

تأثیر تعداد ردیف عناصر شش پایه در کاهش عمق آبشستگی پیرامون پایه پل مکعبی

زهرا زیلایی*^۱، محمود شفاعی بجزستان^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۰۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Zahra.zilai@yahoo.com

چکیده

عناصرشش پایه با نام تجاری ای- جک در سازه‌های دریائی استفاده فراوانی دارد، و در سال‌های اخیر نیز به‌عنوان یک وسیله مناسب برای کنترل فرسایش سواحل رودخانه نیز توصیه شده است. هدف این تحقیق بررسی کاربرد این عناصر در کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل است که بدین منظور دو سری آزمایش بدون حضور و با حضور عناصر شش پائی و در سه ردیف کارگذاری انجام گردید. آزمایش‌ها تحت پنج عدد فرود مختلف جریان در محدوده ۰/۱۶ تا ۰/۲۴ در اطراف پایه پل مکعبی انجام و توپوگرافی بستر در تمامی آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد، که عناصر شش پایه توانسته‌اند، بیشینه عمق آبشستگی را تا حدود ۴۴٪ در آزمایش‌های با یک ردیفه، تا ۸۳٪ در آزمایش با دو ردیفه و ۱۰۰٪ در آزمایش با سه ردیفه در عدد فرود ۰/۱۶ کاهش دهند. افزایش عدد فرود باعث گردید تا از میزان تأثیر عناصر در کاهش عمق آبشستگی کاسته شده بطوری‌که درصدهای کاهش عمق آبشستگی فوق برای عدد فرود ۰/۲۴ به ترتیب ۴۴٪، ۶۳٪ و ۸۱٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: عنصر شش پایه، ای- جک، پایه پل مکعبی، عمق آبشستگی، عدد فرود

Effects of Six-Leg Elements Row Quantity on Reduction of Cubic Bridge Pier Scour Depth

Z Zilai^{1*}, M Shafai Bajestan²

Received: 17 April 2015

Accepted: 25 October 2016

1- M.Sc. Student. Hydraulic Structures Dept., Faculty of Water Sci. Engine., Shahid Chamran Univ., of Ahvaz, Iran

2-Prof. Hydraulic Structures Dept., Faculty of Water Sci. Engine., Shahid Chamran Univ., of Ahvaz, Iran

* Corresponding Author, Email: Zahra.zilai@yahoo.com

Abstract

The six-leg elements with trade name of A-jack frequently have been used in coastal structures and recently have been recommended as an effective tool for controlling river bank erosion. The purpose of this study was to investigate the applicability of such elements in reduction of scour depth at bridge piers. Therefore, two series of tests without and with the mentioned elements in three different quantities of rows were carried out. Five different flow conditions, with Froude number in the range of 0.16 to 0.24 around the cubic bridge pier, were performed and bed topography was measured in all experiments. The results of this study show that for Froude number of 0.16, the six-leg elements can reduce the maximum scour depth by as much as 44%, 83% and 100% when the elements are placed in single row, in two rows and in three rows, respectively. The increase of Froude number causes reduction of the effect of six-leg elements on scour depth. So, for Froude number equal to 0.24, the above-mentioned percentages of maximum scour depth reductions were found to be 44%, 63% and 81%.

Keywords: A-jak, Cubic bridge pier, Froude Number, Scour depth, Six basic elements

مقدمه

بنابراین شناخت فرآیند آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل و نیز ارائه راهکارهایی جهت محافظت هر چه بیشتر پایه پل‌ها و سازه‌های دریایی مشابه در برابر آب‌شستگی از اهمیت بالایی برخوردار است. آب‌شستگی در حقیقت جابه‌جایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است. آب‌شستگی موضعی اطراف یک پایه از جریان رو به پایین در وجه بالادست پایه و گرداب نعل‌اسبی در اطراف پایه ناشی می‌شود. حفاظت اطراف پایه‌های پل در مقابل آب‌شستگی می‌تواند از تخریب آن‌ها جلوگیری کند. لذا روش‌های مناسب جهت کاهش و حتی الامکان کنترل آب‌شستگی از جمله مسایل مورد توجه مهندسان هیدرولیک بوده است. از روش‌های مقاوم‌سازی بستر برای پایه‌های میانی و کناری می‌توان به استفاده کردن از پوشش سنگریزه،

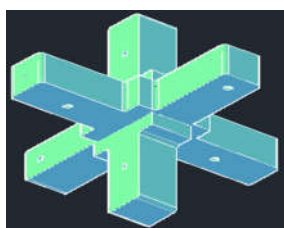
پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند، که از دیرباز مورد استفاده بوده‌اند و همه ساله در اثر بروز سیلاب در رودخانه‌ها تعداد زیادی از پل‌ها درست در زمانی که بیشترین نیاز به آن‌ها وجود دارد، تخریب می‌گردند. وقوع آب‌شستگی در اطراف پایه‌های پل یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها می‌باشد. بنابراین حفاظت از پل‌ها در مقابل آب‌شستگی ضروری است. در سال‌های اخیر محققان زیادی روش‌های گوناگون حفاظت از پل‌ها در مقابل آب‌شستگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. روش‌های مهار و جلوگیری از آب‌شستگی براساس مطالعه‌های انجام شده بر روی مکانیزم آب‌شستگی می‌باشد.

قدرت عوامل فرسایش، مقاومت مواد بستر بالا برده می شود. در تحقیقی عملکرد طوق همراه سنگچین جهت کنترل آبشستگی توسط پارسا بصیر (۱۳۸۳) مورد بررسی قرار گرفت. هرمزی (۱۳۹۱) نیز اثر ایجاد زبری‌های مکعبی شکل در پیرامون پایه پل مستطیلی را به‌عنوان شیوه جدید کاهش عمق آبشستگی در مقابل جریان‌های رو به پائین و گرداب‌های نعل‌اسبی مورد بررسی قرار داد. پروان (۱۳۹۲) استفاده از زبری بر پایداری سنگچین از جنس رودخانه‌ای و پوک‌های در اطراف پایه پل را مورد بررسی قرار داد که به این نتیجه رسید که وجود زبری باعث مقاوم‌تر شدن و افزایش پایداری سنگچین می‌گردد، همچنین سنگچین با جنس رودخانه‌ای در جریان با سرعت بیشتری نسبت به سنگچین با جنس پوک‌های معدنی گسیخته می‌شود. نتایج مؤید این است که در شرایط ترکیب دو روش زبری و سنگچین، اندازه سنگ‌های مورد نیاز با جنس رودخانه‌ای و پوک‌ها به ترتیب حدود ۱۹ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. در مناطقی که سنگ‌های بزرگ در اختیار نباشد می‌توان از عناصر بتنی نظیر تترا پد یا تتراهدرا فریم (به نقل از بگ و بگ) (۲۰۱۳) و یا عناصر شش پایه استفاده کرد. هر یک از این عناصر از دو قطعه بتن T شکل که در وسط به هم متصل هستند تشکیل شده که در نتیجه دارای شش پا می‌باشد. این عناصر با نام تجاری عنصر شش پایه^۱ در سازه‌های دریائی کاربرد فراوانی دارند و در سال‌های اخیر به عنوان کنترل فرسایش پنجه ساحل رودخانه‌ها نیز توصیه شده است (بی نام ۲۰۱۵). با قرارگیری این عناصر بر روی بستر رودخانه باعث استهلاک انرژی جنبشی جریان و افزایش مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی می‌شوند. این عناصر یا به صورت درهم و یا به صورت یکنواخت کنار هم قرار گرفته شده‌اند، و از ۶ جهت با عناصر کناری خود قفل می‌شوند، و در نتیجه به صورت یک-پارچه عمل می‌کنند. استفاده از این عناصر در اطراف پایه پل نیز می‌تواند باعث افزایش زبری و کاهش

