

تأثیر تراکم و رقوم کارگذاری قطعات شش‌پایه بر عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی

مسیح ذوالقدر*، محمود شفاعی بچستان^۲، احمد فتحی^۳

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۸

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

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

^۳- استادیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zolghadr.masih@gmail.com

چکیده

بررسی‌ها نشان داده‌است که آبشستگی تکیه‌گاه پل سهم عمده‌ای در تخریب پل‌ها دارد، از این رو حفاظت پل‌ها در مقابل این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. برای پل‌های موجود روش‌های پوششی نظیر سنگ‌چین کاربرد فراوانی دارد و در مناطقی که تأمین سنگ مورد نیاز پرهزینه باشد از بلوک بتنی و یا موارد مشابه استفاده می‌شود. در این مطالعه برای اولین بار کاربرد قطعات بتنی شش‌پایه در آزمایشگاه مطالعه شده‌است. کارگذاری قطعات شش‌پایه در تراکم‌های باز، متوسط و متراکم و همچنین در اعماق زیر بستر، روی بستر و حالت میانی انجام شده است. به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه کارگذاری قطعه شش‌پایه در کنترل آبشستگی تکیه‌گاه پل در شرایط مختلف جریان می‌باشد به‌طوری‌که می‌تواند تا ۸۶ درصد عمق آبشستگی رأس تکیه‌گاه را کاهش دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد بیشینه کاهش عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه در حالت کارگذاری قطعات روی بستر و با تراکم بیشینه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، بستر ماسه‌ای، تکیه‌گاه پل، قطعه شش‌پایه، گرداب اصلی

Effect of Density and Depth of Six-Legged Elements Placement on Rectangular Abutment Scour Depth

M Zolghadr^{1*}, M Shafai Bejestan²

Received: 15 February 2015 Accepted: 20 October 2015

¹PhD. Student of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci.Engin., ShahidChamran Univ. of Ahvaz, Iran

²Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci.Engin., ShahidChamran Univ. of Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: zolghadr.masih@gmail.com

Abstract

The reviews of past researches have shown that abutment scour plays an important role in bridge failures. Hence, protection of bridges against scour is a significant issue. For existing bridges, armoring methods, like riprap, has a wide application. In areas where providing stones is expensive concrete blocks or similar techniques have been applied. In this study for the first time the application of six-legged concrete elements has been experimentally investigated. The six-legged elements have been placed in three different densities (open, medium and dense) and three different placement depths (under the bed, above the bed and medium case). Each alternative has been tested under different flow conditions. Generally, the results proved that the six-legged elements could considerably reduce the scour depth under different flow conditions so as the maximum scour depth of abutment nose was reduced up to 86%. The maximum reduction of scour depth was obtained when the high dense six-legged elements had been placed above the bed.

Keywords: Bridge abutment, Principle vortex, Sand bed, Scour, Six-legged elements

مقدمه

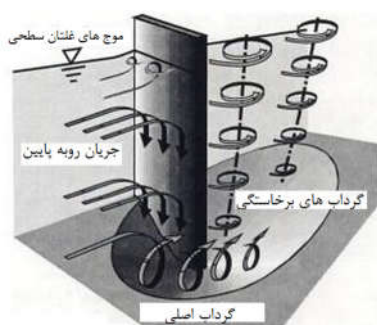
مقابله با آبشستگی پل دو راه کلی وجود دارد. روش اول طراحی پی با عمقی بیش از عمق آبشستگی تعادلی به‌ازای دبی طرح و عدم استفاده از روش‌های حفاظتی است. در این روش، تخمین عمق تعادلی آبشستگی از اهمیت خاصی برخوردار است که توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است (لیم ۱۹۹۷، لیم و چنگ ۱۹۹۸، ملویل و کلن ۲۰۰۰، ریچاردسون و دیویس ۲۰۰۱، الیوتو و هگر ۲۰۰۲، آرنسون و همکاران ۲۰۱۲). روش دوم حفاظت پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل در مقابل آبشستگی است به‌طوری‌که منجر به حذف یا کاهش عمق آبشستگی تعادلی گردد. حفاظت پل در برابر آبشستگی

آبشستگی یک پدیده طبیعی است که به‌واسطه توان فرسایشی جریان در بسترهای آبرفتی با جابجایی ذرات صورت می‌پذیرد (باربویا و دی ۲۰۰۴). ویرانی بسیاری از پل‌ها در ایران و سراسر جهان ناشی از آبشستگی در پی آن‌ها (پایه و تکیه‌گاه) می‌باشد. در مورد تکیه‌گاه‌ها نیز آمار نشان می‌دهد که از ۳۸۳ پل که در آمریکا تخریب شده‌اند، ۷۲ درصد علل تخریب، مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه بوده است (آنداناله ۲۰۰۶). مطالعات ملویل نیز نشان می‌دهد که ۷۰ درصد هزینه‌های شکست پل در نیوزیلند ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است (ملویل ۱۹۹۲). این آمار که نشان‌دهنده سهم آبشستگی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها در تخریب پل‌ها می‌باشد، ضرورت مطالعه در مورد پیش‌بینی آبشستگی و روش‌های محافظت پل در برابر آن را آشکار می‌سازد. به‌منظور

می‌دهد. این گرداب‌ها به وسیله جریان اصلی به سمت پایین دست رانده شده و علاوه بر ایجاد مکش بر ذرات بستر موجب انتقال ذرات بلند شده به وسیله گرداب اصلی و جریان رو به پایین خواهند بود. مطالعات کاون (۱۹۸۸) نشان می‌دهد که سیستم گردابی در جریان‌های عمیق‌تر مستقل از عمق جریان است. به عبارت دیگر حد معینی برای تأثیر عمق جریان بر عمق آبشستگی وجود دارد.

مشاهدات و پژوهش‌های کاون (۱۹۸۴) در زمینه تکیه‌گاه‌های با طول بیشتر (عمود بر جریان) انجام شد که نتایج آن در شکل ۲ دیده می‌شود. در این نوع تکیه‌گاه‌ها، جریان رو به پایین مؤلفه‌ای کم اهمیت‌تر بوده و یک جریان چرخشی آرام با ابعاد نسبتاً بزرگ در بالادست تکیه‌گاه و در نزدیکی آن تشکیل می‌گردد. با توجه به عمق کم جریان (نسبت به طول تکیه‌گاه) در این حالت، جریان تا حدود زیادی دوبعدی می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، آبشستگی در حوالی انتهای تکیه‌گاه، همان‌جایی که گرداب اصلی تمرکز بیشتری دارد، شدیدتر می‌باشد. همچنین حرکت مارپیچی گرداب اصلی باعث ایجاد گرداب ثانویه ضعیفی می‌گردد.

در خلال توسعه چاله آبشستگی در مقابل تکیه‌گاه ذرات بستر به وسیله گرداب اصلی از چاله آبشستگی به سمت پایین دست فرسایش یافته و از آن خارج می‌گردند.



شکل ۱- ساختار جریان در اطراف تکیه‌گاه کوتاه (ملویل و کلمن ۲۰۰۰).

