفحه حفاظتی، مدل آزمایشگاهی.

* نویسنده مسئول: ابراهیم نوحانی

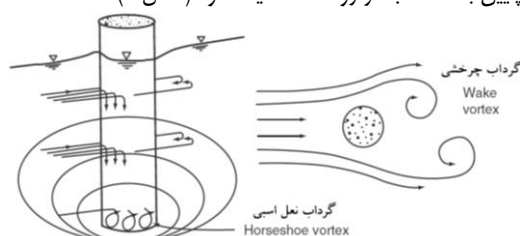
نشانی: استادیار گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

تلفن: ۰۶۱۳ - ۴۲۴۲۰۶۰۱

پست الکترونیکی: nohani_e@yahoo.com

مقدمه

آبستگي موضعي در اثر برخورد مستقيم جريان آب به سازه های دست ساز بشر مانند پایه های پل رخ می دهد. عوامل متعدد هیدرولیکی باعث می شود که پدیده آبستگي در محل سازه های آبی که در ساحل رودخانه ها احداث می شوند، تشدید شود (۱). مطالعات فرسایش و رسوبگذاری این امکان را فراهم می آورد تا بتوان ضمن شناخت رفتار ریخت شناسی رودخانه، اثرهای اقدامات مختلف ساماندهی را بر عملکرد رفتاری رودخانه مورد ارزیابی کمی و کیفی قرار داده و از این طریق امکان تشخیص عوامل ناپایداری و اعمال معیارهای مناسب حفاظتی و اقدامات مهندسی را پیشاپیش میسر نمود (۲). عامل اصلی این نوع آبستگي در اثر تشکیل گرداب های نعل اسبی^۱ در اطرف پایه های پل به وجود می آید. انسداد جريان به وسیله پایه ها، موجب ساکن شدن جريان^۲ در جلوی آن می شود. یک گردابان هیدرولیکی رو به پایین در جلوی پایه ها توسعه می یابد که باعث می شود جريان رو به پایین به سمت بستر رودخانه هدایت شود (شکل ۱).



شکل ۱- گرداب های نوع نعل اسبی و چرخشی (۸)

جریان پایین رونده ضمن حفر بستر در جلوی پایه، به داخل حفره نفوذ کرده و به طرف بالادست چرخیده و گردابی را بوجود می آورد. چرخش جریان در دور پایه باعث افزایش موضعی سرعت و تمرکز تنش در دور پایه می شود. چرخش آب نیز در داخل گودال جلوی پایه به دو طرف توسعه پیدا می کند و در مجموع گردابی ایجاد می کند که به آن گرداب نعل اسبی می گویند. حفره گودال آبستگي توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک نماید. این سیستم های گردابی، مکانیسم اصلی آبستگي موضعی به حساب می آیند که در دراز مدت باعث ایجاد حفره در محل پایه پل شده و ممکن است موجب ریزش پل شوند. قدرت گرداب نعل اسبی با افزایش عمق آبستگي کاهش می یابد. برای آبستگي بستر زنده^۳، تعادل وقتی ایجاد می شود که مقدار مواد بستر از بالادست رودخانه با مقدار مواد بستر رودخانه انتقال یافته برابر باشد. برای آبستگي آب زلال^۴ تعادل وقتی ایجاد می شود که تنش برشی ایجاد شده به وسیله گرداب برابر با تنش برشی بحرانی شود (۳، ۴). بر اساس مطالعات آنانداله (۲۰۰۶) در مورد پایه های پل نیز آمار نشان می دهد که از ۳۸۳ پل که در آمریکا تخریب شده اند، ۷۲ درصد مربوط به آبستگي تکیه گاه بوده است (۵). مطالعات ملویل و کلمن (۲۰۰۰) نیز نشان می دهد که ۷۰ درصد هزینه های شکست پل در نیوزیلند ناشی