قطعات بتن پیش ساخته، کیسه‌های پر شده از دوغاب سیمان، لایه محافظتی بتنی، استفاده از توری‌های سنگی و استفاده از زبری و سنگچین اشاره کرد. از روش‌های تغییر الگوی جریان در پایه‌های پل می‌توان به سپرهای دایروی یا طوق که دور پایه ساخته می‌شوند و شمع‌های حفاظتی که در بالادست پایه پل‌های پل قرار می‌گیرند، اشاره نمود. امکان، اجرا و اطمینان در هر یک از روش‌های کاهش آبشستگی، تابعی از عوامل مختلف مانند کارآیی، هزینه، نگهداری و آگاهی از معایب هر روش می‌باشد. چیو (۱۹۹۲) دو روش اساسی برای محافظت پی پل در مقابل آبشستگی پیشنهاد نمود، که عبارتند از: ۱- بالا بردن مقاومت مواد بستر در برابر فرسایش که آن عمل غالباً با قرار دادن یک لایه محافظ از پوشش سنگریزه، قطعات بتنی پیش ساخته، کیسه‌های پر شده از دوغاب سیمان، بسط پی، لایه محافظتی بتنی و استفاده از توری سنگی در پایه پل انجام می‌گیرد. ۲- کاهش قدرت عوامل فرسایش یعنی جریان رو به پائین و گرداب نعل‌اسبی، که می‌توان به سپرهای دایروی یا طوقه‌ها اشاره نمود. در سال‌های اخیر استفاده از شکاف پایه نیز راه حلی به عنوان برای کاهش گرادیان فشار بین سطح آب و بستر پیشنهاد شده است. محققانی چون چیو (۱۹۹۲)، کومار و همکاران (۱۹۹۹)، حیدرپور و همکاران (۲۰۰۳)، تأثیر شکاف در بدنه پایه‌های استوانه‌ای منفرد را بر آب-شستگی پایه بررسی کرده‌اند. محققانی از جمله بایرام ولارسن (۲۰۰۰)، رودکیوی و ساترلند (۱۹۸۱) و حیدر-پور و همکاران (۲۰۰۳) در گروه پایه‌ها نیز تأثیر شکاف پایه بر آبشستگی موضعی را بررسی نمودند. ایجاد پوشش حفاظتی سنگچین در اطراف پایه‌ها به عنوان روش متداول مورد بررسی قرار گرفته است. در زمینه الگوی محدوده پوشش سنگچین و ابعاد لازم برای آن می‌توان به تحقیق‌های گیلز (۱۹۳۸)، بوناسونداس (۱۹۷۳)، نیل (۱۹۷۴) و پوزی (۱۹۷۴) برای پایه‌های استوانه‌ای اشاره کرد (به نقل از چیو) (۱۹۹۵)، استفاده توأم از شکاف و سنگچین و یا طوق و سنگچین روشی است ترکیبی که در این روش‌ها همراه با کم کردن

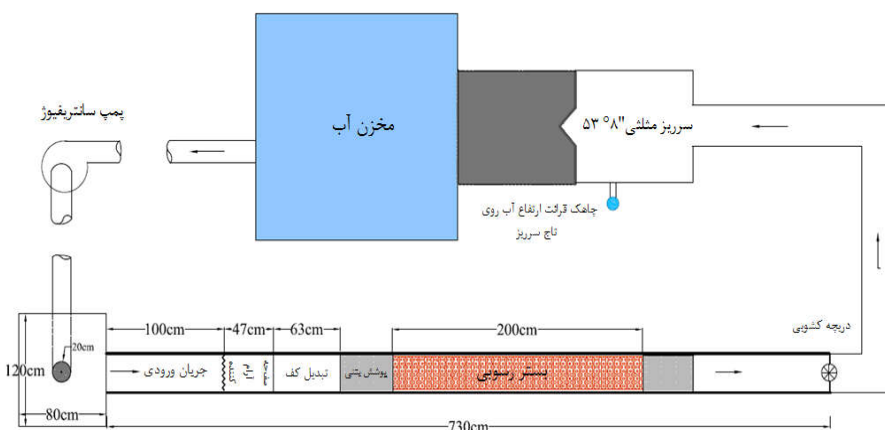
^۱ A-jack

همراه فیلتر ژئوتکستایل و یا با قرارگیری قطعات سنگ بین آنها استفاده شود. از آنجا که تا کنون تحقیق مدونی در رابطه با میزان تأثیرپذیری این عناصر در کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل در منابع منتشر نشده است. از این رو در این تحقیق اثر تعداد ردیف‌های عنصر شش‌پایه در کاهش عمق آبشستگی بررسی می‌گردد. در شکل ۱ نمایی از عناصر شش‌پایه نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از عنصر شش‌پایه.

سرعت نزدیک بستر و کاهش قدرت گردابه‌های رو به پائین و برخاستگی شده که در نتیجه منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌گردد. هر چند که در راهنمای شرکت تجاری (بی‌نام ۲۰۱۵) یکی از کاربردهای المان‌ها را کنترل آبشستگی اطراف پایه پل ذکر کرده است. تنها گزارشی که در زمینه کاربرد این عناصر را در کنترل آبشستگی منتشر شده است، نتایج آزمایش‌هایی است که توسط تورنتن و همکاران (۱۹۹۹) برای پایه پل در بستر ماسه‌ای انجام شد، برای تعیین پایداری هیدرولیکی ای‌جک‌های مدل $5 \times 4 \times 5$ در حالت آب-شستگی پایه پل، آزمایش‌ها در فلومی با شیب تند (۱۳ درصد) و با بستر ثابت در دانشگاه ایالتی کلرادو انجام گرفت.، که بر این اساس میزان کاهش عمق آبشستگی را با کاربرد عناصر شش‌پایه به تنهایی ۵ تا ۳۰ درصد گزارش دادند، و توصیه کردند که این عناصر باید به-



شکل ۲- پلان کانال و تجهیزات آزمایشگاهی.

