نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۷، شماره ۴ (زمستان ۱۳۹۶)، یادداشت پژوهشی، ۱۱۳-۱۲۱ پیاپی ۸۹

بررسی عملکرد طوق، آبپایه و ترکیب آنها در کنترل آبشستگی پایه پل استوانه‌ای

نازنین شاه‌کرمی *

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

(دریافت: ۹۵/۴/۱۴، پذیرش: ۹۵/۱۱/۹، نشر آنلاین: ۹۵/۱۱/۱۰)

چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سازه‌های رودخانه‌ای، ایجاد فرسایش در فونداسیون پایه‌ای شکل آن‌ها است. با گسترش کنترل نشده این پدیده، چاله آبشستگی سبب تضعیف فونداسیون و در نتیجه ایجاد تهدید برای کل سازه خواهد شد. در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد راهکارهای کنترل آبشستگی پایه پل، روش‌های آبپایه، طوق و سپس ترکیب آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی به صورت آزمایشگاهی برای پایه استوانه‌ای در شرایط آب زلال صورت گرفت. بر اساس توصیه‌های منتج از تحقیقات مرور شده، آبپایه مماس بر وجه پایین‌دست پایه، هم عرض کانال، به صورت عمود از کف تا تراز رسوبات و طوق دایره‌ای با قطر خارجی ۳ برابر پل، در تراز بستر نصب شد. در روش ترکیبی نیز از ادغام دو راهکار قبل به طوری که آبپایه مماس بر پایین‌دست طوق شود، استفاده گردید. مقایسه راهکارها با آزمایش شاهد نشان داد طوق سبب افزایش زمان تعادل شده، اما آبپایه این زمان را کاهش داده است. در روش ترکیبی زمان تعادل، مابین زمان تعادل هر راهکار به تنهایی و تقریباً مشابه با آزمایش شاهد گردید. در کاهش عمق حداکثر آبشستگی، بهترین عملکرد مربوط به ترکیب طوق و آبپایه، سپس طوق و بعد از آن آبپایه به ترتیب با ۷۵، ۶۵ و ۲۰ درصد کاهش در کل رودخانه و ۱۰۰، ۹۰ و ۲۰ درصد کاهش در مجاور پل بود. طوق و روش ترکیبی توانسته‌اند اثرات تغییر تراز بستر را در محدوده پل کاملاً بهبود دهند.

کلیدواژه‌ها: آبشستگی، پایه پل، آبپایه، طوق، راهکار کنترل، روش ترکیبی.

۱- مقدمه

طبق آمار ارائه شده در ایران مشکل آبشستگی موضعی در پایه‌های پل عامل اصلی تخریب آنها می‌باشد. تحقیقات انجام شده در هشت منطقه و استان کشور نشان می‌دهد که ۴۲ ٪ از پل‌های این محدوده دچار آبشستگی شده‌اند. همچنین آمار به دست آمده نشان می‌دهد که از تعداد کل پل‌ها که نیاز به مرمت و تعمیر دارند، ۵۷ ٪ آنها به جهت آبشستگی نیاز به تعمیرات دارند (خادم، ۱۳۸۱). الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده بوده که این پیچیدگی با تشکیل حفره آبشستگی در اطراف پایه تشدید می‌شود. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید که عملکرد آنها باعث حفر گودال آبشستگی می‌شود. توسعه این گودال در اطراف پایه‌ها باعث خالی شدن زیر پی‌ها و در نتیجه خرابی آنها و خرابی پل می‌شود. دو عامل مهم که باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شود، یکی برخورد جریان به پایه با ایجاد گرداب نعل اسبی[1] و دیگری جدا شدن جریان از پایه پل با ایجاد گرداب‌های برخاستگی[2] می‌باشد. عمده روش‌هایی که به منظور کنترل و کاهش آبشستگی در پایه‌های پل انجام می‌شود، روش‌های تغییر الگوی جریان و روش‌های افزایش مقاومت ذرات بستر است. در تحقیق حاضر از میان روش‌های تغییر الگوی جریان روش‌های آبپایه، طوق و سپس ترکیب آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. آبپایه یکی از روش‌هایی است که با جلوگیری از توسعه گردابه‌ها بر عمق آبشستگی اثر می‌گذارد. Grimaldi و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که کمترین فاصله بین پایه و آبپایه در پایین‌دست دارای بیشترین تأثیر بوده، به طوری که عمق آبشستگی جلوی پایه را حدود ۲۶ درصد کاهش می‌دهد. رازی و همکاران (۱۳۸۸) در ارزیابی تأثیر موقعیت قرارگیری آبپایه در کاهش عمق آبشستگی نشان دادند هنگامی که آبپایه در بالادست پایه و یا درست در وسط پایه قرار می‌گیرد خطر آبشستگی در پایین‌دست پایه بیشتر احساس می‌شود، در نتیجه قراردادن آبپایه در بالادست توصیه نمی‌شود. همچنین با قرارگیری آبپایه در پایین‌دست پایه و چسبیده به آن،

1. Horse Vortex

2. Wake Vortex

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۳۲۲۱۶۶۹۶-۰۸۶

آدرس ایمیل: n-shahkarami@araku.ac.ir

عمق آبشستگی جلوی پایه حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق Tafarojnoruz و همکاران (۲۰۱۲) در مورد آبپایه نشان داد، هنگامی که آبپایه کاملاً به پایه چسبیده است، عمق آبشستگی جلوی پایه ۱۷/۲درصد کاهش می‌یابد. موحدی و همکاران (۱۳۹۳) به منظور کنترل آبشستگی از آبپایه در پایین‌دست پایه پل تکی و دوتایی در شرایط آب زلال استفاده کردند. برای تک پایه، آبپایه هم تراز با بستر رسوبی و در دو فاصله در پایین‌دست تک پایه قرار گرفت. نتایج نشان داد هنگامی‌که آبپایه به پایه چسبیده است، حداکثر کارایی آبپایه حاصل می‌شود؛ به طوری که عمق آبشستگی جلوی پایه ۲۹/۶ درصد کاهش می‌یابد.

