

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی اثر شمع‌های فدا شونده، طوق و شکاف به صورت جداگانه و ترکیبی بر میزان آبخستگی موضعی پایه پل

سید محمدعلی زمریدیان^{1*}، حمیده غفاری²، زهرا قاسمی²

1- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

2- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شیراز

*mzomorod@shirazu.ac.ir

چکیده - روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش آبخستگی موضعی اطراف پایه پل وجود دارد. در این پژوهش تأثیر شکل طوق، ابعاد و محل نصب آن‌ها روی پایه و همچنین تأثیر شمع‌های فدا شونده، شکاف و طوق به طور جداگانه و همچنین ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی آن‌ها بر میزان آبخستگی در مدت زمان 5 ساعت بررسی و مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد طوق مربعی نسبت به طوق‌های دایروی و لوزوی شکل، عملکرد بهتری در کاهش آبخستگی دارد و فاصله نصب تراز بستر تأثیر بیشتری در کاهش آبخستگی نسبت به فواصل 0.4D- و 0.4D+ دارد. طوق مربعی با 70% کاهش و سپس شمع‌های فدا شونده با 46/67% کاهش و شکاف با میزان بازشدگی 30% قطر پایه، با 31% کاهش به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش بیشینه عمق آبخستگی داشته‌اند. ترکیب شمع‌های فدا شونده و طوق مربعی با 75% کاهش، بیشترین عملکرد را در کنترل آبخستگی نشان داد و این در حالی است که ترکیب سه‌تایی شمع‌های فدا شونده، شکاف و طوق و شکاف بازده کمتری در کاهش آبخستگی نشان دادند؛ به گونه‌ای که ترکیب شمع فدا شونده، شکاف و طوق مربعی 68% کاهش و ترکیب شمع فدا شونده، شکاف و طوق دایره‌ای 66/67% کاهش در بیشینه عمق آبخستگی نشان داد.

کلیدواژه‌گان: آبخستگی موضعی، شمع فدا شونده، طوق، شکاف، پایه پل.

1- مقدمه

اطراف پایه که جریان‌های رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب‌های برخاستگی از مهم‌ترین آن‌ها هستند، به کار می‌روند. تاکنون بیش از ده روش گوناگون از این دسته برای کنترل آبخستگی پیشنهاد شده است؛ از جمله، ایجاد شکاف در پایه، نصب طوق، شمع‌های فدا شونده، پره‌های مستغرق، کابل و غیره (Tafarajnoruz et al., 2012). طوق‌ها صفحاتی تخت با ضخامت ناچیز هستند که اطراف پایه نصب می‌شوند و جریان را به دو ناحیه تقسیم می‌کنند، ناحیه بالای طوق به عنوان یک مانع در برابر جریان رو به پایین عمل می‌کند و قدرت جریان‌های رو به پایین در اثر برخورد با طوق کاهش می‌یابد. در ناحیه پایین طوق قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه گرداب

وقوع آبخستگی در اطراف پایه‌های پل از عمده‌ترین دلایل تخریب آن‌ها می‌باشد و به دلیل اهمیت و پیچیدگی آن، بررسی و به‌دست آوردن راهکارهای نوین در جهت کاهش آن ضروری است. به طور کلی دو روش اساسی برای کنترل آبخستگی وجود دارد، روش‌های غیر هیدرولیکی که با حفاظت از بستر آبخستگی را کنترل می‌کنند (سنگچین، گابیون بندی، ژئوتکتایل و غیره) و روش‌های هیدرولیکی که با منحرف کردن جریان اطراف پایه، از پایه در برابر آبخستگی محافظت می‌کنند (Melville and Sutherland, 1989). در واقع روش‌های هیدرولیکی به منظور تغییر الگوی جریان و کاهش شدت گرداب‌های ایجاد شده در

آبشستگی را کاهش می‌دهد (Chiew, 1992). شمع‌ها یا پایه‌های فدا شونده که خود نیز ممکن است عاملی برای آبشستگی باشند، با انحراف جریان و ایجاد یک منطقه با سرعت پایین در جلوی پایه و کم کردن پتانسیل فرساینده‌گی جریان، از پایه در برابر آبشستگی محافظت می‌کنند (Haque et al., 2007).

اثر شمع‌های فدا شونده در دو شکل پایه دایره‌ای و مستطیلی توسط Melville and Hadfield (1991) بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که تعداد بیشتر شمع‌ها تأثیر بیشتری در محافظت از پایه دارد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها این اثر کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین نشان دادند که زاویه بین شمع‌ها در رأس مثلث در کاهش عمق آبشستگی تأثیرگذار است؛ به گونه‌ای که با افزایش زاویه از 30 درجه به 53 درجه، تأثیر آن در حفاظت پایه کاهش می‌یابد. از آنجا که استفاده از روش‌های تغییردهنده الگوی جریان نسبت به روش‌های مقاوم‌سازی بستر دارای سرعت اجرایی بیشتر و هزینه اجرایی کمتری می‌باشد، لذا در پژوهش حاضر ابتدا تأثیر شمع‌های فدا شونده، طوق و شکاف به طور جداگانه در کاهش آبشستگی پایه پل بررسی شده است و سپس به بررسی اثر ترکیبی دوتایی و سه‌تایی آن‌ها در کاهش آبشستگی پایه پل پرداخته شده است.

2- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال بتنی به طول 15 متر، عرض 40 سانتی‌متر، عمق 50 سانتی‌متر و شیب طولی 0/001 انجام شد و مقطع آزمایشی به طول 2 متر و عمق 16 سانتی‌متر با رسوبات ماسه‌ای پر شد. به منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از مقطع آزمایشی طول سکوی بالادست 6 متر و به منظور تأثیر نداشتن جریان خروجی روی آبشستگی طول سکوی پایین دست 4 متر در نظر گرفته شد. به منظور کنترل عمق جریان از یک سرریز مستطیلی لبه تیز که در انتهای کانال قرار داشت، استفاده گردید. همچنین از یک دی‌سنج خودکار الکتریکی که بر روی لوله رانش پمپاژ قرار داشت برای کنترل دی‌جریان استفاده گردید. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام گرفت و پارامترهایی از قبیل سرعت جریان (v)، عمق جریان (v) و اندازه رسوبات بستر (d_{50}) ثابت در نظر گرفته شده‌اند و

نعل اسبی کاهش پیدا می‌کند (Alabi, 2006). میزان اثرگذاری طوق‌ها در کاهش آبشستگی متناسب با ابعاد و موقعیت قرارگیری آن‌ها روی پایه نسبت به تراز بستر می‌باشد (Karimae and Zarrati, 2012; Zarrati et al. 2004, 2006, 2010).

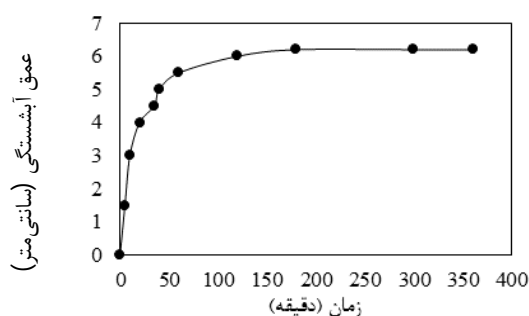
(Karimae and Zarrati (2012) با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر طوق بر میزان آبشستگی اطراف پایه پل در مدت زمان بیشتر از 200 ساعت به این نتیجه رسیدند که استفاده از طوق باعث کاهش نرخ و عمق آبشستگی و درعین حال افزایش گستردگی گودال آبشستگی اطراف پایه پل می‌شود. همچنین Mashahir et al. (2009) با مطالعه بر روی طوق در کاهش آبشستگی پایه پل در مدت زمان 80 ساعت، نشان دادند که به کارگیری دو طوق یکی در تراز بستر و دیگری به اندازه قطر پایه زیر بستر، بیشترین کارایی را در کاهش آبشستگی دارد.

مطالعات انجام شده توسط Zarrati et al. (2004) روی طوق در کنترل آبشستگی پایه مستطیلی در مدت زمان 50 ساعت، نشان داد که نصب طوق در تراز زیر بستر کارایی طوق را افزایش نمی‌دهد و میزان اثرگذاری طوق در تراز بستر بیشینه می‌باشد. (Chiew (1992) برای اولین بار استفاده از شکاف را به عنوان روشی برای کاهش آبشستگی مطرح کرد و با ایجاد دو شکاف مستطیلی در دو تراز نزدیک سطح آب و نزدیک بستر، و به عرض 0.25D و 0.5D روی پایه و بررسی میزان آبشستگی، به این نتیجه رسید که هر چه عرض شکاف بیشتر باشد، تأثیر بیشتری در کاهش آبشستگی دارد، به گونه‌ای که به ترتیب به اندازه 20% و 30% آبشستگی را کاهش می‌دهند. لازم به ذکر می‌باشد که عرض شکاف را تا جایی می‌توان بیشتر کرد که پایداری پل به خطر نیفتد.

آقاخان و همکاران (1389) با مطالعه اثر هندسه شکاف بر آبشستگی و با بررسی دو شکاف به عرض 0.2D و 0.3D که تا سطح بستر روی پایه امتداد یافته بودند، به این نتیجه رسیدند که به ترتیب باعث 44% و 74% کاهش در میزان آبشستگی می‌شوند. در واقع شکاف در پایه، قدرت جریان‌های رو به پایین را تضعیف می‌کند و با ایجاد جریان افقی، جریان‌های رو به پایین در جلوی پایه را به فاصله دورتری از پایه منحرف می‌کند و به این ترتیب پتانسیل

همچنین (Raudkivi 1998) شرط تشکیل حداکثر عمق آبخستگی در آب زلال را $V \leq 0.95V_c$ می‌داند. V_c سرعت آستانه حرکت ذرات است. بنابراین با سعی و خطا، دبی جریان 15 lit/s، عمق جریان 12 cm، سرعت جریان $0/3125 \text{ m/s}$ و $V = 0.91 V_c$ به دست آوردن زمان تعادل معیارهای متفاوتی توسط محققان ارائه شده است. از جمله Melville and Chiew (1999) مدت زمانی که تغییرات عمق آبخستگی در یک دوره 24 ساعته کمتر از 5 درصد قطر پایه باشد را به عنوان $\left(\frac{d(d_{50})}{dt} \leq \frac{0.05D}{24h}\right)$ زمان تعادل پیشنهاد داده‌اند. Kumar et al. (1999) مدت زمانی که تغییرات آبخستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد را به عنوان معیار زمان تعادل پیشنهاد داده‌اند.