۱متری از دهانه ورودی فلوم استفاده شد. جریان پس از خروج از فلوم، وارد یک حوضچه می‌گردید، و با عبور از یک سرریز مثلثی استاندارد ۵۳ درجه، مجدداً وارد مخزن تامین آب می‌شد. کنترل عمق جریان با استفاده از یک دریچه کشویی که در انتهای کانال قرار داشت، صورت می‌گرفت. در شکل ۲ نمایی از کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است.

جانمایی عناصر شش‌پایه در بستر رسوبی: پایه پل مکعبی در فاصله ۱/۷ متری از ابتدای بستر رسوبی و

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانالی به طول ۷/۳ متر، عرض ۰/۵۶ متر و عمق ۰/۶ متر با شیب طولی ۰/۰۲۸ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران انجام شد. دیواره‌ها و کف فلوم از جنس پلکسی-گلاس شفاف بود. جریان مورد نیاز با استفاده از یک پمپ سانتریفیوژ از مخزن تامین آب وارد مخزن آرام کننده در ابتدای فلوم می‌گردید. به منظور حذف تلاطم ورودی، از یک صفحه مشبک آرام کننده، در فاصله

در اطراف پایه پل به صورت یک، دو و سه ردیفه پیرامون پایه پل مطابق شکل ۳ چیده شدند.

در وسط کانال آزمایشگاهی قرار داده شد، و سپس عناصر شش‌پایه با آرایش دایره‌ای با تراکم ۱۰۰٪



ج) سه ردیفه



ب) دو ردیفه



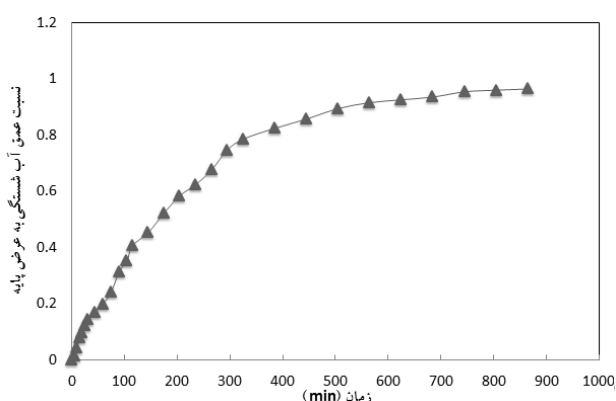
الف) یک ردیفه

شکل ۳- چیدمان المان‌ها پیرامون پایه پل (الف) یک ردیفه (ب) دو ردیفه (ج) سه ردیفه.

عناصر کاملاً توسط پایه‌ها بهم قفل شده‌باشند و خلل فرج بین پایه‌ها به حداقل برسد آنرا تراکم صددرصد گویند. در کارهای دریائی برای کاربرد موج شکن برای ایجاد خلل فرج بیشتر بین پایه‌ها و در نتیجه پراکنده کردن موج با تراکم کمتر استفاده می‌شود. ملویل و کلن (۲۰۰۰) برای میزان زبری رسوبات، از نسبت عرض پایه (D) به اندازه متوسط ذرات (d_{50}) استفاده کردند. با توجه به تحقیق‌های صورت گرفته، وقتی که $\frac{D}{d_{50}} < 50$ باشد، آب‌شستگی موضعی تحت تأثیر اندازه ذرات خواهد بود، و در صورتی که این نسبت از ۵۰ بزرگ‌تر باشد، اندازه ذرات تأثیری بر میزان آب‌شستگی موضعی نخواهد گذاشت. میزان انحراف معیار هندسی ذرات ($\sigma_g = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{\frac{1}{2}}$) نباید از ۱/۳ بیشتر باشد. شپارد و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند، عمق آب‌شستگی با کاهش نسبت $\frac{D}{d_{50}}$ از مقدار ۱۲، کاهش می‌یابد. لی و استورم (۲۰۰۹) نیز کمینه این مقدار را برابر ۲۰ بیان کردند. با توجه به شرایط ذکر شده، برای تامین رسوبات بستر از ماسه باقی مانده بین الک‌های ۲۰ و ۳۰ در محدوده ذرات ۰/۸۳ تا ۰/۵۹ میلی‌متر و با انحراف معیار هندسی ۱/۲۲ می‌باشند. بستر کانال

دستیابی به بیشینه عمق آب‌شستگی نیازمند در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر میزان آن می‌باشد، که با توجه به موارد زیر انتخاب شوند. برای جلوگیری از اثر عرض جانبی دیواره‌های کانال روی آب‌شستگی موضعی، و به منظور انتخاب حداکثر قطر پایه، معیارهای مختلفی مانند $\frac{D}{B} \leq 0.15$ (شپارد و همکاران، ۲۰۰۴) و میلر (۲۰۰۳) در نظر گرفته شده‌اند. D قطر پایه در محل بستر و B عرض کانال می‌باشد. لذا برای مدل کردن از پایه پلی‌کس گلاس به عرض ۷۰ میلی‌متر استفاده گردید، عناصر استفاده شده در این تحقیق از جنس بتن و از اتصال دو قسمت T شکل به هم ساخته می‌شوند و هندسه ای شش‌پایه را ایجاد می‌کند. ابعاد هر یک از عناصری شش‌پایه ۵×۵×۵ سانتی‌متر و جرم مخصوص آنها ۲/۰۷ گرم بر میلی‌لیتر و ارتفاع مؤثر آن‌ها زمانی که بر روی سه پایه قرار می‌گیرند برابر ۴ سانتی‌متر می‌باشد. هندسه خاص این عناصر این قابلیت را فراهم کرده است تا این عناصر بتوانند از هر شش و جهه با عناصر کناری قفل شوند و به صورت یک ردیف یک‌پارچه قرار بگیرند. تعداد عناصر در این ردیف بستگی به تراکم کارگذاری مورد نظر دارد. هر چه میزان فشردگی عناصر در این ردیف بیشتر شود در صد تراکم نیز بیشتر می‌شود. در حالیکه

دو جریان هم زمان به محل پایه برسند و با برخورد آنها به هم، سرعت های آنها تقریباً صفر شود. با این روش، هیچ حرکتی در ذرات بستر اتفاق نمی افتد. سپس دبی جریان افزایش پیدا می کند تا به دبی مورد نظر برسد. با این دبی ثابت، عمق جریان به وسیله دریچه پائین دست کانال به آرامی و با فواصل زمانی کوتاه کم می شود تا سرعت جریان افزایش یابد.



