

بررسی اثر جداگانه و ترکیبی طوق و شمع فداشونده در آبخستگی موضعی گروه پایه پل

سید محمدعلی زمردیان^{۱*}، حمیده غفاری^۲، زهرا قاسمی^۳

۱. دانشیار، بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸)

چکیده

شناخت پدیده مخرب آبخستگی در اطراف پایه‌های پل و ارائه راهکارهای مقابله با آن ضروری می‌باشد. در این پژوهش به منظور کنترل آبخستگی در اطراف گروه پایه از شمع‌های فداشونده، طوق مربعی و کاربرد توأم آن‌ها استفاده شده است. گروه پایه دو و سه تایی در امتداد یک خط و با فاصله 2.5D در جهت طولی و عرضی جریان و در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در گروه پایه در جهت جریان، استفاده از شمع‌های فداشونده منجر به کنترل کامل آبخستگی در پایه پستی می‌شود. طوق تأثیر بیشتری در کاهش آبخستگی پایه جلویی به میزان ۷۲/۲۲٪ و ۶۹/۲۳٪ به ترتیب در گروه پایه دو تایی و سه تایی نشان داد و کاربرد توأم آن‌ها منجر به کاهش بیشتر آبخستگی در تک تک پایه‌ها شده است. در گروه پایه دو و سه تایی عمود بر جریان روش ترکیبی به ترتیب با کاهش ۵۷/۱۴٪ و ۶۷/۵٪ آبخستگی، بیشترین تأثیر را نسبت به کاربرد جداگانه آن‌ها نشان داد.

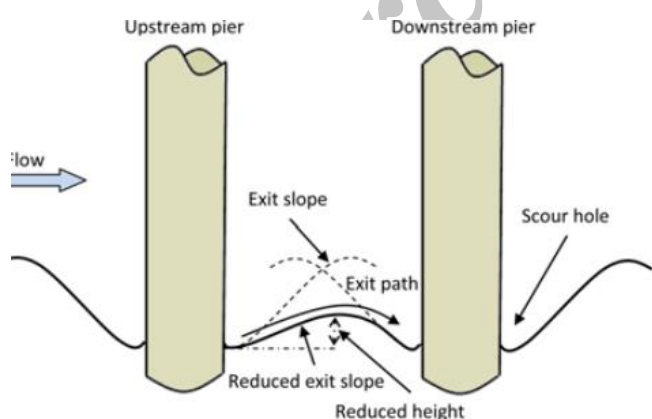
واژه‌های کلیدی: آبخستگی موضعی، گروه پایه، طوق، شمع فداشونده

مقدمه

منجر به تخمین غیرقابل اطمینانی از عمق آبخستگی می‌شود. آبخستگی در اطراف پایه پل به دلیل تشکیل سیستم گردابی پیچیده‌ای است که با برخورد جریان به پایه و جدا شدن آن، تشکیل می‌شود و از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سیستم جریان‌های رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب‌های برخاستگی اشاره کرد که عملکرد آن‌ها باعث تشکیل گودال آبخستگی می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده، دو مکانیزم مهم که باعث پیچیده‌تر شدن الگوی آبخستگی در حالت گروه پایه نسبت به تک پایه می‌شود عبارت است از عامل تقویت‌کننده (Reinforcing) و عامل حفاظت‌کننده (Sheltering). عامل تقویت‌کنندگی باعث افزایش عمق آبخستگی در پایه جلویی می‌شود و عامل حفاظت بودن به این معناست که وجود پایه بالادست سبب کاهش سرعت جریان و در نهایت کاهش آبخستگی در پایه پایین دست می‌شود (Raudkivi, 1998). در شکل (۱) به صورت شماتیک آبخستگی در اطراف پایه‌های دو تایی عمود بر جریان نشان داده شده است؛ بنابراین مطالعات بیشتر روی گروه پایه‌ها و آبخستگی ناشی از آن‌ها و ارائه تکنیک‌های مقابله با این پدیده ضروری می‌باشد. از جمله مطالعاتی که در زمینه آبخستگی در حالت گروه پایه انجام گرفته است می‌توان به کارهای (1986) Nouh، (1978) Hannah و (1994) Breusers و (1991) Raudkivi، (1994) Vittal *et al.*

آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های پل یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه می‌باشد که با گذشت زمان و به خصوص در هنگام سیلاب پتانسیل به خطر انداختن پایداری پل و همچنین پایداری سازه‌های جانبی را دارد. علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در فنون تحلیل و طراحی سازه‌ای، هر ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان در اثر پدیده آبخستگی تخریب و منجر به خسارات زیادی می‌گردند؛ بنابراین مطالعات بیشتر در زمینه هیدرولیک پل و آبخستگی موضعی در کنار اصول علمی طراحی سازه‌ای ضروری است و لازمه ارائه تکنیک‌های مقابله با این پدیده مخرب می‌باشد. در طراحی پل‌ها به دلایل اقتصادی و ژئوتکنیکی از گروه پایه استفاده می‌شود تا بار سازه‌ای پل به صورت گسترده به پی وارد شود و همچنین نسبت به تک پایه معادل با آن که دارای ضخامت بیشتری است، آبخستگی کمتری را ایجاد کند. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه آبخستگی موضعی در حالت تک پایه صورت گرفته است و روابط زیادی نیز جهت تخمین عمق آبخستگی توسط محققین ارائه شده است اما به دلیل اینکه مکانیسم آبخستگی در حالت گروه پایه با تک پایه متفاوت و پیچیده‌تر است، کاربرد این روابط در حالت گروه پایه

پایه در برابر آبشستگی محافظت می‌کند (Haque *et al.*, 2007). Melville و Hadfield (1999) با مطالعه تأثیر شمع‌های فدا شونده در کاهش آبشستگی پایه پل به این نتیجه رسیدند که تعداد بیشتر شمع‌ها تأثیر بیشتری در محافظت از پایه دارد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها این اثر کاهش می‌یابد. چیدمان شمع‌ها در پژوهش آن‌ها به صورت مثلثی و به گونه‌ای که رأس مثلث به سمت بالادست و در جلوی پایه قرار می‌گرفت، بود. آن‌ها همچنین نشان دادند که زاویه بین شمع‌ها در رأس مثلث در کاهش عمق آبشستگی تأثیرگذار است به گونه‌ای که با افزایش زاویه از ۳۰ درجه به ۵۳ درجه تأثیر آن در حفاظت پایه کاهش می‌یابد. Heidarpour *et al.* (2007) با بررسی تأثیر شکاف در میزان آبشستگی گروه پایه دو و سه تایی در امتداد یک خط به این نتیجه رسیدند که در گروه پایه با فاصله دو برابر قطر پایه، کارایی شکاف برای کلیه پایه‌ها یکسان و برابر تک پایه می‌باشد و با افزایش فاصله بین پایه‌ها عملکرد شکاف در پایه جلویی به علت کاهش عامل تقویت‌کنندگی و در پایه عقبی به علت کاهش تأثیر گرداب‌های جاری افزایش می‌یابد. مطالعات زیادی در زمینه کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه‌ها وجود ندارد و تمرکز مطالعات روی تک پایه می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع آبشستگی پایه پل و کاربرد گسترده گروه پایه به جای تک پایه در طراحی پل‌ها، در این پژوهش با به‌کارگیری شمع‌های فدا شونده و طوق مربعی و همچنین روش نوین ترکیب آن‌ها، به مطالعه و کنترل آبشستگی در گروه پایه پرداخته شده است که تاکنون بررسی نشده است.



شکل ۱. آبشستگی اطراف دو پایه در امتداد جریان (Nazariha, 1996)

آنالیز ابعادی

آبشستگی یک پدیده بسیار پیچیده است و تعداد پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی پایه‌ی پل بسیار زیاد می‌باشد، بنابراین منظور کردن تأثیر کلیه پارامترها در آبشستگی بسیار پیچیده و مشکل می‌باشد؛ بنابراین با گروه‌بندی مقادیر مهم