Masjedi et al. (2010) مشاهده کردند که 92% آبخستگی پایه بدون حفاظت در 4 ساعت اول آزمایش اتفاق می‌افتد. در پژوهش حاضر با توجه به محدودیت‌های موجود در انجام آزمایش‌های با مدت زمان طولانی، از معیار Kumar et al. (1999) و مطابق با Heidarpour et al. (2010) استفاده شده است. بر همین اساس زمان تعادل 5 ساعت به دست آمد (شکل 2) و به عنوان معیار مقایسه میزان آبخستگی اطراف پایه حفاظت شده با پایه بدون حفاظت در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت. جدول 1 شرایط جریان را در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در این جدول Fr عدد فرود می‌باشد و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.



شکل 2 منحنی تغییرات آبخستگی نسبت به زمان

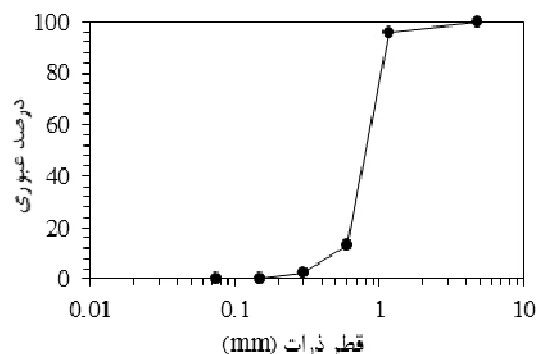
جدول 1 شرایط جریان در آزمایش‌های انجام شده

d_{50} (mm)	D/d_{50}	y (m)	V_c (m/s)	y/D	V/V_c	Fr
0/78	38/46	0/12	0/3424	4	0/9125	0/288

به‌گونه‌ای انتخاب شدند که حداکثر آبخستگی ناشی از پایه پل ایجاد گردد و در تعیین مقادیر آن‌ها از معیارهایی که توسط محققان ارائه شده است، استفاده شد. از جمله، برای از بین بردن تأثیر دیواره کانال بر میزان آبخستگی، نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه باید بزرگ‌تر از $6/25$ باشد (Raudkivi and Ettema, 1983)، بنابراین با توجه به عرض کانال از پایه استوانه‌ای به قطر 3 سانتی‌متر استفاده شده است که این نسبت تقریباً برابر با $6/7$ به دست آمد. رسوب مورد استفاده در آزمایش از نوع ماسه ریز و دارای دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد. برای جلوگیری از تشکیل ریپل در سطح رسوبات قطر متوسط ذرات بایستی از $0/7$ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد و برای حذف تأثیر اندازه رسوبات بر آبخستگی قطر متوسط ذرات باید در شرط $D/d_{50} > 20 - 25$ (D قطر پایه) صدق کند (Raudkivi and Ettema, 1983).

از آنجایی که غیریکنواختی رسوبات باعث کاهش آبخستگی می‌شود، بنابراین از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد که در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از $1/3$ باشد ($\sigma_g < 1.3$)، شرط یکنواخت بودن ذرات برقرار می‌باشد (شفاعی بجستان، 1390). بنابراین برای مطابقت با شرایط مذکور از ماسه با $d_{50} = 0.78$ میلی‌متر و $\sigma_g = 1.25$ استفاده شد. منحنی دانه‌بندی رسوبات در شکل 1 نشان داده شده است.

Chiew and Melville (1987) به این نتیجه رسیدند که اگر عمق جریان نسبت به قطر پایه به اندازه کافی بزرگ باشد ($y/D > 3.5$) عمق جریان تأثیری بر آبخستگی موضعی اطراف پایه ندارد.



شکل 1 منحنی دانه‌بندی رسوبات ماسه‌ای

شکاف ایجاد شده در پایه به عرض $0.3D$ و طول $8D$ در نظر گرفته شد که به اندازه $3D$ در داخل رسوب قرار می‌گیرد (شکل 6).

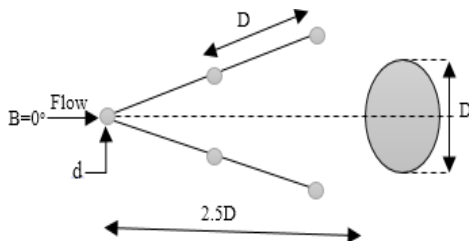
3- بحث و نتایج

3-1- آبستگي در تک پایه

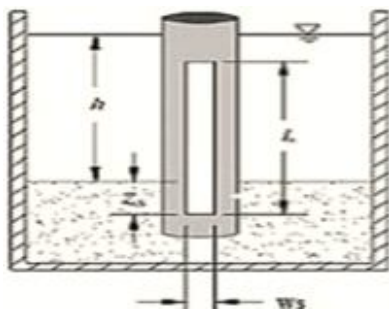
در این حالت مشاهده شد که آبستگي در جلوی پایه و به صورت متقارن نسبت به محور پایه شروع می‌شود و مواد رسوبي از جلو و اطراف پایه شسته شده و به صورت پشته در پشت پایه جمع می‌شوند. این پشته‌ها به تدریج به طرف پایین دست انتقال می‌یابند. بیشینه عمق آبستگي در این حالت 6 سانتی‌متر به دست آمد. در شکل 7 پروفیل گودال آبستگي اطراف پایه نشان داده شده است.