شکل ۴- منحنی توسعه زمانی حفره آب شستگی.

بعد از برقراری جریان به مدت ۳۰۰ دقیقه پمپ خاموش می شد، تا آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شده و بر توپوگرافی بستر تغییری ایجاد نگردد. در نهایت توپوگرافی بستر در اطراف پایه در یک شبکه ۳×۳ سانتی متری توسط مترلیزری برداشت می گردید. سپس با قرار دادن عناصر شش پایه در سه ردیف کارگذاری در اطراف پایه به طور یکنواخت الگوی جریان بررسی می شد. برای انجام آزمایش از پنج دبی متفاوت بر اساس شرایط کانال آزمایشگاهی استفاده شد تا تاثیر حضور عناصر شش پایه ارزیابی شود. جدول ۱ شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایشها را نشان می دهد. در همه آزمایشها رژیم جریان آشفته و زیر بحرانی است، که جریان طبیعی در اکثر رودخانهها نیز همین رژیم را دارد.

آزمایشگاهی در بازه ۴ متری به ضخامت ۱۰ سانتی متر با رسوباتی با قطر متوسط ۰/۷ میلی متر پوشانده شد. طبق نظر اتما (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 روبه پائین و کاهش عمق آب شستگی می شود. بنابراین باید عمق جریان بگونه ای انتخاب شود که تأثیر این پدیده بر عمق آب شستگی از بین برود. پس کمینه عمق انتخاب شده برای از بین این اثر باید بیش از ۱/۵ برابر قطر پایه باشد. که در این آزمایشها ۰/۱۶ متر انتخاب شده است. طبق نظر ملویل و چپو (۱۹۹۹) زمانی که سرعت جریان در محدوده $1 < \frac{V}{V_c} < 0.3$ باشد، آب شستگی در شرایط آب زلال رخ می دهد. پدیده آب شستگی موضعی، یک فرآیند تابع زمانی است و با گذشت زمان، گسترش پیدا کرده و به حالت تعادل می رسد. ملویل و چپو (۱۹۹۹) و دی و همکاران (۱۹۹۵) گسترش زمانی آب شستگی را وابسته به شرایط جریان، هندسه و پارامترهای رسوب دانسته اند. تاکنون تلاش های زیادی توسط محققان مختلف برای استاندارد کردن زمان تعادل و رسیدن به حالت تعادل انجام شده است. به منظور تعیین زمان مناسب برای انجام آزمایشها، یک آزمایش ۱۴ ساعته برای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه (سرعت نسبی ۰/۹۴) انجام گرفت، و زمانی که بیشینه عمق حفره آب شستگی نسبت به زمان ناچیز شد، به عنوان زمان آزمایشها تعیین گردید. با توجه به شکل ۴ زمان آزمایشها ۳۰۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

روش انجام آزمایش

در شروع هر آزمایش پس از صاف کردن بستر به آرامی مصالح را از آب اشباع نموده، و کانال پر از آب شده به طوری که مصالح شسته نشوند. برای این منظور بهتر است که آب از فواصل مساوی در پائین دست و بالادست به طور همزمان به طرف پایه هدایت شود، تا

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی جریان حاکم بر آزمایش‌ها.

$Q \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Fr	$Y \text{ (m)}$	$V \text{ ms}^{-1}$	V/V_C
۰/۰۲۷	۰/۲۴	۰/۱۶	۰/۳	۰/۹۳
۰/۰۲۵	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۸۶
۰/۰۲۲	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۷۵
۰/۰۲	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۶۸
۰/۰۱۸	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۶۲

تحلیل ابعادی

بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. با توجه به ثابت بودن متغیرهای انحراف معیار هندسی ذرات، چگالی نسبی متوسط رسوبات از این رو رابطه‌ی ۳ بدون بعد به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

$$\frac{d_s}{B} = f \left(Fr, \frac{R}{B} \right) \quad [3]$$

نتایج و بحث

در این تحقیق آزمایش‌ها به دو دسته تقسیم شدند. در مرحله اول الگوی فرسایش و رسوب گذاری جریان در کنار پایه مکعبی بدون حضور عناصر شش‌پایه که شامل پنج آزمایش بود، اندازه گیری شد. در مرحله بعد با نصب عناصر شش‌پایه الگوی فرسایش و رسوب گذاری بستر اندازه‌گیری می‌شد که شامل ۱۵ آزمایش بود. آزمایش‌ها ابتدا با قرار دادن یک ردیف از عناصر شش‌پایه پیرامون پایه پل که شامل پنج آزمایش بود، صورت پذیرفت. سپس با دو ردیف و پس از آن با قرار دادن سه ردیف از عناصر شش‌پایه پیرامون پایه پل انجام شده است، در هر سری از آزمایش‌های صورت پذیرفته، تأثیر کارگذاری ردیف‌های عناصر شش‌پایه بر الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش بستر رسوبی مورد بررسی قرار گرفت.

الف) آزمایش‌های بدون حضور عناصر شش‌پایه (آزمایش‌های شاهد)

هدف از انجام این آزمایش‌ها مشاهده عملکرد سیستم‌های گردابی و نحوه حرکت ذرات و همچنین برداشت

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که بر میزان آب‌شستگی مؤثر می‌باشند اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در این آزمایش در رابطه ۱ ارائه شده‌اند:

$$d_s = f(B, y, t, R, \sigma, \nu, \rho, D_{50}, C_d, B', V, \rho_s) \quad [1]$$

در رابطه ۱ d_s : عمق آب‌شستگی، B : عرض پایه پل، y : عمق جریان، t : مدت زمان انجام آزمایش، R : قطر A-jack دور پایه، σ : انحراف معیار ذرات رسوبی، ν : لزجت سینماتیکی سیال، ρ : دانسیته سیال، D_{50} : قطر متوسط رسوبات بستر، C_d : ضریب شکل پایه، B' : عرض کانال، ν : سرعت جریان و ρ_s : دانسیته رسوبات بستر می‌باشد. با استفاده از روش‌های تحلیل ابعادی و نظریه باکینگهام رابطه کلی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{B} = f \left(\frac{y}{B}, \frac{D_{50}}{B}, \frac{B'}{B}, \frac{R}{B}, C_d, \sigma, \frac{\rho_s}{\rho}, R_e, Fr \right) \quad [2]$$