(Nazariha, 1996) Valentine و Babaeyan-Koopaei (1999)، (Ataei-Ashtiani و Beheshti (2006)، Zarrati *et al.* (2006)، (Heidarpour *et al.* (2010)، Bozkus و Cesme (2010)، (Ashtiani و Ashtiani (2012)، Aslani-Kordkandi و Movahedi *et al.* (2014)، Beg و Beg (2014)، (Gao *et al.* (2013)، Diwedat (2013)، Hosseini و Amini (2015) و غیره اشاره کرد که هر یک به نوعی با تغییر در تعداد، آرایش و فاصله بین پایه‌ها در جهت جریان و همچنین در جهت عمود بر جریان، میزان آبشستگی شکل گرفته را مورد مطالعه قرار داده‌اند. به طور کلی دو روش اساسی جهت مقابله با آبشستگی وجود دارد، روش‌های هیدرولیکی که با منحرف کردن جریان اطراف پایه، از آن محافظت می‌کنند و روش‌های غیر هیدرولیکی که با مقاوم‌سازی بستر، آبشستگی را کنترل می‌کنند (Melville and Sutherland, 1989). در واقع روش‌های هیدرولیکی به منظور تغییر الگوی جریان و کاهش شدت گرداب‌های ایجاد شده در 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 آبشستگی پیشنهاد شده است از جمله، ایجاد شکاف در پایه، نصب طوق، شمع‌های فدا شونده، پره‌های مستغرق، کابل و غیره (Tafarajnoruz *et al.*, 2012). مطالعات زیادی روی اثر هر یک از این روش‌ها در کاهش آبشستگی در حالت تک پایه انجام شده است و این در حالی است که استفاده از روش‌های ترکیبی می‌تواند تا حد زیادی آبشستگی را کاهش دهد. طوق‌ها صفحاتی تخت با ضخامت ناچیز هستند که روی پایه نصب می‌شوند و مانند مانع و محافظ بستر در برابر جریان‌های رو به پایین و گرداب‌های نعل اسبی عمل می‌کنند و قدرت این گرداب‌ها را مهار می‌کنند. Singh *et al.* (2001) با مطالعه روی طوق در جهت کنترل آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که بهترین محل نصب طوق روی پایه، تراز 0.1D زیر سطح بستر رسوب می‌باشد که در این حالت طوق به پهنای 2.5D به میزان ۱۰۰٪ آبشستگی را نسبت به حالت بدون طوق کاهش می‌دهد. همچنین بیان نمودند که حداکثر عمق آبشستگی با افزایش فاصله بین تراز بستر و تراز نصب طوق، افزایش پیدا می‌کند. Abdelazim *et al.* (2009) با بررسی عملکرد طوق‌ها در برابر آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که طوق مستطیلی با کاهش ۷۲ درصدی عمق آبشستگی بیشترین تأثیر را دارد. 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 فرساینده‌ی جریان، از

خلاصه می‌شود:

$$\frac{d_s}{D} = f_3 \left(\frac{Vt}{D}, n \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

بنابراین در این پژوهش در حالت تعادل تنها متغیر موجود تعداد پایه‌ها در دو جهت عمود بر جریان و همچنین در جهت جریان می‌باشد؛ بنابراین با به‌کارگیری شمع‌های فداشونده، طوق و همچنین ترکیب آن‌ها، میزان آبشستگی گروه پایه در دو جهت عمود بر جریان و همچنین در راستای جریان با فاصله ثابت 2.5D بین پایه‌ها، با تغییر در تعداد پایه‌ها بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