طوق‌ها وسایلی هستند که موازی با کف رودخانه و عمود بر پایه، نصب می‌شوند. شکل عمومی طوق‌ها دایره‌ای است. با نصب طوق در اطراف پایه، جریان رو به پایین در حین برخورد به طوق از بستر منحرف شده و باعث کاهش آبشستگی می‌شود (Chiew، ۱۹۹۲). Moncada و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از طوق به ابعاد سه برابر قطر پایه، عمق آبشستگی را ۱۰۰ درصد کاهش دادند. در حالی که Zarrati و همکاران (۲۰۰۴) کاهش آبشستگی برای همان شکل طوق و پایه را ۲۷٪ گزارش کردند. Karimaee و Zarrati (۲۰۱۱) از آرایش مختلف طوق در پایه استوانه‌ای استفاده کردند. بهترین نتیجه برای شرایطی حاصل شد که دو طوق، یکی در تراز بستر و دیگری در ترازی به میزان قطر پایه در داخل بستر نصب می‌شوند که در این حالت عمق آبشستگی نهایی به میزان بیش از ۵۰٪ کاهش یافته و از طرفی گستردگی حفره در اطراف پایه به میزان ۳۰٪ افزایش یافت. ثانیخانی و همکاران (۱۳۸۷) نشان دادند که طوق نصب شده در زیر و روی سطح بستر مؤثرتر از طوق-های قرار گرفته در بالای بستر هستند. مسجدی و محمودی (۱۳۹۰) به بررسی پنج قطر متفاوت از طوق در ۴ ارتفاع نصب متفاوت در اطراف پایه پل استوانه‌ای در حالت آب زلال در قوس پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که حداقل میزان آبشستگی با قطر سه برابر قطر پایه در تراز D ۰/۱ زیر بستر ایجاد شد که ۹۳٪ میزان آبشستگی را کاهش داد. Jahangirzadeh و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی به بررسی راندمان استفاده از طوق مستطیلی و دایره‌ای روی کاهش حجم و عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل پرداختند. آنها همچنین با استفاده از نتایج حاصل از به کارگیری هر دو نوع شکل طوق، دو معادله برای پیش‌بینی عمق آبشستگی ارائه دادند.

در روش‌های ترکیبی نیز با به کارگیری هم‌زمان روش‌های مختلف سعی در کاهش آبشستگی می‌شود. Chiew (۱۹۹۲) آزمایشاتی روی ترکیب طوق و شکاف انجام داد. Parker و همکارانش (۱۹۹۸) از ترکیب شمع‌های صفحه‌ای نفوذپذیر همراه با سنگچین به عنوان یک اقدام در کنترل آبشستگی برای پایه‌های استوانه‌ای و مستطیلی استفاده کردند. Zarrati و همکاران (۲۰۰۶) از ترکیب طوق‌های به هم پیوسته و سنگچین در شرایط آب زلال استفاده کردند. شریعتی و همکاران (۱۳۹۰) با به کارگیری طوق مربعی و شکاف، عمق آبشستگی را کاهش دادند. شجاعی و همکاران (۱۳۹۰) کاهش عمق حفره آبشستگی با ترکیب طوق و چهار عدد صفحه در پایه استوانه‌ای را بررسی نمودند. حسینی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده هم‌زمان صفحات مستغرق و طوق برای پایه‌های مستطیلی دماغه گرد آبشستگی را کاهش دادند. عقلی و زمردیان (۱۳۹۲) با استفاده از مدل فیزیکی، تأثیر توأم طوق و کابل روی عمق آبشستگی اطراف پایه در قوس رودخانه را مورد مطالعه قرار دادند. Akib و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی تأثیر افزایش راندمان به کارگیری توأم طوق و ژئوبگ، در مقایسه با استفاده منفرد از آنها پرداختند.

در این تحقیق به منظور بررسی راهکارهای کنترل آبشستگی پایه پل با استفاده از روش‌های آبپایه و طوق با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، سعی شد از توصیه‌های تحقیقات مشابه قبلی که منجر به بهترین عملکرد گردیده بودند، همچنین ترکیب آنها استفاده شده و نتایج مقایسه گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

برای انجام تحلیل ابعادی از مرجع حسن‌پور و همکاران (۱۳۹۲) استفاده شد که به صورت خلاصه به شرح ذیل است.

عوامل متعددی بر میزان آبشستگی در اطراف پایه‌های پل تأثیر می‌گذارند که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

سرعت آستانه حرکت (V_C)، سرعت جریان (V) عمق جریان (Y)، عرض پایه (D)، طول پایه (L)، شتاب ثقل (g)، چگالی سیال (ρ_w)، لزجت سینماتیکی (ν)، چگالی ذرات رسوبی (ρ_s)، اندازه رسوبات (d_{50})، مدت زمان انجام آزمایش (T) در حالت کلی می‌توان نوشت:

$$f_1(d_s, y, D, l, V, g, \rho_w, \rho_s, \nu, d_{50}, V_c, T) = 0 \quad (۱)$$

با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه بالا را می‌توان به صورت تابع بدون بعد زیر نوشت:

$$f_2\left(\frac{y}{D}, \frac{l}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{gy}{V^2}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{\nu}{VD}, \frac{d_s}{D}, \frac{VT}{D}, \frac{V}{V_C}\right) = 0 \quad (۲)$$

با توجه به این که ρ_s، ρ_w، d_{50}، D، l و y در تمام آزمایشات ثابت می‌باشند و همچنین $\frac{\nu}{VD}$ بیانگر عکس عدد بدون بعد رینولدز و $\frac{gy}{V^2}$ عکس مجذور عدد بدون بعد فرود و $\frac{V}{V_c}$ بیانگر شدت جریان می‌باشند که در آزمایشات انجام شده تقریباً ثابت هستند، لذا می-توان از تأثیر این پارامترها صرف‌نظر شده و رابطه (۲) را به صورت زیر نوشت:

$$f_3\left(\frac{d_s}{D}, \frac{V.T}{D}\right) = 0 \quad (۳)$$

در رابطه فوق $\frac{d_s}{D}$ عمق بدون بعد آبشستگی و $T^* = \frac{V.T}{D}$ زمان بی‌بعد است.

۲-۲- آماده‌سازی آزمایشگاهی

به این منظور از فلوم تحقیقاتی آزمایشگاه هیدرولیک گروه عمران دانشگاه اراک استفاده شد. این کانال شیب‌پذیر، دارای ۹ متر طول، ۵۰ سانتی‌متر عرض و ۶۰ سانتی‌متر ارتفاع است. دیواره کانال از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت ۵ میلی‌متر است. اندازه‌گیری جریان توسط یک دبی سنج التراسونیک صورت می‌گیرد. آب در یک سیکل بسته به داخل کانال پمپاژ می‌شود. در انتهای کانال هم یک دریچه قرار گرفته که می‌توان برای تنظیم ارتفاع از آن استفاده نمود. به منظور کاهش مصالح به کار رفته در کانال از یک کف کاذب با عمق ۲۰ سانتی‌متر استفاده گردید. بخشی که برای انجام آزمایش استفاده گردید در طول ۲/۵ متر میانی به فاصله ۳/۵ متر از ابتدای کانال قرار داشت که با رسوبات پر شد، ضمن آن که برای شبیه‌سازی بهتر شرایط با رودخانه طبیعی روی کف کاذب هم به ضخامت ۲ تا ۳ سانتی‌متر رسوب ریخته شد.