از آبستگي تکیه گاه پل بوده است (۶). این آمار که نشان دهنده سهم آبستگي پایه ها و تکیه گاه ها در تخریب پل ها می باشد، ضرورت مطالعه در مورد پیش بینی آبستگي و روش های محافظت پل در برابر آن را آشکار می سازد. تاکنون روش های متعددی جهت کنترل آبستگي پایه های پل ارائه شده است که بطور کلی به دو گروه اصلی الف) مقاوم سازی بستر و ب) تضعیف سیستم های گردابی تقسیم می شوند. در روش اول بستر رودخانه در مجاورت پایه های پل با قرار دادن اجزاء سنگین و مقاوم به آبستگي محافظت می گردد. از نمونه های این گروه می توان به گابیون، ریپ ریپ، تشک حفاظتی و ... اشاره کرد. برای تضعیف سیستم های گردابی روش های زیادی مطرح شده است که مهم ترین آنها عبارتند از: استفاده از طوق، ایجاد شکاف، استفاده از شمع های حفاظتی و همچنین بکار بردن صفحات مستغرق و همچنین صفحات حفاظتی ۵ می باشد. تکنیک صفحات مستغرق ۶ یکی از روش هایی است که با تغییر در رژیم حرکت بار بستر این امکان را فراهم می سازد تا محل رسوب گذاری و فرسایش قابل کنترل باشد. این صفحات در مقطع عرضی کانال طراحی و با زاویه کوچکی نسبت به جهت جريان به صورت عمود در بستر نصب میشوند (۷). نوحانی و امامقلی زاده (۱۳۹۶) به بررسی کاربرد پره های مستغرق در کاهش آبستگي موضعی تکیه گاه پل با دماغه گرد بررسی آمار شکست پل ها پرداختند (۸). نتایج ایشان نشان داد که عملکرد پره های مستغرق در کاهش آبستگي اطراف تکیه گاه قابل ملاحظه بوده و موجب حرکت حفره آبستگي و دور کردن آن از دماغه تکیه گاه به سمت مرکز کانال شده است. همچنین استفاده از پره های مستغرق با ۵ نوع آرایش مختلف نشان می دهد که بطور متوسط این سازه می تواند ۶۰/۱ درصد عمق آبستگي را در اطراف تکیه گاه پل کاهش دهد. نوحانی و همکاران، (۱۳۹۱) طی تحقیقی بر روی قطر سنگچین پایدار اطراف پایه پل استوانه ای در قوس رودخانه به این نتیجه رسیدند که پایداری سنگدانه ها در قوس به موقعیت قرارگیری بستگی دارد به طوری که در زاویه ۶۰ درجه حداقل پایداری و در زاویه ۳۰ درجه قوس حداکثر پایداری لایه سنگ چین در قوس رخ می دهد (۹). بطور کلی پایداری سنگدانه های کار گذاشته شده در اطراف پایه های پل در قوس رودخانه به علت عوامل تقویت کننده آبستگي (جریان های ثانویه و حلزونی)، کمتر از رودخانه های مستقیم می باشد. نوحانی و همکاران (۱۳۹۱) طی بررسی آزمایشگاهی تاثیر شکاف پایه بر میزان آبستگي اطراف پایه پل استوانه در قوس رودخانه را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بکارگیری شکاف در پایه های پل در میزان کاهش آبستگي متاثر است و شکافی که از بستر شروع می شود و تا سطح آب ادامه پیدا کند نسبت به سایر موقعیت های قرارگیری شکاف مؤثرتر است و می تواند تا ۴۴ درصد باعث کاهش آبستگي نسبت به حالت بدون شکاف پایه شود (۱۰). حجت خواه و سلیمانی بابرصاد (۱۳۹۵) از سازه های محافظ با پنج زاویه مختلف ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۰ درجه،

5 - Protective plates
6 - Submerged vanes

1 - Horseshoe vortices
2 - Stagnation
3 - Live bed
4 - Clear water

$$d_s = f_1(V, g, \rho, \mu, V_c, d_s, b, d_{50}, y, L) \quad (1)$$

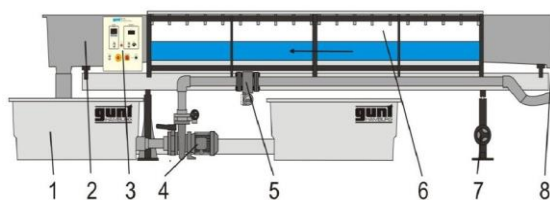
با انتخاب سه پارامتر ρ, V, b به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش باکینگهام، پارامترهای بی بعد موثر در آبهستگی تکیه گاه به صورت رابطه زیر به دست آمد:

$$\frac{d_s}{b} = f_2\left(\frac{\rho b V}{\mu}, \frac{\sqrt{g y}}{V}, \frac{V_c}{V}, \frac{d_{50}}{b}, \frac{y}{b}, \frac{L}{b}\right) \quad (2)$$

در رابطه فوق پارامترهای بی بعد $\frac{\rho b V}{\mu}$ و $\frac{\sqrt{g y}}{V}$ به ترتیب بیانگر عدد رینولدز و عدد فرود جریان می باشند. از آنجایی که جریان در کلیه آزمایش ها متلاطم (آشفته) است، عدد رینولدز پارامتری تأثیرگذار نمی باشد و لذا می توان آن را حذف نمود. همچنین با ترکیب پارامترهای بدون بعد و حذف پارامترهای بدون بعد ثابت در آزمایش ها $(\frac{d_{50}}{b}$ و $\frac{y}{b})$ و عدد رینولدز رابطه زیر را میتوان برای حداکثر عمق آبهستگی در اطراف پایه با حضور صفحات حفاظتی به دست آورد:

$$\frac{d_s}{b} = f_3\left(F_r, \frac{V_c}{V}, \frac{L}{b}\right) \quad (3)$$

به منظور انجام آزمایش ها در این تحقیق از یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۷/۵ متر، عرض ۳۰ سانتی متر، عمق ۴۵ سانتی متر با شیب متغییر و بدنه شیشه ای (به منظور مشاهده شرایط هیدرولیکی جریان تشکیل شده) استفاده شد. فلوم مورد استفاده در این تحقیق عبارتست از یک کانال روباز مستطیلی با جداره شیشه ای، حوضچه آرام کننده در ابتدای فلوم، کانال خروجی در انتهای فلوم، مخزن آب، تانک ورودی، پمپ آب و همچنین دریچه و شیرآلات، زهکش های خروج آب و دستگاه اندازه گیری دبی جریان که هدف اصلی آن ایجاد جریان با عمق، سرعت و دبی های متفاوت جهت انجام آزمایش ها است (شکل ۲).



