

## تأثیر کاربرد همزمان کابل و طوقه در کاهش آب‌شستگی اطراف گروه پایه‌های سه‌تایی

علی نوری امامزاده‌بی<sup>۱</sup>، حسن ترابی<sup>۲\*</sup>، بهزاد قربانی<sup>۳</sup> و حجت‌اله یونسی<sup>۴</sup>

### چکیده

استفاده از روش‌های اقتصادی برای جلوگیری یا کاهش خطر تخریب پل‌ها در زمان سیلابی شدن رودخانه‌ها، امری ضروری است. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از طوقه، شکاف، سنگ‌چین، کابل پیچیده شده دور پایه و یا ترکیب آن‌ها اشاره کرد. در این پژوهش تأثیر استفاده همزمان از کابل و طوقه به عنوان روشی جدید برای کاهش آب‌شستگی در کنار گروه پایه‌های سه‌تایی با فاصله بین پایه دو برابر قطر پایه ( $S/b=2$ ) و سه برابر آن ( $S/b=3$ )، بررسی شد. آزمایش‌ها در شرایط آب‌شستگی آب زلال برای رسوبات یکنواخت انجام شد. از طوقه با قطر دو برابر قطر پایه و کابل با قطر  $0/15$  قطر پایه و زاویه پیچش ۱۵ درجه استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از کابل و طوقه کارایی بسیار بهتری نسبت به کابل و طوقه تنها دارد به طوری که سبب کاهش ۲۰، ۴۵ و ۵۳ درصدی عمق نهایی آب‌شستگی به ترتیب در کنار پایه‌های اول، دوم و سوم می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها زمان شروع آب‌شستگی با تأخیر بیشتری همراه است به طوری که ۲۳۴ دقیقه تأخیر برای پایه سوم با  $S/b=3$  ثبت شد.

**واژه‌های کلیدی:** طوقه، عمق آب‌شستگی موضعی، کابل، کنترل آب‌شستگی موضعی، گروه پایه.

**ارجاع:** نوری امامزاده‌بی ع. ترابی ح. قربانی ب. و یونسی ح. ۱۳۹۵. تأثیر کاربرد همزمان کابل و طوقه در کاهش آب‌شستگی اطراف گروه پایه‌های سه‌تایی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۲: ۱۴۷-۱۵۵.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.  
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.  
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.  
۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

\* نویسنده مسئول: [torabi1976@gmail.com](mailto:torabi1976@gmail.com)

## مقدمه

آبشستگی یکی از مسائل مهم در تخریب پایه پل‌های احداث شده روی رودخانه‌ها است. بیشتر تخریب این پل‌ها به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌هاست (بروسرز و همکاران، ۱۹۷۷). با برخورد جریان به پایه پل، سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید که عملکرد آن‌ها سبب حفرگودالی در اطراف پایه شده که حفره آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه این گودال در اطراف پایه سبب خالی‌شدن زیر پی‌ها و در نتیجه تخریب پل می‌شود. زمانی که فرآیند آبشستگی در حضور گروه پایه رخ می‌دهد، مکانیزم‌هایی ایجاد می‌شود که عبارتند از: عامل تقویت کننده که سبب افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود، و عامل حفاظ بودن که در اثر برخورد جریان به پایه بالادست، سرعت مؤثر جریان برای پایه پایین دست کاهش یافته و باعث کاهش آبشستگی در آن می‌شود (رودکیوی، ۱۹۹۸).

هانا (۱۹۷۸) بررسی‌های خود را در زمینه آبشستگی در گروه پایه‌های دوتایی استوانه‌ای و قرار گرفته در یک خط، در جریان دائمی و در شرایط آب زلال و با استفاده از رسوبات یکنواخت با قطر متوسط  $0.78$  میلی‌متر انجام داد. طبق نتایج وی، زمانی که پایه‌ها به طور دقیق کنار هم قرار گیرند،  $S/b=1$  (S فاصله مرکز تا مرکز پایه‌ها و b قطر پایه)، عمق آبشستگی در پایه جلویی برابر با آبشستگی در تک پایه خواهد بود. اما با افزایش فاصله، تأثیر عامل تقویت کننده در پایه اول مشاهده می‌شود که این عامل در  $S/b=2/5$  به حداکثر خود می‌رسد و تا  $S/b=11$  وجود دارد. در فاصله‌های بیشتر از  $S/b=11$ ، عمق آبشستگی در پایه جلویی برابر با مقدار آن در تک پایه خواهد بود.

نظریه‌ها (۱۹۹۶) اثر زاویه برخورد جریان ( $\alpha$ ) در گروه پایه‌های سه‌تایی را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که با افزایش  $\alpha$  حداکثر عمق آبشستگی پایه میانی در  $\alpha=50^\circ$  و برای  $S/b=2$  رخ می‌دهد.

آشتیانی و بهشتی (۲۰۰۶) آرایش متفاوت گروه پایه‌ها را در شرایط آب زلال بررسی کردند. آن‌ها سه پایه با قطرهای مختلف را با ۸ نوع آرایش ماتریسی به گونه‌ای به کار بردند که فاصله بین پایه‌ها حداکثر دو برابر قطر پایه باشد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد آبشستگی گروه پایه‌ها متفاوت از تک پایه بوده و بستگی به فاصله پایه‌ها دارد به

طوری که هر چه فاصله پایه‌ها کمتر باشد اثر متقابل پایه‌ها بیشتر می‌شود.