کلیه مطالعات آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شد. آزمایشگاه مجهز به یک کانال بتنی به طول ۱۵ متر، عرض ۴۰ سانتیمتر، عمق ۵۰ سانتیمتر و شیب طولی ۰/۰۰۱ می‌باشد. مقطع مستطیلی آزمایش به طول ۲ متر و عمق ۱۶ سانتیمتر انتخاب شد که با بالا آوردن کف کانال در قسمت بالادست و پایین دست مقطع آزمایش، ایجاد شد و با رسوبات ماسه‌ای پر شد. به‌منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از مقطع آزمایشی طول سکوی بالادست ۶ متر انتخاب شد که در بالادست با یک شیب ملایم کاهش ارتفاع می‌دهد. به‌منظور تأثیر نداشتن جریان خروجی روی آبشستگی طول سکوی پایین دست ۴ متر در نظر گرفته شد. در مقطع آزمایشی به‌منظور مشاهده تغییرات بستر و سطح آب، دیواره‌ها از جنس شیشه‌ای می‌باشند. سیستم تأمین‌کننده آب به‌صورت گردشی بود که امکان تداوم آزمایش‌ها را برای زمان طولانی فراهم می‌کرد. به این صورت که آب از یک مخزن زیرزمینی به حجم تقریبی ۱۰۰ مترمکعب توسط سه پمپ سانتریفیوژ به درون یک تانک استاتیکی به حجم ۱۲ مترمکعب به‌منظور تأمین هد، پمپ می‌شد. با باز کردن شیر ورودی، آب از طریق لوله به درون یک حوضچه که در ابتدای کانال قرار داشت وارد می‌شد و اغتشاشات سطحی آن توسط توری فلزی گرفته می‌شد. به‌منظور کنترل عمق جریان از یک سرریز مستطیلی لبه تیز با قابلیت بالا و پایین شدن که در انتهای کانال قرار داشت استفاده می‌شد و همچنین از یک دبی سنج خودکار الکتریکی برای کنترل دبی جریان استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام گرفت. چراکه عمق آبشستگی در شرایط آب زلال بیشتر از حالت بستر زنده می‌باشد بنابراین نتایجی که با فرض آب زلال به دست می‌آید دست بالاتر و دارای ضریب اطمینان بیشتری نسبت به آبشستگی بستر زنده می‌باشد بنابراین محققین در مطالعات آبشستگی بیشتر از شرایط بستر زلال استفاده نموده‌اند. پارامترهایی از قبیل دبی

به‌صورت پارامترهای بی‌بعد، تعداد متغیرهای موجود کاهش می‌یابد. این پارامترها عبارت‌اند از خصوصیات جریان، خصوصیات رسوب و هندسه پایه. پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی پایه پل (d_s) عبارت‌اند از عمق جریان (y)، سرعت جریان (V)، قطر پایه (D)، میانگین قطر ذرات (d_{50}) که می‌تواند با رابطه زیر بیان شود:

(رابطه ۱)

$$d_s = f_1(D, V, y, g, \rho_w, \nu, \rho_s, d_{50}, L, n, t, B, w, k_s, H, n_p, d, S, \beta, X)$$

در این رابطه ρ_w جرم مخصوص آب، ν لزجت سینماتیکی جریان، g شتاب ثقل، ρ_s جرم مخصوص ذرات جامد، L فاصله بین پایه‌ها، n تعداد پایه‌ها، B عرض فلوم، t زمان، w قطر طوق، k_s ضریب شکل طوق، H تراز نصب نسبت به بستر، n_p تعداد شمع‌های فداشونده، d قطر شمع‌های فداشونده، S فاصله بین شمع‌های فداشونده، θ زاویه بین شمع‌ها در رأس مثلث و X فاصله بین پایه تا رأس مثلث شمع‌های فداشونده می‌باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام و در نظر گرفتن سرعت جریان، قطر پایه و جرم مخصوص آب به‌عنوان متغیرهای تکراری، رابطه ۱ به‌صورت زیر در می‌آید:

(رابطه ۲)

$$\frac{d_s}{D} = f_2 \left(\frac{y}{D}, \frac{D}{d_{50}}, \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{V.D}{\nu}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{L}{D}, \frac{Vt}{D}, \frac{B}{D}, \frac{W}{D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{X}{D}, n_p, k_s, \beta, n \right)$$