اجزای مختلف مدل آزمایشگاهی (پلان)
۱- مخزن خروجی فلوم، ۲- کانال خروجی انتهایی فلوم، ۳- کلبه های روشن و خاموش پمپ، ۴- پمپ، ۵- دستگاه اندازه گیری دبی، ۶- کانال مستطیلی روباز شیشه ای، ۷- شیر تنظیم دبی، ۸- حوضچه آرام کننده ابتدای فلوم

شکل ۲- اجزای مختلف مدل آزمایشگاهی (پلان)

اسکلت سازه فلوم، فلزی و جنس جداره ها از فایبرگلاس مقاوم بوده حداکثر دبی که وارد فلوم می شود حدود ۴۸ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شیب کف فلوم توسط جک هیدرولیکی قابلیت تنظیم دارد و رسوبات بستر به ارتفاع ۱۴ سانتیمتر از کف فلوم در نظر گرفته شد و ارتفاع آب روی رسوبات بستر با توجه به دبی آستانه حرکت (۱۲ لیتر بر ثانیه در این تحقیق) ۱۰ سانتی متر منظور گردید. در انتخاب قطر یا عرض مدل پایه های مورد استفاده باید اثر جانبی به وسیله دیواره های فلوم روی آبهستگی موضعی اطراف پایه در نظر گرفته شود. برای از بین رفتن تأثیر دیواره های کانال بر آبهستگی موضعی، طبق توصیه های چپو و ملویل (۱۹۸۷) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد (۱۶). لذا جهت مدل کردن پایه پل از لوله PVC به قطر ۵۰ میلی متر به صورت استوانه ای استفاده شد. در وسط کانال و در محدوده ای به طول ۱/۶ متر و به ارتفاع ۱۴ سانتی متر از رسوبات با

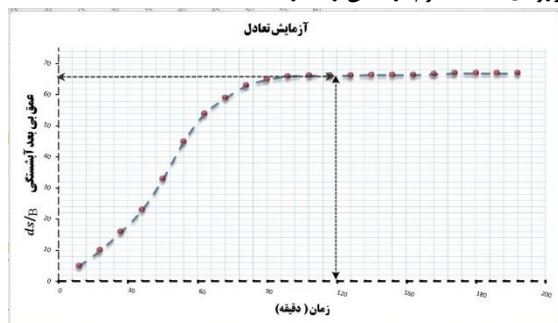
جهت کنترل آبهستگی اطراف پایه پل استفاده کردند (۱۱). نتایج ایشان نشان داد که سازه محافظ با زاویه قرارگیری ۱۵ درجه در کاهش میزان آبهستگی عملکرد بهتری دارد. صمیمی بهبهان و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از صفحاتی با زاویه مشخص بین ۱۰ تا ۳۰ درجه نسبت به جهت جریان در ردیف های چندتایی برای اصلاح شکل جریان نزدیک بستر، عمق آبهستگی پایه پل استوانه ای را کاهش داد (۱۲). قربانی و کریمی (۲۰۰۷) به بررسی استفاده از یک صفحه مستغرق با طولی برابر قطر پایه پل استوانه ای شکل در جلوی پایه و همچنین به بررسی استفاده از دو صفحه مستغرق در بالادست پایه در حالت چسبیده به پایه پرداختند (۱۳). نوحانی و ابراهیمی (۱۳۸۹) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر توام طوق و صفحات مستغرق بر میزان کاهش عمق آبهستگی گروه پایه های پل استوانه ای شکل پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که صفحات مستغرق با تأثیر بر روی خطوط جریان و طوق با محافظت از پایه در مقابل گرداب های پایین رونده و گرداب های نعل اسبی، ابزار مناسبی جهت کاهش عمق آبهستگی در پایه های استوانه ای می باشد (۱۴).

شجاعی و همکاران (۱۳۹۱) بیان کردند که در شرایط کاربرد ۶ صفحه مستغرق با حالت های مختلف قرارگیری آنها، کاهش ۵۱ درصد عمق آبهستگی اطراف پایه پل حاصل شد و در شرایط کاربرد ۴ و ۲ صفحه مستغرق به ترتیب ۵ و ۱۲ درصد کاهش عمق آبهستگی رخ داد (۱۵). همانطور که اشاره شد یکی از روش های تضعیف سیستم گردابی استفاده از صفحات حفاظتی می باشد، صفحه حفاظتی عبارتست از صفحه ای نازک که در یک ارتفاع مشخص از پایه پل نصب شده و به این وسیله مانع از تماس مستقیم جریان پایین رونده در جلوی پل با بستر رودخانه می گردد و فعالیت گرداب های نعل اسبی را تضعیف می کند همچنین در این نوع پایه ها سرعت آبهستگی کاهش یافته و یا به عبارت دیگر زمان شروع آبهستگی به تأخیر می افتد. تفاوت این صفحات با طوقه در این است که در جلوی پایه و جدای از پایه نصب می شوند در حالیکه طوقه بر روی پایه نصب شده و معمولاً در مواقعی که امکان نصب طوقه به علل اجرایی و یا محدودیت ساخت مواجه باشیم از صفحات حفاظتی در جلوی پایه استفاده می شود. لذا در تحقیق حاضر با بکارگیری صفحات حفاظتی با طول های مختلف و مقایسه عملکرد آنها میزان کاهش آبهستگی اطراف پایه پل بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