3-2- بررسی تأثیر شکل و تراز نصب طوق بر آبستگي

طوق‌ها در سه فاصله نسبت به بستر نصب شدند. تراز بستر، $+0.4D$ بالای بستر و $-0.4D$ درون بستر. نتایج نشان داد که استفاده از طوق منجر به کاهش آبستگي می‌شود که میزان آن بستگی به شکل، ابعاد و همچنین محل نصب طوق روی پایه دارد. ابتدا به بررسی بهترین محل قرارگیری طوق روی پایه پرداخته می‌شود.



شکل 5 آرایش شمع‌های فداشونده در برابر پایه



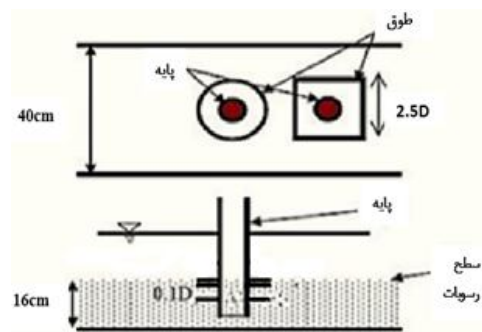
شکل 6 هندسه و محل شکاف روی پایه

پس از اطمینان از شروع جریان یکنواخت و ثابت شدن عمق و دبی جریان، آزمایش‌ها برای مدت 5 ساعت آغاز می‌شد. پس از اتمام آزمایش‌ها و خشک شدن سطح رسوبات، با استفاده از یک متر لیزری که روی یک ریل قرار می‌گرفت، پروفیل گودال آبستگي به صورت شبکه 2×1 سانتی‌متر برداشت می‌شد. در شکل 3 کانال آزمایش نشان داده شده است. در این پژوهش از سه مدل طوق مربعی، لوزی و دایره‌ای استفاده شده است. طوق مربعی دارای طول ضلع $2.5D$ و طوق لوزی دارای عرض $3.3D$ و طول $2.5D$ می‌باشد و از طوق دایره‌ای در دو قطر $2D$ و $2.5D$ استفاده شد. طوق‌ها در سه فاصله نسبت به بستر مستقر شدند: در تراز بستر، به اندازه $+0.4D$ بالای بستر و به اندازه $-0.4D$ در درون بستر (شکل 4).

همچنین با توجه به معیار Melville and Hadfield (1991) از 5 شمع فداشونده استفاده گردید. قطر پایه 6 برابر قطر شمع‌های فداشونده می‌باشد. بنابراین قطر شمع‌ها 5 میلی‌متر و با آرایش مثلثی با زاویه رأس 30 درجه انتخاب شدند که فاصله رأس مثلث تا پایه برابر $2.5D$ و فاصله شمع‌ها از یکدیگر برابر با D در نظر گرفته شد (شکل 5).



شکل 3 نمایی از فلوم مورد استفاده



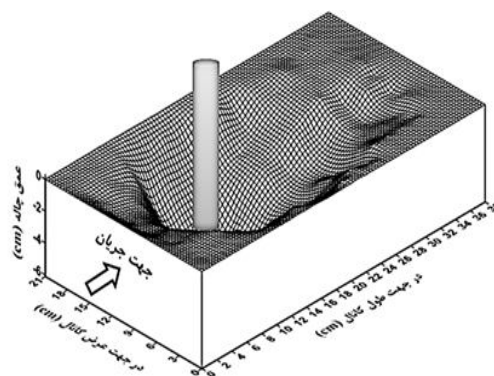
شکل 4 تراز نصب طوق مربعی و دایره‌ای روی پایه

می‌شود که جریان آب با برخورد به لبه‌های طوق انحراف پیدا کند و باعث ایجاد شیارهایی در پایین دست پایه و طرفین طوق در بستر خاک شود که با گذشت زمان این شیارها توسعه پیدا می‌کنند و به سمت پایه گسترش می‌یابند و در نهایت در جلوی پایه با رسیدن به هم باعث ایجاد آبشستگی می‌شوند. بنابراین بهترین محل نصب طوق در تراز بستر خاک مشاهده شد. همچنان که Zarrati et al. (2004) نیز بهترین محل نصب طوق را در تراز بستر پیشنهاد دادند. همچنین شریعتی و همکاران (1390) با بررسی عملکرد طوق در سه فاصله نصب تراز بستر و 0.4D زیر بستر و بالای بستر، به این نتیجه رسیدند که استفاده از طوق در تراز زیر بستر نسبت به قرارگیری آن در سایر ترازها مؤثرتر است و همچنین مشاهده کردند که حداکثر کاهش عمق آبشستگی در شرایط به کارگیری طوق مربعی برابر 70% و در طوق دایره‌ای برابر 57% می‌باشد.

