بررسی آزمایشگاهی تاثیر رقوم کارگزاری المان‌های شش پایه برعمق آبشستگی پایه مستطیلی

مریم هوشمند[1*] و محمود شفاعی بجستان [2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت :۹۴/۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۵

چکیده

آبشستگی اطراف پایه‌ها و تکیه گاه پل یکی از مهمترین علت تخریب پل‌ها است. روش‌های پوششی نظیر سنگ چینی از جمله روش‌هایی است که برای ایمن سازی پل‌های موجود استفاده می شود. در مناطقی که سنگ دور از دسترس باشد می‌توان از المان‌های شش پایه که موضوع این تحقیق است استفاده کرد. در این مطالعه تأثیر قرار دادن یک ردیف المان‌های شش‌پایه با تراکم ۱۰۰درصد در سه حالت روی بستر، نیمه بستر و زیر بستر، تحت پنج عدد فرود مختلف جریان ۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۱۹، ۰/۱۷ و ۰/۱۶ در اطراف پایه پل مربعی در فلومی آزمایشگاهی پوشیده شده با دانه‌های رسوبی ۰/۷ میلی‌متری در آزمایشگاه هیدرولیک بررسی شد. نتایج به دست آمده با آزمایش شاهد مقایسه گردید و مشخص شد، که المان‌های فوق توانسته‌اند در شرایط قرارگیری نیمه در بستر تا ۵۷ درصد میزان حداکثر عمق آبشستگی را کاهش دهند. توصیه کلی این است که این المان‌ها با فیلتر ژئوسنتتیک استفاده شوند یا در ردیف‌های بیشتری قرارگیرند.

کلید واژه‌ها: آبشستگی، آب زلال، المان‌های شش‌پایه، پایه پل.

Experimental Investigation of the Effect of Depth of Placement of Six-Legs Elements on Scour at Rectangular Bridge Pier

M. Hooshmand [1*]and M.Shafai Bejestan[2]

1*- M. Sc. Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received :9 July 2015 Accepted:27 September 2015

Abstract

Pieve scour is one of the most important cause of bridge failure. Covering methods such as using riprap is among techniques which are widely applied for the existing bridges. For those places where the stones of adequate size are not available, use of six-legged elements which is the subject of this, study is a good choice. In this study the effect of placement of a single row six- legged around a rectangular bridge with 100% density in three different cases of above, mid and below the bed under five different Froude numbers of 0.24, 0.22, 0.19, 0.17 and 0.16 have been experimentally investigated. Comparison of the bed topography with mean measure of bed deposit of 0.7 mm of tests with six- legged and tests without elements showed that generally the elements can reduce the scour depth significantly. The elements placed on the mid of bed have shown better performance

with maximum reduction of about 57%. The general recommendation is to use these elements with geo-syntactic filter or placed in more rows.

Keywords: Scour, Clear water, Six-legs elements, Bridge pier.

مقدمه

در طراحی دیوارهای حفاظتی، آبگیرها، پایه پل‌ها، حوضچه‌های آرامش و پایین‌دست سرریزهای آبشاری پیش‌بینی میزان عمق آبشستگی ضروری است. وجود پایه پل‌ها باعث کاهش عرض عبوری جریان، برخورد جریان با پایه و انحراف خطوط جریان از اطراف پایه به کف بستر می‌شود. این انحراف خطوط جریان باعث گود شدن اطراف پایه می‌شود، و خطرات جدی را به دنبال دارد. اگر پایه‌ای به صورت عمودی در بستر رودخانه قرار گرفته باشد، جریان آب در اطراف آن متلاطم شده، و یک سلسله جریان‌های گردابی پیرامون آن ایجاد می‌کند. این سیستم گردابی عامل اصلی آبشستگی است که در دراز مدت باعث ایجاد حفره در محل پایه پل می‌شود و ممکن است موجب ریزش پل گردد. عامل اولیه آبشستگی موضعی پایه پل جریان‌های رو به پایینی هستند که مثل یک جت عمودی آب عمل می‌کنند و مواد کناری پایه را بلند کرده و جریان معمولی آب آن را می‌شوید. سیستم گرداب نعل‌اسبی از نتایج آبشستگی موضعی است. این سیستم در ابتدا کوچک و قدرت آن کم است ولی بعد از تشکیل حفره اندازه و قدرت آن هم زیاد می شود. با افزایش عمق حفره آبشستگی مقدار جریان رو به پایین در نزدیکی کف حفره کاهش یافته و زمانی که قدرت نیروهای محرک تقریباً برابر با قدرت نیروهای مقاوم گردید آبشستگی متوقف می شود (شفاعی بجستان،۱۳۸۷). شکل (۱) الگوی جریان و حفره آبشستگی را نشان می دهد.

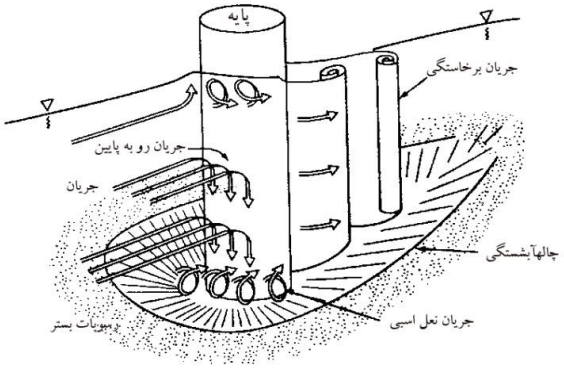
انواع روش‌های کنترل آبشستگی در دو فاز، مقابله با فرسایش و کاهش تأثیر نیروهای فرساینده انجام می‌شود.