قبل از انجام آزمایش ها، ابتدا پارامترهای موثر بر پدیده هیدرولیکی را بررسی و سپس با آنالیز ابعادی، پارامترهای بی بعد استخراج گردید. در ایجاد پدیده آبهستگی اطراف پایه پل و کنترل آن توسط صفحات حفاظتی پارامترهای مختلفی تأثیر گذارند از جمله؛ سرعت متوسط V ، شتاب ثقل g ، جرم مخصوص سیال ρ ، لزجت دینامیکی μ ، سرعت آستانه حرکت V_c ، عمق آبهستگی d_s ، قطر پایه پل b ، قطر ذرات رسوب d_{50} ، عمق جریان y و طول صفحات محافظ L . با توجه به پارامترهای ذکر شده، می توان رابطه (۱) را برای حداکثر عمق آبهستگی اطراف پایه پل استوانه ای تعریف نمود:

طولی فلوم، پس از تسطیح ماسه ها در تراز مد نظر یعنی ۱۴ سانتی متر (ارتفاع ماسه از کف کانال ۱۴ سانتی متر) در نهایت با باز کردن شیر ورودی آب به فلوم آزمایش را آغاز شد.



شکل ۳- منحنی توسعه زمانی آبستنگی

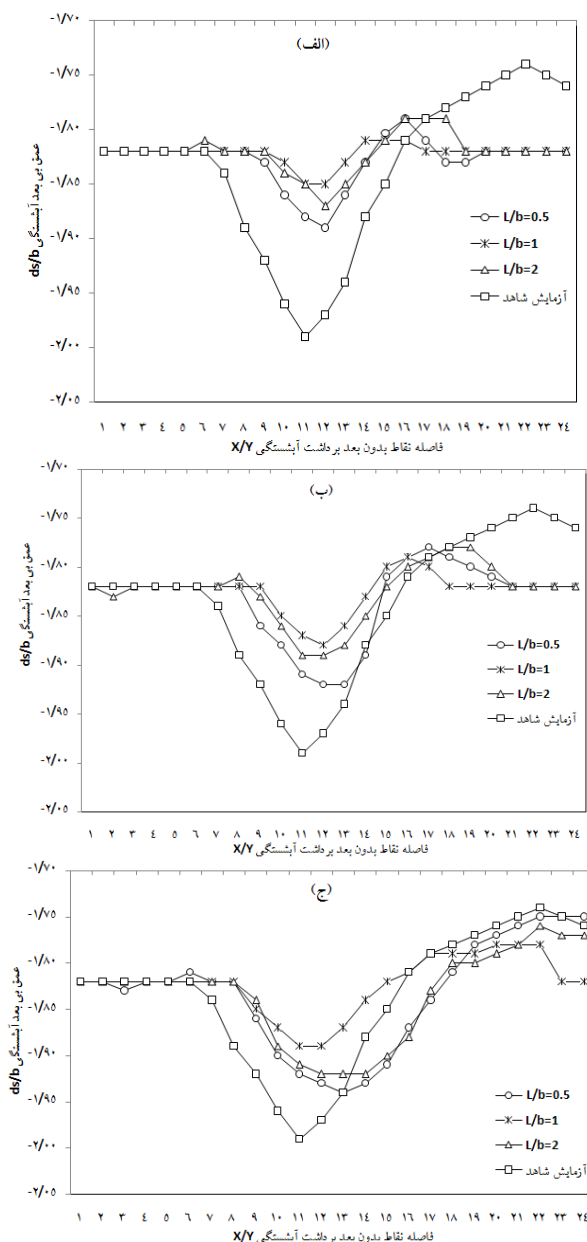
به منظور بررسی اثر طول صفحات حفاظتی بر کاهش عمق آبستنگی اطراف پایه پل تعداد ۱۰ آزمایش طبق دسته بندی آزمایش ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- معرفی آزمایش ها

تعداد آزمایش	ارتفاع آب (cm)	دبی (lit/s)	عدد فرود جریان	طول صفحات محافظ (cm)
۱	۱۰	آستانه حرکت	-۰/۲۶	-
۳	۱۰	۷/۸	-۰/۲۶	۲،۵،۱۰/۵
۳	۱۰	۷	-۰/۲۳	۲،۵،۱۰/۵
۳	۱۰	۶/۴	-۰/۲۱	۲،۵،۱۰/۵

متغیرهای آزمایش شامل سه دبی (۷/۸ و ۷ و ۶/۴ لیتر بر ثانیه) و سه طول مختلف صفحات محافظ با اندازه ۵، ۲/۵ و ۱۰ سانتی متر ($L = b$ ، $L = b/2$ و $L = b/5$) در دبی ثابت آستانه حرکت و دبی های زیر آستانه حرکت انجام شد. مراحل آزمایش ها به این شکل انجام شد که پس از قرار دادن رسوبات در اطراف پایه، به منظور یکنواخت کردن سطح رسوبات از یک ارابه تسطیح کننده دستی استفاده شد سپس صفحات محافظ (صاف و یا زبر) در جلوی پایه کارگذاری شد (شکل ۴). پس از استقرار پایه و صفحات محافظ در جای مناسب با روشن کردن پمپ و تنظیم دبی آستانه حرکت، آزمایش شروع می شود. برای اینکه هد آب روی رسوبات ثابت باقی بماند با استفاده از سرریزی که انتهای فلوم قرار گرفته و با سعی و خطا جهت یافتن سرعت آستانه، تراز آب به ۱۰ سانتی متر رسانده و توسط دریچه انتهایی ثابت شد. پس از تنظیم دقیق تراز سطح آب آزمایش به مدت ۱۲۰ دقیقه در حال انجام باقی می ماند و بعد از گذشت ۱۲۰ دقیقه و اتمام آزمایش پمپ خاموش شده و آب فلوم تخلیه می شد. سپس زهکشی رسوبات و تخلیه آب از درون فلوم انجام می گرفت و برداشت مقادیر آبستنگی توسط متر لیزری و شیشه شبکه بندی مدرج انجام می گرفت و در نهایت با تسطیح مجدد رسوبات و نصب صفحات محافظ جدید مراحل فوق برای آزمایش های بعدی تکرار شد.