خود به دو دسته روش‌های اصلاح جریان^۱ و روش‌های پوششی^۲ تقسیم‌بندی می‌گردد (سیمارو و همکاران ۲۰۱۲). در روش‌های اصلاح جریان، قدرت جریان رو به پایین و گرداب اصلی که دلایل اصلی آبشستگی هستند، کاهش و یا از محدوده موردنظر دور می‌گردند. الگوی جریان در مجاورت تکیه‌گاه‌ها توسط لو و همکاران (۱۹۶۱) و ونگ (۱۹۸۲) و کاون (۱۹۸۸) تشریح شده‌است. در شکل ۱ الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه نشان داده شده‌است. همان‌طور که دیده می‌شود، ساختار جریان شامل موج‌های غلتان سطحی^۳، جریان رو به پایین^۴، گرداب اصلی^۵ و گرداب برخاستگی^۶ می‌باشد. گرداب اصلی مشابه گرداب نعل اسبی است که در آبشستگی پایه‌ها اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی در تکیه‌گاه‌ها الگوی جریان شبیه به پایه‌ها است. جریان رو به پایین نتیجه برخورد جریان اصلی به تکیه‌گاه می‌باشد. در این حالت فشار رکورد^۷ در نزدیکی سطح آب که میزان کاهش سرعت بیشتر است، بیشینه بوده و به سمت پایین کاهش می‌یابد. نتیجه آن ایجاد گردابیان فشار رو به پایین است که جریان رو به پایین را موجب می‌شود. این جریان رو به پایین پس از برخورد با بستر باعث از جا کندن ذرات می‌شود. ضمن اینکه گرداب عمودی رو به پایین پس از برخورد به بستر به سمت بالا برگشت خورده با مؤلفه اصلی جریان تداخل و گرداب حلزونی شکلی را اطراف تکیه‌گاه تشکیل می‌دهد که ذرات رسوبی بلند شده درون این گرداب افتاده به پائین دست منتقل می‌شوند. با عمیق شدن حفره و اضافه شدن حجم آب داخل حفره این گرداب ضعیف می‌گردد و از تنش‌های وارد به کف کاسته می‌شود. بنابراین جریان رو به پایین و گرداب حلزونی شکل یا گرداب اصلی عوامل پایه‌ای آبشستگی می‌باشند. گرداب‌های برخاستگی نیز ناشی از جدایش جریان از مرزهای جامد تکیه‌گاه می‌باشد که در پایین دست آن رخ

⁵Principle vortex

⁶Wake vortex

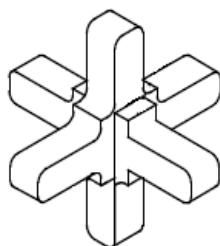
⁷Stagnation pressure

¹Flow altering countermeasures

² Armoring countermeasures

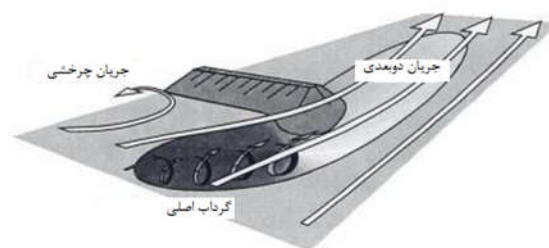
³Surface roller

⁴Down flow



شکل ۳- نمایی از قطعه شش‌پایه.

این قطعات به‌عنوان کنترل فرسایش پنجه ساحل رودخانه‌ها نیز توصیه شده‌اند (تورنتون و همکاران ۲۰۰۱). قرارگیری این قطعات بر روی بستر رودخانه باعث استهلاک انرژی جنبشی جریان و افزایش مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی می‌شود. این قطعات یا به صورت درهم و یا به صورت یکنواخت کنار هم قرار می‌گیرند و از ۶ جهت با قطعات کناری خود قفل می‌شوند در نتیجه به صورت یکپارچه عمل می‌کنند. قطعات شش‌پایه با جلوگیری از ایجاد چاله فرسایشی گرداب اصلی را حذف یا تضعیف می‌نمایند. این قطعات ضمن ایجاد پوشش و افزایش ضریب مانینگ تا حدود ۰/۱ امکان رشد پوشش گیاهی در بینابین پایه‌ها را فراهم کرده و به حفظ طبیعی ساحل رودخانه نیز کمک می‌کنند. دلیل انتخاب تکیه‌گاه با دیواره قائم نیز این است که قوی‌ترین سیستم گردابی را در مقایسه با سایر انواع تکیه‌گاه‌ها ایجاد کرده و می‌تواند به‌عنوان یک حالت بحرانی و به‌منظور طراحی در نظر گرفته شود (کوردوسو و فاعل ۲۰۰۹). در مورد قطعات شش‌پایه مطالعات اندکی از دیدگاه سازه‌ای و هیدرولیکی انجام شده که در مطالعات هیدرولیکی عموماً به کاربرد آن‌ها در حفاظت سواحل دریاها به‌عنوان موج‌شکن، و تا حدودی به حفاظت کناره رودخانه‌ها و پایه پل پرداخته شده است. در سال ۱۹۹۹ سه مطالعه همزمان در دانشگاه ارگان در رابطه با قطعات شش‌پایه صورت پذیرفت. پایداری قطعات شش‌پایه در برابر انواع موج‌ها در حالتی که بر روی موج شکن سنگی قرار گرفته‌اند توسط لبارون (۱۹۹۹) مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در پژوهش دیگر نیروهای وارده از طرف موج بر



شکل ۲- ساختار جریان در اطراف تکیه‌گاه‌های بلند

(ملویل و کلمن ۲۰۰۰).

استفاده از طوق، سرریزهای مستغرق، دیوارهای موازی، آبشکن محافظ و صفحات مستغرق از جمله روش‌های اصلاح الگوی جریان هستند که توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است (شجاعی و همکاران ۱۳۹۱، عبدالله‌پور و همکاران ۱۳۹۲، خادمی و شفاعی بجستان ۱۳۹۳، خزیمه‌نژاد و همکاران ۱۳۹۳، رادیس و داوری ۲۰۱۴). در روش‌های پوششی که موضوع اصلی این تحقیق است، یک مانع صلب که عموماً قطعات سنگین وزنی بوده تا به سادگی توسط جریان آب جابجا نگردند، در مقابل تکیه‌گاه یا پایه کارگذاری می‌شوند. مثل کارگذاری سنگ‌چین، توریسنگ، قطعات بتنی، ژئوبگ و غیره که توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها عموماً تعیین اندازه قطعات، گستردگی پوشش و دیگر ویژگی‌های هندسی آن می‌باشد (اتما ۱۹۸۰، ونگ ۱۹۸۲، دانگل ۱۹۹۴، لاگاس و همکاران ۲۰۰۹، تفرج نوروز و همکاران ۲۰۱۰، منصور و شفاعی بجستان ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲). در مناطقی که تهیه قطعات سنگی مورد نیاز پر هزینه باشد از قطعات بتنی می‌توان استفاده کرد. یکی از قطعات بتنی که در سال‌های اخیر در سازه‌های دریائی مورد استفاده قرار گرفته است قطعات شش‌پایه با نام تجاری a-jacks می‌باشند. هر یک از این قطعات از دو قطعه بتن [شکل که در وسط به هم متصل هستند تشکیل شده که در نتیجه دارای شش‌پایه می‌باشد] (شکل ۳).

آبشستگی تکیه‌گاه پل، آزمایشات در فلوم تحقیقاتی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران برپا شدند. آزمایشات در فلومی از پوشش پلاکسی گلس به-طول ۱۰ متر و عرض ۱ متر و عمق ۰/۶ متر و شیب کف ۰/۰۰۳ انجام گرفته است. در ابتدای فلوم یک صفحه مشبک جهت آرام کردن جریان و جلوگیری از ایجاد امواج ناشی از نوسانات پمپ تعبیه شده است. در فاصله ۴ متر از ابتدای فلوم یک جعبه رسوبی به عرض ۷۰ و طول ۱۸۰ سانتی‌متر تعبیه شده، فاصله جعبه رسوبی از ابتدای فلوم جهت اطمینان از ایجاد جریان توسعه یافته در نظر گرفته شده است. درون جعبه رسوبی رسوبات ماسه ای یکنواخت با اندازه متوسط ۰/۶۵ میلی‌متر تراز گردیده‌اند. انتخاب این اندازه از رسوبات بر این اساس بوده که با توجه به محدوده دبی که می‌تواند در فلوم برقرار گردد اولاً آبشستگی به‌وجود آمده و از سوی دیگر فرم‌های بستر تشکیل نگردند. در انتهای فلوم نیز یک سرریز لبه تیز مستطیلی جهت تنظیم سطح آب در فلوم قرار دارد. قبل از ورود آب به مخزن یک سرریز مثلثی جهت اندازه‌گیری و تنظیم دبی نصب شده است. آب از مخزن توسط یک پمپ سانتریفیوژ با دبی بیشینه ۱۰۰ لیتر بر ثانیه به فلوم پمپ می‌گردد. شکل ۴ نشان‌دهنده فلوم و تجهیزات آن می‌باشد.