برای جلوگیری و کاهش آبشستگی در پایه پل‌ها دو روش اساسی، ارائه شده است. در روش اول که به روش مستقیم موسوم است. مقاومت بستر در مقابل تنش‌های وارده افزایش می‌یابد که از آن جمله می‌توان به استفاده از سنگ‌چین در کنار پایه‌ها اشاره کرد. روش دوم یا روش غیرمستقیم که در آن با تغییر الگوی جریان در اطراف پایه از تأثیر نیروهای مخرب کاسته می‌شود. از روش‌های غیرمستقیم می‌توان به استفاده از طوق، کابل، پره‌های مستغرق، آب‌بند بستر و غیره اشاره کرد. بررسی‌های توماس (۱۹۶۷)، تاناکا و یانو (۱۹۶۷)، نیل (۱۹۷۳) و اتما (۱۹۸۰) نشان می‌دهد که قرار دادن یک طوق در اطراف پایه پل می‌تواند عمق آبشستگی را کاهش دهد (آلبی، ۲۰۰۶). تاناکا و یانو (۱۹۶۷)، چپو (۱۹۹۲) و مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند با افزایش قطر طوقه راندمان آن در کاهش آبشستگی افزایش می‌یابد. زرانی و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند طوقه با قطر بیشتر از سه برابر قطر پایه، غیرکاربردی است. حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر طوقه بر گروه پایه‌ها پرداختند و با انجام آزمایش‌هایی روی تک پایه بدون طوقه و گروه پایه دوتایی و سه‌تایی دارای طوقه و بدون طوقه نتیجه گرفتند که آبشستگی پایه‌های دارای طوقه با یک تأخیر زمانی نسبت به پایه بدون طوقه شروع می‌شود و این تأخیر در شروع آبشستگی در پایه‌های عقبی نسبت به پایه‌های جلویی بیشتر است.

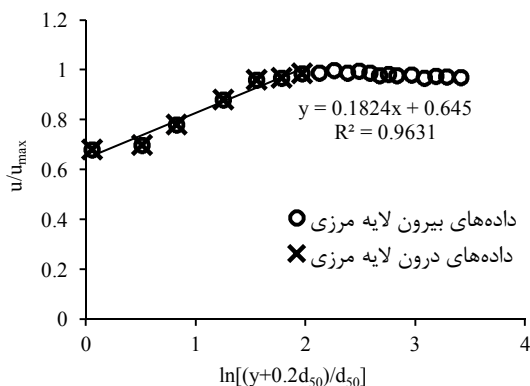
دی و همکاران (۲۰۰۶) برای اولین بار از کابل‌هایی که به صورت حلزونی دور پایه پیچیده می‌شد به عنوان یک روش اقتصادی، ساده و قابل اجرا در کنترل و کاهش آبشستگی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کابل جریان روبه پایین را کاهش می‌دهد و سبب کاهش عمق آبشستگی می‌شود و با افزایش قطر و کاهش زاویه کابل‌ها میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش آبشستگی برابر  $46/3$  درصد برای کابل با زاویه  $15^\circ$  و قطر کابل به پایه برابر  $0.1$  گزارش شد.

ایزدی‌نیا و حیدرپور (۲۰۱۲) کاهش عمق آبشستگی با استفاده از کابل پیچیده شده دور تک پایه استوانه‌ای شکل را بررسی و مشاهده کردند که با افزایش قطر کابل و کاهش زاویه پیچش، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد.



شکل ۱- شمایی از منطقه آزمایش و مدل پایه‌ها

از آنجا که آزمایش‌ها باید در شرایط آب زلال انجام شود لازم بود که تنش برشی در بستر بالادست کمتر از تنش برشی آستانه حرکت ذرات باشد (رودکیوی، ۱۹۹۸). بدین منظور قبل از نصب پایه و شروع آزمایش‌ها، با انجام آزمایش‌های زیاد (بدون حضور پایه) مشاهده شد که عمق آستانه حرکت ذرات برابر ۲۷cm است. با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی (ADV)، پروفیل‌های سرعت در شرایط آستانه حرکت ذرات برداشت شد و با استفاده از قانون لگاریتمی، سرعت برشی آستانه حرکت ذرات محاسبه شد. شکل ۲ محدوده اعتبار قانون لگاریتمی و خط رگرسیون برازش شده بر داده‌های درون لایه مرزی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- قانون لگاریتمی برای تعیین سرعت برشی آستانه حرکت ذرات

پس از تعیین محدوده اعتبار قانون لگاریتمی، سرعت برشی آستانه حرکت ذرات ( $u_{c*}$ ) از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$u_{c*} = k\alpha u \quad (1)$$

که در آن  $k$  ثابت جهانی ون کارمن و برابر  $0.4$  و  $\alpha$  شیب خط رگرسیون است.

پس از تعیین سرعت برشی آستانه حرکت، سرعت برشی ( $u_c$ ) از رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$\frac{u_c}{u_{c*}} = 5.75 \log\left(\frac{5}{53 - \frac{y}{d_{50}}}\right) \quad (2)$$

همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که کابل با قطر  $0.15$  قطر پایه و زاویه پیشش  $15^\circ$  بیشترین تأثیر را در کاهش عمق آب‌شستگی دارد.