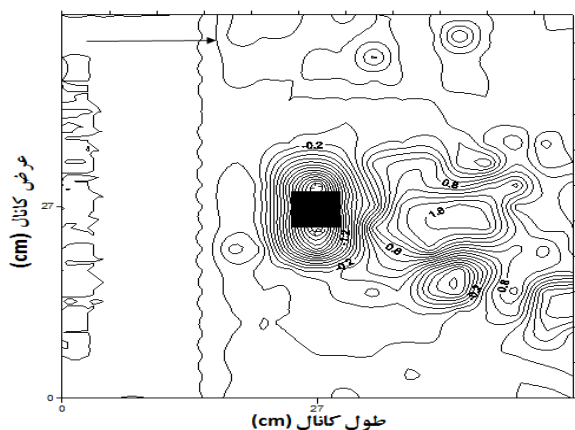
برای انجام آزمایش‌ها، پایه‌هایی با مقطع مستطیلی و از جنس پلکسی ساخته شده بودند، به همین دلیل از تأثیر، C_d صرف‌نظر می‌شود. با توجه به اینکه عدد رینالدز در محدوده‌ی انجام آزمایش‌های صورت پذیرفته بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشد، بنابراین جریان در محدوده‌ی آشفته

شستگی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و تغییرات عمق آب‌شستگی ناچیز می‌شود. در تمامی اعداد فرود مورد آزمایش، بیشترین عمق ناشی از آب‌شستگی در جلوی پایه ایجاد و در دو سمت به صورت متقارن روبه پائین‌دست پایه از عمق آن کاسته شده و در پشت پایه، مواد جدا شده از جلوی پایه انباشته می‌گردد. با افزایش عدد فرود جریان حفره عمیق‌تر و وسیع‌تری ناشی از فعالیت جریان‌های گردابی در اطراف پایه پل تشکیل می‌شود، و رسوبات شسته شده بستر نیز در فاصله دورتری از پایه تجمع می‌یابند. در این آزمایش‌ها بیشینه عمق آب‌شستگی برای اعداد فرود ۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۱۹، ۰/۱۷ و ۰/۱۶ در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۵ و ۶ توپوگرافی تشکیل شده پیرامون پایه پل در اعداد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ را نشان می‌دهد.

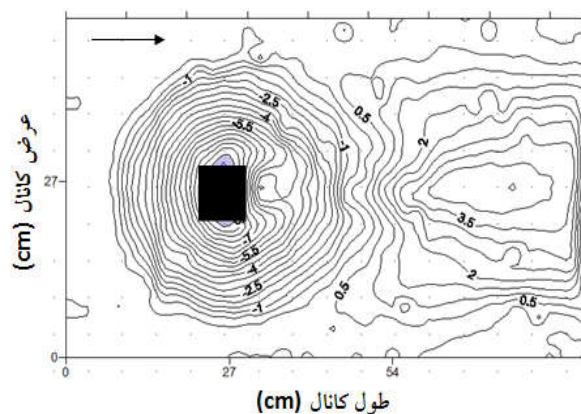
عمق آب‌شستگی در جلوی پایه برای مقایسه با نتایج آزمایش‌های مرحله بعدی بود. نتایج نشان داد که آب‌شستگی از جلوی پایه بر اثر جریان رو به پائین شروع می‌شود. با بیشتر شدن عمق حفره آب‌شستگی در جلوی پایه، فضای مناسبی جهت چرخش رو به پائین در داخل حفره فوق ایجاد شده و گرداب‌های نعل‌اسبی شروع به فعالیت می‌کنند. گرداب‌های برخاستگی نیز در طرفین و پائین‌دست پایه، جایی که جریان از دو طرف پایه جدا می‌شود، ذرات این منطقه هم چنین مصالح جریان قرار می‌دهند. با فعال شدن گرداب نعل‌اسبی در جلوی پایه، تمامی عوامل فرسایش، برداشت و انتقال مصالح کنده شده تکمیل شده و آب‌شستگی شدیدی در این لحظات اتفاق می‌افتد. با گذشت پنج ساعت نرخ آب-

جدول ۲- بیشینه عمق حفره آب‌شستگی در شرایط هیدرولیکی ثابت برای آزمایش‌های شاهد.

Fr	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۶
d_s (cm)	-۹/۹	-۸/۵	-۵/۴	-۴/۲	-۳



شکل ۶- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل در عدد فرود ۰/۱۶.



شکل ۵- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل در عدد فرود ۰/۲۴.

این جدول اعداد منفی نشان‌دهنده بیشینه عمق آب‌شستگی است.

ب) آزمایش‌ها با حضور عناصر شش‌پایه در این مرحله ۱۵ آزمایش با جانمایی عناصر شش‌پایه پیرامون پایه پل در اعداد فرود بالادست جریان انجام گرفت. نتایج آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. در

جدول ۳- بیشینه عمق آبشستگی مورد بررسی در ردیف‌های مختلف عناصر شش پایه.

سه ردیفه (cm)	دو ردیفه (cm)	یک ردیفه (cm)	Fr
-۱/۹	-۳/۷	-۵/۵	۰/۲۴
-۰/۷	-۲/۶	-۴/۹	۰/۲۲
-۰/۲	-۱/۵	-۳/۶	۰/۱۹
-۰/۱	-۱	-۳/۲	۰/۱۷
.	-۰/۵	-۲/۸	۰/۱۶

در رابطه فوق d_1 بیشینه عمق آبشستگی در آزمایش- های شاهد و d_2 بیشینه عمق آبشستگی در حضور عنصر شش پایه در شرایط هیدرولیکی ثابت می- باشد.

درصد کاهش آبشستگی با استفاده از نتایج آزمایش- های شاهد و از رابطه ۴ محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است:

$$R_1 = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100 \quad [۴]$$

جدول ۴- درصد کاهش آبشستگی چیدمان عناصر شش پایه پیرامون پایه نسبت به آزمایش‌ها شاهد.

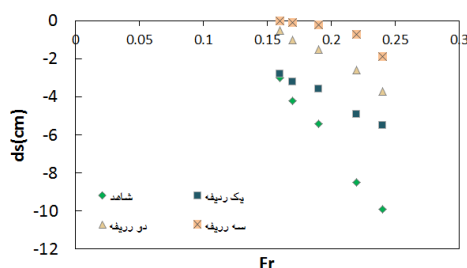
عناصر شش پایه R			Fr
سه ردیفه	دو ردیفه	یک ردیفه	
۸۱	۶۳	۴۴	۰/۲۴
۹۲	۶۹	۴۲	۰/۲۲
۹۶	۷۲	۳۳	۰/۱۹
۹۸	۷۶	۲۴	۰/۱۷
۱۰۰	۸۳	۷	۰/۱۶

شستگی مشهود است. کاهش سرعت جریان نزدیک بستر و در نهایت کاهش عمق آبشستگی نسبت به آزمایش‌های شاهد کاهش یافته، که برای اعداد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ به ترتیب بیشترین و کمترین عمق آب- شستگی ۵/۵ و ۳ سانتی متر مشاهده شد. کاهش عمق حفره آبشستگی در چیدمان المان‌های یک ردیفه پیرامون پایه نسبت به آزمایش‌های شاهد در شرایط هیدرولیکی ثابت، به دلیل افزایش زبری به علت حضور عناصر و قدرت گردابه‌های رو به پائین و منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شود. در شکل ۸ و ۹ توسعه حفره آبشستگی پیرامون پایه پل در اعداد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ را در عناصر یک ردیفه پیرامون پایه نشان می‌دهد.