محققین زیادی تأثیر پارامترهای بی‌بعد رابطه ۲ را بر آبشستگی بررسی نموده‌اند؛ بنابراین اثر هرکدام از پارامترها بر تابع f_2 مشخص می‌باشد. ازجمله، اگر $\frac{y}{D} > 3.5$ عمق جریان تأثیری بر آبشستگی موضعی اطراف پایه ندارد (Chiew and Mellville, 1987)، اگر $\frac{D}{d_{50}} > 20 - 25$ اندازه رسوبات بستر تأثیری بر آبشستگی پایه پل ندارد (Raudkivi and Ettema, 1983)، همچنین اگر نسبت $\frac{B}{D} \geq 6.25$ دیواره کانال تأثیری بر آبشستگی موضعی پایه پل ندارد (Raudkivi and Ettema, 1983). اگر عدد رینولدز پایه $\frac{V.D}{\nu}$ بزرگ‌تر از ۷۰۰۰ باشد بنابراین پارامتر $\frac{V.D}{\nu}$ و همچنین پارامتر $\frac{V}{\sqrt{gD}}$ تأثیری بر آبشستگی ندارند (Franzetti et al, 1994). در پژوهش حاضر کلیه پارامترهای بی‌بعد ذکرشده و تأثیرگذار بر تابع f_2 ثابت در نظر گرفته شده است. پارامترهای هیدرولیکی، هندسی و پارامترهای مربوط به سیال ثابت می‌باشند و تنها با تغییر در تعداد پایه‌ها در دو جهت عمود بر جریان و در راستای جریان، تأثیر شمع‌های فداشونده و طوق بر کاهش میزان آبشستگی پایه پل بررسی شده است. بنابراین در این پژوهش عمق آبشستگی بی‌بعد به‌صورت زیر

جریان (Q)، سرعت جریان (v)، عمق جریان (y)، اندازه رسوبات بستر (d_{50}) و قطر پایه پل (D) در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شده‌اند و در تعیین مقادیر آن‌ها از معیارهایی که توسط محققین پیشین ارائه شده است استفاده شد به‌گونه‌ای که شرایط برای تشکیل حداکثر آبخستگی موضعی ناشی از پایه پل فراهم باشد. 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 پایه‌های استوانه‌ای به قطر ۲ سانتیمتر استفاده شده است که این نسبت در حالت دو پایه عرضی برابر با $8/25$ و در حالت سه پایه در جهت عرضی برابر $6/5$ 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 $20 < \frac{D}{d_{50}} < 25$ صدق کند (Raudkivi and Ettema, 1983). از آنجایی که غیریکنواختی رسوبات باعث کاهش آبخستگی می‌شود بنابراین از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد و در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از $1/3$ باشد ($\sigma_g < 1.3$) شرط یکنواخت بودن ذرات برقرار می‌باشد (Shafaei-Bejestan, 2011)؛ بنابراین برای مطابقت با شرایط مذکور از ماسه با $d_{50} = 0.78$ میلی‌متر و $\sigma_g = 1.25$ استفاده شد. منحنی دانه‌بندی رسوبات ماسه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. Chiew و Mellville (1987)، با بررسی آبخستگی موضعی پایه پل در شرایط آب زلال و همچنین بستر زنده در رسوبات ماسه‌ای (با قطر متوسط برابر 0.24 ، 0.16 ، 0.185 ، 0.145 ، 0.12 میلی‌متر) در شدت جریان‌های مختلف (0.09 ، 0.195 ، 0.15 ، 0.2 ، 0.3 ، 0.35 ، 0.4) به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت عمق جریان به قطر پایه از یک محدوده بیشتر باشد ($3.5 > \frac{y}{D}$) عمق جریان تأثیری بر آبخستگی موضعی اطراف پایه ندارد و حداکثر آبخستگی ایجاد می‌شود. Raudkivi (1998) شرط تشکیل حداکثر عمق آبخستگی در آب زلال را $V \leq 0.95V_c$ پیشنهاد داده است. V_c سرعت آستانه حرکت ذرات است و در این پژوهش با توجه به رابطه پیشنهادی Mellville و Sutherland (1989) (رابطه ۵) و همچنین رابطه Coleman و Melville (2000) (رابطه ۶) که در زیر آورده شده است به دست آمده است.

$$V_c = 5.75 U_{*c} \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

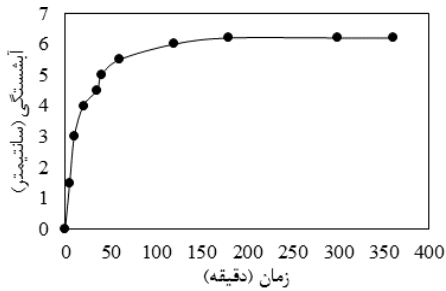
$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0125 (d_{50})^{1.4} \quad (\text{رابطه ۶})$$