۲-۳- اعمال محدودیت‌های لازم در مدل‌سازی

در انتخاب قطر مدل پایه باید اثر جانبی به وسیله دیواره‌های فلوم روی آبشستگی موضعی اطراف پایه در نظر گرفته شود. در کلیه آزمایش‌ها برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی، طبق توصیه‌هایChiew و Melville (۱۹۸۷) قطر پایه (D) نباید از ۱۰ درصد عرض کانال (b) بیشتر باشد. همچنین Raudkivi و Ettema (۱۹۸۳) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض فلوم را ۰/۱۶ بیان کرده‌اند. در این تحقیق به منظور تأمین این شروط قطر پایه برابر ۵ cm لحاظ شد.

طبق توصیه Raudkivi و Ettema (۱۹۸۳) برای جلوگیری از تشکیل ریپل قطر متوسط ذرات (d_{50}) باید از ۰/۷ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. قطر متوسط ذرات رسوبی باید به گونه‌ای باشد که حداکثر مقدار عمق آبشستگی ایجاد شود. آنها برای این موضوع شرط ۲۵-۲۰ <D/d_{50} را مطرح کرده‌اند. Melville (۱۹۹۷) برای این موضوع شرط (۲۵ <D/d_{50}) را مطرح کرده است. همچنین Lee و Storm (۲۰۰۹) نیز حداقل مقدار را برای D/d_{50} برابر ۲۵ بیان کردند. همچنین برای حذف اثر رسوبات روی عمق آبشستگی نسبت قطر پایه به متوسط ذرات باید بیشتر از ۵۰ نباشد (Chiew، ۱۹۸۷). با انتخاب میکروسیلیس با قطر متوسط ۱mm، انحراف معیار ۱/۳ و چگالی ۲/۶ تمام شرایط لازم فوق‌الذکر تأمین شد.

Melville و Chiew (۱۹۹۹) حداکثر مقدار آبشستگی را ۲/۴D بیان کرده‌اند و لذا عمق رسوبات باید بیشتر از این مقدار لحاظ شود. با توجه به این که در این تحقیق در تمام آزمایش‌ها عمق رسوبات بیش از ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شده است، این شرط تأمین می‌شود.

عمق جریان آب در کانال آزمایشگاهی یکی از کمیت‌هایی است که اگر به درستی انتخاب نشود حداکثر مقدار عمق آبشستگی، تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. طبق توصیه Oliveto و Hager (۲۰۰۲) برای جلوگیری از آثار زبری، عمق آب بیشتر از ۲۰ میلی‌متر پیشنهاد شده است. طبق مطالعات Chiew (۱۹۹۵) چنانچه ۳ <Y/D باشد، عمق جریان تأثیری بر روی عمق آبشستگی ندارد. برای حفظ این شروط در تمام آزمایش‌های انجام شده، عمق آب حدود ۲۰ سانتی‌متر (بین ۲۰ تا ۲۰/۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد (ستون دوم جدول (۱)).

در این تحقیق مدل برای حالت آبشستگی آب زلال طراحی شد. با توجه به این که آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی شده است، لذا به منظور جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوبات در بالادست پایه، سرعت متوسط جریان باید کمتر از سرعت بحرانی باشد (V/V_c< 1). برای تعیین سرعت برشی بحرانی به ازای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سلسیوس روابط زیر تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد (Melville، ۱۹۹۷).

جدول ۱- مشخصات جریان در هریک از آزمایش‌های این تحقیق

آزمایش		دبی (m^3/s)	عمق (cm)	ارتفاع رسوب (cm)	U*c (m/s)	V_C (m/s)	V(m/s)	V/V_C
پایه پل		۲۱/۶	۲۰	۲۲/۶		۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۵۲
پایه پل همراه با	طوق	۲۲/۲	۲۰/۴	۲۲/۶	۰/۰۲۴	۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۵۲
	آبپایه	۲۲	۲۰	۲۲/۶		۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۵۲
	طوق + آبپایه	۲۱/۲	۲۰/۵	۲۲/۵		۰/۴۲	۰/۲۱	۰/۵

$$U_{*C} = 0.0115 + 0.0125{d_{50}}^{1.4} \qquad 0.1\ \text{mm} < d_{50} < 1\text{mm}$$

$$U_{*C} = 0.0305{d_{50}}^{0.5} - 0.0065{d_{50}}^{-1} \qquad 1\ \text{mm} < d_{50} < 100\text{mm} \qquad (۴)$$

و برای سرعت بحرانی (V_C) از رابطه زیر استفاده نمود:

$$\frac{V_C}{U_{*C}} = 5.75\log(5.53\frac{y}{d_{50}}) \qquad (۵)$$

طبق نظر ملویل و چیو (۱۹۹۹) آبشستگی آب زلال موقعی ایجاد می‌گردد که سرعت متوسط جریان در محدوده $0.3\ V_c<V<V_c$ باشد. بر اساس قطر مصالح ۱mm و عمق‌های لحاظ شده در هر یک از آزمایش‌های انجام شده این تحقیق مقدار سرعت بحرانی از روابط (۴) و (۵) به دست آمد که نتایج آن در جدول (۱) آمده است. همان طور که قابل ملاحظه است، نسبت سرعت به سرعت بحرانی در تمام آزمایشات مقدار ۰/۵ به دست آمده است که شروط فوق را تأمین می‌کند. لازم به ذکر است V_C در تحقیقاتی که به صورت آزمایشگاهی حاصل شده، مقدار کمتری نسبت به آنچه از فرمول فوق منتج می‌گردد، می‌باشد. به عنوان مثال موحدی و همکاران (۱۳۹۵) با قطری مشابه به مقدار این تحقیق، مقدار سرعت بحرانی آزمایشگاهی را m/s ۰/۳ به دست آورده است که این به معنای نزدیک شدن نسبت V/V_c واقعی به یک است. اما در هر صورت مهم تأمین شدن معیارهای اشاره شده است.

در تمام آزمایش‌ها، شیب کانال ثابت ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شد. جریان دائمی، یکنواخت می‌باشد. کنترل زیر بحرانی جریان در طی آزمایشات و متلاطم بودن آنها نیز با استفاده از محاسبه اعداد بدون بعد فرود و رینولدز انجام گرفت که برای پایه پل بدون محافظ، با طوق و با آبپایه به ترتیب ۰/۲ و $۲/۴\times۱۰^{۳}$ و برای ترکیب طوق و آبپایه به ترتیب ۰/۱ و $۲/۳\times۱۰^{۳}$ حاصل شد.