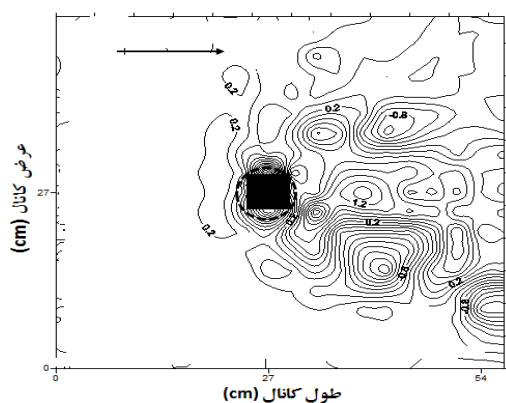
مقایسه آزمایش‌های نحوه چیدمان عناصر با آزمایش‌های شاهد

(۱) آزمایش‌ها با قرار دادن یک ردیف عناصر شش پایه در اطراف پایه پل

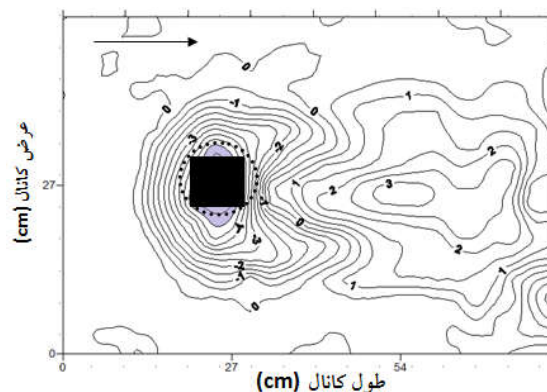
در این شرایط ۵ آزمایش به منظور بررسی عملکرد یک ردیف چیدمان عناصر شش پایه پیرامون پایه پل تحت اعداد فرود بالا دست جریان (۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۱۹، ۰/۱۷ و ۰/۱۶) بررسی شد. مشاهده شد با افزایش عدد فرود حفره عمیق‌تر و وسیع‌تری ناشی از فعالیت جریان‌های گردابی در اطراف پایه تشکیل می‌شود. به‌طور کلی با افزایش عدد فرود جریان و در نتیجه افزایش قدرت جریان گردابه‌ای، عمق حفره آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۷ تأثیر اعداد فرود جریان بر عمق آب-



شکل ۷- نسبت عمق آب‌شستگی به قطر پایه با تغییر عدد فرود جریان.



شکل ۹- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل با چیدمان یک ردیف عنصرشش‌پایه (عدد فرود ۰/۱۶).



شکل ۸- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل با چیدمان یک ردیف عنصرشش‌پایه (عدد فرود ۰/۲۴).

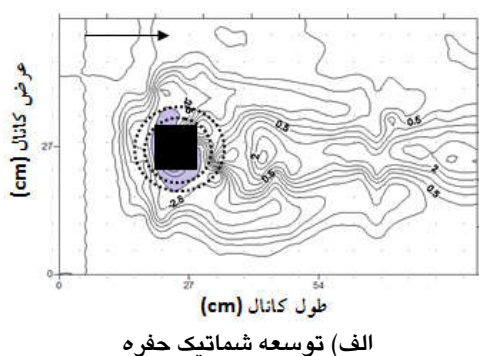
آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به آزمایش‌های شاهد و آزمایش‌های یک ردیفه کاهش یافته و با توجه به جدول ۳، بیشترین و کمترین میزان عمق آب‌شستگی در چیدمان دو ردیفه المان‌ها در اعداد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ برابر با ۳/۷ و ۰/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. این کاهش به دلیل افزایش زبری در نحوه چیدمان عناصر پیرامون پایه بوده است. که بر اثر افزایش ردیف‌های عنصر از یک ردیفه به دو ردیفه سرعت نزدیک بستر بیشتر کاهش یافته که منتهی آن کاهش قدرت گرداب‌های نعل‌اسبی پیرامون پایه بوده است، که در نهایت کاهش توسعه حفره آب‌شستگی را از لحاظ طولی و عرضی در پی خواهد داشت. کاهش عدد فرود جریان، کاهش عمق آب‌شستگی نسبت به آزمایش‌های شاهد بیشتر بوده است. محاسبه درصد کاهش آب‌شستگی در چیدمان دو ردیفه نشان می‌دهد، در عدد فرود ۰/۲۴ میزان کاهش حفره آب‌شستگی حدود ۶۳ درصد نسبت به آزمایش-

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، با محاسبه درصد کاهش آب‌شستگی با استفاده از رابطه ۴ مشاهده شده است که، با افزایش عدد فرود جریان، کاهش عمق آب‌شستگی نسبت به آزمایش‌های شاهد بیشتر بوده، به عبارت دیگر المان‌های شش‌پایه در اعداد فرود بالا عملکرد مناسب‌تری را از خود نشان می‌دهند. در چیدمان یک ردیفه بیشترین درصد کاهش آب‌شستگی در عدد فرود ۰/۲۴ بوده که برابر ۴۴٪ و کمترین مقدار آن در عدد فرود ۰/۱۶ می‌باشد و برابر ۷٪ مشاهده شده است.

(۲) آزمایش‌ها با قرار دادن دو ردیف عناصر شش‌پایه در اطراف پایه پل

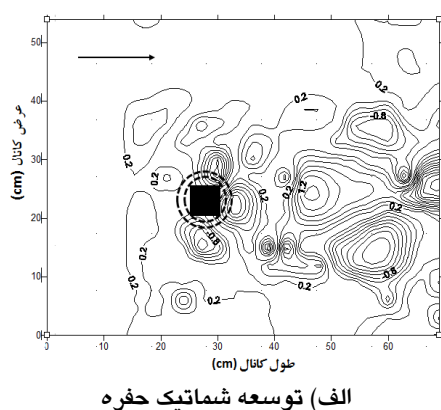
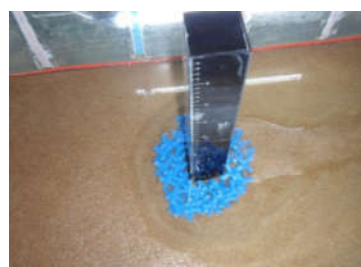
در این سری از روند آزمایش‌ها به‌منظور بررسی عملکرد دو ردیف عناصر شش‌پایه پیرامون پایه پل مکعبی، متناسب با اعداد فرود بالادست جریان در شرایط آب زلال (۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۱۹، ۰/۱۷، و ۰/۱۶) ۵

از عناصر نیز در اعداد فرودهای پائین نیز تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد، زیرا بر اساس مشاهده‌های صورت پذیرفته از میزان توسعه حفره کاسته می‌شود، و توسعه تپه رسوبی در پیرامون پایه رو به پائین دست افزایش می‌یابد. الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل مکعبی در عدد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

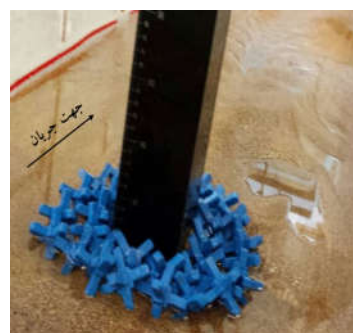


شکل ۱۰- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل با چیدمان دو ردیف عنصر شش‌پایه (عدد فرود ۰/۲۴).