دانه بندی یکنواخت و غیر چسبیده پر گردید و برای محدود کردن رسوبات و جلوگیری از جابه جایی آنها دو عدد باکس از جنس PVC به ارتفاع ۱۴ سانتی متر (هم ارتفاع با بستر رسوبی) ساخته شده و بوسیله چسب مخصوص در محل های خود ثابت شد. برای جلوگیری از تشکیل ریبیل قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی متر بزرگتر باشد (۱۷). همچنین برای حذف اثر رسوبات روی عمق آبستنگی نسبت قطر پایه به متوسط قطر ذرات باید کمتر از ۵۰ باشد. در همین راستا راودکیوی و اتما این نسبت را ۳۰-۲۵ پیشنهاد کرده اند. با توجه به این موارد از یک لایه ماسه طبیعی رودخانه ای با قطر متوسط معادل ۰/۹ میلی متر و ضریب انحراف استاندارد معادل ۱/۱ و ضریب یکنواختی ۱/۲۵ انتخاب و در لایه ای به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی متر برای انجام آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه آبستنگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی شد لذا به منظور جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوبات در بالادست پایه، سرعت متوسط جریان باید کمتر از سرعت بحرانی ذرات رسوبی ($u < u_c$) باشد (۱۸). در کلیه آزمایش ها نسبت سرعت متوسط جریان (u) به سرعت بحرانی (u_c) ۰/۹۳ انتخاب شد. به منظور برداشت نقاط از یک دستگاه متر لیزری استفاده شد که ساخت کشور مجارستان با عنوان تجاری Leica می باشد. دقت این دستگاه در ۷۰ متر برابر ± 2 میلی متر می باشد. زمان تعادل نقش مهمی در نتایج بدست آمده از یک آزمایش آبستنگی ایفا می کند. این زمان با توجه به اینکه بایستی شرایط تعادلی حاصل گردد، طولانی است و زمان انجام آزمایشات طولی مدت است. بسیاری از محققین حداکثر زمان آزمایشات انجام شده را ۲ ساعت در نظر گرفته اند، و بیان کرده اند که میزان افزایش در عمق حفره آبستنگی عمدتاً بعد از ۲ ساعت ناچیز است (۱۹). شپارد و همکاران (۲۰۰۴) آزمایش های خود را زمانی متوقف کردند که عمق آبستنگی بیشتر از ۵ درصد قطر پایه طی یک دوره ۲۴ ساعته نباشد (۲۰). معیار زمان تعادل در این تحقیق حاضر، معیاری است که کومار و همکاران در تحقیقات خود در نظر گرفتند و آن مدت زمانی است که تغییرات عمق آبستنگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی متر نباشد (۲۱). بدین منظور یک آزمایش تعادل در بحرانی ترین شرایط (دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه) و پایه استوانه ای بدون طوق و صفحه محافظ به مدت ۳/۵ ساعت انجام شد. در پایان با رسم اعماق نسبی آبستنگی در مقابل زمان شکل (۳) رسم گردید. با توجه به این شکل مشاهده می شود که در مدت ۱۲۰ دقیقه اول ۹۵٪ آبستنگی رخ می دهد. لذا در کلیه آزمایشات، زمان آزمایش ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از ورود ماسه ها به درون زهکش (که جهت تخلیه آب باقیمانده در فلوم تعبیه شده است) در بخش زیرین ماسه ها فیلتر مخصوص توری قرار داده شد. آب خروجی از زهکش توسط لوله های پلاستیکی مجدداً به مخزن تأمین کننده آب سیستم وصل گردید، جهت ثابت نگه داشتن پایه پل درون بستر رسوبی در حین انجام آزمایش ها از پایه نگهدارنده از جنس PVC و به ضخامت ۱ سانتی متر استفاده شد. سپس مجموعه پایه و صفحه نگهدارنده مربوطه در زیر ماسه ها قرار داده شد و جهت حصول اطمینان از افقی بودن رسوبات کف کانال اقدام به تراز کردن کف یا استفاده از ارابه تسطیح گردید این عمل در دو موقعیت انجام شد یکی در موقعیت عرضی فلوم و دیگری در موقعیت



شکل ۵- مقایسه بین پروفیل طولی تغییرات آبهستگی نسبی اطراف پایه پیل استوانه‌ای نسبت به تغییر طول نسبی صفحات حفاظتی در اعداد فرود؛ (الف) عدد فرود ۰/۲۶ (ب) عدد فرود ۰/۲۳ (ج) عدد فرود ۰/۲۶

همچنین علت هیدرولیکی آن است که اثر گذاری جریان های رو به پایین در جلوی پایه تا شعاع خاصی از پایه می باشد و افزایش بیشتر طول صفحه حفاظتی اثر گذاری کمتری خواهد داشت. شکل (۶) مقایسه بین پروفیل طولی تغییرات آبهستگی نسبی اطراف پایه پیل استوانه‌ای نسبت به تغییر عدد فرود جریان در طول های ثابت صفحات حفاظتی را نشان می دهد. با توجه به اینکه آزمایش شاهد در عدد فرود آستانه (۰/۲۶) انجام شده است، بیشترین عمق نسبی آبهستگی را به خود اختصاص داده است اما در حالتیکه از صفحات حفاظتی استفاده شد، عمق نسبی آبهستگی در عدد فرود آستانه به شدت کاهش داشته که در کلیه حالات شکل ۶ قابل مشاهده است.