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر استفاده همزمان از کابل و طوقه در کاهش و کنترل آب‌شستگی موضعی در گروه پایه‌های سه‌تایی و تأثیر فاصله بین پایه‌ها در کارایی کابل و طوقه است.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در فلوم آزمایشگاهی مستقر در دانشگاه شهرکرد و دارای مقطع مربع مستطیل به ابعاد  $0.6$  در  $0.6$  و طول  $20$  متر انجام شد. این فلوم دارای کف فلزی و دیواره‌هایی از جنس فایبرگلاس و شفاف است. برای سنجش عمق جریان از عمق‌سنج مجهز به کولیس با دقت  $0.02$  میلی‌متر، و برای به دست آوردن پروفیل‌های سرعت از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی (ADV) استفاده شد. منطقه‌ی آزمایش به طول  $10$  متر از مصالح بستر با ضخامت  $20$  سانتی‌متر پر شد. سکوه‌های ابتدایی و تحتانی به طول  $3$  متر به همراه منطقه آزمایش به اندازه کافی بزرگ بود که جریان در منطقه آزمایش، توسعه یافته محسوب گردد. شکل ۱ شمایی از منطقه آزمایش و مدل پایه‌ها را نمایش می‌دهد.

مواد بستر از ماسه دانه‌بندی‌شده و به گونه‌ای انتخاب شد که در بستر منطقه آزمایش ریپل تشکیل نشود پس قطر متوسط رسوبات باید از  $0.7$  میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. همچنین، برای حذف اثر اندازه رسوبات روی عمق آب‌شستگی باید نسبت قطر پایه بر قطر متوسط ذرات بستر  $25-20$  باشد (رودکیوی و اتماء، ۱۹۸۳). شرط یکنواخت بودن اندازه ذرات این است که انحراف استاندارد هندسی ذرات ( $\sigma_g$ ) کمتر از  $1/3$  باشد (کیخایی، ۱۳۸۵). بر این اساس، در این تحقیق از یک نوع ماسه ریخته‌گری شسته شده گردگوشه با چگالی نسبی  $2/65$  با قطر متوسط اندازه ذرات برابر  $0.81$  و انحراف معیار  $1/15$  استفاده شد. کلیه آزمایش‌های این طرح با شیب طولی کانال معادل صفر درجه و با دبی  $55 \text{ lit/s}$  انجام شد. بر اساس نظر رودکیوی (۱۹۹۸) مبنی بر این که نسبت عرض کانال به قطر پایه نباید از  $6/25$  کمتر باشد در این آزمایش‌ها از مدل پایه استوانه‌ای از جنس پلاستیک تفلون با قطر پایه ثابت  $6 \text{ cm}$  استفاده شد.

عمق جریان بیشتر از سه برابر قطر پایه باشد که با توجه به قطر پایه انتخابی این نسبت به طور تقریبی برابر ۵ است. برای مقایسه روش‌های محافظتی آزمایش‌هایی روی تک‌پایه و گروه پایه‌های سه‌تایی با فاصله بین پایه‌های ۲ و ۳ برابر قطر پایه ( $S/b=2/3$ ) انجام شد که خلاصه آن در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به شکل ۲ و با استفاده از روابط موجود،  $u_c=0/38m/s$ ،  $u_{c*}=0/026m/s$  نسبت سرعت به سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات  $u/u_c=0/92$  و در نتیجه عمق جریان ۲۹ سانتی‌متر محاسبه شد. بر اساس نظر رودکیوی (۱۹۹۸)، برای جلوگیری از ایجاد تداخل گرداب‌های موج‌کمانی و نعل‌اسبی و کاهش عمق آبشستگی باید

جدول ۱- آزمایش‌های انجام شده

تعداد آزمایش	روش حفاظت	S/b	آزمایش
۴	بدون محافظ، کابل، طوقه، کابل و طوقه	-	تک‌پایه
۸	بدون محافظ، کابل، طوقه، کابل و طوقه	۲ و ۳	گروه پایه‌های سه‌تایی

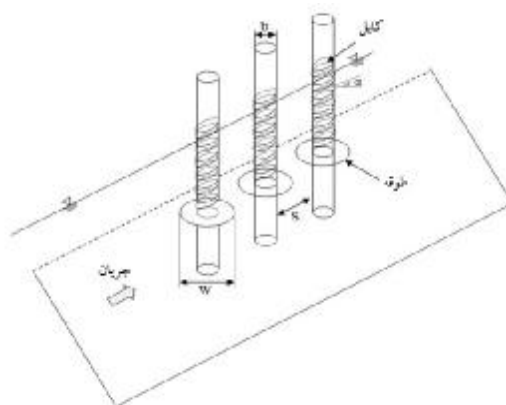
متوالی تغییرات عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر باشد؛ برای رسیدن به این معیارها، چند آزمایش بلند مدت برای هر یک از حالت‌ها انجام و مشخص شد که آزمایش‌ها باید تا ۵۶ ساعت ادامه یابد ولی چون هدف مقایسه تأثیر کابل، طوقه و استفاده هم‌زمان کابل و طوقه بود، آزمایش‌ها در ده ساعت ادامه یافت.