های شاهد افزایش یافته است، که بیانگر عملکرد مطلوب‌تری از نحوه چیدمان‌ها را نشان می‌دهد. در این نحوه چیدمان مشاهده می‌شود، که حداکثر عمق حفره آب‌شستگی علاوه بر این که نسبت به عناصر یک ردیفه در همین شرایط هیدرولیکی کاهش یافته است، به بخش جلوتری از حفره انتقال یافته، و اندکی پس از عناصر شش‌پایه مشاهده می‌شود. نحوه چیدمان این سری



شکل ۱۱- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل با چیدمان دو ردیف عنصر شش‌پایه (عدد فرود ۰/۱۶).

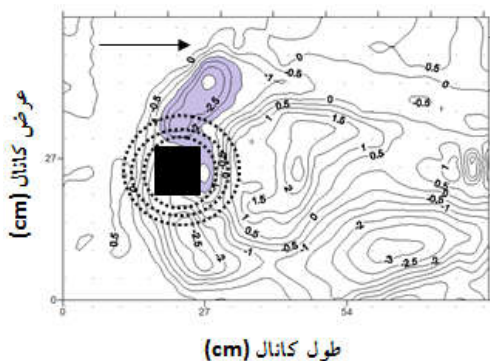


پایه تشکیل نشده و در جلوی پایه بلافاصله پس از سه ردیف عناصر شش‌پایه تپه رسوبی مشاهده شد، و حفره آب‌شستگی به دو حفره در طرفین پایه با عمق کمتر تفکیک شده است. در عدد فرود ۰/۱۶ بر طبق آنچه در کانال آزمایشگاهی مشاهده شد، عملاً هیچ‌گونه حفره‌ای دیده نشد، و تمامی حفره به تپه رسوبی پس از پایه مبدل گردید. به عبارتی می‌توان گفت که، افزایش تعداد ردیف‌های عنصر نتیجه اثر بخشی در کاهش حفره آب‌شستگی که هدف نهایی ما بوده، داشته است. الگوی

۳) آزمایش‌ها با قرار دادن سه ردیف عناصر شش‌پایه در اطراف پایه پل به منظور بررسی عملکرد سه ردیف عناصر شش‌پایه پیرامون پایه پل، مطابق با روندهای پیشین ۵ آزمایش در اعداد فرود ۰/۲۴، ۰/۲۲، ۰/۱۹، ۰/۱۷ و ۰/۱۶ برنامه‌ریزی گردید. در چیدمان سه ردیفه پیرامون پایه پل در عدد فرود ۰/۲۴ میزان ۸۱٪ کاهش در توسعه حفره آب‌شستگی مشاهده شده است، و بر اساس پلان ترسیم شده، مشاهده می‌شود، که حفره آب‌شستگی در جلوی

به همراه توسعه حفره در کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است.

توسعه آب‌شستگی پیرامون پایه پل مکعبی در عدد فرود ۰/۲۴ در شکل ۱۲ و برای عدد فرود ۰/۱۶ در شکل ۱۳

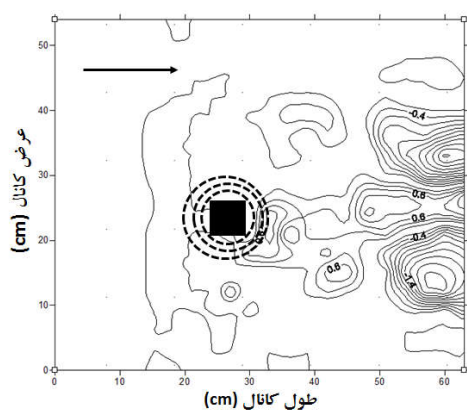


الف) توسعه شماتیک حفره



ب) توسعه مشاهده شده در کانال

شکل ۱۲- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل با چیدمان سه ردیف عنصر شش‌پایه (عدد فرود ۰/۲۴).



الف) توسعه شماتیک حفره



ب) توسعه مشاهده شده در کانال

شکل ۱۳- الگوی توسعه حفره آب‌شستگی پیرامون پایه پل با چیدمان سه ردیف عنصر شش‌پایه (عدد فرود ۰/۱۶).

مقایسه با پژوهش‌های قبل

شکل ۱۴ نحوه قرارگیری عناصر را در آزمایش‌های تورنتن و همکاران (۱۹۹۹) که در دانشگاه ایالتی کلرادو انجام شد، نشان می‌دهد. آن‌ها پس از لایه‌بندی مناسب بستر خوشه‌های خشک و متحدی از عناصر را با آرایش $5 \times 4 \times 5$ ، در اطراف پایه پل به صورت نوار احداث کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند، که پایداری هیدرولیکی ای‌جک‌های مدل $5 \times 4 \times 5$ می‌تواند با برابر قرار دادن گشتاور واژگونی حاصل از نیروی درگ و گشتاور مقاوم حاصل از وزن غوطه‌وری بدست آید. آن‌ها نیروی درگ مربوط به ای-جک‌ها را برابر با

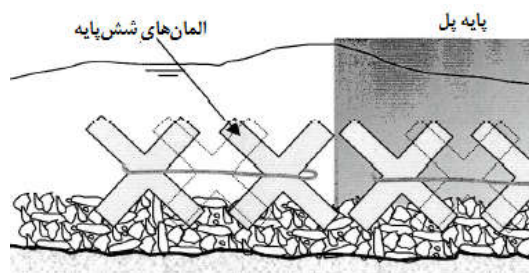
مقایسه توسعه طولی و عرضی حفره آب‌شستگی از نظر

تعداد ردیف

مطابق با آنچه که تاکنون بیان شد، و بر اساس شکل-های توسعه حفره که نحوه توسعه طولی و عرضی حفره آب‌شستگی را در اعداد فرود ۰/۲۴ و ۰/۱۶ را می‌توان مشاهده کرد. با افزایش تعداد چیدمان‌ها پیرامون پایه پل نسبت به آزمایش‌های شاهد، کاهش عمق آب-شستگی در جلوی پایه مشاهده شده است، و علاوه بر این کاهش توسعه طولی و عرضی حفره نیز دیده شده که با افزایش تعداد ردیف‌های مزبور حفره آب‌شستگی کاهش یافته و تپه رسوبی جایگزین آن می‌شود

تفاوت در افزایش درصد کاهش آب‌شستگی این تحقیق را نسبت به تحقیق پیشین در برتر بودن نحوه چیدمان عناصر دانست، که این امر موجب تقویت نیروی درگ و مقابله با نیروهای پیرامون پایه شده است.