با بررسی میزان آبشستگی در دو طوق دایره‌ای به قطر 2D و 2.5D مشاهده می‌شود که با افزایش بعد هندسی طوق، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد که به این دلیل می‌باشد که هر چه طوق‌ها در قطر و طول بیشتری ساخته شوند کارایی بیشتری در مهار و کاهش قدرت گرداب‌های تشکیل شونده اطراف پایه دارند. بنابراین میزان آبشستگی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه اشکال طوق در کاهش آبشستگی که در جدول 3 ارائه شده است، مشاهده می‌شود که طوق مربعی با کاهش 70 درصدی عمق آبشستگی، بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی دارد و استفاده از طوق لوزی شکل با 10 درصد کاهش آبشستگی کمترین تأثیر را داشته است و این در حالی است که طوق دایره‌ای به قطر 2.5D، 50 درصد کاهش در آبشستگی نشان داده است. بنابراین می‌توان گفت که طوق مربعی به دلیل داشتن لبه‌های تیز و همچنین سطح بیشتر، عملکرد بهتری در مهار کردن قدرت گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی دارد؛ که این در طوق لوزی شکل به این دلیل که رأس طوق در جهت جریان است و همچنین ناحیه بستر در نقاطی که گرداب‌ها به بستر برخورد می‌کنند، کاملاً پوشش داده نمی‌شود، تأثیر کمتری در مهار گرداب‌ها و کاهش عمق آبشستگی دارد. با مقایسه گودال آبشستگی شکل گرفته اطراف پایه مشاهده می‌شود که

با مقایسه سه تراز نصب طوق روی پایه در تراز بستر، +0.4D بالای بستر و -0.4D درون بستر، مشاهده شد که بیشترین عملکرد طوق در کاهش آبشستگی در فاصله تراز بستر رخ می‌دهد. نتایج در جدول 2 نشان داده شده است. در این پژوهش همچنین مشاهده شد که هرچه تراز نصب طوق در زیر بستر به سطح بستر نزدیکتر باشد، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد.

نصب طوق در محدوده پایین تر از 0.4D زیر بستر، باعث می‌شود که با گذشت زمان و برخورد جریان‌های رو به پایین و گرداب‌های نعل اسبی به بستر، ذرات خاک روی طوق شسته شود و باعث افزایش فضای بالای طوق شود که اثر مطلوبی بر کاهش آبشستگی ندارد. همچنین نصب آن در نواحی بالای بستر به دلیل فاصله موجود بین طوق و بستر خاک و تشکیل گرداب در این ناحیه باعث شسته شدن خاک بستر می‌شود که با گذشت زمان این فاصله افزایش می‌یابد. بنابراین عملکرد طوق در جهت کنترل گرداب و کاهش آبشستگی کاهش می‌یابد (شریعتی و همکاران، 1390).



شکل 7 پروفیل گودال آبشستگی اطراف پایه

جدول 2 درصد کاهش آبشستگی در ترازهای

مختلف نصب طوق			محل قرارگیری طوق
-0.4D	تراز	+0.4D	
	زیر بستر	روی بستر	
65	70	48	مربعی به طول 2.5D
36	42	25	دایره‌ای به قطر 2D
46	50	40	دایره‌ای به قطر 2.5D

شواهد نشان داد که نصب طوق روی بستر خاک باعث

جدول 3 درصد کاهش آبخستگی با طوق به اشکال مختلف در فاصله نصب تراز بستر

شرایط آزمایش	حداکثر عمق آبخستگی	درصد کاهش عمق	درصد کاهش حجم آبخستگی
تک پایه	2
پایه + طوق مربعی	0/6	70	41/26
پایه + طوق دایره‌ای به قطر 2.5D	1	50	68/5
پایه + طوق لوزی	1/8	10	10/07

جدول 4 درصد کاهش آبخستگی با استفاده از روش‌های کنترلی مورد استفاده

شرایط آزمایش	نسبت حداکثر عمق آبخستگی	درصد کاهش عمق	درصد کاهش حجم آبخستگی
تک پایه	2
پایه + شمع	1/06	46/67	46/37
پایه + طوق مربعی	0/6	70	41/26
پایه + طوق دایره‌ای به قطر 2.5D	1	50	68/5
پایه + شکاف	1/37	31	-10/13

نتایج Kumar (1996) روی شکاف به عرض 0/25 قطر پایه، برای کاهش آبخستگی نشان داد که توسعه شکاف به پایین‌تر از بستر، منجر به کاهش 33% در عمق آبخستگی می‌شود و این در حالی است که نوزاد و همکاران (1380) نشان دادند که عملکرد شکاف در سرعت جریان‌های کمتر، خیلی بیشتر از عملکرد آن در سرعت‌های بیشتر می‌باشد. نکته‌ای که در جدول 4 مشاهده می‌شود، کاهش منفی 10 درصدی حجم آبخستگی در حالت استفاده از شکاف در پایه می‌باشد. شکاف در پایه به دلیل اینکه جریان‌های رو به پایین را به پایین‌دست انتقال می‌دهد، در کاهش بیشینه عمق آبخستگی که در اطراف پایه شکل می‌گیرد، مؤثر است، اما باعث شسته شدن ذرات در پایین‌دست پایه و افزایش حجم گودال آبخستگی می‌شود. بنابراین با حفاظت پایین‌دست پایه، می‌توان آبخستگی را در حضور شکاف به حداقل رساند. گودال آبخستگی در حضور طوق روی پایه به عنوان نمونه در شکل 8 آورده شده است.