در روش اول با تقویت مصالح اطراف بستر مانند انواع سنگچین‌ها یا سنگ ریزه‌های حفاظتی، مقاومت بستر در برابر تنش‌های وارده افزایش داده می‌شود، و در روش دیگر با استفاده از شمع‌های حفاظتی (پایه‌های قربانی شونده)، صفحات مستغرق، آستانه و ایجاد شکاف با تغییر الگوی جریان در اطراف پایه در جهت کاهش اثر عوامل فرسایش دهنده مانند جریان‌های ثانویه و گرداب‌های نعل‌اسبی تلاش می‌شود (چیو[1]، ۱۹۹۲). استفاده از طوق برای کاهش آبشستگی در هر دو روش مستقیم و غیر مستقیم قرار می گیرد. شجاعی و همکاران(۱۳۹۰) بیشترین میزان کاهش در عمق حفره آبشستگی با ترکیب طوق و چهار عدد صفحه در پایه استوانه ای را ۶۱ درصد ذکر نمودند .صمیمی بهبهان و همکاران(۱۳۸۵) اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در حالتی که صفحات کاملاً به پایه های پل چسبیده اند بهترین شرایط تثبیت به وجود می آید. آزم و قمشی(۱۳۹۲) نشان داد که با افزایش قطر شمع‌ها، آبشستگی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. کاهش عمق آبشستگی با افزایش قطر شمع تا فاصله بهینه وجود داشت و با افزایش فاصله این روند عکس شده و شمع ها با قطر کمتر تأثیر بیشتری بر کاهش عمق آبشستگی داشتند. زراتی و همکاران[2] (۲۰۰۴) بیان کردند، که زمانی که طوق زیر بستر قرار می گیرد، گسترش حفره آبشستگی اطراف پایه و عمق آبشستگی پایین دست طوق افزایش می یابد. مونکادا و همکاران[3](۲۰۰۹) با استفاده از طوق به ابعاد سه برابر قطر پایه عمق آبشستگی را ۱۰۰درصد کاهش دادند. آنگر و هگر[4] (۲۰۰۶) با مطالعه سه رقوم قرارگیری سنگچین (هم تراز،بالاتر و پایین تر از بستر)، در اطراف پایه‌های استوانه‌ای پل در مسیر مستقیم، پایدارترین رقوم قرارگیری سنگچین را رقوم هم تراز با بستر معرفی کردند.

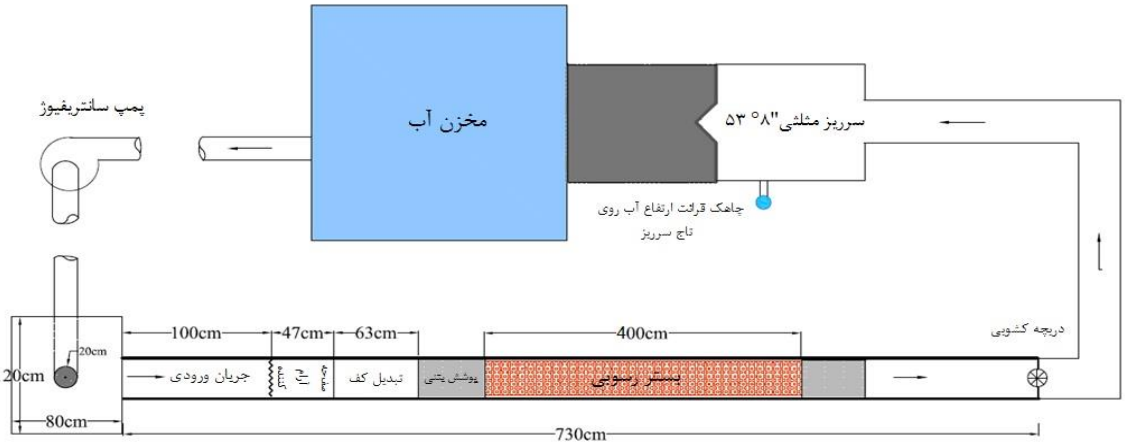
مطالعه‌های انجام شده توسط گریمالدی و همکاران[5] (۲۰۰۹) نشان داد که هرچه شکاف در بستر خاک فرو رود کاهش عمق آبشستگی بیشتر می‌شود. البته شکاف ممکن است به وسیله رسوبات رودخانه پر شود و از عملکرد آن کم شود. دی و همکاران[6] (۲۰۰۶) استفاده از کابل را به عنوان یک اقدام پیشگیرانه و آسان معرفی کردند. در این روش کابل به صورت مارپیچی روی پایه قرار گرفته و با انحراف گرداب نعل اسبی منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شود. با افزایش قطر، تعداد و کاهش زاویه کابل عمق آبشستگی کاهش می یابد. حداکثر کاهش عمق آبشستگی ۴۶ درصد گزارش شد. نتایج تحقیقات عقلی و زمردیان (۱۳۹۲) نشان داد با افزایش قطر کابل و کمتر شدن فاصله میان گام ها، آبشستگی بیشتر کاهش می یابد و حداکثر مقدار کاهش آبشستگی به ۵۹ درصد می رسد. از آنجا که تا به حال طبق آنچه عنوان شد، تحقیق مدونی در رابطه با میزان تأثیرپذیری رقوم کارگذاری المان‌های شش پایه در کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل در منابع منتشر نشده است. از این رو در این تحقیق اثر جایگاه المان‌های شش‌پایه پیرامون پایه پل مربعی در سه حالت روی، نیمه و زیر بستر در کاهش عمق آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت.

1 - Chiew

2 - Zarrati *et al.*
3 - Moncada *et al.*
4- Unger and Hager
5- Grimaldi *et al.*
6 - Dey *et al.*



شکل ۱- الگوی جریان و حفره آبشستگی موضعی اطراف یک پایه پل استوانه‌ای شکل (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷)



شکل ۲- پلان کانال و تجهیزات آزمایشگاهی

مواد و روش ها

در این تحقیق از فلوم آزمایشگاهی به طول ۷/۳ متر، عرض ۰/۵۶ متر و عمق ۰/۶ متر با شیب طولی ۰/۰۰۲۸ متر بر متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شده است. دیواره‌ها و کف فلوم از جنس پلکسی گلاس شفاف بود. بازه‌ای از فلوم به طول تقریبی ۴ متر و به ضخامت ۰/۱ متر با رسوبات ماسه با دانه‌بندی یکنواخت و قطر متوسط ۰/۷ میلی‌متر پوشیده شد. جریان مورد نیاز با استفاده از یک پمپ سانتریفیوژ از مخرن تامین آب وارد مخزن آرام کننده در ابتدای فلوم می‌گردید. به منظور حذف تلاطم ورودی از یک صفحه مشبک آرام کننده، در فاصله یک متری از دهانه فلوم استفاده شده است. جریان پس از خروج از فلوم، وارد حوضچه می‌گردید و با عبور از روی یک سرریز مثلثی استاندارد ۵۳ درجه، مجدداً وارد مخزن تامین آب می‌شد. اندازه‌گیری دبی جریان با قرائت ارتفاع آب روی سرریز و با استفاده از رابطه دبی- اشل سرریز صورت می‌گرفت. در تمامی آزمایش‌ها فاصله پایه از ابتدای بستر رسوب ۱/۷ متر بود. پایه مورد آزمایش از جنس پلکسی گلاس و به صورت مربعی با عرض ۷ سانتی متر و به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر برای جلوگیری از مستغرق شدن پایه در حین آزمایش، و به صورت مدرج تهیه شده بود. شکل(۲) نمایی از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن را نشان می‌دهد.

