

بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از طوق در کاهش عمق و تأخیر در شروع آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی پایه پل

حسین حسین‌جان‌زاده^{۱*}، خسرو حسینی^۲، عبدالله اردشیر^۳ و حجت کرمی^۴

چکیده

بررسی پدیده آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل به دلیل نقش حیاتی و مهم این سازه، ضروری است. استفاده از طوق اطراف تکیه‌گاه یکی از روش‌های کنترل آبشستگی است که به دلیل سادگی اجرا و عملکرد مناسب، پژوهش‌ها در مورد آن افزایش روزافزون یافته است. از جمله عوامل تأثیرگذار بر آبشستگی تکیه‌گاه‌ها، شکل و طول تکیه‌گاه است. در این پژوهش دو نوع تکیه‌گاه کوتاه و بلند مستطیلی در شرایط جریان ۰/۶۵ و ۰/۸۵ و $U/U_{cr} = 0/95$ و در حالت آبشستگی آب زلال، با مصالح بستر یکنواخت (ماسه به قطر میانگین ۰/۹۱ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ۱/۳۸) و تا زمان رسیدن به تعادل نسبی بررسی شد. نتایج برای شرایط جریان نزدیک به آستانه حرکت ($U/U_{cr} = 0/95$) نشان داد که با قرارگیری طوق با طولی معادل دو برابر طول تکیه‌گاه کوتاه در تراز بستر، عمق و حجم حفره آبشستگی به ترتیب ۴۶ و ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. در حالیکه در تکیه‌گاه بلند با حضور طوق با طولی معادل طول تکیه‌گاه در همان شرایط جریان، درصد کاهش عمق و حجم حفره آبشستگی به ترتیب ۲۶ و ۳۴ درصد مشاهده شد. همچنین شروع آبشستگی کناره تکیه‌گاه در همین شرایط جریان، با حضور طوق در تکیه‌گاه کوتاه و بلند مستطیلی، به ترتیب ۵ و ۴/۵ ساعت بعد از شروع آزمایش‌ها مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، بررسی آزمایشگاهی، تکیه‌گاه مستطیلی، طوق.

ارجاع: حسین‌جان‌زاده ح. حسینی خ. اردشیر ع. و کرمی ح. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از طوق در کاهش عمق و تأخیر در شروع آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی پایه پل. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۱۳۳-۱۴۱.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۴- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

* نویسنده مسئول: Hossein_hj@ymail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۱۴

مقدمه

آبستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها در نتیجه اثر فرسایشی جریان آب است که در صورت عدم در نظر گرفتن تمهیدات لازم، سبب تخریب پل می‌شود. تخریب پل علاوه بر زیان‌های اقتصادی، از نقطه نظر اجتماعی نیز اثرات سوئی را به دنبال خواهد داشت. در این زمینه بررسی‌هایی در طی چندین دهه گذشته انجام شده است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده تا سال ۱۹۷۳ در آمریکا از ۳۸۳ خرابی پل، ۲۵ درصد ناشی از تخریب پایه و ۷۲ درصد آن در اثر تخریب تکیه‌گاه پل بوده است (ریچاردسون و دیویس، ۱۹۹۵). بر اساس بررسی‌ها، بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۴ از ۱۰۸ خرابی پل در نیوزلند ۲۹ مورد مربوط به تخریب تکیه‌گاه پل است (ملویل، ۱۹۹۲). بر اساس این پژوهش، خسارت ناشی از تخریب پل به دلیل آبستگی تکیه‌گاه پل ۷۰ درصد کل خسارات وارده را دربرمی‌گیرد. از نقطه نظر اقتصادی صرف هزینه و زمان برای بررسی، پژوهش و ارائه روش‌های مناسب برای مقابله با آبستگی، درمقایسه با هزینه‌های جانی و مالی محتمل در زمان بروز سیلاب و هزینه تعمیر و بازسازی آن، باصرفه به نظر می‌رسد.

با تغییر الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه، آبستگی موضعی رخ می‌دهد. در چندین دهه گذشته مطالعات بسیاری برای شناخت پدیده آبستگی اطراف تکیه‌گاه پل و مکانیزم توسعه آبستگی انجام شده است (ملویل، ۱۹۹۲؛ مولیناس و همکاران، ۱۹۹۸؛ دی و باربوتیا، ۲۰۰۵ و ملویل و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین بررسی‌هایی در زمینه تأثیر استفاده از طوق بر کاهش عمق آبستگی اطراف تکیه‌گاه پل انجام شده است (کایاتورک و همکاران، ۲۰۰۴؛ هوا و همکاران، ۲۰۰۶ و اردشیر و همکاران، ۱۳۹۱). کایاتورک و همکاران (۲۰۰۴) در زمینه عملکرد طوق بر پیشرفت آبستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی بلند (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان بزرگ‌تر از یک) در شرایط آستانه حرکت ذرات بستر انجام داده‌اند. آن‌ها با نصب طوق با اندازه‌های مختلف در ترازهای متغیر دریافتند که با فرارگیری طوق در تراز پایین‌تر از بستر نتایج بهتری حاصل می‌شود. بر اساس این آزمایش‌ها، زمانی که طوق در تراز ۵۰ میلی‌متر پایین‌تر از کف کانال قرار بگیرد، آبستگی تا ۶۷ درصد کاهش می‌یابد. هوآلی و همکاران (۲۰۰۶) بررسی‌هایی در زمینه تأثیر طوق در

کاهش آبستگی اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در حالت آب زلال انجام دادند، آن‌ها دریافتند که اندازه طوق مؤثرترین پارامتر در میزان عمق آبستگی است و همچنین به این نتیجه رسیدند که عمق آبستگی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. اردشیر و همکاران (۱۳۹۱) عملکرد طوق کامل و تکه‌ای به عنوان محافظ بستر روی دو نوع تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای ۴۵ درجه را بررسی کردند. در تمامی آزمایش‌ها از تکیه‌گاه کوتاه (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کوچک‌تر یا مساوی یک) استفاده شد. نتایج نشان داد که طول طوق پارامتر مؤثری در کاهش عمق آبستگی است به صورتی که با افزایش طول طوق میزان آبستگی کاهش می‌یابد. در حقیقت طوق به عنوان یک جسم صلب با فرارگیری در مسیر حرکت گردابه‌های ایجاد شده، سبب کاهش میزان آبستگی می‌شود.