۲-۴- انجام آزمایشات

به این منظور در هر آزمایش پس از نصب پل و تجهیزات محافظتی (در صورت وجود) رسوبات کف، توسط ارابه تسطیح متحرک به طور یکسان در جهت طولی و عرضی در سراسر فلوم گسترانده شد. پیش از راه‌اندازی پمپ، دریچه انتهایی بسته و آب زلال به آرامی از انتها به درون کانال هدایت شد تا از ایجاد ریپل و ناهمواری در سطح بستر جلوگیری شود. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوبات بعد از گذشت چند دقیقه، پمپ با دبی کمی راه‌اندازی شد. سپس به آرامی دبی به میزان مورد نظر رسانده شد (ستون اول جدول (۱)). بعد از آن با تنظیم دقیق دریچه پایین‌دست، عمق لازم (ستون دوم جدول (۱)) حاصل شد. در طول زمان انجام آزمایش، توسط دستگاه عمق‌سنج با دقت میلی-متر، بیشترین عمق آبشستگی حول پایه در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. بعد از اتمام آزمایش و قطع دبی ورودی به فلوم، دریچه انتهایی به آرامی پایین آورده شده تا آب در فلوم به آرامی زهکشی شده و آسیبی به توپوگرافی اطراف پایه وارد نسازد. سپس به وسیله متر لیزری با دقت میلی‌متر، در یک شبکه ۱×۱ سانتی-متری که مرکز پل صفر مختصاتی آن بود توپوگرافی بستر در اطراف پایه برداشت شد.

۲-۴-۱- آزمایش پایه پل بدون محافظ

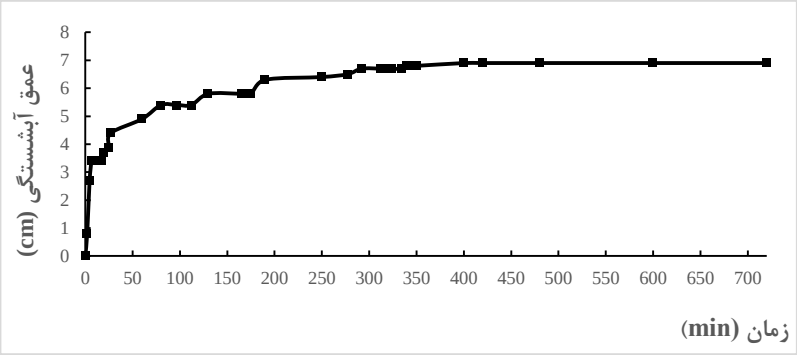
در این تحقیق ابتدا آبشستگی پایه پل استوانه‌ای بدون هیچگونه محافظتی به عنوان آزمایش شاهد انجام گرفت تا مبنایی برای ارزیابی عملکرد راهکارهای کنترل در کاهش میزان آبشستگی و تغییرات بستر باشد. شکل (۱) شروع و پایان آزمایش شاهد را نشان داده است.

همچنین زمان رسیدن به تعادل اولیه نیز بر اساس این آزمایش مشخص گردید. بدین منظور از تحقیق Melvile و Chiew (۱۹۹۹) استفاده شد. آنها یک آزمایش طولانی به مدت ۲۴ ساعت روی پایه پل بدون طوق در دبی ۳۲ لیتر بر ثانیه انجام دادند. با توجه به نمودار به دست آمده از تحقیق آنها مشخص شد که در ۶ ساعت اول تقریباً ۹۸ درصد آبشستگی رخ می‌دهد. بنابر این در کلیه آزمایش‌ها، زمان تعادل ۶ ساعت در نظر گرفته شد. در این تحقیق نیز نمودار توسعه زمانی آبشستگی برای پایه پل بدون محافظ (آزمایش شاهد) بررسی شد (شکل (۲)).

(الف)

(ب)

شکل ۱- الف) آماده‌سازی کانال قبل شروع آزمایش، ب) زهکشی کامل کانال در پایان آزمایش آبشستگی پایه پل



شکل ۲- توسعه زمانی تدریجی آبشستگی برای نمونه شاهد

مشاهده گردید که تغییرات عمق آبشستگی در ابتدا زیاد بوده، ولی با گذشت زمان رفته رفته کم شده به طوری که ۷۵ درصد آبشستگی در ۷۰ دقیقه اول رخ داده است. در ضمن از دقیقه ۲۹۰ تا ۴۰۰ تغییرات آبشستگی تنها ۱ mm اندازه‌گیری شده است که بر این اساس معیار Raudkivi و Ettema (۱۹۸۳) را که بیان کرده مدت زمان انجام آزمایش زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در یک بازه ۴ ساعته کمتر از ۱ mm باشد را نیز تأمین می‌کند. بر این اساس و برای حفظ اطمینان از دادن فرصت کافی برای آبشستگی، زمان تعادل حداقل ۶ ساعت برای تمام آزمایش‌ها مبنا قرار گرفت.

۲-۴-۲- آزمایش پایه پل همراه با راهکارهای محافظتی

به منظور ارزیابی راهکارهای کنترل آبشستگی پایه پل، یکبار آزمایش پایه همراه با آبپایه، بار دیگر با طوق پایین‌دست و در نهایت با ترکیب دو روش قبل یعنی آبپایه و طوق به صورت هم-زمان انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات مرور شده مرتبط، در استفاده از آبپایه بلافاصله پایین‌دست پایه پل، مماس بر آن آبپایه‌ای قرار گرفت که کل عرض کانال را پوشانده و ضخامت آن ۵ میلی‌متر بود. ارتفاع آن نیز از کف تا تراز رسوبات قرار گرفت. در راهکار پل همراه با طوق محافظ نیز بر اساس توصیه‌های منتج از تحقیقات مرور شده، از طوق به ابعاد سه برابر قطر پایه استفاده شد. لذا قطر داخلی طوق ۵ cm، قطر خارجی ۱۵ cm و ضخامت ۳ mm انتخاب شد و طوق در تراز بستر نصب گردید. در روش ترکیب طوق و آبپایه نیز مجددا طوق با قطر سه برابر قطر پایه مماس بر سطح بستر قرار گرفته و آبپایه با عرض برابر عرض کانال درست مماس بر طوق در پایین‌دست طوق به نحوی قرار گرفت که هم تراز رسوبات قرار گیرد. شکل (۳) پایان مرحله زهکشی آزمایش‌های مربوط به کنترل آبشستگی انجام شده در این تحقیق را نشان داده است.

(الف) (ب) (ج)

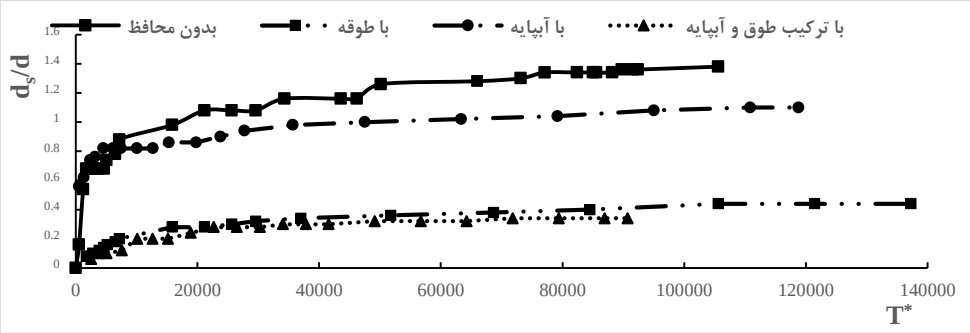
شکل ۳- پایان مرحله زهکشی آزمایش کنترل آبشستگی پایه پل با: الف) آبپایه، ب) طوق، ج) ترکیب طوق و آبپایه