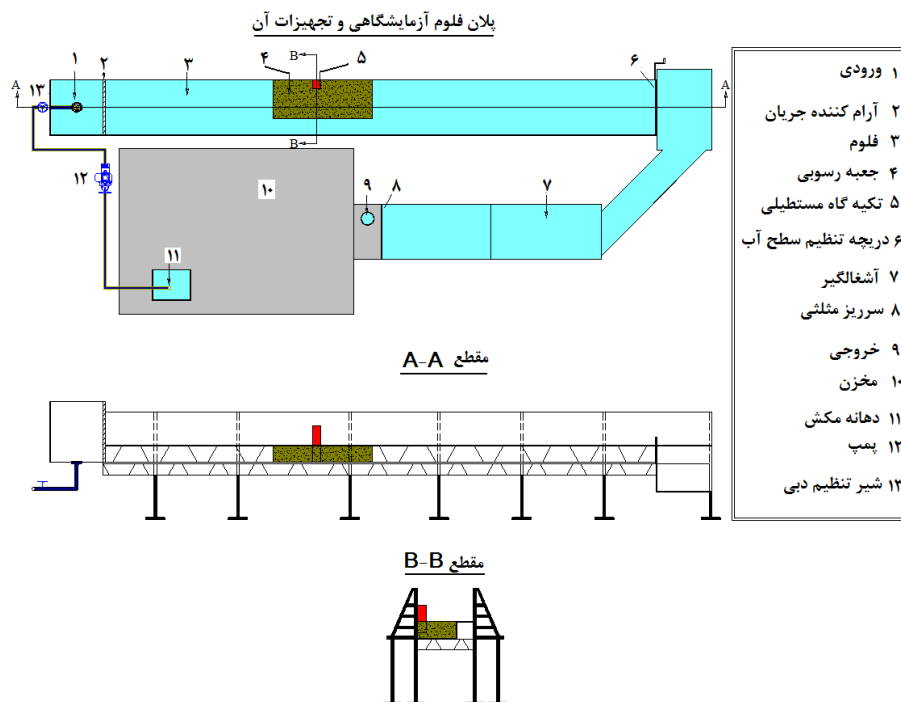
عمق جریان در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۱۲ سانتی‌متر بوده و چهار عدد فرود مختلف به‌عنوان شرایط هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مشخصات این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه از نوع مستطیلی (با دیوار قائم) و از جنس گالوانیزه با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر با ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتی‌متر بوده که در فاصله ۷۱ سانتی‌متری ابتدای جعبه رسوبی نصب شده است. طبق طبقه‌بندی ملویل (۱۹۹۲)، با توجه به عمق جریان و ابعاد گفته شده تکیه‌گاه مورد آزمایش جزو تکیه‌گاه‌های با طول متوسط قرار می‌گیرد که در این نوع تکیه‌گاه‌ها عمق آبشستگی به‌طور هم‌زمان تابعی از طول تکیه‌گاه و عمق جریان است.

قطعات شش‌پایه به‌صورت فیزیکی و عددی شبیه‌سازی شدند (وایز ۱۹۹۹). ضرایب خیز، افت و انعکاس موج برای قطعات شش‌پایه با روش آزمایشگاهی نیز در یک مطالعه دیگر تعیین گردیدند (ریبکی ۱۹۹۹). در همین سال یک مطالعه سازه‌ای نیز بر روی قطعات شش‌پایه جهت بررسی پیش‌آن‌ها تحت بارهای استاتیکی قائم در همان دانشگاه انجام پذیرفت (مایکل ۱۹۹۹). از جمله دیگر مطالعات هیدرولیکی که بر روی قطعات بتنی شش‌پایه صورت گرفته می‌توان به گزارش دو مرحله‌ای ارائه شده به اداره حفاظت آب و خاک آمریکا توسط آزمایشگاه هیدرولیک مانلی در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ اشاره نمود که به‌ترتیب به‌منظور مقایسه قطعات شش‌پایه با سایر انواع موج شکن به روش آزمایشگاهی و اصلاح ابعاد قطعه شش‌پایه با هدف بهبود کارکرد آن به‌عنوان موج شکن ارائه گردیده‌اند (جیواردن ۲۰۰۹ و ۲۰۰۳). تنها گزارشی که در زمینه کاربرد این قطعات در کنترل آبشستگی منتشر شده است نتایج آزمایش‌هایی است که توسط تورنتن و همکاران (۱۹۹۹ الف و ب) برای پایه پل در بستر ماسه‌ای انجام دادند و میزان کاهش عمق آبشستگی را با کاربرد قطعات شش‌پایه ۷۰ تا ۹۵ درصد گزارش دادند و توصیه کردند که این قطعات باید به‌همراه فیلتر ژئوتکستایل و یا قرارگیری قطعات سنگ بین آن‌ها استفاده شود.

با توجه به مزایای قطعات شش‌پایه و با در نظر گرفتن اینکه تاکنون مطالعات در زمینه کاربرد این قطعات بسیار محدود و در خصوص تکیه‌گاه پل نیز گزارشی منتشر نشده، این مطالعه صورت گرفته است. در این مطالعه تراکم قرارگیری قطعات و نیز عمق کارگذاری این قطعات مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی کارکرد قطعه شش‌پایه در کنترل



شکل ۴- فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن.

آزمایش شامل دبی جریان، عمق جریان، و توپوگرافی بستر بوده که به ترتیب به وسیله سرریز مثلثی، سطح-سنج^۸ و متر لیزری مورد اندازه گیری قرار گرفته اند. معمولاً برای بررسی عمق آبشستگی و ارائه روابطی برای پیش بینی آن باید مدت زمان هر آزمایش برابر زمان تعادل و یا مدت زمانی که در آن عمق آبشستگی تغییرات اندکی پس از یک مدت زمان مشخص داشته باشد ادامه یابد که این زمان بین ۲ ساعت (بوزیکوس و عثمان ۲۰۰۴) تا ۹۶ ساعت (کوتیاری و همکاران ۱۹۹۲) ذکر شده است. از آنجا که هدف این تحقیق بررسی عمق آبشستگی در گزینه های مختلف می باشد و نه ایجاد رابطه برای پیش بینی عمق آبشستگی، مدت زمان مورد نیاز آزمایش با توجه به این موضوع تعیین گردید. بدین منظور که ابتدا آزمایش های ۱۲ ساعته در اعداد فرود مختلف انجام شده و تغییرات درصد عمق نهایی آبشستگی در مقابل زمان ترسیم شد (شکل ۵).

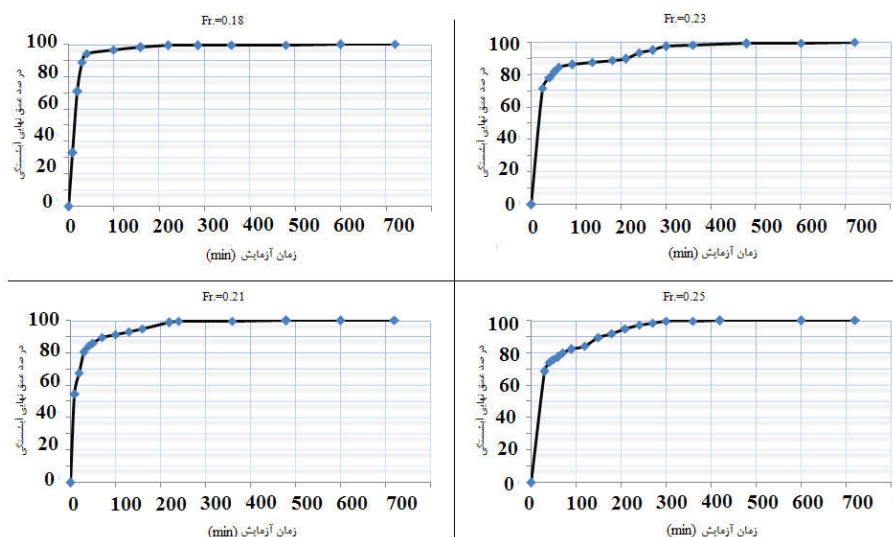
کلیه آزمایش ها در شرایط آب زلال انجام شده ($u/u_c < 1$) که u سرعت متوسط جریان و u_c سرعت بحرانی یا سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی می باشد) و رژیم جریان متلاطم و زیر بحرانی بوده است. مقدار سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی به وسیله آزمایش در بستر تراز شده و بدون حضور تکیه گاه تعیین گردیده است. بدین منظور ابتدا فلوم به تدریج از جریان پر شده به طوری که رسوبات حرکتی نداشته باشند و پس از رسیدن عمق جریان به مقداری ثابت با افزایش دبی جریان سرعت به تدریج افزایش یافته است. این آزمایش ها چندین بار انجام شده و سرعتی که در آن شروع حرکت یک یا چند ذره رسوب با چشم دیده شود به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته می شود (شفاعی ۱۳۸۷). میانگین مقادیر به دست آمده از این آزمایش ها معادل $0/3$ متر بر ثانیه بوده که به عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب پارامترهای اندازه گیری شده در هر

⁸Point-gage

مدت زمانی که بیش از ۹۰ درصد آبشستگی ۱۲ ساعته اتفاق افتاده است به عنوان زمان آزمایش‌ها تعیین گردید که برابر ۴ ساعت به دست آمد.