### نتایج و بحث

#### الف) پایه بدون محافظ

در این حالت گروه پایه‌های سه‌تایی در فواصل  $S/b=2$  و  $S/b=3$  نصب شد و عمق آبشستگی نسبت به زمان ثبت شد. شکل ۴ توسعه زمانی آبشستگی در گروه پایه‌های سه‌تایی را در مقایسه با تک پایه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که میزان آبشستگی در پایه اول در گروه پایه‌های سه‌تایی به دلیل پدیده تقویت‌کننده پایه‌های دیگر بیشتر از تک‌پایه است. همچنین به دلیل پدیده حفاظت‌کنندگی پایه‌های اول و دوم، میزان آبشستگی در پایه سوم همیشه کمتر از تک‌پایه است. در پایه دوم اثرات این پدیده‌ها یکدیگر را خنثی کرده و میزان آبشستگی به طور تقریبی برابر با آبشستگی تک‌پایه است. حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) با انجام آزمایش‌هایی روی گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی بدون محافظ دیدند که عمق آبشستگی در کنار پایه دوم گروه پایه‌های سه‌تایی به طور تقریبی با عمق آبشستگی تک‌پایه برابر است که با نتایج این آزمایش همخوانی دارد.

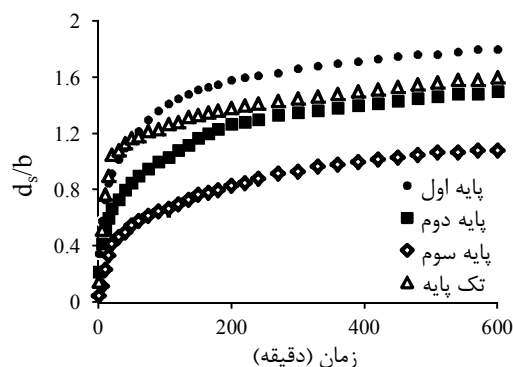
با توجه به بررسی ایزدی‌نیا و حیدرپور (۲۰۱۲) مبنی بر این که کابل با قطر بیشتر و زاویه پیش کمتر دارای تأثیر بیشتری در کاهش آبشستگی است پس در این پژوهش از ضخیم‌ترین اندازه کابل در بررسی مذکور یعنی کابل با قطر ۰/۱۵ برابر قطر پایه با زاویه پیش ۱۵ درجه استفاده شد. بررسی‌های انجام شده روی طوقه نشان می‌دهد که طوقه با قطر دو برابر قطر پایه دارای بیشترین کارایی در کاهش عمق آبشستگی است بنابراین از طوقه با این اندازه استفاده شد که روی بستر قرار می‌گرفت. شکل ۳ چگونگی کارگذاری کابل و طوقه در کنار گروه پایه‌های سه‌تایی را نشان می‌دهد.



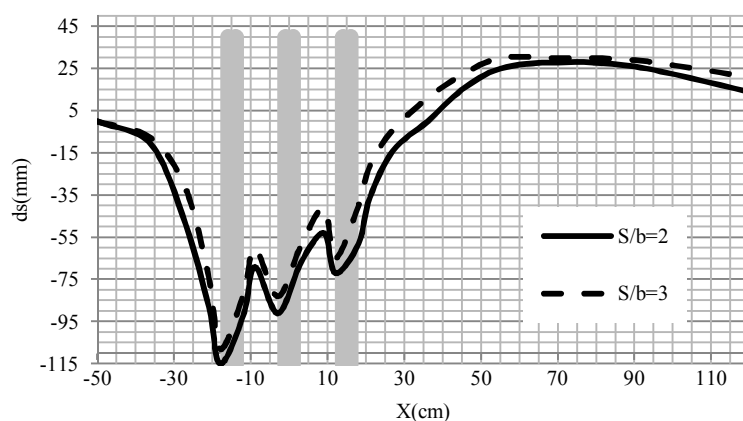
شکل ۳- شمایی از روش‌های محافظتی گروه پایه‌های سه‌تایی

پژوهشگران معیارهای مختلفی را برای زمان تعادل مطرح کرده‌اند. میا و نگو (۲۰۰۳) زمان تعادل را زمانی معرفی کردند که یک ساعت پس از آن عمق آبشستگی کمتر از ۱ میلی‌متر باشد. بر اساس معیار کومار و همکاران (۱۹۹۹) زمان تعادل مدت زمانی است که در سه ساعت

با توجه به بررسی‌های حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) افزایش فاصله بین پایه‌ها در پایه‌های بدون محافظ تأثیر کمی روی عمق نهایی آب‌شستگی دارد. در این بررسی نیز با توجه به شکل ۵ با افزایش  $S/b$  از دو به سه عمق نهایی آب‌شستگی در حدود ۱ درصد تغییر کرد.