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر راهکار کنترل در توسعه زمانی حداکثر آبشستگی اطراف پایه پل

گسترش زمانی آبشستگی اطراف پایه پل در هر یک از آزمایش‌ها در شکل (۴)، همچنین زمان ایجاد ۷۵٪ میزان آبشستگی نهایی در جدول (۲) آمده است. در آزمایش آبپایه، ۷۵٪ میزان آبشستگی تنها در ۳۰ دقیقه اول انجام می‌گیرد. پس از آن افزایش عمق آبشستگی با روند بسیار کمی تا ۶ ساعت ادامه پیدا کرده است و پس از آن به مدت ۱۰۰ دقیقه ثابت باقی ماند. وجود طوق زمان شروع آبشستگی را به تأخیر انداخته است، به طوری که

در این آزمایش ۷۵٪ آبشستگی در ۱۳۰ دقیقه اول رخ داده است. این نتیجه مشابه به آنچه است که Alabi (۲۰۰۶) در تحقیق خود به آن اشاره کرده است. به همین دلیل برای اطمینان از نتایج حاصله، آزمایش طوق به مدت ۵۲۰ دقیقه انجام گرفت که از دقیقه ۴۰۰ به بعد مقدار آن ثابت گردید. در آزمایش ترکیبی طوق و آبپایه ۷۵٪ آبشستگی در ۸۰ دقیقه اول اتفاق می‌افتد. تا این زمان تغییرات زمانی آبشستگی مشابه طوق است اما پس از آن با شیب کمتری نسبت به طوق ادامه می‌یابد که حدوداً از زمان ۲۶۰ تا ۳۶۰ دقیقه مقدار آن بدون تغییر ثبت گردید.



شکل ۴- توسعه زمانی حداکثر آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای

جدول ۲- تأثیر به کارگیری راهکارهای کنترل آبشستگی در زمان تعادل آبشستگی

پایه پل همراه با	--	آبپایه	طوق	ترکیب طوق و آبپایه
زمان ایجاد ۷۵٪ آبشستگی (دقیقه)	۷۰	۳۰	۱۳۰	۸۰

۳-۲- تأثیر راهکار کنترل در کاهش حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه پل

در جدول (۳) حداکثر عمق آبشستگی پایه پل بدون محافظ و با اعمال راهکارهای محافظتی قید شده است. همچنین عملکرد هر راهکار در کاهش عمق آبشستگی به صورت درصد نیز ارائه گردیده است. راهکار آبپایه در پایین‌دست، توانسته حداکثر آبشستگی را به میزان ۲۰٪ کاهش دهد. حدوداً تا چهل دقیقه پس از شروع آزمایش حداکثر آبشستگی در سمت راست پایه بود، اما از آن به بعد به جلوی پایه (مماس بر وجه بالادست پایه) منتقل شد. در طوق در محدوده پایه پل (تا $3D$) میزان آبشستگی ۹۰٪ نسبت به حالت بدون طوق و در کل بستر هم به میزان ۶۵٪ کاهش داده شده است که مبین عملکرد بسیار مطلوب این راهکار در کاهش آبشستگی دارد. محل حداکثر آبشستگی به فاصله ۱۵ cm بعد پل است. راهکار ترکیبی نیز توانسته حداکثر عمق آبشستگی را ۷۵٪ نسبت به پل تنها بهبود دهد. در مقایسه می‌توان گفت که عملکرد این روش ترکیبی، ۷۰٪ نسبت به طوق و ۸۷٪ نسبت به آبپایه بهبود یافته است. ضمن آن که وجود آبپایه مماس بر وجه پایین طوق مانع از ایجاد آبشستگی زیر طوق (در محدوده $3D$ از پل) شده است.

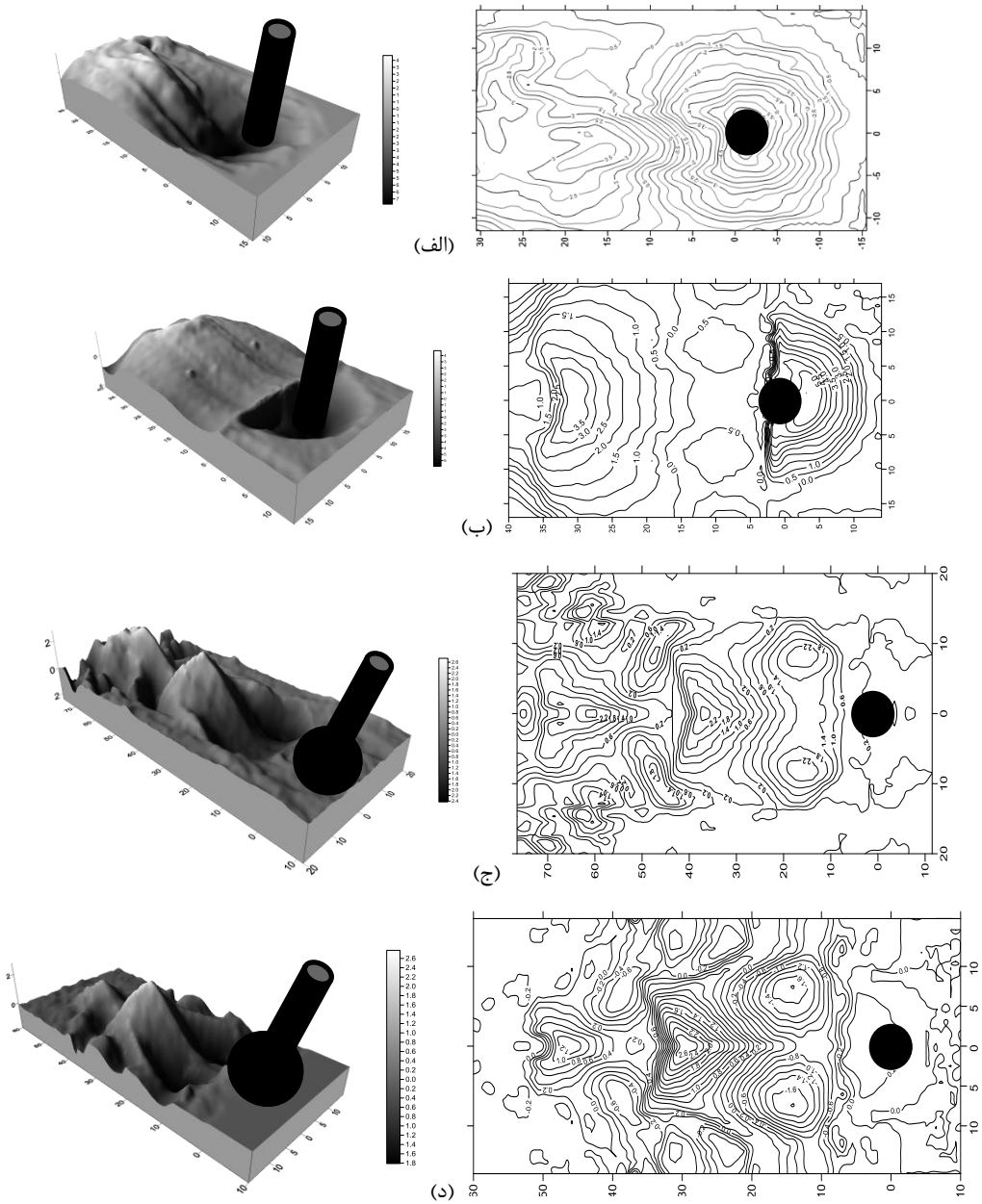
جدول ۳- تأثیر به کارگیری راهکارهای کنترل آبشستگی در کاهش حداکثر عمق آبشستگی