با توجه به بررسی‌های گذشته، در پژوهش‌های انجام شده فقط شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95$ بررسی شده و دیگر شرایط جریان در نظر گرفته نشده است. همچنین مقایسه‌ای بین تکیه‌گاه کوتاه و بلند مستطیلی و بررسی عملکرد طوق در کاهش عمق آبستگی در شرایط ذکر شده انجام نشده است. هدف پژوهش، بررسی تأثیر نصب طوق در اطراف تکیه‌گاه‌های کوتاه و بلند مستطیلی پل روی توسعه فرآیند آبستگی است. بدین منظور آزمایش‌هایی در حالت آبستگی آب زلال روی مصالح بستر یکنواخت با قطر متوسط $0/91$ میلی‌متر در شرایط مختلف جریان ($0/65$ و $0/85$ و $0/95$) انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در فلوم مستطیلی به طول ۱۴، عرض ۱ و ارتفاع ۱ متر با شیب طولی $0/0004$ در آزمایشگاه محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه‌ها مستطیل شکل و طوق‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها هم‌شکل با تکیه‌گاه‌ها با ابعاد بزرگ‌تر انتخاب شده‌اند. در تمام آزمایش‌ها ضخامت طوق ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (مشاهیر و همکاران، ۲۰۰۴). در شکل ۲ تصویر شماتیکی

آزمایش، برای برداشت تغییرات بستر کانال در اطراف تکیه‌گاه از دستگاه دیجیتالی برداشت بستر با نام LBP^1 استفاده شد. این دستگاه می‌تواند تغییرات بستر را با دقتی معادل ۰/۱ میلی‌متر در مقاطع ۱ میلی‌متری عرض کانال برداشت کند. در هر آزمایش، توپوگرافی بستر اطراف تکیه‌گاه با استفاده از داده‌های برداشت شده (X, Y, Z) با نرم‌افزار 8 Surfer ترسیم شده است.

تعیین آستانه حرکت ذرات بستر

ابتدا آزمایش‌هایی برای تعیین آستانه حرکت ذرات انجام شد. برای محاسبه و تنظیم مقدار مختلف (U_{cr}/U_{*cr}) و برای به دست آوردن مقدار دبی آستانه حرکت، از رابطه (۱) که از سوی لاجلان و ملویل (۲۰۰۱) ارائه شده است، استفاده شد.

$$U_{cr}/U_{*cr} = 5.75 \log(y/K_s) + 6 \quad (1)$$

که در این معادله U_{cr} سرعت بحرانی ذرات بستر (آستانه حرکت ذرات)، U_{*cr} سرعت برشی بحرانی ذرات است که از دیاگرام شیلدز، به دست می‌آید. همچنین y عمق جریان در بالادست تکیه‌گاه و K_s زبری معادل مصالح بستر است و با توجه به اینکه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال ($U/U_{cr} < 1$) و بدون انتقال رسوب از بالادست انجام شده است، این پارامتر برابر با $2d_{50}$ (که در آن d_{50} قطر متوسط مصالح بستر) است (لاجلان و ملویل، ۲۰۰۱ و دی و باربوتیا، ۲۰۰۴). برای شرایط حاکم بر آزمایش‌ها U_{*cr} و U_{cr} برابر با ۰/۲۱ و ۰/۳۶ متر بر ثانیه به دست می‌آید. در شرایط نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی برابر ۰/۹۵ و برای عمق جریان ۰/۱۵ متر، با در نظر گرفتن آستانه حرکت ذرات بستر، دبی جریان ۵۲ لیتر بر ثانیه به دست آمده است. همچنین برای شرایط جریان ۰/۶۵ و $U/U_{cr} = 0.185$ ، دبی جریان به ترتیب ۳۵ و ۴۶ لیتر بر ثانیه محاسبه شد.

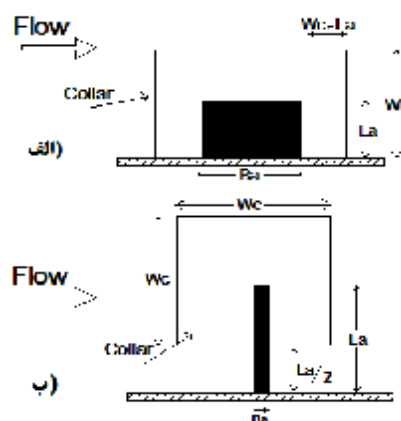
شرح آزمایش‌ها

در این پژوهش برای تعیین زمان تعادل نسبی آبشستگی، ابتدا آزمایش‌هایی به مدت ۷۰ ساعت انجام گرفت. با توجه به توسعه آبشستگی و تغییرات زمانی، با در نظر گرفتن ۹۵ درصد عمق آبشستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه، زمان تعادل نسبی برای تکیه‌گاه‌های کوتاه و بلند به ترتیب ۴۰