شکل ۴- توسعه زمانی آب‌شستگی در گروه پایه سه‌تایی در مقایسه با تک پایه



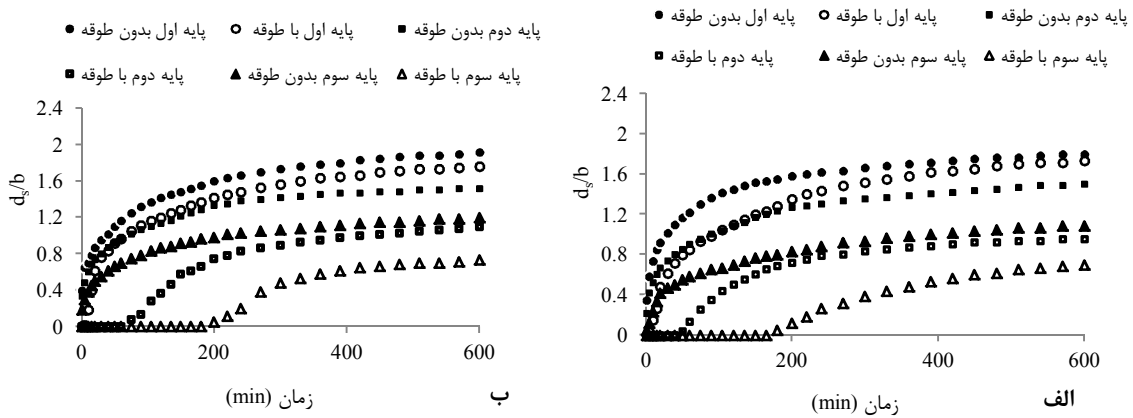
شکل ۵- مقایسه عمق نهایی آب‌شستگی در گروه پایه‌های سه‌تایی با  $S/b=2$  و  $S/b=3$

عمق گودال آب‌شستگی نسبت به گروه پایه‌ها با  $S/b=2$  باشد.

از شکل ۶ می‌توان دریافت که بهترین عملکرد طوقه در گروه پایه‌ها در حالتی است که فضای بین دو پایه به طور کامل با طوقه پوشیده شده است ( $S/b=2$ ). در این حالت میزان کاهش عمق آب‌شستگی در پایه‌های اول، دوم و سوم نسبت به گروه پایه‌های بدون محافظ به ترتیب برابر ۹، ۳۷ و ۴۱ درصد است. حیدرپور و همکاران (۲۰۱۰) کاهش عمق آب‌شستگی در کنار گروه پایه‌های سه‌تایی با  $S/b=3$  را به ترتیب ۱۹ و ۴۵ درصد بیان کردند. بر اساس آزمایش‌های این پژوهش، میزان تأثیر طوقه بر کاهش عمق آب‌شستگی و افزایش تأخیر زمانی برای هر یک از پایه‌ها در دو حالت  $S/b=2$  و  $S/b=3$  در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ب) پایه محافظت شده با طوقه

در این حالت از طوقه‌ای به اندازه دو برابر قطر پایه در کنار تک پایه و گروه پایه‌های سه‌تایی استفاده شد. با شروع آزمایش، اولین نشانه آب‌شستگی در انتهای طوقه سوم مشاهده شد که در حال پیشروی به طرف کناره‌ها و بالادست آن بود. پس از مدتی شیاری در کنار طوقه‌های اول و دوم نیز دیده شد. با رسیدن آب‌شستگی به خود پایه، شیب دیواره گودال ایجاد شده کاهش یافته و عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. صرف‌نظر از فاصله پایه‌ها عمق گودال آب‌شستگی در جلو پایه اول تفاوت چندانی با پایه جلویی گروه پایه سه‌تایی بدون محافظ ندارد؛ ولی در پایه‌های دوم و سوم با افزایش فاصله بین پایه‌ها، زمان تأخیر و عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. در گروه پایه‌های سه‌تایی با  $S/b=3$  فضای بین پایه‌ها به طور کامل با طوقه پوشیده نشده است و همین امر می‌تواند دلیلی بر افزایش



شکل ۶- توسعه زمانی آبشستگی گروه پایه‌های سه‌تایی حفاظت شده با طوقه با الف)  $S/b=2$  و ب)  $S/b=3$

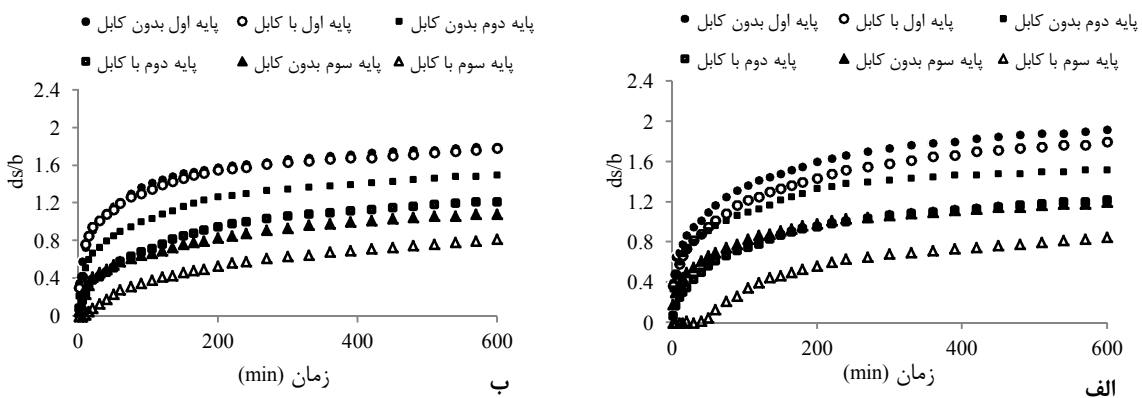
جدول ۲- میزان کاهش عمق آبشستگی و میزان تأخیر زمانی در کنار پایه‌های محافظت شده با طوقه