جدول ۱- ویژگی‌های آزمایش‌های انجام شده.

آزمایش	دبی (Ls^{-1})	عمق جریان (cm)	عدد فرود	سرعت جریان ($cm s^{-1}$)	سرعت/سرعت بحرانی
۱	۲۳/۴	۱۲	۰/۱۷۹	۱۹/۵	۰/۶۵
۲	۲۷	۱۲	۰/۲۰۸	۲۲/۵	۰/۷۵
۳	۳۰/۶	۱۲	۰/۲۳۵	۲۵/۵	۰/۸۵
۴	۳۲/۴	۱۲	۰/۲۵۰	۲۷	۰/۹۰
۴	۳۲/۴	۱۲	۰/۲۵۰	۲۷	۰/۹۰



شکل ۵- تغییرات عمق آبشستگی به صورت درصدی از عمق نهایی آن نسبت به زمان.

شبکه برداشت در محل‌های مورد نیاز متراکم‌تر شده است.

تراکم و رقوم مختلف کارگذاری قطعه شش پایه

به منظور بررسی تأثیر تراکم قطعه شش پایه در مهار آبشستگی اطراف تکیه‌گاه، ۳ تراکم باز، متوسط (نیمه‌متراکم) و متراکم در نظر گرفته شدند. شکل ۶ نشان‌دهنده تراکم‌های مذکور می‌باشد. هرچه قطعات متراکم‌تر در کنار یکدیگر قرار گیرند، از طرفی پایداری مجموعه آن‌ها افزایش یافته و سطح بیشتری از بستر را

آزمایش‌های شاهد (بدون حضور قطعات شش پایه)

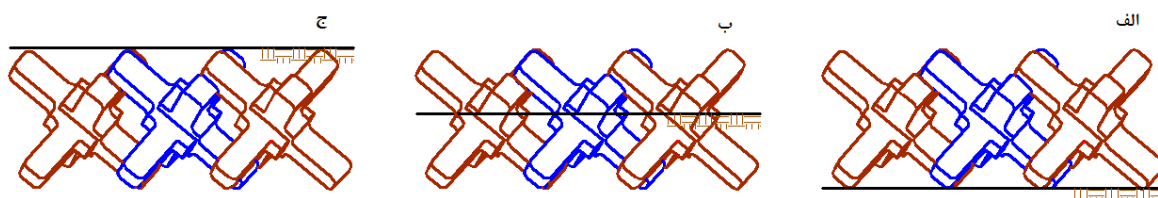
در ابتدا آزمایش‌های شاهد با کارگذاری تکیه‌گاه، بدون حضور قطعات شش پایه در چهار عدد فرود مختلف طبق جدول ۱ انجام گردید. قبل از انجام هر آزمایش بستر به وسیله ماله و قوطی فلزی کاملاً تسطیح گردید و سپس با متر لیزری کنترل شده است. پس از اتمام آزمایش نیز توپوگرافی بستر با متر لیزری در شبکه ۳ در ۳ سانتی‌متر برداشت گردیده است. البته به تناسب پستی بلندی بستر

سطح بستر و در حالت متراکم (T_3) ۹۷٪ سطح بستر به-
وسيله قطعات شش‌پایه پوشانده شده است. این اعداد به-
وسيله اندازه‌گیری سطوح پوشش شده در هر تراکم به-
دست آمده است.

پوشش می‌کنند و از طرف دیگر تعداد قطعات مورد نیاز
در واحد سطح افزایش می‌یابد. در حالت با تراکم باز (T_1)
حدوداً ۵۴٪ سطح بستر، در حالت نیمه متراکم (T_2) ۷۶٪



شکل ۶- تراکم‌های مختلف کارگذاری قطعات شش‌پایه.



شکل ۷- رقوم مختلف کارگذاری قطعات شش‌پایه: الف) روی بستر D_1 ، ب) عمق میانی D_3 ، ج) زیر بستر D_2 .

شکل ۸ نمونه کارگذاری قطعات شش‌پایه اطراف
تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. پس از اتمام هر آزمایش
به منظور برداشت توپوگرافی بستر، در حالتی که قطعات
بر روی بستر قرار داشتند به آرامی برداشته شده‌اند،
به طوری که منجر به بر هم ریختن بستر و ایجاد تغییرات
در آن نگردد. در حالتی که قطعات در زیر بستر قرار
داشتند و یا در زیر رسوبات مدفون گردیده‌اند به منظور
اجتناب از بر هم ریخته شدن بستر، خارج نگردیده‌اند.

نتایج و بحث

در آزمایش‌های شاهد با افزایش عدد فرود جریان
و نزدیک شدن سرعت جریان به سرعت بحرانی، عمق
آبشستگی و ابعاد حفره آبشستگی اطراف تکیه‌گاه افزایش
می‌یابد. همچنین در کلیه حالات بیشینه عمق آبشستگی
در گوشه بالادست تکیه‌گاه رخ داده است، بنابراین همین
نقطه به عنوان مبنای اندازه‌گیری بیشینه عمق آبشستگی



شکل ۸- کارگذاری قطعات شش‌پایه در اطراف
تکیه‌گاه پل در فلوم آزمایشگاهی در حالت متراکم بر روی
بستر.

به منظور بررسی تأثیر رقوم کارگذاری قطعات
شش‌پایه در مهار آبشستگی اطراف تکیه‌گاه کارگذاری
قطعات در سه عمق مختلف روی بستر (D_1)،
بستر (D_2) و بین این دو عمق (D_3) مطابق شکل ۷ انجام
پذیرفته است.

بالادست تکیه‌گاه واقع بوده، در اعماق و تراکم کارگذاری مختلف به‌طور متفاوت نسبت به آزمایش‌های شاهد کاهش یافته است.

در نظر گرفته شده است. عمق آبشستگی در انتهای آزمایش‌های شاهد اول تا چهارم به ترتیب ۳۷ و ۵۵ و ۶۵ و ۹۵ میلی‌متر بوده است. جدول ۲ خلاصه نتایج آزمایش‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های این جدول عمق آبشستگی بیشینه که در گوشه

جدول ۲- عمق آبشستگی رأس تکیه‌گاه (mm) ds در تراکم و اعماق مختلف کارگذاری.