	آزمایش	حداکثر عمق آبشستگی (cm) (ds)	$\frac{d_s}{D}$	درصد کاهش عمق آبشستگی
پایه پل همراه با	----	۶/۹	۱/۴	
	آبپایه	۵/۵	۱/۱	٪۲۰
	طوق	۲/۴، ۰/۷ زیر طوق	۰/۴۸، ۰/۱۴ زیر طوق	٪۶۵، ٪۹۰ زیر طوق
	طوق + آبپایه	۱/۷، ۰ زیر طوق	۰/۳۴	٪۷۵- ٪۱۰۰ زیر طوق

۳-۳- تأثیر راهکار کنترل در پروفیل بستر

در پایان هر یک از آزمایش‌های کنترل آبشستگی، تغییرات توپوگرافی بستر در مجاورت پایه پل به صورت خطوط کنتور و نمایش سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Surfer در شکل (۵) نشان داده شده است. محدوده آبشستگی بستر نسبت به مرکز پل در هریک از آزمایش‌ها در جدول (۴) آمده است. هر یک از راهکارهای محافظتی گستره تغییرات مورفولوژیک بستر بعد از پل را افزایش داده‌اند. این گستره در روش ترکیب طوق و آبپایه تغییر قابل

ملاحظه‌ای نسبت به حالت پایه بدون محافظ نداشته است. اما در بالادست پل می‌توان از نتایج این گونه استباط نمود که افزودن سازه آبپایه به پل، تغییر چندانی در مورفولوژیک بستر نداشته، هر چند از طرفین پل ۳۵٪ میزان آبشستگی را در راستای محور افزوده است. اما افزودن طوق و همچنین ترکیب طوق و آبپایه تغییرات توپوگرافی بستر را در مقایسه با پل تنها در بالادست و جناحین بسیار بهبود داده، به طوری که تقریباً می‌توان تراز بستر را با حالت قبل احداث هر نوع سازه بر آن یکسان فرض کرد. اگر بحث پایداری پل مدنظر قرار گیرد در راهکار آبپایه حداکثر آبشستگی چسبیده به پل در جلوی آن به وقوع می‌پیوندد. در راهکار طوق، در محدوده قرارگیری طوق، حداکثر میزان آبشستگی در بدترین زمان به حدود $\frac{d_s}{D}$ =۰/۰۱ رسیده است. اما اگر بحث مورفولوژی بستر مطرح باشد حداکثر آبشستگی در پایین‌دست طوق به صورت دو چاله متقارن در چپ و راست پل به وقوع می‌پیوندد. ضمن آن که نقطه قعر چاله اول و دوم هم با گذشت زمان به جلوتر (دورتر از پل) کشیده می‌شود. در روش ترکیبی حداکثر عمق آبشستگی در دو حفره نسبتاً متقارن در جناح چپ و راست بعد از آبپایه به تعادل رسیده است، همچنین دو گودال با عمق کمتر در فضای خالی دو طرف پایه بین طوق و آبپایه نیز ایجاد می‌گردد.



شکل ۵- تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف پایه پل به صورت خطوط کنتور و سه بعدی: الف) بدون محافظ، ب) آبپایه، ج) طوق، د) ترکیب طوق و آبپایه

جدول ۴- محدوده آبشستگی بستر نسبت به مرکز پل بر حسب نسبت طول گستردگی (L) به قطر پایه پل (D)

پایه پل همراه با	--	آبپایه	طوق	ترکیب طوق و آبپایه
در هریک از جناحین پل	۲	۲/۷	ناچیز	۰
بالادست پل	۲/۴	۲/۶	ناچیز	۰
پایین‌دست پل	۱۱/۵	۱۷	۱۸	۱۲

۴- نتیجه‌گیری

در مورد زمان رسیدن به تعادل آبشستگی، مقایسه راهکارها با آزمایش شاهد نشان می‌دهد که از این میان طوق سبب افزایش زمان تعادل شده، اما آبپایه این زمان را کاهش داده است. در ترکیب طوق و آبپایه زمان تعادل مابین زمان تعادل هر راهکار به تنهایی و تقریباً مشابه با آزمایش شاهد است.

در کاهش عمق آبشستگی، بهترین عملکرد مربوط ترکیب طوق و آبپایه، سپس طوق و بعد از آن آبپایه است. درصد کاهش آبشستگی در کل رودخانه در این روش‌ها به ترتیب ۷۵، ۶۵ و ۲۰ درصد و کاهش آبشستگی مجاور پل (تا شعاع سه برابر آن) به ترتیب ۱۰۰، ۹۰ و ۲۰ درصد است. در روش آبپایه حداکثر آبشستگی در جلوی پل و چسبیده به آن، اما در روش طوق و روش ترکیبی حداکثر آبشستگی بعد پل به فاصله $\frac{L}{D}$=۲/۸ اتفاق می‌افتد.

در تأثیر اعمال راهکارها بر توپوگرافی بستر، افزودن طوق و آبپایه طول گستره تغییرات پایین‌دست بستر را نسبت به پل بدون محافظ افزایش داده‌اند، ضمن آن که آبپایه تغییرات عرضی را نیز افزوده است. اما باید توجه داشت که دامنه تغییرات حداقل و حداکثر در همه راهکارها بهبود یافته است. در محدوده پل، طوق و روش ترکیبی توانسته‌اند اثرات تغییر تراز بستر را کاملاً بهبود دهند.

۵- قدردانی

لازم به ذکر است که این طرح با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اراک براساس قرارداد شماره ۹۴/۸۸۸ مورخ ۱۳۹۴/۱/۱۷ انجام شده است که نگارنده بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌نماید.

۶- مراجع

حسن‌پور ن، حسین‌زاده‌دلیر ع، ارونقی ه، " بررسی آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل باله‌ای شکل با طوق"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۲، ۲۳ (۳)، ۲۲۱-۲۳۴.

حسینی ح، حسین‌زاده‌دلیر ع، فرسادی‌زاده د، ارونقی ه، قربانی، مع، "تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش پایه‌های مستطیلی با دماغه گرد"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۱، ۲۲ (۳)، ۸۸-۱۰۱.