از ابعاد تکیه‌گاه و طوق، به صورت جداگانه برای دو نوع تکیه‌گاه، نشان داده شده است که در آن W_c عرض طوق، L_a و B_a به ترتیب طول و عرض تکیه‌گاه است.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش‌ها



شکل ۲- شماتیکی از پلان تکیه‌گاه و طوق‌های استفاده شده در آزمایش‌ها (الف) تکیه‌گاه کوتاه (ب) تکیه‌گاه بلند

با افزایش عرض طوق سطح بیشتری از کف بستر محافظت می‌شود و از برخورد مستقیم جریان و گردابه‌های ایجاد شده به ذرات بستر جلوگیری می‌شود. همچنین با افزایش عرض طوق گردابه‌های برخاستی در فاصله‌ای دورتر از تکیه‌گاه، به طور مستقیم روی مصالح بستر ایجاد می‌شود. نسبت عرض به طول تکیه‌گاه کوتاه مستطیلی با توجه به مسائل اجرایی و همچنین با توجه به بررسی‌های دی و باربوتیا (۲۰۰۵) در نظر گرفته شده است. با بررسی آزمایش‌های کایاتورک (۲۰۰۵) استنباط می‌شود که طوق با طول ۱/۵ الی ۲/۵ برابر طول تکیه‌گاه، بازه مطلوبی برای در نظر گرفتن تأثیر این پارامتر روی فرآیند آبشستگی است. بنابراین در این پژوهش طوق با طولی معادل ۲ برابر طول تکیه‌گاه کوتاه مستطیلی در نظر گرفته شد. همچنین برای تکیه‌گاه بلند، طوق با طولی معادل با طول تکیه‌گاه برای محافظت بستر در نظر گرفته شد. در پایان هر

است. در این پژوهش تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی با دستگاه (PI) Profile Indicator ساخت مؤسسه دلفت هیدرولیک اندازه‌گیری شد. این دستگاه دارای یک میله حسگر به قطر ۲ میلی‌متر است که به صورت خودکار در عمق کانال حرکت کرده و قادر به اندازه‌گیری عمق با دقتی معادل ۰/۱ میلی‌متر است. با توجه به اینکه قطر حسگر این دستگاه کم است، تغییری در محدوده جریان و آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه ایجاد نمی‌کند. از آنجا که محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی در کناره (گوشه بالادست) دماغه تکیه‌گاه است، دستگاه در محل ثابت شده و در بازه‌های زمانی موردنظر، عمق آبشستگی برداشت می‌شد.

۵۰ ساعت به دست آمده است. زمان تعادل نسبی آبشستگی این‌گونه تعریف می‌شود که در ۲ ساعت بعد از این زمان، تفاوت عمق آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر باشد (ملویل، ۱۹۹۲). در جدول ۱ شرح پارامترهای مورد بررسی در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش آورده شده است. در این بررسی ابتدا ۶ آزمایش شاهد بدون حضور طوق (S1-3 و L1-3) و سپس ۶ آزمایش با حضور طوق (SC1-3 و LC1-3) به اندازه $2L_g$ (معادل ۳۰ سانتی‌متر) برای تکیه‌گاه کوتاه و L_g (معادل ۲۵ سانتی‌متر) برای تکیه‌گاه بلند، در تراز بستر، با شرایط ذکر شده انجام شده و تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی کناره تکیه‌گاه حین اجرای آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده

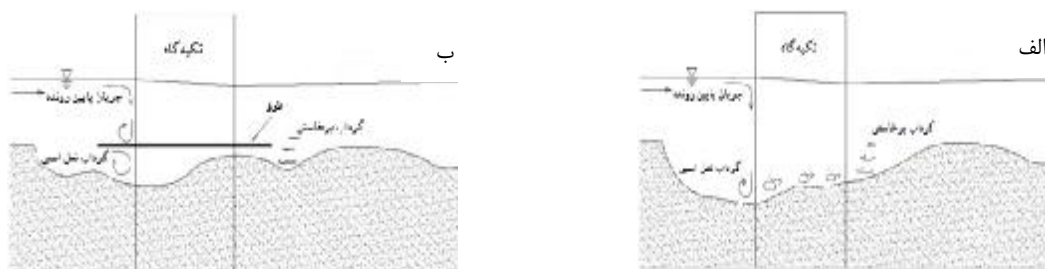
جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی در پژوهش

شماره آزمایش	شکل تکیه‌گاه	طول تکیه‌گاه L_g (m)	دبی ورودی (lit/sec)	شرایط جریان U/U_{cr}	عمق جریان y (m)	نسبت طول به عمق جریان L/y	میانگین قطر ذرات بستر d_{50} (mm)
S1, SC1	مسطحی کوتاه	۰/۱۵	۵۲	۰/۹۵	۰/۱۵	۱	۰/۹۱
S2, SC2			۴۶	۰/۸۵			
S3, SC3			۳۵	۰/۶۵			
L1, LC1	مسطحی بلند	۰/۲۵	۵۲	۰/۹۵	۰/۱۵	۱/۶۶	۰/۹۱
L2, LC2			۴۶	۰/۸۵			
L2, LC3			۳۵	۰/۶۵			

درجه شروع شده و با گذشت زمان با افزایش شدت آبشستگی، گردابه نعل اسبی ایجاد شده سبب جدا شدن ذرات از بستر شده و جریان اصلی با در اختیار گرفتن این ذرات آن را به پایین دست منتقل می‌کند.