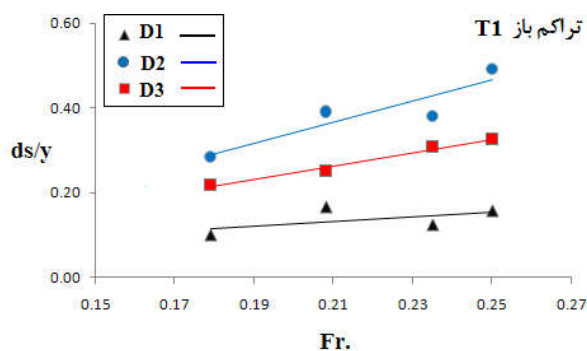
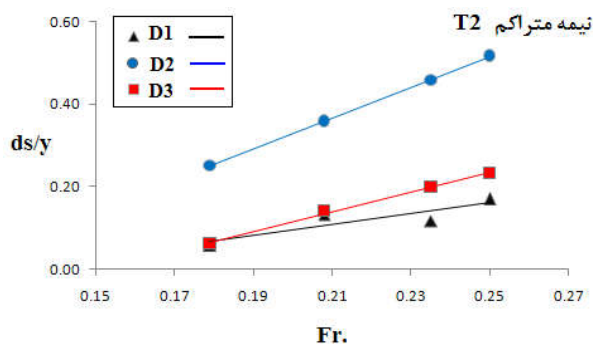
عمق کارگذاری	تراکم قطعات	روی بستر ₁ D ₁	زیر بستر ₂ D ₂	عمق میانه ₃ D ₃	عدد فرود
عمق کارگذاری T ₁	تراکم کم	۹	۳۴	۲۶	۰/۱۷۹
		۲۰	۴۵	۳۰	۰/۲۰۸
		۱۵	۴۴	۳۷	۰/۲۳۵
		۱۹	۵۹	۳۹	۰/۲۵۰
عمق کارگذاری T ₂	تراکم متوسط	۷	۳۰	۷	۰/۱۷۹
		۱۶	۴۳	۱۷	۰/۲۰۸
		۱۴	۵۵	۲۴	۰/۲۳۵
		۲۲	۶۲	۲۸	۰/۲۵۰
عمق کارگذاری T ₃	تراکم زیاد	۶	۲۱	۷	۰/۱۷۹
		۱۱	۲۷	۱۵	۰/۲۰۸
		۱۲	۳۴	۲۰	۰/۲۳۵
		۱۳	۴۷	۲۳	۰/۲۵۰

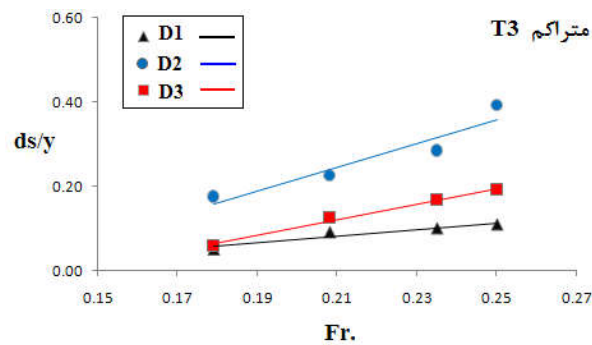
نشان می‌دهد رجوع نمود. طبق شکل‌های ۹ تا ۱۱ در هر تراکم دلخواه، منحنی مربوط به عمق کارگذاری D₁ یا عمق روی بستر کمترین مقادیر آبشستگی نسبی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در هر تراکم چنانچه قطعات بر روی بستر قرار گیرند بیشترین تأثیر در کنترل آبشستگی را خواهند داشت. علت این موضوع رامی‌توان به تأثیر زبری قطعات ربط داد که در این عمق از آنجایی که کل قطعه بر روی بستر نمایان است، اثر زبری بیشتر از سایر عمق‌ها بوده و منجر به کنترل جریان رو به پایین در مجاورت تکیه‌گاه می‌گردد.

به‌منظور درک بهتر از درصد تأثیر آرایش‌های مختلف در مهار آبشستگی رأس تکیه‌گاه مستطیلی جدول ۳ نتایج آزمایش‌های انجام شده را به‌صورت درصد کاهش آبشستگی رأس تکیه‌گاه نشان می‌دهد. طبق این جدول کارگذاری قطعات شش پایه بسته به نوع تراکم و عمق کارگذاری آن‌ها بین ۸ تا ۸۶ درصد عمق آبشستگی رأس تکیه‌گاه را کاهش داده است. به‌منظور بررسی تأثیر رقوم کارگذاری مختلف در کاهش آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه در یک تراکم معین می‌توان به اشکال ۹ تا ۱۱ که تغییرات آبشستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود (Fr.) را به ترتیب برای تراکم‌های باز، نیمه‌متراکم و متراکم

جدول ۳- درصد کاهش عمق آبخستگی رأس تکیه‌گاه در تراکم و اعماق مختلف کارگذاری (%).

عمق کارگذاری	عدد فرود	تراکم		
		عمق D3	زیر D2	روی بستر D1
T ₁ تراکم کم	۰/۱۷۹	۳۰	۸	۷۶
	۰/۲۰۸	۴۵	۱۸	۶۴
	۰/۲۳۵	۴۳	۳۲	۷۷
	۰/۲۵۰	۵۹	۳۸	۸۰
T ₂ تراکم متوسط	۰/۱۷۹	۸۱	۱۹	۸۱
	۰/۲۰۸	۶۹	۲۲	۷۱
	۰/۲۳۵	۶۳	۱۵	۷۸
	۰/۲۵۰	۷۱	۳۵	۷۷
T ₃ تراکم زیاد	۰/۱۷۹	۸۱	۴۳	۸۴
	۰/۲۰۸	۷۳	۵۱	۸۰
	۰/۲۳۵	۶۹	۴۸	۸۲
	۰/۲۵۰	۷۶	۵۱	۸۶

شکل ۹- تغییرات آبخستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود (Fr.) در تراکم باز (T₁) و اعماق کارگذاری مختلف.شکل ۱۰- تغییرات آبخستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود (Fr.) در حالت نیمه متراکم (T₂) و اعماق کارگذاری مختلف.



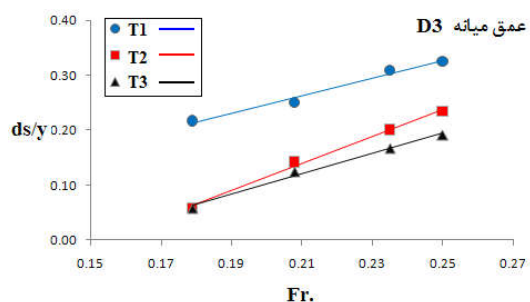
شکل ۱۱- تغییرات آبشستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود (Fr) در حالت متراکم (T_3) و اعماق کارگذاری مختلف.

خلاف انتظار عمق آبشستگی نسبی کمتر شده است. مثلاً همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل ۹ و در عمق روی بستر یا D_1 ، در عدد فرود دوم آبشستگی نسبی بیشتر از عدد فرود سوم و چهارم است. علت این پدیده را می‌توان به امکان حرکت قطعات شش پایه در تراکم باز ارتباط داد. به طوری که در تراکم باز با ایجاد حفره آبشستگی در مجاورت رأس تکیه‌گاه بسته به ابعاد و توپوگرافی آن که خود متأثر از شرایط هیدرولیکی جریان است، با خالی شدن زیر اولین قطعه شش پایه در مجاورت حفره، قطعه به داخل آن تمایل پیدا نموده و تا حدودی روند آبشستگی را کندتر می‌نماید. اما در حالت متراکم قطعات داخل یکدیگر کاملاً درگیر شده و امکان جابجایی زیاد آنها، میسر نخواهد بود. در ارتباط با رقوم کارگذاری پوشش حفاظتی مطالعات محدود دیگری توسط دیگران پژوهشگران نظیر لاجلان (۱۹۹۹) و ملویل و کلمن (۲۰۰۰) در مورد حفاظت پایه پل به وسیله سنگ چین و در شرایط بستر زنده انجام شده است. آنها پیشنهاد کردند که در حالی که فرم بستر وجود دارد، رقوم کارگذاری لایه سنگ چین در حداقل رقوم دونه‌ها قرار گیرد تا از تخریب لایه سنگ چین جلوگیری شود. این مطالعات با هدف بررسی تأثیر رقوم کارگذاری لایه سنگ چین بر پایداری آن و جلوگیری از زیرشویی آن به وسیله فرم‌های بستر در مجاورت پایه انجام شده است. در حالی که در مطالعه حاضر تأثیر رقوم کارگذاری قطعات شش پایه بر کنترل آبشستگی تکیه‌گاه پل و در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفته است.