المان‌های شش‌پایه به طول ۵ سانتی‌متر و جرم خشک ۱۹/۵ گرم و حجم ۹/۴ میلی‌لیتر و جرم مخصوص ۲/۰۷ گرم بر میلی‌لیتر با تراکم ۱۰۰ درصد پیرامون پایه پل چیده می‌شدند. از المان‌های شش پایه برای موج شکن ها هم استفاده می شود که برای داشتن نفوذ پذیری بیشتر و عملکرد بهتر اتلاف انرژی موج با تراکم کمتر و با فاصله کمی از هم نصب می شوند ولی در این مطالعه برای جلوگیری از فرار ذرات رسوبی بستر با حداقل نفوذپذیری و کاملا به‌هم چسبیده نصب شدند که اصطلاحا تراکم ۱۰۰ درصد گفته می شود. شکل (۳) نمایی از المان‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



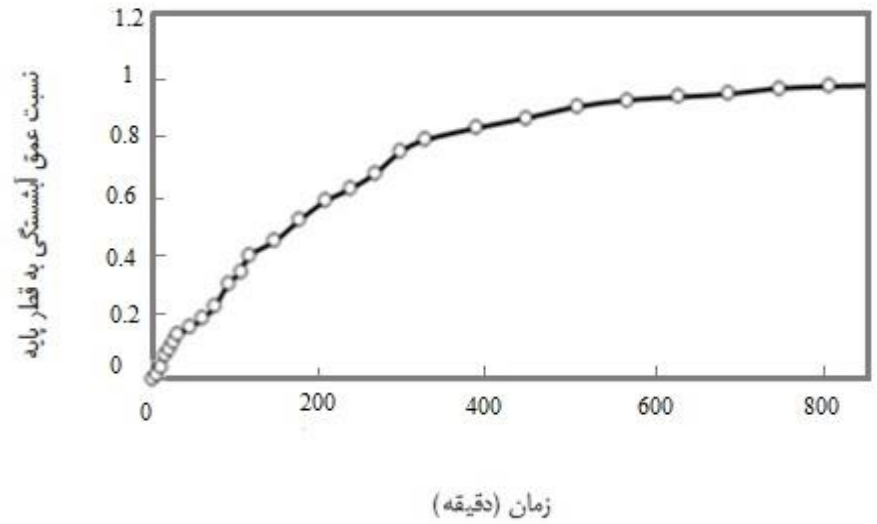
شکل ۳- نمایی از المان‌های شش‌پایه مورد بررسی در آزمایشگاه

در آزمایش‌ها برای رسیدن به عمق حداکثر آبشستگی باید پارامترهای مؤثر با در نظر گرفتن موارد زیر انتخاب شوند.
برای انتخاب حداکثر قطر پایه، معیارهای مختلفی مانند ۱- (رودکیوی و اتما[1]، ۱۹۸۳) $D_{Bed}/W \le 0.16$، ۲- (شپارد و همکاران[2]، ۲۰۰۴)و ۳- (میلر[3]، ۲۰۰۳) $D_{Bed}/W \le 0.15$ در نظر گرفته شده‌اند. W : عرض کانال و D_{Bed} : قطر پایه در محل بستر می‌باشد. بنابراین پایه از جنس پلکسی گلاس و به صورت مربعی با عرض ۷ سانتی‌متر و به ارتفاع ۵۰ سانتی متر و به صورت مدرج تهیه شد.
رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) بیان نمودند برای جلوگیری از ایجاد پدیده ریپل در سطح بستر کانال رسوبی، میانگین اندازه ذرات d_{50} باید از ۰/۶ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. طبق آزمایش‌های رودکیوی[4] (۱۹۹۸) به منظور حذف تاثیر اندازه ذرات بر عمق آبشستگی موضعی، نسبت قطر پایه به میانگین اندازه ذرات(D_{Bed}/d_{50}) باید بیشتر از ۵۰ باشد. به این ترتیب اندازه میانگین ذرات رسوب استفاده شده باید در شرط $0.6 \prec d_{50} \prec 0.8$ صادق باشند.
همچنین برای حذف اثر غیریکنواختی رسوبات بر کاهش میزان آبشستگی موضعی مطابق پیشنهاد چیو و ملویل[5] (۱۹۸۷) میزان انحراف معیار هندسی ذرات ($\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{\frac{1}{2}}$) باید از ۱/۳ کم‌تر باشد. با توجه به شرایط ذکرشده، برای تأمین رسوبات بستر از ماسه‌ی باقی‌مانده بین الک‌های ۲۰ و ۳۰ در محدوده ذرات ۰/۸۳ تا ۰/۵۹ میلی‌متر با انحراف معیار هندسی ۱/۲۲ استفاده شد، و قطر ذرات رسوبی ۰/۷ میلی‌متر انتخاب گردید.
طبق نظر اتما[6] (۱۹۸۰)، در جریان‌های کم عمق،گرداب‌های موج کمانی ایجاد شده در سطح آب، به علت گردش در خلاف جهت جریان با جریان تداخل یافته و موجب کاهش در جریان رو به پایین و کاهش عمق آبشستگی می‌شود. بنابراین عمق جریان باید به گونه‌ای انتخاب شود که تاثیر آن بر عمق آبشستگی از بین برود. پس حداقل عمق انتخاب شده برای از بین بردن این اثر باید ۱/۵ برابر قطر پایه باشد، که در این تحقیق عمق جریان ۱۶ سانتی‌متر انتخاب شد.
آبشستگی موضعی به دو حالت آبشستگی با بستر متحرک و آبشستگی آب زلال تقسیم می‌شود. آبشستگی در شرایط آب زلال در شرایطی اتفاق می‌افتد که مواد بستر در بالادست محدوده آبشستگی در جای خود ثابت باشند، و به آستانه حرکت نرسیده باشند. در آبشستگی آب زلال سرعت متوسط جریان در محدوده $0.3V_c \prec V \prec V_c$ (V_c سرعت بحرانی در آستانه حرکت)، می باشد (ملویل و چیو،۱۹۹۹). آبشستگی در این آزمایش از نوع آب زلال بود، زیرا تنها در این حالت حداکثر عمق آبشستگی مشاهده می‌شد. با توجه به پروفیل سرعت آزمایشگاهی، سرعت برشی $V_c = 0.32$ متر بر ثانیه و میانگین سرعت $V_c = 0.3$ متر بر ثانیه و $V/V_c = 0.94$ به‌دست می‌آید. جدول (۱) مشخصات هیدرولیکی جریان را نشان می دهد.