نتایج و بحث

شکل ۳ نمای کلی از تغییرات بستر را در اطراف تکیه‌گاه با و بدون حضور طوق نشان می‌دهد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که آبشستگی تحت تأثیر جریان پایین رونده در بالادست تکیه‌گاه و با زاویه تقریبی ۴۵



شکل ۳- نمای کلی از تغییرات بستر اطراف تکیه‌گاه (الف) بدون حضور طوق و (ب) با حضور طوق

سریع بوده و رفته رفته با گذشت زمان، نرخ آبشستگی کاهش می‌یابد. پس از آن مرحله گسترش آبشستگی و وسیع شدن آبشستگی در همسایگی تکیه‌گاه رخ می‌دهد. در نهایت با گذشت زمان، با استهلاک انرژی جریان‌های گردابه‌ای در گودال آبشستگی، فرآیند آبشستگی به تعادل

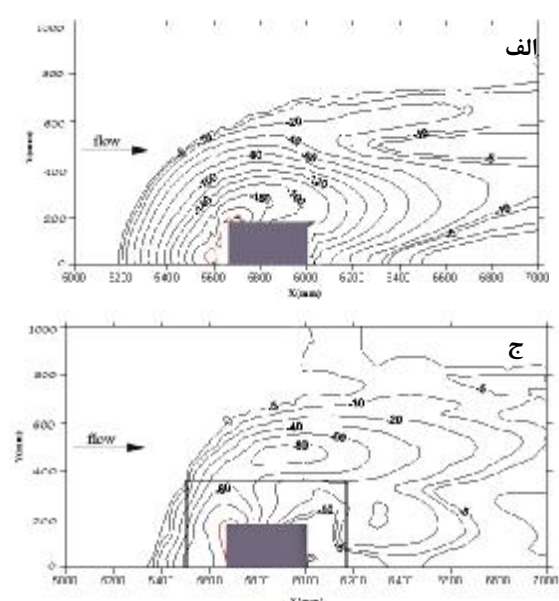
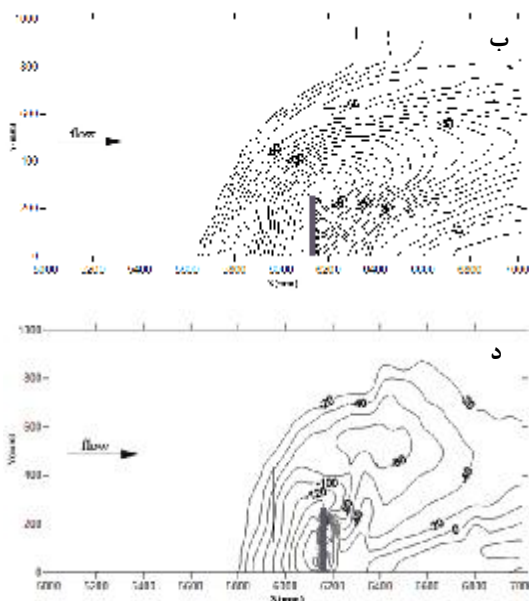
مرحله اول آبشستگی (حدود ۶۰ درصد میزان آبشستگی کل) برای شرایط جریان در آستانه حرکت ذرات ($U/U_{cr}=0/95$)، برای تکیه‌گاه مستطیلی کوتاه و بلند به ترتیب ۱۴۰ و ۹۰ دقیقه پس از شروع آزمایش، رخ داده است. در شروع آزمایش‌ها، فرسایش کناره تکیه‌گاه بسیار

کاسته شدن انرژی گردابه‌های برخاستی، با فاصله گرفتن از تکیه‌گاه به سمت پایین دست، ذرات رسوب ته نشین شده به طوری که پشته رسوبی ایجاد می‌شد. به طور کلی شکل عام آبشستگی در دماغه تمامی تکیه‌گاه‌ها به صورت یک هرم وارونه بوده که هرچه عمیق تر می‌شد، شعاع آن کم می‌شد. در تمامی آزمایش‌ها، حداکثر عمق آبشستگی در نزدیکی دماغه تکیه‌گاه رخ داد. شیب حفره آبشستگی در قسمت بالادست حفره همواره بیشتر از شیب قسمت پایین دست بود. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که متوسط شیب در بالادست حفره آبشستگی نزدیک به زاویه اصطکاک داخلی ذرات بستر (φ) بوده و مقدار آن حدود ۳۰ درجه به دست آمد. این مقدار معادل زاویه اصطکاک داخلی ذرات بستر با قطر میانگین ۰/۹۱ میلی‌متر است که از آزمایش برش مستقیم روی این مصالح به دست آمد. این نتایج مشابه نتایجی است که دی و باربوتیا (۲۰۰۵) در رابطه با پایه و تکیه‌گاه پل مشاهده نمودند.

نسبی می‌رسد. حداکثر عمق آبشستگی برای تکیه‌گاه مستطیلی کوتاه و بلند در حالت بدون حضور طوق، به ترتیب ۲۶/۸ و ۳۰/۱ سانتی‌متر در کنار تکیه‌گاه‌ها به دست آمده است. در شکل ۴ نمایی از تکیه‌گاه‌های کوتاه و بلند مستطیلی نصب شده در فلوم به همراه طوق در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/85$ نشان داده شده است. همچنین شکل ۵ توپوگرافی بستر در اطراف تکیه‌گاه‌های کوتاه و بلند مستطیلی در همان شرایط جریان با و بدون حضور طوق را نشان می‌دهد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در داخل حفره آبشستگی در بالادست تکیه‌گاه‌ها، به دلیل وجود جریان پایین رونده ذرات به صورت خزشی منتقل می‌شدند، اما در داخل حفره آبشستگی جلوی تکیه‌گاه‌ها و همچنین بعد از آن، به دلیل وجود جریان بالارونده، ذرات بستر به صورت معلق در آمده و به همراه جریان اصلی منتقل می‌شدند. در پایین دست تکیه‌گاه‌ها، به دلیل کاهش اثر گردابه‌های نعل اسبی و همچنین