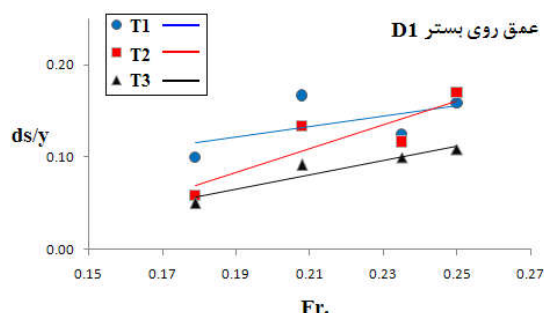
در مورد عمق کارگذاری D_2 یا عمق زیر بستر با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت در هر تراکم دلخواه، منحنی مربوطه بیشترین مقادیر آبشستگی نسبی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر عمق آبشستگی در این عمق کارگذاری از سایر حالات بیشتر خواهد بود. چراکه در این حالت قطعات در زیر بستر مدفون بوده و زبری آنها نقشی در کنترل آبشستگی ایفا نمی‌کند. گرچه وقوع آبشستگی که منجر به پدیدار شدن قطعه می‌گردد در طی گذشت زمان می‌تواند تأثیر زبری نسبت به شروع آزمایش را بیشتر کند.

در عمق کارگذاری D_3 یا عمق میانه مقادیر آبشستگی نسبی در بین منحنی تغییرات دو عمق کارگذاری دیگر قرار می‌گیرد. علت این پدیده را مانند حالات قبل می‌توان به زبری قطعه نسبت داد. در عمق کارگذاری D_3 نیمی از قطعه بر روی بستر نمایان است و تأثیر زبری و انحراف جریان رو به پایین آن از عمق D_1 کمتر و از عمق D_2 بیشتر است. بنابراین انتظار می‌رود اثر آن بر کنترل آبشستگی نیز متوسطی از دو عمق دیگر باشد.

در مورد روند کلی تغییرات منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های ۹ تا ۱۱ همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای هر خط برازش داده شده دلخواه با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی نسبی نیز افزایش می‌یابد. در حالت تراکم باز (شکل ۹)، و تا حدودی نیمه-متراکم (شکل ۱۰) با وجود اینکه روند کلی تغییرات صعودی است، در مقاطعی با افزایش عدد فرود جریان بر



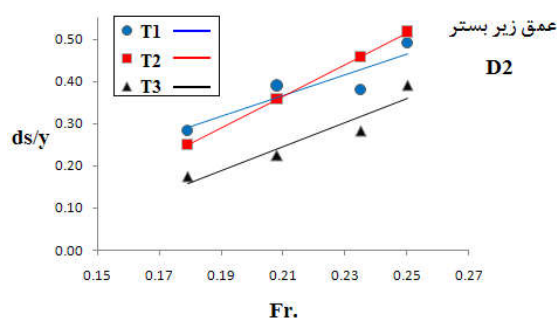
شکل ۱۴- تغییرات آبشستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود ($Fr.$) در عمق کارگذاری میانه (D_3) و در تراکم‌های مختلف.



شکل ۱۲- تغییرات آبشستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود ($Fr.$) در عمق کارگذاری روی بستر (D_1) و در تراکم‌های مختلف.

همان‌طورکه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مشاهده می‌گردد، با وجود اینکه روند کلی تغییرات هر نمودار افزایشی است، به صورت مقطعی در برخی از نقاط با افزایش عدد فرود جریان عمق آبشستگی نسبی برخلاف انتظار کاهش یافته است. مثلاً در عمق D_1 (شکل ۱۲) عمق آبشستگی نسبی در عدد فرود سوم در تراکم‌های T_1 و T_2 کمتر از عدد فرود دوم می‌باشد. این پدیده در عمق D_2 (شکل ۱۳) و تراکم T_1 نیز مشاهده می‌گردد که باعث ایجاد تقاطع در نمودارهای مربوطه شده است. علت این پدیده مانند قبل چرخش قطعات شش‌پایه به داخل حفره آبشستگی در تراکم‌های کمتر می‌باشد. درحالی‌که در حالت متراکم یا T_3 به علت درگیر شدن قطعات با یکدیگر و عدم امکان جابجایی آن‌ها، روند افزایشی مقادیر آبشستگی نسبی در مقابل عدد فرود حفظ گردیده است. در مطالعات قبلی انجام شده به وسیله تورنتون و همکاران (۱۹۹۹ الف و ب)، تأثیر کارایی قطعات شش‌پایه در حفاظت پایه پل فقط در حالت متراکم بیشینه (و در سطح بستر) مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر سه نوع تراکم مختلف بررسی شده که می‌تواند ارائه‌دهنده گزینه‌های مختلف طراحی عمق پی تکیه‌گاه باشد. انتقال قطعات شش‌پایه به داخل حفره آبشستگی که با توجه به شکل ظاهری آن‌ها همراه با چرخش می‌باشد می‌تواند به عنوان نوعی مکانیزم شکست تحت عنوان

به منظور بررسی تاثیر تراکم و درگیر شدن قطعات شش‌پایه در یک عمق کارگذاری معین، بر عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه می‌توان به شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ رجوع نمود. در این اشکال تغییرات آبشستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود ($Fr.$) به ترتیب برای اعماق کارگذاری روی بستر، زیربستر و عمق میانه نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تغییرات آبشستگی نسبی (ds/y) در برابر عدد فرود ($Fr.$) در عمق کارگذاری زیر بستر (D_2) و در تراکم‌های مختلف.

روند کلی تغییرات آبشستگی نسبی در یک تراکم معین در هر عمق کارگذاری دلخواه با افزایش عدد فرود جریان، افزایشی است. طبق شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ کمترین مقادیر آبشستگی نسبی در هر عمق کارگذاری دلخواه مربوط به حالت متراکم یا T_3 می‌باشد.

دریافت که با وجود اینکه عمق و ابعاد حفره آبشستگی دماغه تکیه‌گاه کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته، آبشستگی در قسمت مرکزی کانال تشدید شده است. به عبارت دیگر قطعات شش‌پایه ضمن حفاظت از سازه در محل مورد نظر، تمایل به دور کردن آبشستگی به سمت پایین‌دست و مرکز کانال دارد که این موضوع در اعداد فرود بزرگتر بیشتر قابل ملاحظه می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان به ارتفاع قطعات نسبت به سطح بستر مرتبط دانست. در آزمایش‌های انجام شده ارتفاع قطعات شش‌پایه از سطح بستر ۳/۵ سانتی‌متر بوده که کمتر از یک سوم عمق جریان (۱۲ سانتی‌متر) می‌باشد. همچنین با توجه به این شکل ابعاد حفره آبشستگی نیز در پایین‌دست دچار تغییراتی گشته است. به طوری‌که با کارگذاری قطعات از یک سو پهنای حفره آبشستگی کمتر و از سوی دیگر طول آن در جهت جریان افزایش یافته است. این موضوع نیز در اعداد فرود بالاتر، بهتر قابل مشاهده است. در جدول ۴، مقادیر عمق آبشستگی مرکز کانال نسبت به دماغه تکیه‌گاه در آزمایش‌های شاهد و ارزیابی قابل مقایسه است. پدیده انتقال نقطه آبشستگی با عمق بیشینه از رأس تکیه‌گاه، عموماً در روش‌های اصلاح الگوی جریان مشاهده می‌گردد.

چرخش^۹ در نظر گرفته شود. این نوع مکانیزم شکست برای پوشش‌هایی نظیر بلوک‌های بتنی مهار شده با کابل^{۱۰} توسط برتولدی (۱۹۹۴) مورد بررسی قرار گرفته است.