طوق مربعی بیشینه عمق آبخستگی را به پشت پایه انتقال داده است و در جلو و طرفین پایه عمق آبخستگی بسیار کاهش یافته است.

کریمایی و همکاران (1394) اظهار داشتند که اگرچه طوق از اثرات جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی پیشگیری می‌نماید، اما قادر به جلوگیری از آبخستگی ناشی از گرداب‌های برخاستگی در پایین‌دست پایه نمی‌باشد. به نظر می‌رسد در صورت استفاده از طوق با طول بیشتر در پشت پایه جریان‌های برخاستگی به میزان بیشتری مهار شوند و آبخستگی به حداقل برسد، همچنان که بهترین طوق از نظر ابعادی طوقی معرفی شده است که عرض طوق حداقل 3 برابر قطر پایه باشد (Masjedi et al. 2010; Mashahir and Zarrati, 2002; Zarrati et al. 2004, 2006 Karimae and Zarrati, 2012).

در طوق دایره‌ای بیشینه عمق آبخستگی در جلوی پایه شکل گرفته است که ناشی از عملکرد نسبتاً ضعیف آن نسبت به طوق مربعی در مهار جریان‌های رو به پایین و گرداب نعل اسبی می‌باشد؛ اما به دلیل لبه‌های تیز طوق مربعی که جریان اطراف پایه را به شدت انحراف می‌دهد، حجم گودال آبخستگی در این حالت نسبت به طوق دایره‌ای بیشتر به دست آمده است. همچنین طوق لوزی شکل به دلیل کارایی ضعیف آن در مهار گرداب‌ها، تقریباً 10% کاهش در میزان حجم آبخستگی نشان داده است که این در طوق مربعی 41/26% و در طوق دایره‌ای به قطر 2.5D برابر 68/5% می‌باشد (جدول 3).

3-3- بررسی و مقایسه اثر سه روش طوق، شکاف و

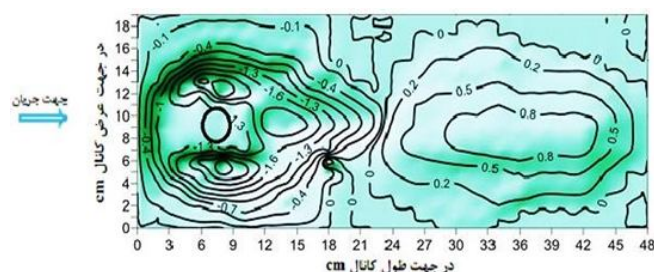
شمع فداشونده بر میزان آبخستگی

در اینجا کاربرد طوق مربعی و دایره‌ای در بهترین حالت نصب که تراز بستر به دست آمده را با دو روش شکاف و شمع فدا شونده که در قبل مفصل توضیح داده شده‌اند، در کاهش میزان آبخستگی بررسی می‌شود. همان‌گونه که در جدول 4 نشان داده شده است طوق مربعی با 70% کاهش در میزان آبخستگی بیشترین تأثیر و شکاف با 31% کاهش، کمترین تأثیر را در کاهش بیشینه عمق آبخستگی دارند و این در حالی است که شمع‌های فدا شونده منجر به کاهش 46/67% آبخستگی شده‌اند.

3-4- بررسی ترکیب شمع‌های فدا شونده، طوق و شکاف در کاهش آبشستگی

در اینجا ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی از شمع فداشونده، شکاف و طوق روی پایه مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در جدول 5 نشان داده شده است، بهترین ترکیب دوتایی، ترکیب شمع فدا شونده و طوق مربعی با کاهش 75 درصدی در عمق آبشستگی می‌باشد. سپس ترکیب شکاف و طوق مربعی با کاهش 73 درصد، شکاف و طوق دایره‌ای با کاهش 70 درصد، شمع فدا شونده و طوق دایره‌ای با کاهش 68 درصد و در آخر شمع فدا شونده و شکاف با کاهش 63 درصد به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش عمق آبشستگی دارند. ترکیب شمع فدا شونده و شکاف، در بین روش‌های ترکیبی ذکر شده کمترین تأثیر را از خود نشان داده است. علت این امر را می‌توان در تأثیر منفی شمع در عبور جریان‌های رو به پایین از داخل شکاف دانست که باعث شده کارایی آن در کاهش آبشستگی نسبت به روش‌های ترکیبی دیگر کاهش یابد. در کاهش حجم آبشستگی نیز به ترتیب ترکیب دوتایی شکاف و طوق دایره‌ای، شمع فدا شونده و طوق دایره‌ای، شمع فدا شونده و