آزمایش	S/b	پایه	تأخیر زمانی (دقیقه)	کاهش عمق آبشستگی (%)
تک‌پایه	-	۱	۱۲۰	۲۴
گروه پایه‌های سه‌تایی	۲	۱	۲	۹
		۲	۴۸	۳۳
	۳	۱	۴	۴۱
		۲	۷۰	۲۶
		۳	۱۹۹	۳۲

### ج) پایه محافظت شده با کابل

چند دقیقه وجود دارد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق نهایی آبشستگی و تأخیر زمانی به طور تقریبی ثابت است و به نظر می‌رسد که اختلاف جزئی آن‌ها به دلیل پدیده‌های تقویت‌کنندگی و حفاظت‌کنندگی پایه‌ها بر هم است. پس می‌توان گفت که فاصله بین پایه‌ها تأثیری در کارایی و عملکرد کابل ندارد.

در این حالت، توسعه زمانی آبشستگی گروه پایه‌های سه‌تایی محافظت شده با کابلی به قطر ۹ میلی‌متر و زاویه پیچش ۱۵ درجه نسبت به افق، برای  $S/b=2$  و  $S/b=3$  با پایه بدون محافظ مقایسه شد (شکل ۷). نتایج نشان داد که تأثیر کابل در کاهش عمق نهایی آبشستگی برای  $S/b=2$  به ترتیب برابر ۸، ۲۲ و ۲۹ درصد و برای  $S/b=3$  به ترتیب برابر ۷، ۲۴ و ۳۰ درصد است. همچنین در هر دو فاصله پایه‌ها، تأخیر زمانی فقط برای پایه سوم و به مقدار



شکل ۷- توسعه زمانی آبشستگی گروه پایه‌های سه‌تایی محافظت شده با کابل با الف)  $S/b=2$  و ب)  $S/b=3$

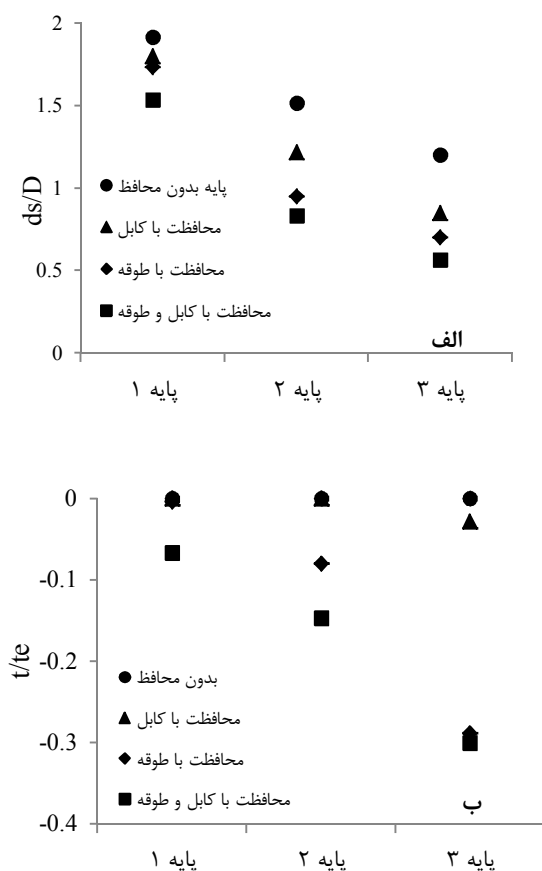
با توجه به جدول ۳، استفاده از کابل سبب کاهش ۱۲ درصدی عمق نهایی آبشستگی تک پایه نسبت به پایه محافظت نشده می شود که با بررسی ایزدی نیا و حیدرپور (۱۳۹۱) که مقدار کاهش را ۱۳ درصد گزارش کرده اند، مطابقت دارد.

جدول ۳ میزان تأثیر کابل بر کاهش عمق آبشستگی و افزایش تأخیر زمانی را برای هر یک از پایه ها در دو حالت  $S/b=2$  و  $S/b=3$  نشان می دهد. از این جدول می توان دریافت که تأخیر زمانی ایجاد شده کابل برای پایه های اول و دوم برابر صفر است. تأخیر زمانی کمی که در کنار پایه سوم دیده می شود نیز شاید به دلیل نقش حفاظت کنندگی پایه های اول و دوم است.

جدول ۳- مقدار کاهش عمق آبشستگی و میزان تأخیر زمانی در کنار پایه های محافظت شده با کابل

آزمایش	S/b	پایه	تأخیر زمانی (دقیقه)	کاهش عمق آبشستگی (%)
تک پایه	-	۱	۰	۱۲
		۱	۰	۶
	۲	۲	۰	۱۹
		۳	۱۷	۲۹
گروه پایه های سه تایی		۱	۰	۰
	۳	۲	۰	۱۷
		۳	۸	۲۴

عمق آبشستگی، به ویژه برای پایه های اول و دوم، استفاده از آن همراه با طوقه توصیه می شود.