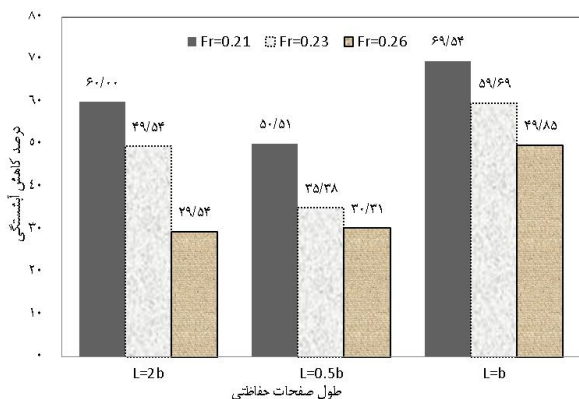


شکل ۴- قرار دادن پایه پیل در رسوبات کف و قرار دادن صفحات محافظ در جلوی پایه

بحث و نتیجه گیری

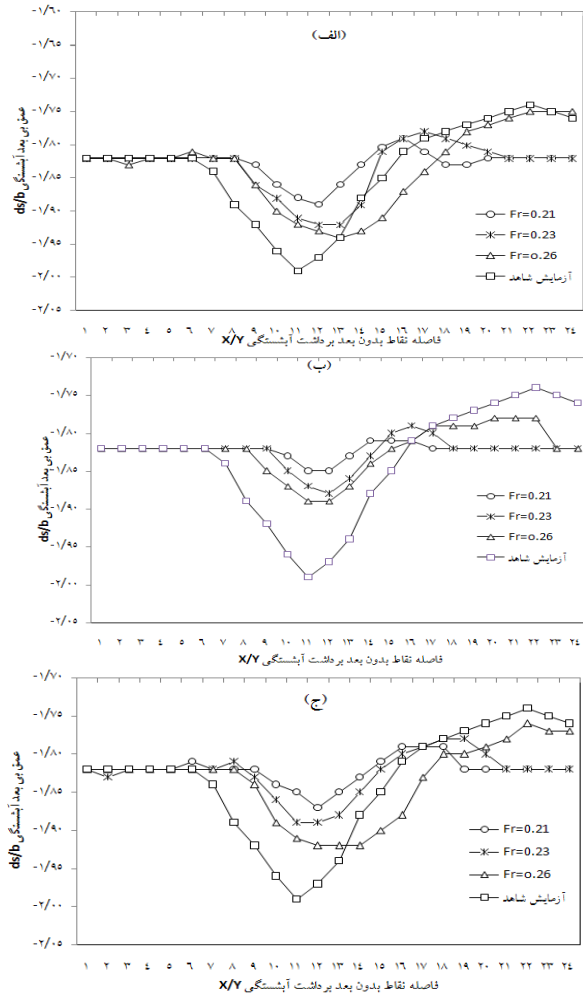
به منظور بررسی تأثیر صفحات حفاظتی بر میزان کاهش آبهستگی پایه پیل نمودارهای بی بعد از نتایج آزمایش ها برای اعداد فرود مختلف (۰/۲۱، ۰/۲۳ و ۰/۲۶) و صفحات حفاظتی با طول های مختلف (۵، ۲/۵ و ۱۰ سانتیمتر) رسم شد. در شکل (۵) تأثیر صفحات حفاظتی بصورت پروفیل طولی آبهستگی در اعداد فرود ثابت رسم شد. همانطور که قابل مشاهده است استفاده از صفحات حفاظتی باعث کاهش آبهستگی موضعی اطراف پایه پیل شده است. این صفحات با حفاظت بستر در برابر جریان های نعل اسبی و روبه پایین، باعث کاهش قدرت حفر چاله آبهستگی در اطراف پایه می شوند و با عملکرد مناسب در برابر گرداب های هجوم آورنده به پایه با توجه به ابعاد صفحات در حد توان مستهلک کرده و مانع از حفر هر چه بیشتر چاله آبهستگی می شوند. همچنین هر چه عمق آبهستگی در جلوی پایه بیشتر باشد (آزمایش شاهد) ارتفاع پشته رسوبی در پشت پایه پیل بیشتر بوده و بالعکس در حالتیکه آبهستگی توسط صفحات حفاظتی به خوبی کنترل شده باشد نتیجتاً ارتفاع پشته رسوبی در پشت پایه پیل کمتر خواهد بود. با افزایش عدد فرود بعلاوه سرعت برخورد جریان با پایه ها و تولید گرداب های شدید تر میزان آبهستگی افزایش پیدا کرده است اما با توجه به نمودار می توان مشاهده کرد که این میزان افزایش آبهستگی در هیچ یک از حالات قرار گیری صفحات محافظ از میزان آزمایش شاهد تجاوز نکرده و این امر خود مؤید آنست که صفحات حفاظتی در کاهش آبهستگی پایه پیل تأثیر گذار بوده است. همچنین نتایج نشان داد که میزان آبهستگی با اختلاف کمی از یکدیگر تغییر داشته است و صفحه حفاظتی با طول $L = b$ نسبت به باقی صفحات حفاظتی باعث کاهش بیشتر عمق آبهستگی شده است که نشان دهنده این است که افزایش طول صفحات حفاظتی تا نسبت خاصی از قطر پایه پیل می تواند بر کاهش عمق نسبی آبهستگی تأثیر داشته باشد و از آن حد بیشتر، باعث کاهش تأثیر بر عمق نسبی آبهستگی خواهد داشت.