طوق مربعی، شمع فدا شونده و شکاف و در آخر شکاف و طوق مربعی بیشترین تأثیر را داشته‌اند. بنابراین همان‌گونه که مشاهده می‌شود استفاده از طوق دایره‌ای در ترکیب روش‌ها، باعث کاهش در حجم گودال آبشستگی شده است و طوق مربعی به دلیل داشتن لبه‌های تیز در طرفین و توسعه عرضی گودال آبشستگی، در ترکیب با روش‌های دیگر تأثیر کمتری را در کاهش حجم آبشستگی نشان داده است. در ترکیب سه‌تایی از روش‌های مذکور، بازده زیادی در کاهش آبشستگی مشاهده نشده است و همه روش‌های ترکیبی دوتایی به جز ترکیب شمع فدا شونده و شکاف، از ترکیب سه‌تایی شمع فداشونده، طوق و شکاف بیشتر تأثیرگذار بوده‌اند، به گونه‌ای که ترکیب شمع فداشونده، شکاف و طوق مربعی باعث کاهش 68% و ترکیب شمع فدا شونده، شکاف و طوق دایره‌ای باعث کاهش 66/67% در عمق آبشستگی شده است. پروفیل آبشستگی اطراف پایه در حضور طوق مربعی، شکاف و شمع فداشونده در شکل 9 آورده شده است. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این پژوهش در مدت زمان 5 ساعت به دست آمده است و جنبه مقایسه‌ای دارد.



(ب)

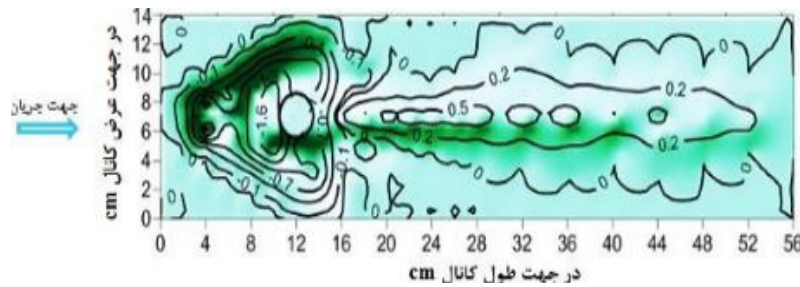


(الف)

شکل 8 الف- گودال آبشستگی در حضور طوق مربعی ب- خطوط میزان دو بعدی گودال آبشستگی با طوق

جدول 5 درصد کاهش آبشستگی در ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی روش‌های کنترلی مورد استفاده

درصد کاهش حجم آبشستگی	درصد کاهش عمق آبشستگی	حداکثر عمق آبشستگی به قطر پایه	شرایط آزمایش
...	...	2	تک پایه
67/48	75	0/5	پایه + شمع + طوق مربعی
70	68	0/63	پایه + شمع + طوق دایره‌ای به قطر 2.5D
55/95	63	0/73	پایه + شمع + شکاف
53/95	73	0/53	پایه + شکاف + طوق مربعی
71/54	70	0/6	پایه + شکاف + طوق دایره‌ای به قطر 2.5D
63/27	68	0/63	پایه + شمع + شکاف + طوق مربعی
54/24	66/67	0/66	پایه + شمع + شکاف + طوق دایره‌ای به قطر 2.5D



شکل 9 گودال آبشستگی پایه در حضور طوق مربعی، شکاف و شمع فداشونده

10/13%- اثر منفی در کاهش حجم گودال آبشستگی نشان داده است و منجر به افزایش حجم گودال آبشستگی شده است.

4- از بین روش‌های ترکیبی، ترکیب شمع فدا شونده و طوق مربعی با 75% کاهش، بیشترین تأثیر را در کاهش بیشینه عمق آبشستگی نشان داده است و این در حالی است که ترکیب شمع فدا شونده و طوق دایره‌ای با 70% کاهش و همچنین ترکیب شکاف و طوق دایره‌ای با 71/5% کاهش، بهترین عملکرد را در کاهش حجم گودال آبشستگی نشان داده‌اند.

5- ترکیب سه‌تایی شمع‌های فدا شونده، شکاف و طوق، نسبت به ترکیب‌های دوتایی بازده بهتری را نشان ندهاند و حتی در مواردی ضعیف‌تر هم عمل کرده‌اند. به گونه‌ای که ترکیب شمع فدا شونده، شکاف و طوق مربعی 68% کاهش و ترکیب شمع فدا شونده، شکاف و طوق دایره‌ای 66/67% کاهش در بیشینه عمق آبشستگی نشان داد.

5- فهرست علائم

D	قطر پایه
d_{si}	عمق آبشستگی نسبت به زمان
d_{50}	قطر متوسط ذرات بستر
Fr	عدد فرود جریان
L	طول شکاف
t	زمان
V	سرعت متوسط جریان
V_c	سرعت بحرانی
w_s	عرض شکاف
Y	عمق جریان در بالادست پایه
σ_g	انحراف معیار ذرات خاک

لذا پیش‌بینی می‌شود که در مدت زمان بیشتر از 5 ساعت، میزان آبشستگی شکل گرفته اطراف پایه پل بیشتر باشد؛ زیرا هنگام استفاده از طوق، در شروع آزمایش‌ها آبشستگی با تأخیر زمانی شروع می‌شود و منجر به افزایش یافتن زمان به تعادل رسیدن عمق آبشستگی می‌شود. بنابراین آبشستگی در پایین‌دست پایه و در مجاورت طوق به علت گرداب‌های برخاستگی با نرخ کم شروع می‌شود و پس از رسیدن به پایه و زیر طوق با نرخ بیشتری و تا زمان رسیدن به تعادل افزایش می‌یابد (Karimae and Zarrati, 2012; Mashahir et al. 2007, 2009).