شکل ۸- نمودار بی بعد مقایسه عمق آبشستگی (الف) و زمان تأخیر (ب) برای گروه پایه های سه تایی با  $S/b=2$

از مقایسه شکل های ۶ و ۷ و داده های جدول های ۲ و ۳ می توان دریافت که طوقه به دلیل جلوگیری از برخورد جریان روبه پایین با رسوبات اطراف پایه، کارایی بهتری نسبت به کابل دارد زیرا کابل فقط قادر به کاهش جریان روبه پایین است.

#### د) پایه محافظت شده با کابل و طوقه

در این حالت استفاده همزمان از کابل و طوقه برای کاهش آبشستگی بررسی شد. با توجه به شکل ۸ که نمودار بدون بعد عمق آبشستگی (عمق نهایی به قطر پایه) و زمان تأخیر (زمان نسبت به زمان تعادل) را برای گروه پایه های سه تایی با  $S/b=2$  نشان می دهد؛ می توان دریافت که استفاده همزمان از کابل و طوقه به مراتب تأثیر بیشتری در کاهش عمق نهایی آبشستگی و افزایش زمان تأخیر نسبت به کاربرد طوقه تنها، دارد؛ به طوری که استفاده از کابل و طوقه مقدار کاهش عمق نهایی آبشستگی در کنار پایه های اول، دوم و سوم را نسبت به طوقه تنها به ترتیب ۱۱، ۱۲ و ۱۹ درصد افزایش می دهد؛ دلیل آن می تواند کاهش قدرت جریان روبه پایین و ضعیف تر شدن گرداب های نعل اسبی در جلو پایه به سبب استفاده از کابل باشد. به عبارتی می توان گفت که کابل فقط می تواند کارایی طوقه را در برابر این پدیده افزایش دهد و با توجه به تأثیر کم استفاده از کابل تنها در کاهش

بیشتر از پایه‌های اول و دوم است که دلیل آن پدیده حفاظت کنندگی پایه‌های اول و دوم است. شکل ۹ عمق آبشستگی در کنار گروه پایه‌های سه‌تایی محافظت شده با کابل، طوقه و کابل و طوقه را برای  $S/b=2$  و  $S/b=3$  نشان می‌دهد.

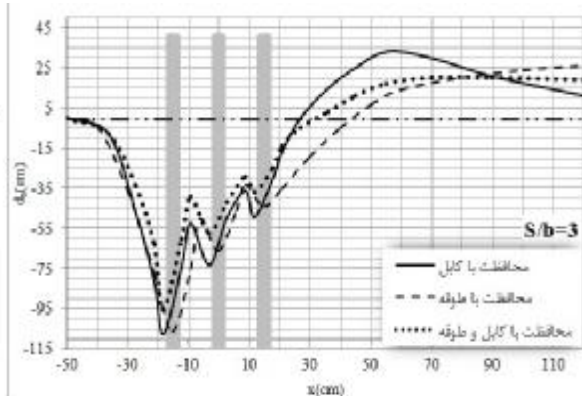
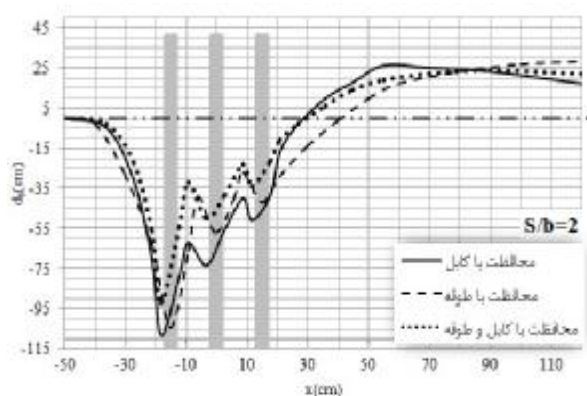
نتایج آزمایش‌ها به طور خلاصه در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول درصد کاهش عمق آبشستگی در جلو گروه پایه‌های سه‌تایی محافظت شده با کابل و طوقه، با سه پایه بدون محافظ و پایه‌های محافظت شده با کابل و طوقه مقایسه شده است. در جدول ۴ مشاهده می‌شود که تأثیر استفاده از کابل و طوقه در جلو پایه سوم به مراتب

جدول ۴- مقایسه میزان کاهش عمق آبشستگی در گروه پایه‌های سه‌تایی محافظت شده با کابل و طوقه نسبت به حالت‌های دیگر

پایه	S/b	زمان تأخیر(دقیقه)	محافظة نشده	محافظة شده با کابل	محافظة شده با طوقه
۱	۳	۴۸	۱۲	۱۱	۱۰
۲	۳	۱۸۰	۳۷	۱۹	۱۴
۳	۳	۲۳۴	۴۳	۲۴	۱۶
۱	۲	۳۹	۲۰	۱۵	۱۱
۲	۲	۹۰	۴۵	۳۱	۱۲
۳	۲	۱۷۷	۵۳	۳۳	۱۹

افزایش عمق آبشستگی می‌تواند به دلیل خالی ماندن مقداری از فضای بین دو پایه باشد چرا که، هنگامی که  $S/b=3$ ، دو طوقه هم‌پوشانی نداشته و مقداری از فضای بین دو پایه بدون پوشش است.