خادم غ، "طراحی لایه ریپ‌رپ در اطراف پایه پل با آبشستگی محدود مجاز"، پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد، گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۱.

ثانیخانی ه، حسین‌زاده‌دلیر ع، فرسادی‌زاده د، فاخری‌فرد ا، ناظمی اح، سلماسی ف، "کاربرد طوق‌های مستطیلی و دایره‌ای در کاهش آبشستگی پایه‌های پل"، مجله دانش کشاورزی، ۱۳۸۷، ۱۸ (۴)، ۱-۱۶.

رازی س، حسین‌زاده‌دلیر ع، سلماسی ف، فرسادی‌زاده د، "تأثیر محل فرارگیری آبپایه بر کاهش عمق آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸.

شجاعی پ، فرسادی‌زاده د، حسین‌زاده‌دلیر ع، "تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش عمق آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای شکل پل‌ها"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۳۹۰، ۱۵ (۵۷)، ۲۳-۳۳.

شریعتی ح، خداشناس س‌ر، اسماعیلی، ک، "بررسی آزمایشگاهی کارکرد با هم طوق و شکاف بر میزان آبشستگی موضعی در پایه پل"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی عمران، ۱۳۹۰، ۲۳(۱)، ۸۶-۹۶.

عقلی م، زمردیان مع، "تأثیر توأم طوق و کابل بر روی عمق آبشستگی اطراف پایه پل در قوس رودخانه‌ها"، نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۱۳۹۲، ۳۶ (۳)، ۳۱-۴۰.

مسجدی ا، غلامزاده محمودی م، "بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۳۹۰، ۵۴، ۱۷-۳۸.

موحدی ن، دهقانی اا، ظهیری ع، اعرابی م ج، "بررسی عملکرد آبپایه در کاهش آبشستگی اطراف تک پایه و پایه‌های دوتایی عمود بر مسیر جریان"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۳۹۳، ۲۱ (۶)، ۱۹۱-۲۰۵.

Akib Sh, Mamat N L, Basser H, Jahangirzadeh A, “Reducing local scouring at bridge piles using collars and geobags”, Journal of Scientific World, 2014, 1-7.

Alabi PD, “Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar”, Master Degree Thesis.

University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2006.

Chiew YM, "Scour protection at bridge Piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1992, 118 (9), 260-1269.

Chiew YM, "Mechanics of riprap failure at bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121 (9), 635-643.

Chiew YM Melville BW, "Local scour around bridge Piers", Journal of Hydraulic Research, 1987, 25 (1), 15-26.

Grimaldi C, Gaudio R, Calomino F, Cardoso AH, "Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill", Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135 (1), 13-21.

Jahangirzadeh A, Basser H, Akib S, Karami H, Naji S, Shamshirband Sh, "Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Different Shapes of Collars on the Reduction of Scour around a Single Bridge Pier", Journal of PLoS ONE, 2014, 9 (6), 1-11.

Karimaee M, Zarrati AR, "Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers", International Journal of Engineering, 2011, 25 (1), 11-16.

Lee S O, Sturm TW, "Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2009, 135 (10), 793-802.

Mellvile BW, "Pier and abutment scour, integrated approach", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1997, 132 (2), 125-136.

Melville BW, Chiew YM, "Time Scale for local scour depth at bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125 (1), 59-65.

Moncada-M AT, Aguirre-Pe J, Bolı´var JC, Flores EJ, "Scour protection of circular bridge piers with collars and slots", Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (1), 119-126.

Oliveto G, Hager WH, "Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2002, 128 (9), 811-820.

Parker G, Toro-Escobar C, Voigt RL, "Countermeasures to protect bridge piers from scour", Final Report NCHRP Project 24-7, Transportation Research Board, Washington DC, 1998.

Raudkivi AJ, Ettema R, "Clear water scour at cylindrical piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1983, 103 (10), 1209-1213.

Tafarojnoruz, A, Gaudio R, Calomino F, "Control evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour", Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138 (3), 297-305.

Zarrati AR, Gholami H, Mashahir MB, "Application of collar to control scouring rectangular bridge piers", Journal of Hydraulic Research, 2004, 42 (1), 97-103.

Zarrati AR, Nazariah M, Mashahir MB, "Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, 132 (2), 154-162.

University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 47 (2018), Issue 4 (Winter), 113-121

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation the Performance of Bed Sill, Collar and Their Combination in Scour Protection of Cylindrical Bridge Pier

Nazanin Shahkarami *

Faculty of Engineering, University of Arak, Arak, Iran

Received: 04 July 2016; **Accepted:** 28 January 2017

Keywords:
Scour, Bridge piers, Bed sill, collar, Countermeasure method, Combination method

1. Introduction

One of the main causes of the destruction of marine structures, is creating erosion in its pier foundation. The uncontrolled spread of scour hole undermines the foundation and thereby will threaten the entire structure. In this study, the performance of countermeasure strategies include bed sill, collar and then combination of them were evaluated. Experimental assessment for cylindrical pier has been conducted under the clear water condition. Based on the recommendations resulting from the studies reviewed, bed sill was attached to the downstream side of the pier, the width of the channel, vertically from floor to sediments and circular collar with an outer diameter equal to 3 times the pier diameter, was installed in the bed level. Also in the combination method the integration of last two solutions was used, while bed sill was placed tangent to the downstream of collar.

2. Methodology

2.1. Experimental setup

The experiments in this study were conducted in the hydraulic laboratory at the Civil Faculty of Arak University. The research flume has 9 meters long, 50 centimeters wide and 60 centimeters high. In order to reduce the materials, by using raised floor with a height of 20 cm, the experiments were performed at 2.5 meter middle length of the channel.

The necessary constraints in modeling were imposed; as the flume width B is limited, the diameter of the pier should be reasonably controlled to prevent sidewall effects. Chiew and Melville (1987) suggested that the pier diameter (D) should not be greater than 10 percent of flume width (b) while Raudkivi and Ettema (1983) suggested that the maximum ratio of D to b should be 0.16, so the cylindrical pier diameter chose 5 cm in this research. To prevent the ripple on bed , median grain size (d_{50}) must be more than 0.7mm and for eliminating the effect of grain on scour depth, ratio of D on $d50$ must be greater than 20-25 (Raudkivi and Ettema, 1983); Lee and storm suggested D/d_{50}> 25. In order to have these conditions, Microsilica by density equal to 2.6 and a median diameter of d_{50}= 1 mm is chosen as model sediment. Melville and Chiew (1999) have estimated maximum scour depth equal to 2.4 so the sediment depth should be greater than this amount. So in this research the sediment depths selected over 20 cm. For minimizing the effect of flow depth on scour, ratio flow depth (Y) to pier diameter (D) must be greater than 3 (Chiew, 1995). The minimum water depth suggested 20 mm by Oliveto and Hager (2002) for preventing effect of roughness. So in this research the flow depth was selected about 20 cm. For having clear water conditions, ratio flow velocity (V) to threshold velocity for the beginning of sediment motion (V_c) must be smaller than 1(V/V_c<1). Melvill and Chiew (1999) have resulted that clear water create in the condition of $0.3V_c<V<V_c$. In all of the tests which have conducted in this research

* Corresponding Author
E-mail addresses: n-shahkarami@araku.ac.ir (Nazanin Shahkarami).