به طور کلی کمترین مقادیر آبشستگی نسبی مربوط به حالتی است که قطعات بر روی بستر در حالت متراکم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر مشاهدات صورت گرفته در حین آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در این حالت قطعات شش‌پایه علاوه بر نقش پوششی، منجر به انحراف جریان به مرکز کانال نیز می‌گردند که منجر به افزایش عمق آبشستگی در مرکز و پایین‌دست تکیه‌گاه خواهد شد. شکل ۱۵ نشان‌دهنده توپوگرافی بستر در پایان آزمایش‌های شاهد و DIT₃ (قطعات روی بستر با تراکم بیشینه) می‌باشد. ردیف بالا نشان‌دهنده آزمایش‌های شاهد و ردیف پایین نشان‌دهنده آزمایش‌های ارزیابی است. از مقایسه آزمایش‌های شاهد و ارزیابی در شکل ۱۵ می‌توان دریافت که به‌ویژه در اعداد فرود کمتر یعنی ۰/۱۷۹ و ۰/۲۰۸ آبشستگی به‌طور چشمگیری مهار شده و سطح بستر در پایین‌دست پل نیز تقریباً بدون تغییر یا با تغییرات اندک باقی مانده است. اما در مورد اعداد فرود بالاتر یعنی ۰/۲۳۵ و ۰/۲۵۰ می‌توان

جدول ۴- خلاصه نتایج آزمایش‌های DIT₃ (قطعات بر روی بستر با تراکم بیشینه).

عمق آبشستگی رأس تکیه‌گاه (mm)					
عمق آبشستگی مرکز کانال (mm)	درصد کاهش عمق آبشستگی	آزمایش ارزیابی	آزمایش شاهد	عدد فرود	آزمایش
ناچیز	۸۴	۶	۳۷	۰/۱۷۹	۱
ناچیز	۸۰	۱۱	۵۵	۰/۲۰۸	۲
۴۱	۸۲	۱۲	۶۵	۰/۲۳۵	۳
۵۰	۸۶	۱۳	۹۵	۰/۲۵۰	۴

بستر اولیه مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که کارگذاری طوقه‌های سطحی منجر به انتقال بیشینه عمق آبشستگی از رأس تکیه‌گاه می‌گردد. جانسون و همکاران

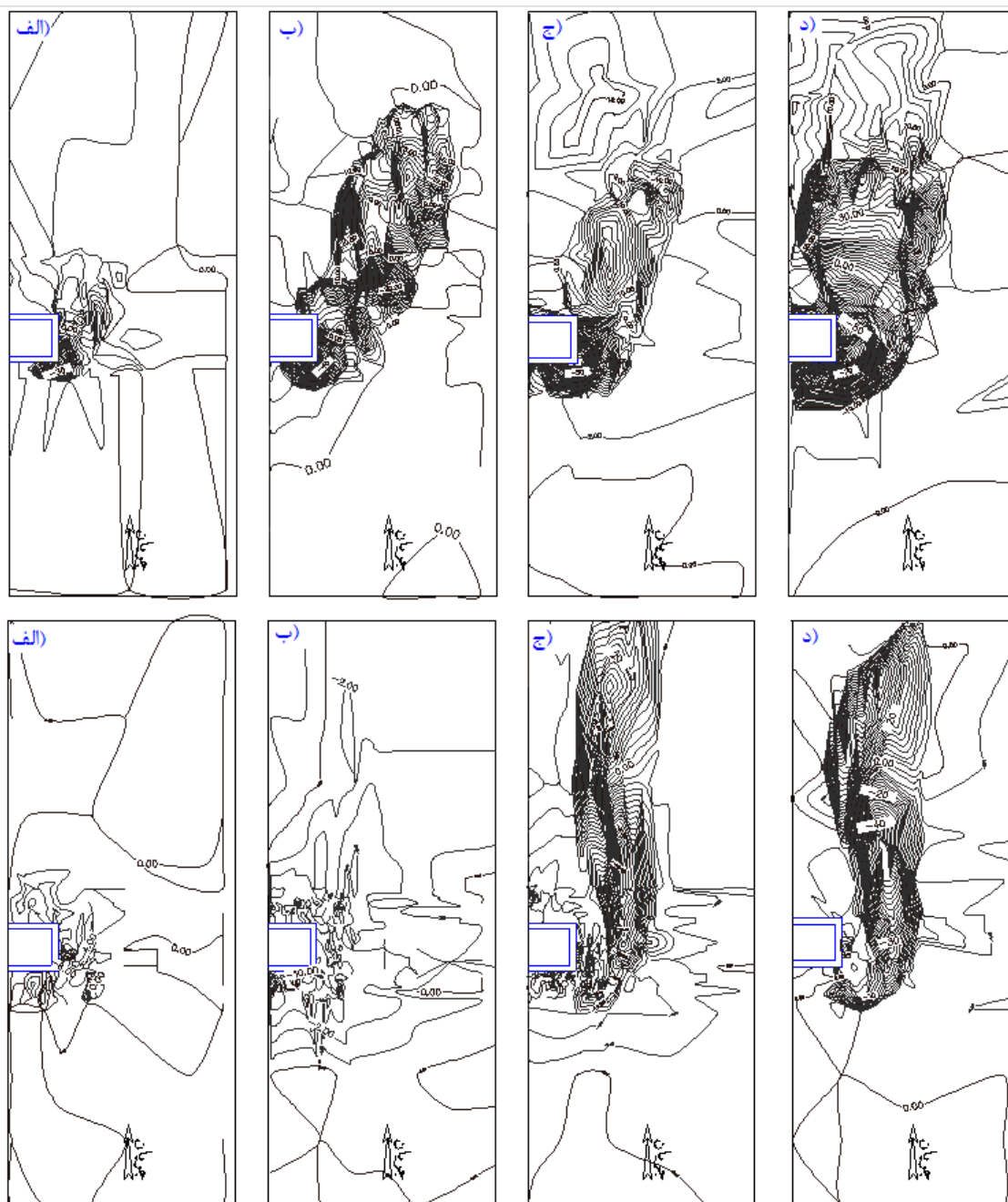
خزیمه نژاد (۱۳۹۱) مختصات و زاویه قرارگیری نقطه آبشستگی با عمق بیشینه را نسبت به رأس تکیه‌گاه مستطیلی در رقوم‌های مختلف نصب طوقه نسبت به

¹⁰Cable tied blocks

⁹Overturning

(۲۰۰۱) ضمن بررسی تأثیر کارگذاری صفحات مستغرق بر مهار آبشستگی تکیه‌گاه مستطیلی نشان دادند که بسته به زاویه و موقعیت قرار گیری صفحات، نقطه دارای بیشینه عمق آبشستگی به پایین دست انتقال می‌یابد. همچنین بیشینه عمق آبشستگی حاصل از چهار

آزمایش شاهد این تحقیق با روابط لیم (۱۹۹۷) و ازالدین و همکاران (۲۰۰۷) مقایسه گردید که میزان خطا به طور متوسط در مقایسه با رابطه لیم (۱۹۹۷) ۰/۵ تا ۲۶ درصد و در مقایسه با رابطه ازالدینو همکاران (۲۰۰۷) ۷ تا ۲۷ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱- وضعیت کلی توپوگرافی بستر در پایان آزمایش، ردیف بالا آزمایش‌های شاهد و ردیف پایین آزمایش‌های

Fr=۰/۱۷۹ (الف: D₁T₃) (ب Fr=۰/۲۰۸ (ج Fr=۰/۲۳۵ (د Fr=۰/۲۵۰.

نتیجه‌گیری کلی

وضعیتی است که در آن قطعات به‌صورت متراکم بر روی سطح بستر قرار می‌گیرند. در این حالت کارگذاری قطعات علاوه بر ایجاد پوشش در محل تکیه‌گاه به‌واسطه ارتفاع مختصری که ناشی از کارگذاری آن‌ها بر روی بستر می‌باشد با تغییراتی در الگوی جریان باعث دور شدن آبشستگی از محل تکیه‌گاه به سمت پایین دست و مرکز کانال می‌گردد. فرم کلی حفره آبشستگی نیز دچار تغییراتی شده، به طوری که عرض حفره کمتر و طول آن در جهت جریان بیشتر می‌گردد.

تشکر و قدردانی

هزینه‌های این مطالعه از محل پژوهانه نویسنده دوم تأمین شده است که بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود.