با توجه به شکل ۹ و جدول ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین پایه‌ها زمان تأخیر افزایش می‌یابد ولی تأثیر کابل و طوقه در کاهش عمق نهایی آبشستگی کم می‌شود یعنی عمق نهایی آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۹- مقایسه عمق آبشستگی در کنار گروه پایه‌های سه‌تایی محافظت شده

کاهش عمق آبشستگی و افزایش زمان تأخیر کم است. به دلیل این که هر کدام از این روش‌ها به تنهایی نمی‌تواند محافظ مناسبی برای پایه‌ها به ویژه پایه اول به شمار آید، تأثیر همزمان آن‌ها بررسی شد. بیشترین تأثیر کابل و طوقه در حالتی است که فاصله بین پایه‌ها به طور کامل با طوقه پوشیده شده باشد ( $S/b=2$ ). در این حالت میزان کاهش عمق نهایی آبشستگی در کنار پایه‌های اول، دوم

### نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر استفاده همزمان کابل و طوقه در کاهش آبشستگی گروه پایه‌های سه‌تایی بررسی شد. آزمایش‌ها برای رسوبات یکنواخت و در شرایط آستانه حرکت ذرات انجام شد. نتایج نشان داد که طوقه می‌تواند عمق آبشستگی را کاهش داده و فرآیند آن را به تأخیر بیندازد. ولی کابل کارایی ضعیف‌تری داشته و تأثیر آن در



- Journal of Sediment Research. 27(3): 394-401.
10. Hannah C. R. 1978. Scour at Pile Groups. Research Report. 78-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand. p. 18-40.
  11. Heidarpour M. Afzalimehr H. and Ezadinia E. 2010. Reduction of Local Scour around Bridge Pier Groups Using Collars. Journal of Sediment Research. 25(4): 411-422.
  12. Kummar V. RangaRaju K. G. and Vittal N. 1999. Reduction of Local Scour around Bridge Piers Using Slot and Collar. Journal of Hydraulic Engineering. 125(12): 1302-1305.
  13. Mia F. and Nago H. 2003. Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier. Journal of Hydraulic Engineering. 117(7): 891-904.
  14. Moncada-M A. T. Aguirre-PE J. Bolivar J. C. and Flores E.J. 2009. Scour Protection of Circular Bridge Piers with Collars and Slots. Journal of Hydraulic Research. 47(1): 119-126.
  15. Nazariha M. 1996. Design Relationships for Maximum Local Scour Depth for Bridge Pier Groups. PhD Dissertation, University of Ottawa, Canada.
  16. Neil C. R. 1973. Guide to Bridge Hydraulics, Road and Transportation Association of Canada. University of Toronto, Canada.
  17. Raudkivi A. J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherland.
  18. Raudkivi A. J. and Ettema R. 1983. Clear Water Scour at Cylindrical Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 109(3): 338-350.
  19. Tanaka S. and Yano M. 1967. Local Scour around a Circular Cylinder. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Congress. 12(3): 193-201.
  20. Thomas Z. 1967. An Interesting Hydraulic Effect Occurring at Local Scour. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Congress. 11(3): 193-201.
  21. Zarrati A. R. Nazariha M. and Mashahir M.B. 2006. Reduction of Local Scour in the Vicinity of Bridge Pier Groups Using Collars and Riprap. Journal of Hydraulic Engineering. 132(2): 154-162.

و سوم نسبت به حالت بدون محافظ، به ترتیب ۲۳، ۳۱ و ۳۸ درصد است که به ترتیب ۱۱، ۱۲ و ۱۹ درصد بیشتر از حالتی است که فقط از طوقه به عنوان حفاظت کننده پایه‌ها استفاده شد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کابل سبب افزایش کارایی طوقه می‌شود و استفاده از آن به همراه طوقه توصیه می‌شود. با افزایش فاصله بین پایه‌ها زمان تأخیر افزایش و عمق نهایی آب‌شستگی کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین کاهش عمق آب‌شستگی برابر ۵۳ درصد برای  $S/b=2$ ، و بیشترین زمان تأخیر برابر ۲۳۴ دقیقه برای  $S/b=3$  است.

## منابع

۱. ایزدی‌نیا، ا. و حیدرپور م. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه عملکرد کابل و شیار در کنترل آب‌شستگی پایه پل. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۷(۱): ۲۳-۳۲.
۲. کیخانی م. ۱۳۸۵. حفاظت بستر رودخانه در مقابل آب‌شستگی موضعی در محل احداث گروه پایه‌های استوانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
3. Alabi P. D. 2006. Time Development of Local Scour at Bridge Pier Fitted with a Collar. MS thesis, University of Saskatchewan, Canada.
4. Ashtiani B. A. and Beheshti A. A. 2006. Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups. Journal of Hydraulic Engineering. 132(10): 1100-1104.
5. Breusers N.H.C. Nicollet G. and Shen H.W. 1977. Local Scour around Cylindrical Piers. Journal of Hydraulic Research. 15(3): 211-252.
6. Chiew Y. M. 1992. Scour Protection at Bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering. 118(11): 1260-1269.
7. Dey S. Sumer B. M. Fredsøe J. 2006. Control of Scour at Vertical Circular Piles under Waves and Current. Journal of Hydraulic Engineering. 132(3): 270-279.
8. Ettema R. 1980. Scour at Bridge Piers. Rep. No. 112, Dept. of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
9. Ezadinia E. and Heidarpour M. 2012. Simultaneous Use of Cable and Collar to Prevent Local Scouring around Bridge Pier.