پل، با افزایش عدد فرود جریان تاثیر صفحات حفاظتی بر کاهش عمق نسبی آبستگي کمتر شده است بطوریکه برای صفحه حفاظتی با طول ۲ برابر قطر پایه پل ($L=2b$) درصد کاهش عمق آبستگي از ۶۰ درصد برای عدد فرود جریان معادل ۰/۲۶ به ۲۹/۵۴ درصد برای عدد فرود ۰/۲۱ کاهش پیدا کرده و ۵۰٪ از تاثیر گذاری صفحه حفاظتی کم شده است. همچنین بیشترین تاثیر صفحه حفاظتی مربوط به صفحه حفاظتی با طول برابر قطر پایه پل ($L=b$) می باشد که معادل ۶۹/۵۴٪ می باشد. با توجه به شکل ۷ با افزایش طول صفحات حفاظتی عمق نسبی آبستگي به میزان زیادی کم شده ولی این افزایش تا $L=b$ بوده و بعد از آن با افزایش طول صفحه حفاظتی تاثیر معکوسی داشته و درصد کاهش آبستگي حدود ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده. به بیان دیگر افزایش طول صفحات حفاظتی تا $L=b$ تاثیر گذار بر کاهش روند آبستگي دارد و از آن بیشتر، به علت برخورد تعداد بیشتر خطوط جریان رو به پایین و ایجاد گرداب های نعل اسبی بیشتر می تواند باعث افزایش قدرت تخریب رسوبات اطراف پایه پل شود که این موضوع باید در محاسبات و تعیین طول اپتیمم مد نظر قرار گرفته شود. نتایج نشان داد که در تمام آزمایش‌ها در مجاورت صفحات حفاظتی، عمق آبستگي به میزان قابل توجهی (حداکثر ۶۹/۵۴ درصد و حداقل ۲۹/۵۴ درصد) نسبت به حالت شاهد کاهش پیدا کرده و این امر بیانگر آنست استفاده از صفحات حفاظتی می تواند ابزار مناسبی در جهت کاهش عمق آبستگي پایه‌های پل باشد.



شکل ۷- درصد کاهش عمق آبستگي با تغییر عدد فرود و طول صفحات حفاظتی در حالات مختلف

محافظ در جلوی پایه، عمق آبستگي در اطراف پایه کاهش یافت. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان داد، در صورت افزایش عدد فرود جریان و ثابت بودن طول صفحات حفاظتی، تاثیر صفحات حفاظتی بر کاهش عمق نسبی آبستگي کمتر شده است و برای صفحه حفاظتی با طول ۲ برابر قطر پایه پل درصد کاهش عمق آبستگي از ۶۰ درصد برای عدد فرود جریان معادل ۰/۲۶ به ۲۹/۵۴ درصد برای عدد فرود ۰/۲۱ کاهش پیدا کرده و ۵۰٪ از تاثیر گذاری صفحه حفاظتی کم شده است. همچنین بیشترین تاثیر صفحه حفاظتی مربوط به صفحه حفاظتی با طول برابر قطر پایه پل می باشد که معادل ۶۹/۵۴٪ می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش طول صفحات حفاظتی



شکل ۶- مقایسه بین پروفیل طولی تغییرات آبستگي نسبی اطراف پایه پل استوانه‌ای نسبت به تغییر عدد فرود جریان در طول ثابت نسبی صفحات حفاظتی؛ الف) $L/b=2$ (ج)، $L/b=1$ (ب)، $L/b=0.5$

با توجه به شکل ۶ با افزایش عدد فرود جریان، عمق نسبی آبستگي افزایش داشته که نرخ این افزایش در صورتیکه از صفحات حفاظتی استفاده شود کاهش داشته است. در ادامه به منظور بررسی دقیق تر تاثیر صفحات حفاظتی بر کاهش عمق آبستگي نسبت به آزمایش شاهد نمودار ستونی برای کلیه آزمایش‌ها رسم شد (شکل ۷). با توجه به شکل (۷) در حالت ثابت بودن طول صفحات حفاظتی در جلوی پایه

نتیجه‌گیری نهایی

یکی از روش‌های غیرمستقیم کاهش آبستگي اطراف پایه‌های پل نصب صفحات حفاظتی در جلوی پایه می باشد. در این تحقیق با مدل سازی آزمایشگاهی به بررسی تاثیر طول صفحات حفاظتی بر میزان کاهش عمق آبستگي پایه‌های استوانه‌ای با انجام آزمایش‌هایی پرداخته شد. در کلیه آزمایش‌ها زمان تعادل ۱۲۰ دقیقه لحاظ شد. در کلیه آزمایش‌ها با نصب صفحات حفاظتی با طول‌های متفاوت تاثیر این سازه بر کنترل آبستگي اطراف پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه نهایی این بود که در کلیه آزمایش‌ها با قرار گیری صفحات