4- نتیجه‌گیری

1- در پژوهش حاضر استفاده از شمع‌های فداشونده، شکاف و طوق، منجر به کاهش بیشینه عمق آبشستگی در اطراف پایه شد. به گونه‌ای که طوق مربعی با 70%، طوق دایره‌ای به قطر 2.5D با 50%، شمع فدا شونده با 46/67% و در آخر شکاف با 31% به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش بیشینه عمق آبشستگی نشان دادند.

2- با مقایسه اشکال هندسی طوق‌های به کار گرفته شده در این پژوهش (مربعی، دایره‌ای و لوزوی) مشاهده شد که طوق مربعی بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی دارد و هر چه سطح طوق بیشتر باشد، این تأثیر بیشتر می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که نصب طوق روی پایه در تراز بستر نسبت به تراز 0.4D- و تراز 0.4D+، منجر به کاهش بیشتر عمق آبشستگی می‌شود.

3- از بین روش‌های ذکر شده در کاهش حجم گودال آبشستگی، به ترتیب طوق دایره‌ای با 68/5%، شمع‌های فداشونده با 46/37% و طوق مربعی با 41/26% بیشترین تأثیر را نشان داده‌اند و این در حالی است که شکاف با

6- منابع

- Mashahir, M. B. and Zarrati, A. R. (2002). "Effect of collar on time development of scouring around rectangular bridge piers." Proc. 5th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering, Warsaw, Poland.
- Mashahir, M.B. Zarrati, A.R. and Mokallaf, E. (2007). "Effect of bed shear stress on development of scouring around bridge piers protected by a collar". Proceeding 32nd Congress, IAHR, Venice, Italy.
- Mashahir, M.B. Zarrati, A.R. Rezaei, M.J. and Zokaei, M. (2009). "Effect of collars and bars in reducing the local scour around cylindrical bridge piers". International Journal of Engineering, Transaction B: Applications, 22(4): 333-342.
- Masjedi, A.R. Bejestan, M.S. and Esfandi, A. (2010). "Reduction of local scour at a bridge pier using collar in a 180 degree flume bend". Journal of Applied Sciences, 10(2): 124-131, ISSN 1812-5654.
- Melville, B. W. and Sutherland, A. J. (1989). "Design method for local scour at bridge pier". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10): 22-30.
- Melville, B. W. and Hadfield, A. C. (1999). "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(11): 12-21.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). "Time scale for local scour at bridge pier". ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 125(1): 59-65.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers". Journal of Hydraulic Engineering, 109(3): 338-350.
- Raudkivi, A.J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- Tafarjnoruz, A. Gaudio, R. and Calomino, F. (2012). "Evaluation of flow-altering countermeasure against bridge pier scour". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 138(3): 297-305.
- Zarrati, A. Gholami, H. and Mashahir, M. (2004). "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers". Journal of Hydraulic Research, 42(1): 97-103.
- 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.
- Zarrati, A. R. Chamani, M. R. Shafaei, A. and Latifi, M. (2010). "Scour countermeasures for cylindrical bridge piers using riprap and combination of collar and riprap". I. J. Sed. Res, 25(3): 31.
- آقاخانی، ا. فغفور مغربی، م. و اسماعیلی، ک. (1389). "بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه شکاف پایه و پایه‌های مجاور هم". مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- شفاعی بجستان، م. (1390). *هیدرولیک انتقال رسوب*. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- شریعتی، ح. خداشناس، س. و اسماعیلی، ک. (1390). "بررسی آزمایشگاهی کارکرد با هم طوق و شکاف بر میزان آبشستگی موضعی در پایه پل". نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، دوره 23، شماره 1، ص.ص. 86-96.
- کریمائی طبرستانی، م. آذرمدخت، ح. زراتی، ا.ر. و انوری، ص. (1394). "طراحی بهینه گستره سنگچین با استفاده از ابعاد مختلف سنگ در اطراف پایه پل با مقطع مستطیلی با طوق محافظ و بدون آن". نشریه هیدرولیک، دوره 10، شماره 4، ص.ص. 51-64.
- نوزاد، ح. حیدرپور، م. و افضل‌ی مهر، ح. (1380). "کنترل و کاهش آبشستگی موضعی پایه پل با استفاده از شکاف در گروه پایه‌ها". سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- Alabi, P.D. (2006). "Time development of local scour at bridge pier fitted with a collar", Msc Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1987). "Local scour around bridge piers". Journal of Hydraulic Research, 25(1): 15-26.
- Haque, M. A. Rahman, M. M. Islam, G. M. T. and Hussain, M. A. (2007). "Scour mitigation at bridge piers using sacrificial piles". International Journal of Sediment Research, 22(1): 49-59.
- Heidarpour, M. Afzalimehr, H. and Izadinia, E. (2010). "Reduction of local scour around bridge pier groups using collar". International Journal of Sediment Research, 25(4), 411-422.
- Karimae Tabarestani, M. and Zarrati, A. R. (2012). "Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylindrical bridge piers". Int. J. Eng. Transactions C, 25(1): 11-16.
- Kumar, V. (1996). "Reduction of scour around bridge piers using protective devices". Ph. D. Thesis, Univ. of Roorkee, Roorkee, India.
- Kumar, V. Ranga Raju, K.G. and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(12): 1302-1305.