شکل ۴- نمایی از تکیه‌گاه‌های مستطیلی و طوق‌های اعمال شده بر آن (الف) تکیه‌گاه بلند- (ب) تکیه‌گاه کوتاه



شکل ۵- توپوگرافی بستر در اطراف تکیه‌گاه‌های مستطیلی کوتاه و بلند (شرایط جریان $U/U_{cr}=0/85$) (الف) و (ب) بدون حضور طوق و (ج) و (د) با حضور طوق

در شکل ۶ تغییرات زمانی عمق آبشستگی در مجاورت تکیه‌گاه‌های کوتاه و بلند مستطیلی در حالت با و بدون حضور طوق به صورت بی بعد، نمایش داده شده است. در شکل ۶ ds/dse نسبت عمق آبشستگی در هر لحظه به حداکثر عمق آبشستگی و همچنین T/Te نسبت زمان برداشت عمق آبشستگی به زمان نهایی (تعادل) است.

بعد از انجام سری آزمایش‌های شاهد بدون حضور طوق، آزمایشات با شرایط ذکر شده در جدول ۱ با حضور طوق به اندازه $2L_a$ برای تکیه‌گاه کوتاه و L_a برای تکیه‌گاه بلند، در تراز بستر، انجام شد. در این حالت نیز برداشت زمانی حداکثر عمق آبشستگی در طول آزمایش انجام و بعد از اتمام هر آزمایش، توپوگرافی بستر برداشت شد (شکل ۵-ب و د). همان‌گونه که در شکل‌های (۵-ب) و (۵-د) دیده می‌شود، استفاده از طوق سبب شد محل ایجاد حفره آبشستگی به محلی دورتر از کناره تکیه‌گاه انتقال یابد. نصب طوق روی تکیه‌گاه سبب می‌شود ذرات بستر در قسمت خارجی طوق به تدریج شسته شده، مجرای باریکی در زیر طوق ایجاد شود و در نتیجه مسیر عبور جریان آب به ناحیه‌ای دورتر از تکیه‌گاه انتقال می‌یابد. در کل با نصب طوق روی هر دو نوع تکیه‌گاه (کوتاه و بلند) و قرارگیری آن در مسیر حرکت جریان روبه پایین، از برخورد مستقیم جریان به بستر جلوگیری شده و در نتیجه سبب جابجایی آبشستگی از محل تکیه‌گاه و کاهش آن می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، برخلاف حالت بدون طوق که آبشستگی به سرعت در اطراف تکیه‌گاه (بالادست و پایین‌دست) توسعه می‌یابد، در ساعت‌های اولیه در گوشه طوق، آبشستگی با شدت کمتری رخ می‌دهد. با نصب طوق بر روی تکیه‌گاه، آبشستگی در دو ناحیه گوشه بالادست طوق و گوشه پایین‌دست طوق شروع شده و تحت تأثیر گردابه‌های برخاستی، حفره پایین‌دست گسترش می‌یابد. با گذشت زمان، حفره بالادست و پایین‌دست به یکدیگر پیوسته و به سمت کناره تکیه‌گاه توسعه می‌یابد. نرخ آبشستگی این دو ناحیه وابسته به اندازه طوق است؛ بدین صورت که با افزایش اندازه طوق، میزان نسبت آبشستگی ناحیه بالادست به پایین‌دست کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده از حداکثر عمق آبشستگی کناره تکیه‌گاه با حضور طوق محافظ در جدول ۲ ارائه شده است. تغییرات زمانی بی‌بعد عمق آبشستگی در این حالت نیز در شکل (۶-ب)

نمایش داده شده است.

با توجه به جدول ۲، استفاده از طوق به طول $2L_a$ روی تکیه‌گاه مستطیلی کوتاه در تراز بستر سبب کاهش عمق آبشستگی در تکیه‌گاه شده است. بدین صورت که برای شرایط جریان $0/65$ ، $0/85$ ، $0/95$ ، U/U_{cr} به ترتیب کاهش 100% ، 57% و 46% عمق آبشستگی مشاهده شد. همچنین استفاده از طوق با طولی معادل طول تکیه‌گاه (L_a) روی تکیه‌گاه بلند مستطیلی در تراز بستر، برای شرایط جریان $0/65$ ، $0/85$ ، $0/95$ ، U/U_{cr} به ترتیب سبب کاهش 60% ، 24% و 26% عمق آبشستگی بر تکیه‌گاه شده است. محل ایجاد ماکزیمم حفره آبشستگی در حضور طوق در حالت کلی، در محدوده گوشه خارجی طوق در پایین‌دست تکیه‌گاه (شکل ۵-ب و د مشاهده شود) است که این مقدار برای تکیه‌گاه کوتاه در فاصله‌های ۲۳ الی ۳۰ سانتی‌متری و برای تکیه‌گاه بلند در فاصله‌های ۲۱ تا ۲۷ سانتی‌متری از کناره تکیه‌گاه رخ داد.