1 - Rudkivi and Ettema
2 - Sheppard *et al.*
3 - Miller
4 - Rudkivi
5 - Chiew and Mellville
6 - Ettema

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌ها

عدد فرود	دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه)	عمق جریان(متر)	سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)	جریان متوسط سرعت / بحرانی سرعت
۰/۲۴	۲۷	۰/۱۶	۰/۳	۰/۹۴
۰/۲۲	۲۵	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۸۷
۰/۱۹	۲۲	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۷۵
۰/۱۷	۲۰	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۶۹
۰/۱۶	۱۸	۰/۱۶	۰/۲	۰/۶۲

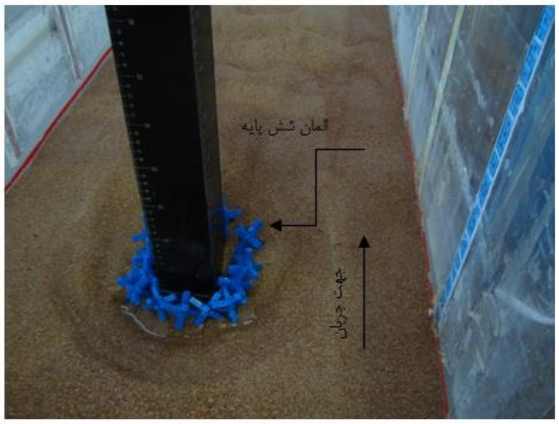


شکل ٤- منحنی توسعه زمانی حفره آبشستگی

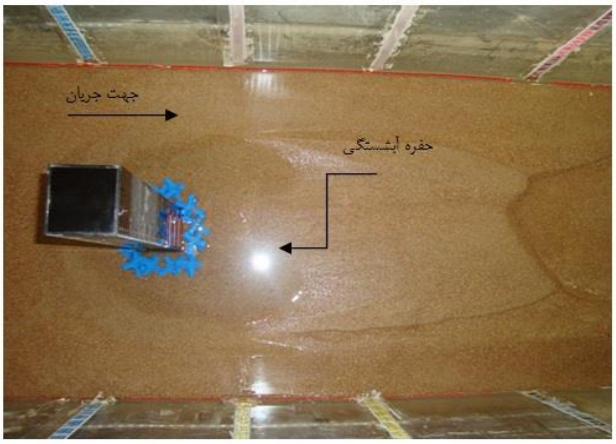
عمق آبشستگی در محل پایه پل وابسته به زمان بوده و درطول زمان افزایش می‌یابد. توانایی تخمین عمق آبشستگی در طی زمان و به خصوص زمان رسیدن حفره آبشستگی به حالت تعادلی برای طراحی پل حائز اهمیت است. در حالت بستر زنده، رسوبات بالادست پایه به درون حفره آبشستگی ریزش می‌کنند، و از میزان عمق حفره آبشستگی کاسته می‌شود؛ اما در شرایط آب زلال به علت عدم حمل رسوب از بالادست، رسوبات کنده شده از حفره آبشستگی جایگزین نشده، و افزایش عمق حفره آبشستگی تا رسیدن به تعادل همچنان ادامه دارد. به منظور بررسی زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش ۱۴ ساعته برای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه انجام گرفت و عمق آبشستگی جلوی پایه به وسیله عمق سنج و در فواصل زمانی معین اندازه گیری شد. پس از انجام آزمایش ۱۴ ساعته، مشخص شد ۸۰ درصد آبشستگی در ۵ ساعت اول آزمایش اتفاق افتاده است .شکل ۴ منحنی توسعه زمانی حفره آبشستگی را نشان می‌دهد.

قبل از شروع هر آزمایش سطح بستر رسوبی با اندازه گیری توسط مترلیزری و به وسیله ماله بنایی تسطیح می‌شد. سپس دریچه انتهایی را به طور کامل بسته، آب را با دبی کم وارد کانال می‌شد، تا سطح ناحیه رسوبی به ارتفاع چند سانتی‌متر از آب پوشیده شود، و از حرکت رسوبات پیش از تنظیم دبی جلوگیری شود. سپس با باز کردن تدریجی دریچه انتهایی و شیر ورودی، دبی به میزان مورد نظر می‌رسید. آزمایش‌ها با پنج دبی جریان۲۷، ۲۵، ۲۰،۲۲ و ۱۸ لیتر بر ثانیه به ترتیب معادل با پنج عدد فرود جریان بالادست پایه ۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۱۹، ۰/۱۷ و ۰/۱۶ در بازه زمانی ۳۰۰ دقیقه به عنوان زمان آزمایش ، انجام گرفتند. پس از اتمام زمان آزمایش و زهکشی کامل کانال، پروفیل بستر رسوبی به صورت یک شبکه ۳×۳ سانتی‌متری توسط مترلیزری برداشت می‌شد. شکل(۵) نمایی از آبشستگی اطراف پایه در دبی ۲۷ در سه حالت قرارگیری المان‌های شش‌پایه پیرامون پایه پل را نشان می‌دهد.