در این مطالعه قطعات بتنی شش‌پایه در مهار آبشستگی موضعی در محل تکیه‌گاه پل با دیواره قائم مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایش‌هایی در فلوم تحقیقاتی و در حضور تکیه‌گاه مستطیلی (با دیوار قائم) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که کارگذاری قطعات بتنی شش‌پایه بسته به نوع آرایش آن‌ها می‌تواند تا ۸۶ درصد عمق آبشستگی در دماغه تکیه‌گاه مستطیلی را کاهش دهد. از بین تراکم‌های باز، نیمه‌متراکم و متراکم، بیشترین تأثیر در مهار آبشستگی مربوط به حالت متراکم می‌باشد. در مورد عمق کارگذاری قطعات بین سه عمق زیر بستر، روی بستر و بینابین بیشترین تأثیر در کنترل آبشستگی مربوط به حالتی است که قطعات روی بستر قرار می‌گیرند. بنابراین بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی (تا ۸۶ درصد) در دماغه تکیه‌گاه پل مربوط به

منابع مورد استفاده

- خادمی خ و شفاعی بجستان م، ۱۳۹۳. بررسی اثر تعداد، موقعیت و زاویه صفحات مستغرق در محل تکیه‌گاه پل بر عمق آبشستگی. مجله پژوهش آب ایران، جلد ۱۵، شماره ۸، صفحه‌های ۴۴ تا ۵۵.
- خزیمه نژاد ح، ۱۳۹۱. بررسی ابعاد و موقعیت قرارگیری طوقه بر آبشستگی موضعی ایجاد شده در محل تکیه‌گاه پل. رساله دکتری، گرایش سازه‌های آبی. دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- خزیمه نژاد ح، قمشی م و شفاعی بجستان م، ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد طوقه‌های مستطیلی متقارن و نامتقارن در کاهش آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل. مجله علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۳۷، شماره ۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۲.
- شجاعی پ، فرسادی زاده د، حسین زاده دلیر ع، سلماسی ف و قربانی ع، ۱۳۹۱. کاربرد صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه استوانه‌ای پل‌ها. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۱، صفحه‌های ۹۱ تا ۱۰۹.
- شفاعی بجستان م، ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- عبداله پور م، حسن پور ن، خسروی نیا پ و حسین زاده دلیر ع، ۱۳۹۲. اثر شکاف در کاهش آبشستگی آبشکن با دیواره عمودی. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۳، صفحه‌های ۱۹۳ تا ۲۰۶.
- منصوری هفشجانی م و شفاعی بجستان م، ۱۳۹۰. طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه. مجله مهندسی آبیاری و آب، سال ۱، شماره ۴، صفحه‌های ۳۵ تا ۴۵.
- منصوری هفشجانی م و شفاعی بجستان م، ۱۳۹۲. مقایسه تأثیر سه رقوم قرارگیری سنگ‌چین بر پایداری آن در محل تکیه‌گاه‌های پل واقع در قوس ۹۰ درجه. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه‌های ۱۹۵ تا ۲۰۴.

Annandale GW, 2006. Scour Technology. McGraw Hill Publications, USA.

Arneson LA, Zevenbergen LW, Lagasse PF and Clopper PE, 2012. Evaluating scour at bridges, 5th edition.

Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular No. 18.

Barbhuiya AK and Dey S, 2004. Local scour at abutments: A review. Sadhana Journal 29(5):449-476.

- Bertoldi DA, 1994. An experimental study of scour protection alternatives at bridge piers. Report, T.F. Laboratory. USA.
- Bozkus Z and Osman Y, 2004. Effect of inclination of bridge piers on scouring depth. *J Hydr Eng* 130 (8), 1260-1269.
- Cardoso A and Fael C, 2009. Protecting vertical-wall abutments with riprap mattresses, *J Hydr Eng* 135 (6):457-465.
- Dongol DMS, 1994. Local scour at bridge abutments. Report No. 544, University of Auckland, NZ.
- Ettema R, 1980. Scour at bridge piers. Report No. 216, University Of Auckland, NZ.
- Ezzeldin MM, Saafan TA, Rageh OS and Nejm LM, 2007. Local scour around spur dikes. Pp. 779-795, 11th International Water Technology Conference, 15-18 March, Sharm El-Sheikh, Egypt.
- Jayewardene I, 2003. Physical modeling of a-jacks units in wave flume. Report 1251, USA.
- Jayewardene I, 2009. Physical modeling of a-jacks units in wave flume, Stage 2. Report 1251, USA.
- Johnson PA, Hey RD, Tessier M and Rosgen DN, 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. *J Hydr Eng* 127 (9): 772-778.
- Korthyari U and RangaRanju K, 1992. Temporal variation of local scour around circular bridge pier. *J Hydr Eng* 118 (8): 1091-1106.
- Kwan TF, 1984. Study of abutment scour. Report No. 328, School of Engineering, University of Auckland, NZ, 225p.
- Kwan TF, 1988. Study of abutment scour. Report No. 451, School of Engineering, University of Auckland, NZ, 461p.
- Lagasse PF, Clopper PE, Pagan-ortiz JE, Zevenbergen LW, Arneson LA, Schall JD and Girard LG, 2009. Bridge scour and stream instability countermeasures: experience, selection, and design guidance-3rd edition. Vol. 1 and 2. Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular No. 23.
- Lauchlan CS, 1999. Pier scour countermeasures. Ph.D. Thesis, University of Auckland, Auckland, NZ, 386 p.
- Lebaron JW, 1999. Stability of a-jacks armored rubble-mound break waters subjected to breaking and non-breaking waves with no overtopping. M.Sc Thesis, Oregon State University, USA.
- Lim SY, 1997. Equilibrium clear-water scour around an abutment. *J Hydr Eng* 123 (3): 237-243.
- Lim SY and Cheng NS, 1998. Prediction of live-bed scour at bridge abutments. *J Hydr Eng* 124 (8):635-638.
- Liu HK, Chang FM and Skinner MM, 1961. Effect of bridge constriction on scour and backwater. Engineering Research Center, Colorado State University, CER 60 KHL 22.
- Melville BW, 1992. Local scour at bridge abutments. *J Hydr Eng* 118 (4): 615-631.
- Melville BW and Coleman SE, 2000. Bridge scour. Water Resources Publications, Colorado, USA.
- Melville BW, 1997. Pier and abutment scour –an integrated approach. *J Hydr Eng* 123 (2):125-136.
- Mickel JJ, 1999. A-jacks matrix stability: deflection due to static normal loads .M.Sc Thesis, Oregon University, USA.
- Oben-nyarko K, and Ettema R, 2011. Pier and abutment scour interaction. *J Hydr Eng* 137 (12):1599-1605.
- Oliveto G and hager WH, 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *J Hydr Eng* 128:811-820.
- Radice A and Davari V, 2014. Roughening elements as abutment scour countermeasures. *J Hydr Eng* 140 (8):1-7.
- Richardson EV and Davis SR, 2001. Evaluating scour at bridges (4th Ed.). FHWA, Hydraulic Circular No.18.
- Ripkey BJ, 1999. Determination of wave run-up, rundown, and reflection design coefficients for a-jacks concrete armor units. M.Sc Thesis, Oregon State University, USA.
- Simarro G, Siveira S and Cardoso AH, 2012. Influence of riprap apron shape on spill-through abutments. *J Hydr Res* 150(1):138-141.
- Tafarojnoruz A, Gaudio R and Dey S, 2010. Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review. *J Hydr Res* 148 (4):441-452.
- Thornton CI, Abt SR and Watson CC, 2001. Field assessment of a-jacks installation, a case study of Brush Creek, Kansas city, Missouri Powell Creek, Waukegan, Illinois. Proceedings of the wetlands engineering and river restoration conference, Reno, Nevada.
- Thornton CI, Watson CC, Abt SR, Lipscomb CM, and Ullman CM, 1999a. Laboratory testing of a-jacks units for inland applications: pier scour protection testing. Colorado State University research report for Armortec Inc.

- Thornton CI, Watson CC, Abt SR, Lipscomb CM, Holmquist-Johnson CL, and Ullman CM, 1999b. Laboratory testing of a-jacks units for inland applications: full scale testing. Colorado University research for Armortec Inc.
- Wise L, 1999. Numerical and physical modeling of wave forces on a-jacks units. M.Sc. Thesis, Oregon University, USA.
- Wong WH, 1982. Scour at bridge abutment. Report No. 275, School of Engineering, University of Auckland, NZ, 109p.