ضریب درگ صفحه‌ای در نظر گرفت که عمود بر جهت جریان قرار داشته و جریان از بالا و کناره‌های آن در حال گذر است. و سپس برای تخمین محل اثر نیروی درگ بالاترین ارتفاع مدل را در نظر گرفتند، تا بیشترین گشتاور واژگونی ممکن را ایجاد کنند. شاید بتوان علت



شکل ۱۴- نحوه قرارگیری عناصر در آزمایش‌های تورنتن و همکاران (۱۹۹۹).

تنهایی ۷ تا ۴۴ درصد کاهش داده و برای آزمایش‌ها با حضور دو و سه ردیف عنصر، این میزان کاهش در عدد فرود ۰/۲۴ به ۶۳ و ۸۱ درصد افزایش پیدا کرده است، و این نشان دهنده عملکرد مطلوب حضور عناصر شش‌پایه با افزایش تعداد ردیف‌ها پیرامون پایه پل می‌باشد. چیدمان دو و سه ردیف عناصر در عدد فرود ۰/۱۶ میزان کاهش بیشتری را نشان می‌دهند و عملاً در چیدمان سه ردیفه مطابق با مشاهده‌های صورت پذیرفته هیچ‌گونه حفره‌ای مشاهده نشده است، و تنها تپه رسوبی از جلوی پایه را می‌توان مشاهده کرد، که به پائین‌دست کشیده می‌شود، و می‌توان این علت را در افزایش مقاومت حضور عناصر و استهلاک هر چه بیش‌تر گردابه‌های پیرامون پایه در اعداد فرود پائین جریان عنوان کرد. در نهایت افزایش تعداد ردیف‌های عناصر شش‌پایه پیرامون پایه پل برای کاهش حفره آب‌شستگی مطلوب می‌باشد، و می‌توان آن را به‌عنوان راهکاری برای حفاظت از پایه پل گزارش کرد.

نتیجه‌گیری کلی

عناصر شش‌پایه باعث استهلاک انرژی جنبشی جریان و افزایش مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی می‌شوند. استفاده از عناصر شش‌پایه در اطراف پایه پل علاوه بر افزایش زبری و کاهش سرعت نزدیک بستر، کاهش قدرت گردابه‌های رو به پائین و رسوبات جدا شده از بستر را منجر می‌شود، که نتیجه آن کاهش عمق آب‌شستگی را در پی خواهد داشت. در این تحقیق نتایج آزمایش‌ها بر روی آب‌شستگی پایه پل با و بدون حضور عناصر شش‌پایه در کانالی با عرض ۰/۵۶ متر در پنج عدد فرود جریان بالادست پایه روی بستر ماسه‌ای و در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. بطور کلی نتایج نشان داد، که با افزایش عدد فرود جریان حفره عمیق‌تر و وسیع‌تری ناشی از فعالیت جریان‌های گردابی در اطراف پایه پل تشکیل می‌شود و رسوبات شسته شده بستر نیز در فاصله دورتری از پایه تجمع می‌یابند. حضور عناصر شش‌پایه به صورت یک ردیفه پیرامون پایه پل میزان حفره آب‌شستگی را به

منابع مورد استفاده

- پارسا بصیر، ۱۳۸۳. حفاظت پایه پل در مقابل آبشستگی موضعی با استفاده توام از سنگ چین و طوق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- پروان ع، ۱۳۹۲. اثر زبری مکعبی شکل بر پایداری سنگچین در کنترل و کاهش آبشستگی موضعی پایه‌های مستطیلی پل‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- هرمزی م، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر ایجاد زبری‌های مکعبی شکل بر کاهش عمق آبشستگی موضعی پایه پل مستطیلی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.
- Anonymous (2015), A-jacks river applications, <http://www.a-jacks.com/River/River.aspx>.
- Bayram A and Larson, M., (2000), Analysis of scour around group of vertical piles in the field", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 216(4): 215-220.
- Beg, M. and Beg, S. (2013). Scour Reduction around Bridge Piers: A Review, International Journal of Engineering Inventions 2(7): 7-15.
- Chiew YM, 1992. Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 118(9): 1260-1269.
- Chiew, Y. M. 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 121(9): 635-643.
- Dey S, Bose SK, and Sastry, G.L.N. 1995. Clear-Water Scour at Circular Piers A Model. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 121(12): 869-876.
- Ettema R, 1980. Scour at bridge piers. Report No.216. University of Auckland. New Zeland..
- Heidarpour, M., Khodarahmi, Z. and Mousavi, S. F. 2003. Control and reduction of local scour at bridge pier groups using slot. XXXIAHR Congress, ATh, Thessaloniki, Greece, August 2(11): 301-307.
- Kumar, V., Ranga Raju, K.G and Vittal, N. 1999. Reduction of Local Sour around Bridge Piers Using Slots and Collars. Journal Of hydraulic Engineering ASCE 125(12): 1302-1305.
- Lee, S.O, Sturm, T, W. 2009. Effect of Sediment Size Scaling on Physical Modeling of Bridge Pier Scour. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 135(10): 793-802.
- Melville B.W., Chiew Y.M. 1999. Time Scale for Local Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 125(1): 59-65.
- Melville, B.W., Coleman, S. E. 2000. Bridge scour. Water Resources Publications LLC, Littleton Colo.
- Miller, W. 2003. Model for the Time rate of Local Sediment Scour at Cylindrical. Structure, Phd thesis, university of Florida.
- Raudkivi, A. J. and Sutherland, A. J. (1981), Scour at bridge piers., Road Research Unit, Bulltin 54, Wellington, New Zealand.
- Sheppard, D.M., Odeh, M. and Glasser, T. 2004. Large Scale Clear-Water Local Scour Experiments .Journal of Huydraulic Engineering, ASCE 130(10): 957-963.
- Thornton CI, Watson CC, Abt SR, Lipscomb CM and Ullman C, 1999. Laboratory Testing of A-Jacks Units for Inland Applications: Pier Scour Protection Testing. Colorado State University research report for Armortec Inc., February.