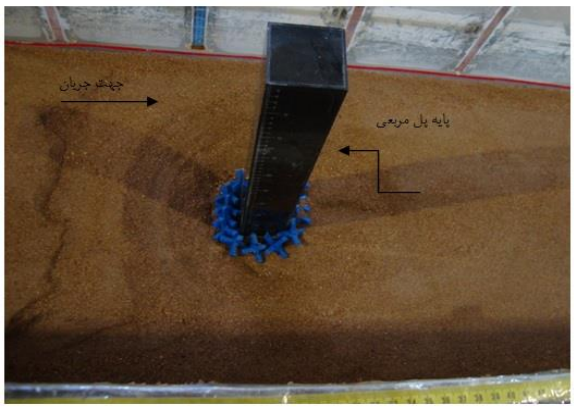
منظور از قرار گیری المان ها در سه حالت روی بستر، نیمه بستر و زیر بستر، به ترتیب قرار دادن المان های شش پایه روی سطح بستر،قرار گرفتن المان ها تا نصف ارتفاع المان درون بستر و قرار گیری المان ها به صورت کامل در زیر بستر رسوبی است.



الف)



ب)



ج)

شکل ۵- توسعه حفره آبشستگی پیرامون پایه پل با کارگذاری المان‌های شش‌پایه در آزمایشگاه در عدد فرود ۰/۲٤ الف) روی بستر، ب) نیمه بستر و ج) زیر بستر

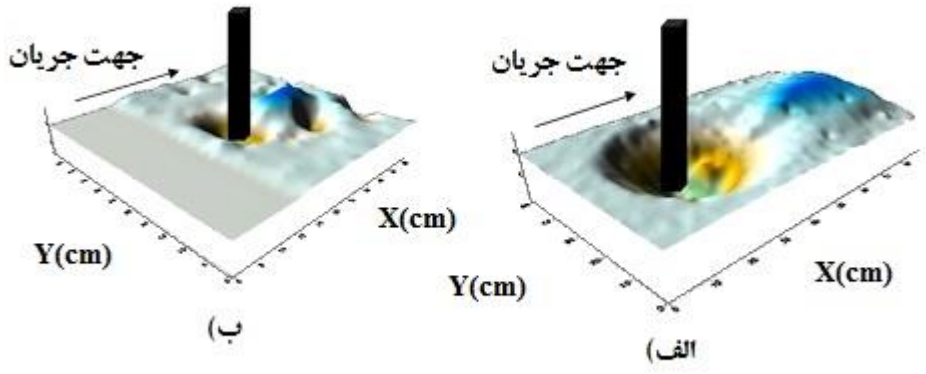
جدول ۲- حداکثر عمق حفره آبشستگی در آزمایش‌های شاهد

عدد فرود	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۲۴
حداکثر عمق حفره آبشستگی (سانتی متر)	-۳	-۴/۲	-۵/۴	-۸/۵	-۹/۹

نتایج و بحث

الف) آزمایش‌های شاهد (آزمایش‌های بدون حضور المان‌های شش‌پایه)

هدف از انجام این آزمایش‌ها مشاهده سیستم گردابی و نحوه حرکت ذرات و اندازه‌گیری عمق آبشستگی برای مقایسه با حالت‌های بعدی است. با انجام آزمایش‌های بدون حضور المان‌های شش‌پایه در پیرامون پایه مشاهده شد، که آبشستگی توسط جریان‌های رو به پایین شروع شده و پس از آن که عمق حفره بیشتر شد، گرداب‌های نعل‌اسبی شروع به کار می‌کنند، و باعث کنده شدن بیشتر ذرات می‌شوند، و عمق حفره بیشتر می‌شود. با گذشت پنج ساعت از شروع آزمایش نرخ آبشستگی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و تغییرات عمق آبشستگی ناچیز شد. در تمامی اعداد فرود جریان بالادست پایه بیشترین عمق آبشستگی در جلوی پایه اتفاق افتاد، و در دو سمت به صورت متقارن رو به پایین دست پایه از عمق آن کاسته شده، و در پشت پایه مواد شسته شده از جلوی پایه انباشته شدند. هرچه سرعت نسبی جریان بیشتر باشد؛ عمق حفره آبشستگی نیز بیشتر بوده، و مواد شسته شده در فاصله دورتری نسبت به پایه انباشته می شد. جدول (۲) حداکثر عمق حفره آبشستگی را نشان می‌دهد. شکل (۶) توسعه حفره آبشستگی پیرامون پایه را در اعداد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ نشان می‌دهد.



شکل ٦- توسعه حفره آبشستگی در آزمایش‌های شاهد الف) عدد فرود ۰/۲٤، ب) عدد فرود ۰/۱٦

جدول ۳- حداکثر عمق آبشستگی پیرامون پایه با حضور المان‌های شش‌پایه

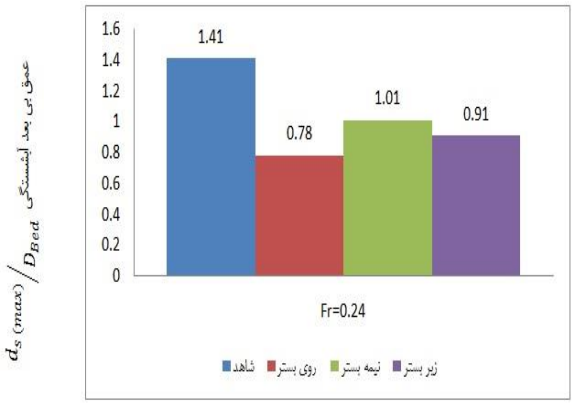
زیر بستر	نیمه بستر	روی بستر	عدد فرود
-۶/۴	-۷/۱	-۵/۵	۰/۲۴
-۵/۹	-۶/۲	-۴/۹	۰/۲۲
-۴	-۴/۲	-۳/۶	۰/۱۹
-۲/۷	-۲/۵	-۳/۲	۰/۱۷
-۲/۳	-۱/۳	-۲/۸	۰/۱۶