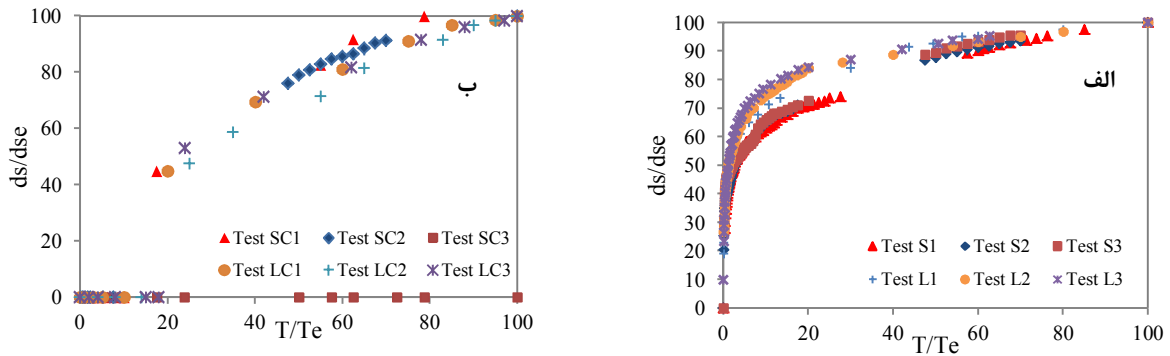
همان‌گونه که در منحنی شکل (۶-الف) دیده می‌شود، در حالت تکیه‌گاه بلند مستطیلی نسبت به تکیه‌گاه کوتاه، در مدت زمان کمتری عمق آبشستگی به حداکثر عمق آبشستگی نزدیک می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که در هر دو نوع تکیه‌گاه، در شرایط جریان پایین‌تر ($0/65$ ، $U/U_{cr}=0/85$) نسبت به شرایط جریان نزدیک به آستانه حرکت ($U/U_{cr}=0/95$)، در مدت زمان کمتری عمق آبشستگی به 80% درصد عمق آبشستگی حداکثر می‌رسد. به عنوان مثال، در حالت تکیه‌گاه بلند، مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن عمق آبشستگی به 80% درصد عمق نهایی آبشستگی برای شرایط جریان $0/65$ ، $0/85$ ، $0/95$ ، U/U_{cr} به ترتیب 405 ، 490 و 760 دقیقه مشاهده شد.

با توجه به شکل (۶-ب)، حضور طوق سبب به تعویق افتادن شروع آبشستگی در کناره تکیه‌گاه در تمامی شرایط جریان می‌شود. مدت زمانی که طول می‌کشد حفره آبشستگی از گوشه خارجی طوق شروع شده و از زیر طوق به کناره تکیه‌گاه برسد به عنوان مدت زمان شروع آبشستگی در نظر گرفته شد.

حجم حفره آبشستگی به دست آمده تحت شرایط مختلف جریان و برای دو نوع تکیه‌گاه کوتاه و بلند مستطیلی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از طوق محافظ سبب کاهش به ترتیب 25% ، 64% و 37% درصدی حجم حفره آبشستگی برای تکیه‌گاه کوتاه

است.

مستطیلی و همچنین ۴۴، ۴۳ و ۳۴ درصدی برای تکیه‌گاه بلند، تحت شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95, 0/85, 0/65$ شده



شکل ۶- منحنی بی بعد تغییرات زمانی عمق آبشستگی تکیه‌گاه مستطیلی در شرایط مختلف جریان - (الف) بدون و (ب) با حضور طوق

جدول ۲- نتایج و شرایط حاکم بر آزمایش‌های انجام گرفته در پژوهش

آزمایش	U/U_{cr}	$U(m/s)$	$T(min)$	عمق آبشستگی مجاور تکیه‌گاه $d_s(mm)$	حجم حفره آبشستگی (m^3)	درصد کاهش عمق آبشستگی مجاور تکیه‌گاه (%)	درصد کاهش حجم حفره آبشستگی (%)
S1	۰/۹۵	۰/۳۵	۲۴۰۰	۲۶۸	۰/۰۷۲۱	-	-
S2	۰/۸۵	۰/۳۱	۲۴۰۰	۲۴۵	۰/۰۵۹۱	-	-
S3	۰/۶۵	۰/۲۳	۲۴۰۰	۱۳۵	۰/۰۱۱۳	-	-
SC1	۰/۹۵	۰/۳۵	۲۴۰۰	۱۴۵	۰/۰۴۵۳	۴۶	۳۷
SC2	۰/۸۵	۰/۳۱	۲۴۰۰	۱۰۷	۰/۰۲۱۵	۵۷	۶۴
SC3	۰/۶۵	۰/۲۳	۲۴۰۰	۰	۰/۰۰۸۵	۱۰۰	۲۵
L1	۰/۹۵	۰/۳۵	۳۰۰۰	۳۰۱	۰/۰۹۲۷	-	-
L2	۰/۸۵	۰/۳۱	۳۰۰۰	۲۴۶	۰/۰۷۶۴	-	-
L3	۰/۶۵	۰/۲۳	۳۰۰۰	۱۶۵	۰/۰۳۴۸	-	-
LC1	۰/۹۵	۰/۳۵	۳۰۰۰	۲۲۳	۰/۰۶۱۲	۲۶	۳۴
LC2	۰/۸۵	۰/۳۱	۳۰۰۰	۱۸۹	۰/۰۴۳۳	۲۴	۴۳
LC3	۰/۶۵	۰/۲۳	۳۰۰۰	۶۶	۰/۰۱۹۵	۶۰	۴۴