انتقال آب به مزرعه و کاهش هدررفت آب در مسیر چاه تا مزرعه، اطمینان کشاورزان به دستیابی به حقاچه بیشتر شود.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

- Nohani, E., & Moalaimazrae, A. 2018. Organization and Stabilization of River Coastal Using a Mathematical Model (Case Study: Zohreh River). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(17), 83-98.
- Shafa'i-Bajastan, M.H. 2017. Theoretical and practical hydraulic principles of sediment transport, Shahid Chamran University Publications, Ahvaz, Iran. P. 125. [In Persian].
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen, H. W. 1977. Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*. 153(2): 211-252.
- Raudkivi, A. J. 1998. Loose boundary hydraulics. IAHR, A. A, Balkema, Rotterdam, The Netherlands pp: 1-538.
- Annandale GW, 2006. Scour echnology. McGraw Hill Publications, USA. pp: 1-230.11).
- Melville BW and Coleman SE, 2000. Bridge scour. Water Resources Publications, Colorado, USA.
- Gupta UP, Ojha CSP and Shirma N, 2010. Enhancing utility of submerged vanes with collar. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 136(9):651-655.
- Emamgholizadeh, S., and Nohani, E. 2017. Application of the Submerged Vanes on Reduction of Local Scour around the Bridge Abutment with Rounded Nose. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 2017; 18(68): 113-128.
- Nohani, A., Heydaranjad, M., and Shafa'i-Bojestan, M. 2013. Laboratory study of the effect of the foundation gap on the amount of erosion around the base of the cylindrical bridge at the position of 60 degrees of the river arch. National conference on optimal use of water resources, Dezful - Islamic Azad University, Dezful branch. [In Persian].
- Nohani E, Shafai Bejestan M, Masjedi A R. Determination of Stable Riprap Diameter Around Cylindrical Bridge Pier in the River Bends. *JWSS*. 2014; 18 (68) :33-42
- Hojjatkhah, A., and Soleimani-Babarsad, M. 2015. Laboratory investigation of the effect of protective structure on reducing scour depth around the bridge foundation. Second Regional Conference on Civil Engineering, Qaimshahr, Islamic Azad University, Qaimshahr Branch, Qaimshahr, Iran. [In Persian].
- Samimibehbehan, T., Barani, G., Rahimkhani, M., and Khanjani, M. 2016. Laboratory investigation of the effect of submerged plates on scouring of bridge foundations. Pages 25 to 31. Proceedings of the National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks, April 12-14, Shahid Chamran Ahvaz University, Ahvaz, Iran. [In Persian].
- Ghorbani, B and Karimi, A, 2007. A comparison of single and double submerged vanes effect on the scour

تا $L=b$ روند کاهش عمق آبستگتی زیاد بوده ولی با افزایش بیشتر طول نسبی صفحات حفاظتی، به علت برخورد تعداد بیشتر خطوط جریان رو به پایین و ایجاد گرداب‌های نعل اسبی بیشتر می‌تواند باعث افزایش قدرت تخریب رسوبات اطراف پایه پل شود و اثر این سازه را کاهش داده است. همچنین در تمام آزمایش‌ها در مجاورت صفحات حفاظتی، عمق آبستگتی به میزان قابل توجهی (حداکثر ۶۹/۵۴ درصد و حداقل ۲۹/۵۴ درصد) نسبت به حالت آزمایش شاهد کاهش پیدا کرده و با توجه به مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از صفحات حفاظتی با تاثیر بر روی خطوط جریان رو به پایین و گرداب‌های نعل اسبی به‌عنوان سازه‌ی مناسبی در جهت کاهش عمق آبستگتی اطراف پایه‌های پل موثر است.

نتایج نشان داد با افزایش فاصله مزرعه تا چاه آب، ادراک کشاورزان از تضاد آب بیشتر شده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود با بهینه‌سازی روش

- occurring at a cylindrical pier. Pp. 260-276. Proceeding of 6th Conference of Hydraulic, Sept. 4-6, Shahre Kord, Iran.
14. Nohani, E., & ebrahimi, S. 2019. Experimental Investigation of the Collar and Vanes on Reduction the Scour Depth of Cylindrical Piers. Iranian Journal of Soil and Water Research, 50(2), 411-424.
 15. Shojaee, P., Farsadizadeh, D., Hoseinzadeh Dalir, A., Salmasi, F., Ghorbani, M. (2012). Application of Submerged Vanes at Cylindrical Bridge Pier as a Scour Countermeasure. *Water and Soil Science*, 22(1), 91-109.
 16. Chiew, Y., M, and Melville, B., W. 1987. Local Scour around Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Research Taylor & Francis*, 25 (1): 15-26.
 17. Raudkivi, A. J., and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3): 338-350.
 18. Oliveto, G., and Hager, W. H. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9): 811-820.
 19. Bozkus, Z., and Yildiz, O. 2004. Effects of inclination of bridge piers on scouring depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(8): 827-832.
 20. Sheppard, D. M., Odeh, M., and Glasser, T. 2004. Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10): 957-96.
 21. Kumar, V., Raju, K. G. R., and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12):1302-1305.