ب) آزمایش با حضور المان‌های شش‌پایه پیرامون پایه پل

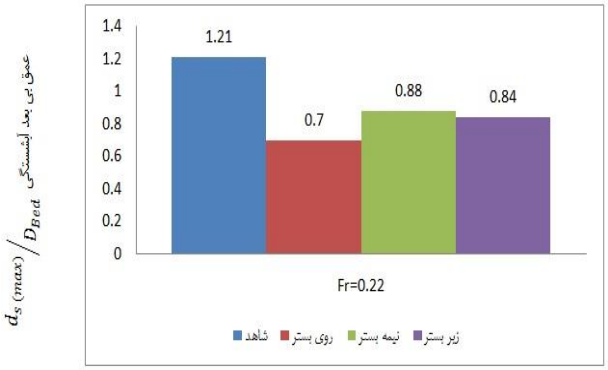
در این مرحله المان‌های شش‌پایه با تراکم ۱۰۰درصد در اطراف پایه و در سه عمق پیرامون پایه پل قرار داده شدند. وجود این المان‌ها با تراکم ۱۰۰درصد باعث مقاوم شدن ذرات بستر در مقابل نیروهای پایین‌رونده و فشاری جلوی پایه و نیروهای برخاستگی و کششی پشت پایه می‌شد.گردابه‌های نعل‌اسبی در این حالت قدرت کمتری داشته، و آبشستگی از لبه بیرونی المان‌ها شروع می‌شد و با نفوذ به زیر المان‌ها با یک تاخیر زمانی نسبت به آزمایش شاهد حفره آبشستگی تشکیل می‌گردید. سیستم گردابی پشت پایه متشکل از گرداب‌هایی است، که در دو طرف محور طولی پایه برخلاف جهت هم می‌چرخند. این جریان‌های گردابه‌ای پشت پایه از همان ابتدای آزمایش بیشترین تاثیر را گسترش حفره آبشستگی داشتند.

جدول (۳) حداکثر عمق آبشستگی پیرامون پایه با حضور المان‌های شش‌پایه را نشان می دهد.

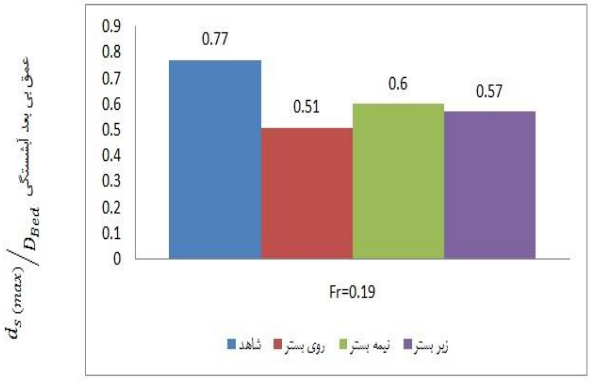
شکل(۷) مقایسه بین عمق‌های بی بعد آبشستگی (نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه) در آزمایش‌های شاهد و المان‌های شش‌پایه را در اعداد فرود متفاوت نشان می‌دهد.



الف)عدد فرود ۰/۲۴



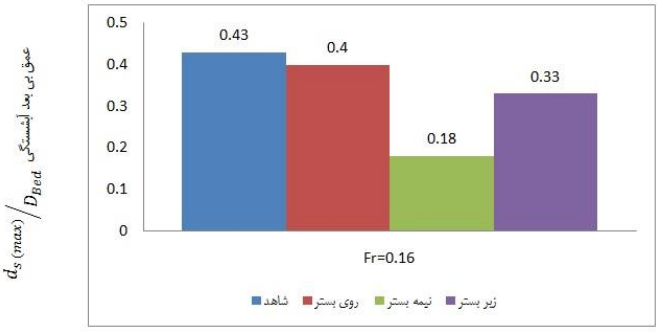
ب)عدد فرود ۰/۲۲



ج)عدد فرود۰/۱۹



د) عدد فرود ۰/۱۷



ه)عدد فرود ۰/۱۶

شکل ۷- مقایسه عمق‌های آبشستگی با و بدون حضور المان‌های شش‌پایه

مقایسه نتایج جدول (۳) با نتایج آزمایش‌های شاهد نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبشستگی بین ۷درصد تا ۵۷درصد کاهش می یابد. درصد کاهش عمق آبشستگی از رابطه (۱) به دست آمد:

$$R\% = \frac{d_1 - d_{s\,(max)}}{d_1} \times 100 \qquad (1)$$

در این رابطه d_1 : حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش شاهد و $d_{s\,(max)}$: حداکثر عمق آبشستگی در حضور المان‌های شش‌پایه است. جدول ۴ این درصد کاهش عمق آبشستگی را نشان می‌دهد.

به طور کلی درهر حالت با افزایش عدد فرود جریان، حفره آبشستگی توسعه طولی و عرضی بیشتری داشت. در حالت قرار گیری المان‌های شش‌پایه روی بستر در عدد فرود ۰/۲۴ کاهش ۴۴درصد آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد مشاهده شد. در همین عدد فرود، کاهش ۲۸ درصد و ۳۵ درصدآبشستگی نسبت به آزمایش شاهد در حالت نیمه و زیر بستر حاصل شد.

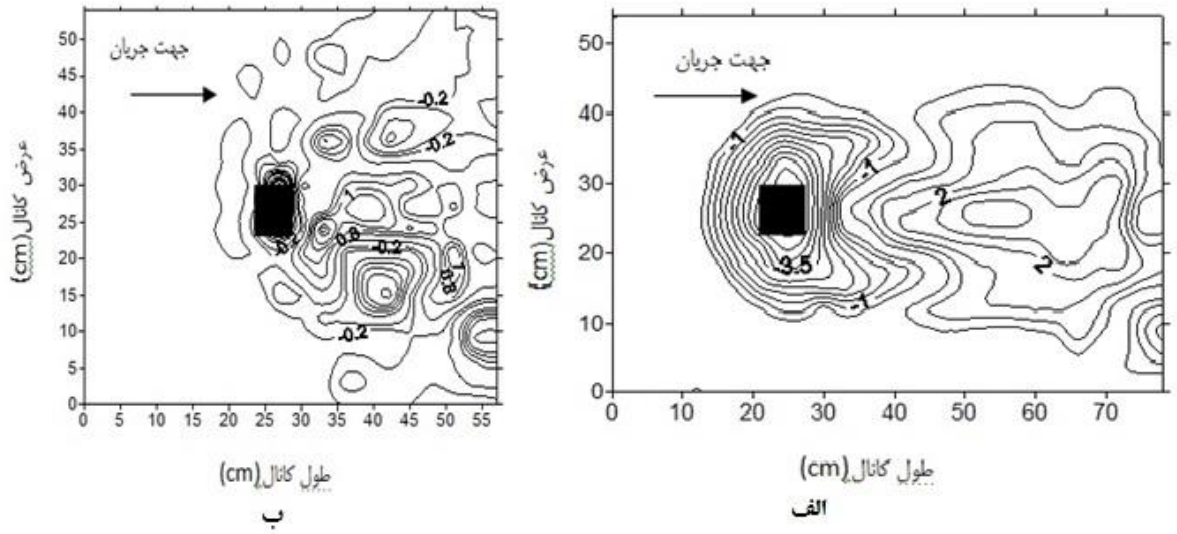
در عدد فرود ۰/۲۲ حالت روی بستر توانست ۴۲درصد آبشستگی را کاهش دهد. در همین عدد فرود حالت‌های نیمه و زیر بستر ۲۷درصد و ۳۱ درصد آبشستگی را کاهش داده است. با کاهش عدد فرود جریان به ۰/۱۹ قرار گیری المان‌های شش‌پایه در حالت روی بستر میزان آبشستگی را به ۳۳ درصد کاهش داد.۲۲ درصد و ۲۶ درصد کاهش آبشستگی مربوط به حالت نیمه بستر و زیر بستر در همین عدد فرود می‌باشد.