$\frac{V}{V_C}$ have controlled equal to 0.5. Steady and uniform flow were imposed. Subcritical flow during tests and control of their turbulent calculated using Froude and Reynolds dimensionless numbers in every test.

3. Results and discussion

Cylindrical bridge pier test was conducted without any protection as a base for evaluating the performance of control solutions to reduce the amount of scour and bed changes. As well as the time they need to reach equilibrium should be determined on this test. Accordingly, equilibrium time at least 6 hours for all tests was based (Fig. 1). In the bed sill test, 75% of the amount of scour happened only in the first 30 minutes. Then scour depth increases with the little trend till 6 hours and then remained constant for 100 minutes. Collar delayed the start of scour time, as in this experiment, 75% scour occurred in the first 130 minutes. So test conducted for 520 minutes which after 400 minutes the amount of scouring fixed. In the combination test, 75% scour happened in the first 80 minutes. Until this time scour development was similar to the collar test but after that continued with less slope. From 260 to 360 minutes no scour development was recorded.

As it can be seen in Fig. 2, by bed sill the maximum scour depth, occurring adjacent to the pier front, is 20 percent less than unprotected pier. By collar the scour depth decreased 90% in the area up to 3 times the radius of the pier radius and 65% in entire of the bed, which shows a very good performance of this strategy to reduce scour. Also the combined approach improved the maximum scour depth 75%, 70% and 87% in comparison with the unprotected pier, collar and bed sill respectively. While there wasn't seen bed scour under collar in this method. In the last two countermeasure methods (collar and combined methods) the maximum scour hole occurred in the downstream of structures. All of countermeasures except combined method increased area of morphological changes in bed. At upstream of the pier can be seen that by adding a bed sill, no significant changes in the bed level occurred, although in the two sides of pier in cross section the area which is influenced by scour has increased 35%. But adding collar and combination of collar and bed sill has decreased bed changes in upstream and wings as it can be supposed same as the bed without any structure in it.

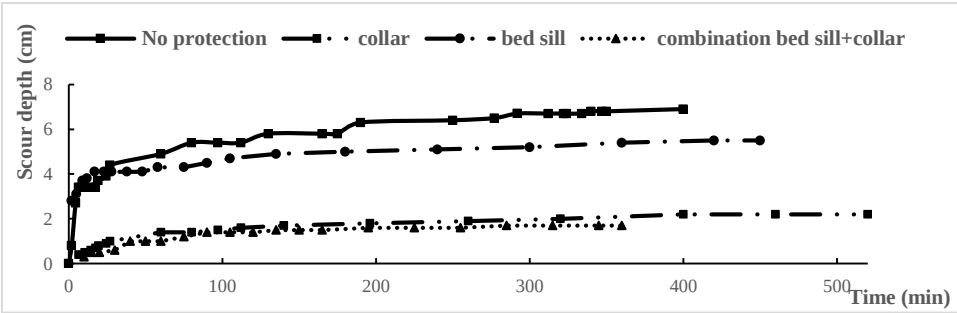


Fig. 1. Maximum scour depth with time around cylindrical bridge pier

4. Conclusions

It can be said that collar increased the equilibrium time of scour, but bed sill reduced this time. In combined strategy equilibrium time was between related times in each solution alone, almost similar to the unprotected pier. The best performance in reduction of scour depth belonged to combination of collar and bed sill, then the collar and then the bed sill; the scour reduction percent in the river in these methods were 75, 65 and 20 percent and 100, 90 and 20 percent respectively in the adjacent pier (up to three times of pier radius). Evaluating the effect of countermeasures on the topography of the bed showed that adding a collar and bed sill increased the length range of bed changes in downstream of the pier, while the bed sill has also added changes in wings. But it should be noted that the range of minimum and maximum scour depth improved in all the control method. Adjacent the bridge, collar and a combined method could improve the effects of bed level changes completely.

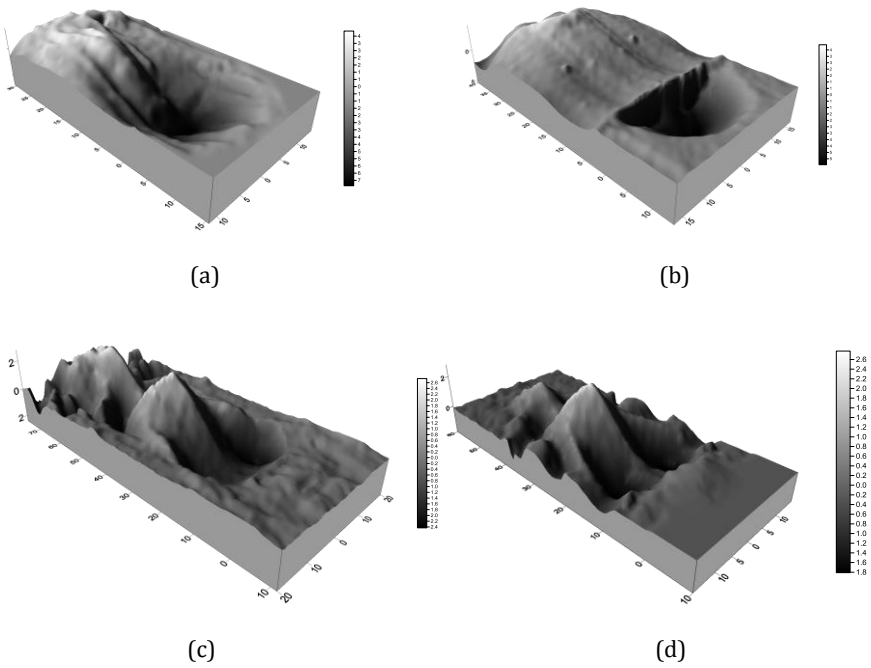


Fig. 2. Bed topography changes around bridge pier: a. without protection, b. with bed sill, c. with collar, d. with combination of collar and bed sill

5. References

Chiew YM, Melville BW, "Local scour around bridge Piers", Journal of hydraulic research, 1987, 25 (1), 15-26.

Raudkivi AJ, Ettema R, "Clear water scour at cylindrical piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1983, 103 (10), 1209- 1213.

Melville BW, Chiew YM, "Time Scale for local scour depth at bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125 (1), 59-65.

Chiew YM, "Mechanics of riprap failure at bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121 (9), 635-643.

Oliveto G, Hager WH, "Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2002, 128 (9), 811-820.