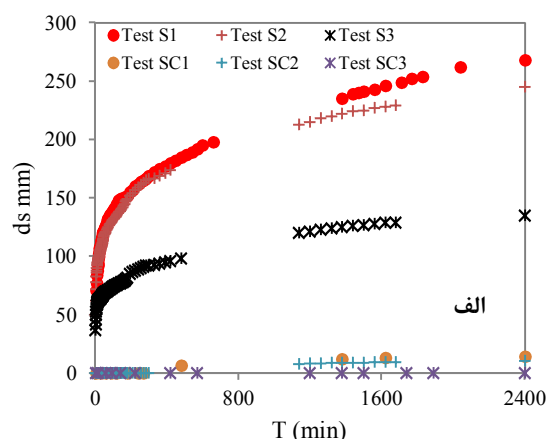
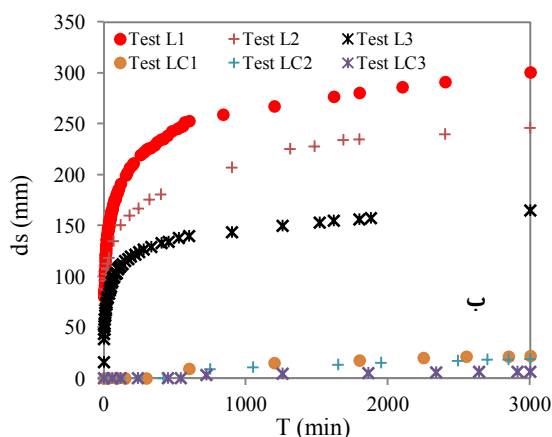
آزمایش، آبشستگی در کناره تکیه‌گاه دیده نشد و حفره‌ی آبشستگی در پایین دست، به کناره بالادست دماغه تکیه‌گاه نرسید. همچنین برای تکیه‌گاه بلند، در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95, 0/85, 0/65$ ، زمان شروع آبشستگی بر تکیه‌گاه به ترتیب ۵۴۰، ۴۰۰، ۳۰۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش مشاهده شد.

شکل (۸- الف) پروفیل طولی بستر را برای مقطعی در ۱۵ سانتی‌متری از دیواره کانال برای شرایط جریان $U/U_{cr}=0/85$ تکیه‌گاه کوتاه مستطیلی نشان می‌دهد. همچنین شکل (۸- ب) پروفیل طولی بستر را برای مقطعی در ۲۵ سانتی‌متری از دیواره کانال برای شرایط

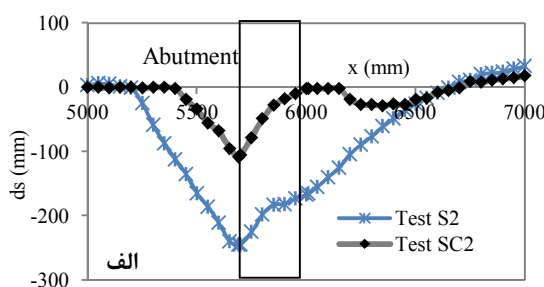
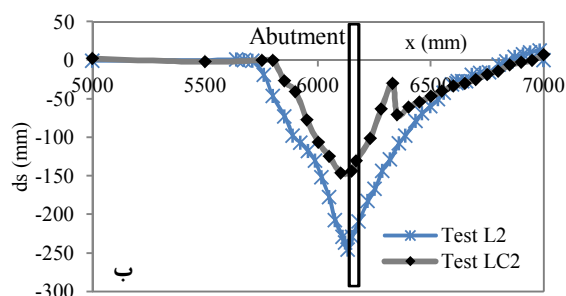
در منحنی شکل ۷ تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان در طول مدت زمان انجام آزمایش‌ها برای دو نوع تکیه‌گاه کوتاه و بلند مستطیلی به ترتیب برای دو حالت بدون حفاظ و با طوق محافظ ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، استفاده از طوق در هر دو نوع تکیه‌گاه کوتاه و بلند سبب تأخیر در شروع آبشستگی در کناره تکیه‌گاه شده است. بدین ترتیب که برای تکیه‌گاه کوتاه، در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95, 0/85$ ، زمان شروع آبشستگی بر تکیه‌گاه به ترتیب ۳۰۰ و ۲۵۵ دقیقه مشاهده شد. این در حالی است که در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/65$ ، بعد از گذشت ۴۰ ساعت از شروع

و سبب تفکیک جریان ورودی به دو قسمت بالای طوق و زیر طوق شده و با جابجایی گردابه‌های ایجاد شده از محل تکیه‌گاه، سبب می‌شود که حفره آبستگی از محل تکیه‌گاه فاصله گرفته و عمق آبستگی در مجاورت تکیه‌گاه کاهش می‌یابد.

جریان $U/U_{cr}=0/85$ تکیه‌گاه بلند مستطیلی، با و بدون حضور طوق، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، استفاده از طوق سبب حداکثر عمق آبستگی در کنار تکیه‌گاه شده است. این کاهش عمق در نتیجه اثر حفاظتی طوق روی بستر است که از برخورد مستقیم جریان رو به پایین به ذرات بستر جلوگیری کرده



شکل ۷- منحنی تغییرات زمانی عمق آبستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی با و بدون حضور طوق در شرایط مختلف جریان (الف) - تکیه‌گاه کوتاه، ب- تکیه‌گاه بلند)



شکل ۸- تغییرات پروفیل طولی بستر اطراف تکیه‌گاه کوتاه مستطیلی با و بدون حضور طوق در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/85$ (الف) - تکیه‌گاه کوتاه، ب- تکیه‌گاه بلند)

بدین دلیل است که گردابه‌های به وجود آمده در اطراف تکیه‌گاه بلند با لبه باریک شدیدتر از گردابه‌های به وجود آمده در اطراف تکیه‌گاه بلند با لبه پهن و یا تکیه‌گاه کوتاه است. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش با بررسی‌های اردشیر و همکاران (۱۳۹۱) نشان داد که در شرایط جریان نزدیک به آستانه حرکت ذرات بستر ($U/U_{cr}=0/95$) در تکیه‌گاه باله‌ای نسبت به تکیه‌گاه مستطیلی، طوق عملکرد بهتری در کاهش عمق آبستگی از خود نشان می‌دهد که به دلیل کمتر بودن قدرت گردابه‌ها در اطراف تکیه‌گاه باله‌ای است.

مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های گذشته

در بررسی‌های انجام شده از سوی کاپاتورک (۲۰۰۵)، اثر استفاده از طوق با ابعاد مختلف بر روی تکیه‌گاه بلند (با عرض پهن) بررسی شد که در شرایطی تقریباً مشابه با آزمایش‌های حاضر، حداکثر کاهش ۴۸٪ عمق آبستگی را نشان داد. این در حالی است که برای تکیه‌گاه بلند (با عرض باریک) در این پژوهش این مقدار ۲۶٪ به دست آمد. با مقایسه نتایج به دست آمده از این دو پژوهش می‌توان دریافت که عملکرد طوق در کاهش عمق آبستگی در تکیه‌گاه کوتاه و بلند با عرض پهن، نسبت به تکیه‌گاه بلند مستطیلی با عرض باریک بهتر است. این امر

3. Dey S. and Barbhuiya A. K. 2005. Time Variation of Scour at Abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 131(1): 11-23.
4. Hua Li. Roger A. Kuhnle Brian D. and Barkdoll B. 2006. Countermeasures Against Scour at Abutments. Report No. 49 Oxford, Mississippi. 163 p.
5. Kayaturk S. Y. Kokpinar M. A. and Gogus M. 2004. Effect of Collar on Temporal Development of Scour around Bridge Abutments. 2nd International Conference on scour and erosion. Singapore. pp.180-186.
6. Kayaturk S. Y. 2005. Scour and Scour Protection at Bridge Abutments. Ph.D. Thesis. Middle East Technical University, Ankara, Turkey. 213 p.
7. Lauchlan C. S. and Melville B. W. 2001. Riprap protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering. 127(5): 412-418.
8. Mashahir M. B. Zarrati A. R. and Rezayi A. R. 2004. Time Development of Scouring around a Bridge Pier Protected by Collar. 2nd International Conference on Scour and Erosion. Singapore. pp. 221-228
9. Melville B. W. 1992. Local Scour at Bridge Abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 118(4): 615-630.
10. Melville B. W. Van B. S. Coleman S. and Barkdoll B. 2006. Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 132(6): 563-574.
11. Molinas A. Kheireldin K. and Baosheng W. 1998. Shear Stress Around Vertical Wall Abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 124(8): 822-830.
12. Richardson E. V. and Davis S. R. 1995. Evaluating Scour at Bridges - Third Edition. Hydraulic Engineering Circular No. 18, Federal Highway Administration, Washington, DC. 250 p.

نتیجه‌گیری

تغییرات زمانی آبشستگی اطراف تکیه‌گاه بلند و کوتاه مستطیلی تحت شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95$ ، $0/85$ ، $0/65$ بدون حضور طوق و همچنین با حضور طوق در تراز بستر، به صورت آزمایشگاهی، در این پژوهش مطالعه و بررسی شده است. در هر دو نوع تکیه‌گاه بلند و کوتاه و در تمامی حالت‌های مختلف جریان مشاهده شد که با حضور طوق، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب که حضور طوق در تراز بستر سبب کاهش $0/100$ ٪ و $0/57$ ٪ و $0/46$ ٪ عمق آبشستگی در شرایط مختلف نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی $0/65$ ، $0/85$ و $0/95$ برای تکیه‌گاه کوتاه، و کاهش $0/60$ ٪، $0/24$ ٪ و $0/26$ ٪ عمق آبشستگی در بر تکیه‌گاه در همان شرایط جریان برای تکیه‌گاه بلند می‌شود. همچنین، محل وقوع عمق ماکزیمم و حفره آبشستگی به ناحیه‌ای دورتر از تکیه‌گاه منتقل می‌شود. شروع آبشستگی کناره تکیه‌گاه نیز با حضور طوق نسبت به حالت بدون حضور طوق، در هر دو نوع تکیه‌گاه کوتاه و بلند به تعویق می‌افتد. بدین ترتیب که در حالت تکیه‌گاه کوتاه، در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95$ ، $0/85$ با حضور طوق، زمان شروع آبشستگی بر تکیه‌گاه به ترتیب 300 و 255 دقیقه بعد از شروع آزمایش و در حالت تکیه‌گاه بلند، برای شرایط جریان $U/U_{cr}=0/95$ ، $0/85$ ، $0/65$ ، به ترتیب 490 ، 760 و 405 دقیقه پس از شروع آزمایش شروع شد. همچنین در شرایط جریان $U/U_{cr}=0/65$ تکیه‌گاه کوتاه، هیچ‌گونه آبشستگی در مدت زمان 40 ساعت در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش، در بر تکیه‌گاه دیده نشد و حفره آبشستگی در پایین‌دست به کناره بالادست تکیه‌گاه نرسید.

منابع

۱. اردشیر ع. چراغی ر. کرمی ح. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی تأثیر طوق در کاهش عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های مستطیلی و دیوار باله‌ای. نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۴(۱):۱-۱۳.
2. Dey S. and Barbhuiya A. K. 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. Journal of Hydraulic Engineering. 130(1):622-634.