در عدد فرود ۰/۱۷، درحالت نیمه بستر میزان کاهش آبشستگی به ۴۰ درصد رسید، و در همین عدد فرود در شرایط کارگذاری روی و زیر بستر این میزان به ۲۴ درصد و ۳۶ درصد تقلیل یافت. در عدد فرود ۰/۱۶، در حالت روی بستر تنها ۷ درصد کاهش آبشستگی نسبت به حالت شاهد مشاهده شد؛ علی رغم اینکه در همین عدد فرود جریان این میزان کاهش به ۲۳ درصد و ۵۷ درصد در شرایط زیر و نیمه بستر مشاهده شد.

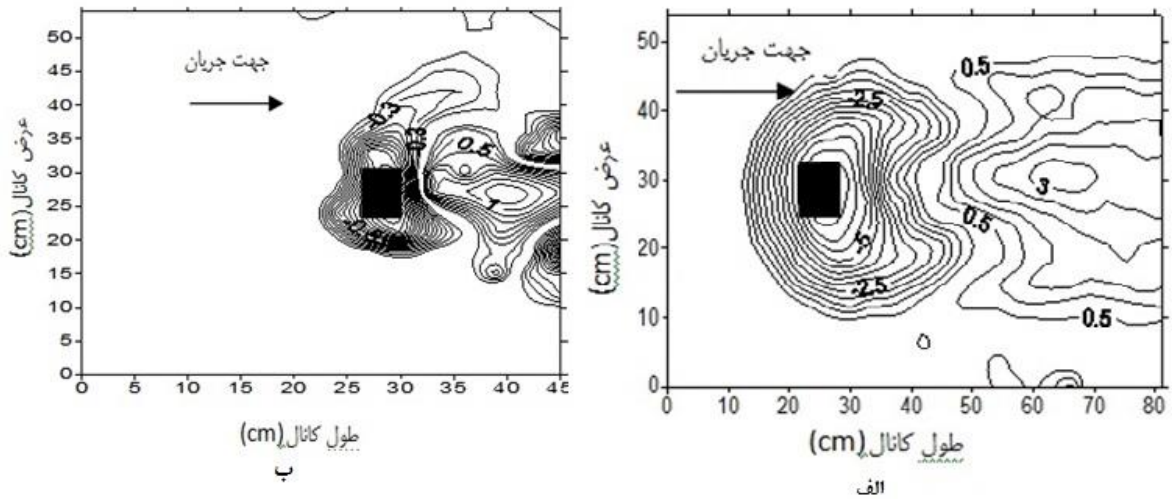
شکل های(۸) ، (۹)و (۱۰) توپوگرافی توسعه حفره آبشستگی در عدد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ برای حالت‌های کارگذاری روی، نیمه و زیر بستر نشان می‌دهد. در تمامی شکل‌ها اعداد روی خطوط میزان عمق آبشستگی و رسوب گذاری بر حسب سانتی متر می باشد. اعداد منفی نشان دهنده آبشستگی و اعداد مثبت نشان دهنده رسوبگذاری هستند.

جدول ٤- درصد کاهش عمق آبشستگی در مقایسه با آزمایش‌های شاهد

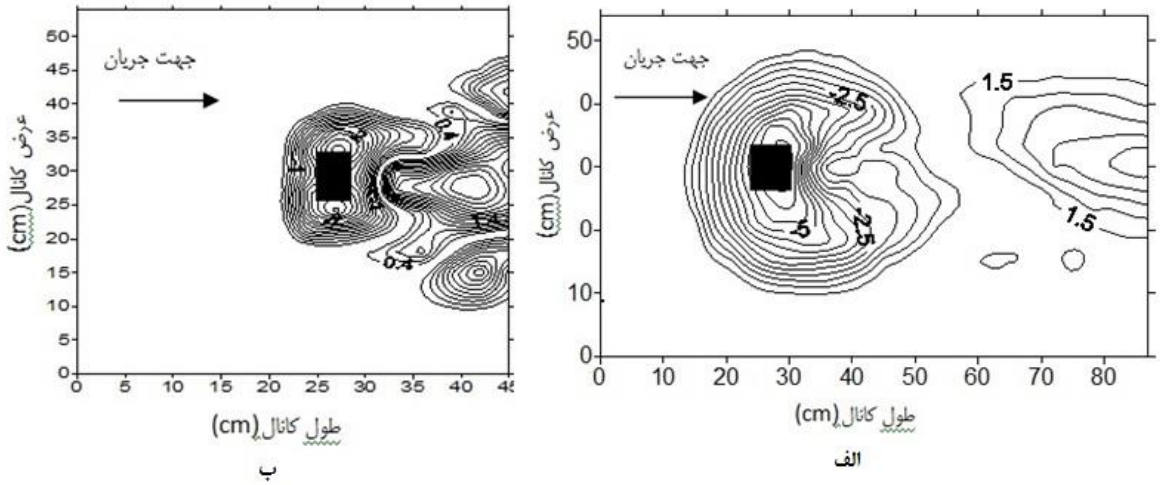
عدد فرود	درصد کاهش عمق آبشستگی		
	روی بستر	نیمه بستر	زیر بستر
۰/۲۴	۴۴	۲۸	۳۵
۰/۲۲	۴۲	۲۷	۳۱
۰/۱۹	۳۳	۲۲	۲۶
۰/۱۷	۲۴	۴۰	۳۶
۰/۱۶	۷	۵۷	۲۳



شکل۸- توپوگرافی توسعه حفره آبشستگی با حضور المان‌های شش‌پایه روی بستر
الف) عدد فرود ٠/٢٤، ب) عدد فرود ٠/١٦

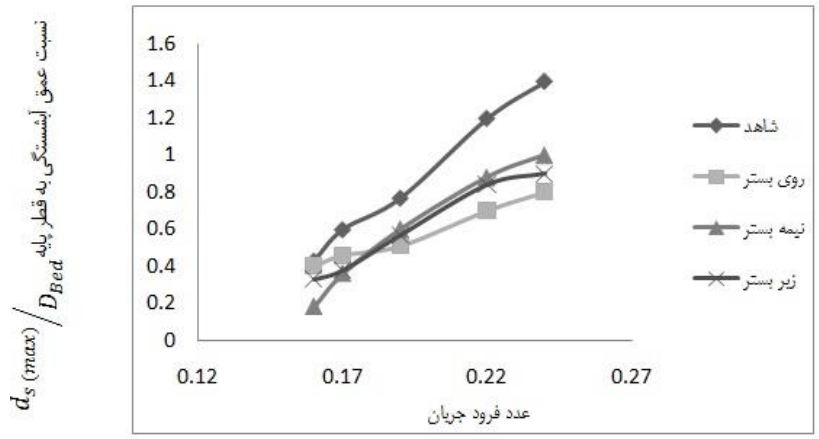


شکل ۹- توپوگرافی توسعه حفره آبشستگی با حضور المان‌های شش‌پایه نیمه بستر
الف) عدد فرود ۰/۲٤، ب) عدد فرود ۰/۱٦



شکل ۱۰- توپوگرافی توسعه حفره آبشستگی با حضور المان‌های شش‌پایه زیر بستر
الف) عدد فرود ۰/۲٤، ب) عدد فرود ۰/۱٦

روند تغییرات عمق بی‌بعد آبشستگی در برابر عدد فرود جریان در شکل (۱۱) آورده شده است با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود جریان، عمق بی بعد آبشستگی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه در برابر عدد فرود جریان با قرار گیری المان‌های شش‌پایه

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر استفاده از المان‌های شش‌پایه در حالت های روی بستر، نیمه بستر و زیر بستر بر آبشستگی پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در پنج عدد فرود جریان بالادست پایه در شرایط آب زلال طرح ریزی شد. سپس عمق حداکثر آبشستگی و پروفیل بستر رسوبی در آزمایش‌های با و بدون المان‌های شش‌پایه برداشت شد. نتایج زیر از آزمایش ها به دست آمد:

- قرارگیری المان ها در روی بستر در عدد فرود ۰/۲۴ موجب کاهش ۴۴ درصد آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد شده است.
- در عدد فرود ۰/۱۶، قرارگیری المان های شش پایه در نیمه بستر کاهش ۵۷ درصد آبشستگی را نسبت به آزمایش شاهد نتیجه می دهد.
- حالت قرارگیری المان ها در زیر بستر در تمامی اعداد فرود جریان در کاهش آبشستگی عملکرد متوسطی داشت.
- با رسم نمودارهای بدون بعد در خصوص،تغییرات عمق بی بعد آبشستگی در مقابل عدد فرود، مشخص شد با افزایش عدد فرود عمق بی بعد آبشستگی افزایش می یابد.

منابع

۱- آزم، ن. و م، قمشی. ۱۳۹۲. اثر شمع های حفاظتی بر کاهش آبشستگی در پایه پل استوانه ای. نشریه دانش آب و خاک، ۲۳(۳):۱۳۴-۱۲۳.

۲- شجاعی، پ. فرسادی زاده،د.و ع، حسین زاده دلیر. ۱۳۹۰. تاثیر توام صفحات مستغرق و طوق در کاهش عمق آبشستگی پایه های استوانه ای شکل پل ها. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۵(۵۷):۳۳-۲۳.

۳- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۷. هیدرولیک انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.چاپ سوم

۴- صمیمی بهبهان، ت. بارانی، غ. ع. رحیم خانلی، م. و م. ج ، خانجانی. ۱۳۸۵، بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل ها. همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز ، اهواز.

۵- عقلی،م. و م.ع. ،زمردیان. ۱۳۹۲. تأثیر توأم طوق و کابل بر روی عمق آبشستگی اطراف پایه پل در قوس رودخانه ها .علوم و مهندسی آبیاری،۳۶(۳): ۴۰-۳۱.

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

7- -Chiew, Y.M. 1992. Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(9): 1260-1269.

8- Dey, S. Sumer, B.M. and J. Fredsoe. 2006. Control of scour at vertical circular piles under waves and current. Journal of Hydraulic Engneering, 132(3): 270-279.

9- Ettema, R. 1980. Scour at Bridge Piers. Report No 216, University of Auckland, School of Engineering.

10- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and A. Cardoso. 2009. Counter-measures against local scour at bridge piers: slot and combined system of slot and bed sill. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 35(5):425-431.

11- Melville B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, 125 (1): 59-65.

12- Miller, W. 2003. Model for the time rate of local sediment scour at cylindrical structure. Ph.D.Thesis, University of Florida.

13- Moncada M A.T., Aguirre-Pe, J., Bolivar J.C. and E.J. Flores. 2009. Scour protection of circular bridge piers with collars and slots. J. Hydraulic Research, 47(1): 119-126.

14- Rudkivi, A. J. Ettema. R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3): 339-350.

15- Rudkivi, A. J. 1998. Loose boundary hydraulics. 3rd Edition, Rotterdam, Brookfield. Pp. 496-514.

16- Sheppard, D. M., Odeh, M. and T. Glasser. 2004. Large scale clear-water local scour experiments .Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, 130(10): 957-963.

17- Unger, J. and W.H. Hager. 2006. Riprap failure at circular bridge piers. Journal Hydraulics Engineering, ACSE. 132(4):354- 362.

18- Zarrati A.R. Gholami, H. and M.B. Mashahir. 2004. Applicationofcollar to control scouring around rectangular bridge piers. J. Hydraulic Research, 42(1): 97-103.