U_{*c} : سرعت برشی بحرانی

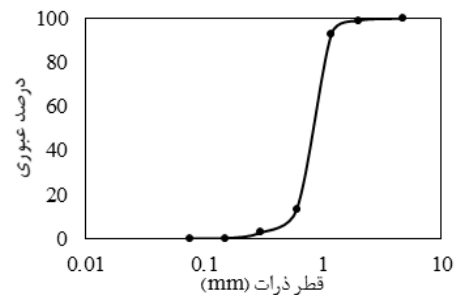
بنابراین با سعی و خطا، دبی جریان ۱۵ لیتر بر ثانیه، عمق جریان ۱۲ cm، سرعت جریان $0.312 \frac{m}{s}$ ، سرعت آستانه حرکت ذرات $0.342 \frac{m}{s}$ و $V = 0.91V_c$ به دست آمد. برای به دست آوردن زمان تعادل از معیار Kumar et al. (1999) استفاده شد و آن مدت‌زمانی است که تغییرات آبخستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد. بدین منظور آزمایشی بدون محدودیت زمانی در شرایط ذکرشده در رسوبات ماسه انجام گرفت و با ثبت تغییرات آبخستگی نسبت به زمان، زمان تعادل ۵ ساعت به دست آمد که در شکل (۳) نشان داده شده است. جدول (۱) شرایط جریان را در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در این جدول Fr عدد فرود می‌باشد و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. مراحل انجام آزمایش‌ها به این صورت است که ابتدا پس از اطمینان از تراز بودن پایه‌ها و نصب تجهیزات لازم، سطح رسوبات با استفاده از تراز تسطیح و هم‌تراز سکوی بالادست می‌شد. پس از روشن شدن پمپ، شیر آب به آرامی باز می‌شد و سرریز انتهای کانال که برای تنظیم عمق جریان است بالا نگه‌داشته می‌شد تا آب به آرامی وارد رسوبات شود و سطح رسوبات به هم‌ریخته نشود. سپس به آرامی شیر آب بازتر می‌شد تا پشت سرریز از آب پر شود و هم‌زمان دبی جریان کنترل می‌شد. پس از آن سرریز به آرامی پایین آورده می‌شد تا عمق ۱۲ سانتیمتر و دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه تأمین شود. پس از اطمینان از شروع جریان یکنواخت، زمان آزمایش‌ها به مدت ۵ ساعت آغاز می‌شد. پس از اتمام آزمایش شیر آب به آرامی بسته می‌شد و سرریز به آرامی بالا آورده می‌شد تا از شسته شدن رسوبات و وارد شدن به گودال آبخستگی جلوگیری شود. با گذشت زمان و پس از خشک شدن سطح رسوبات، با استفاده از یک متر لیزری که روی یک ریل قرار می‌گرفت، پروفیل گودال آبخستگی به صورت شبکه 1×2 ، 1×3 و 1×3 در این شکل (۴) کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این پژوهش از دو و سه پایه با آرایش 1×2 ، 1×3 و 3×3 در جهت عمود بر جریان و همچنین در جهت جریان استفاده شد که فاصله بین پایه‌ها ثابت و برابر $2.5D$ در نظر گرفته شد. این آرایش‌ها با توجه به مشخصات کانال و ابعاد مدل به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دیواره کانال تأثیری بر آبخستگی نداشته باشد. همچنین مطابق با مطالعات Hannah (1978) که نشان دادند در حالتی که فاصله بین پایه‌ها برابر با $2.5D$ باشد تأثیر عامل تقویت‌کننده حداکثر می‌باشد بنابراین در این پژوهش با انتخاب فاصله $2.5D$ ، شرایط برای تشکیل حداکثر آبخستگی فراهم شده است. در پژوهش پیشین که توسط Gavarti و Ghasemi (2015) روی کنترل آبخستگی تک پایه با استفاده از

روش مجزا و ترکیبی شمع‌های فدا شونده، طوق و شکاف انجام گرفت مشاهده شد که ترکیب دو روش شمع‌های فدا شونده با طوق مربعی بیشترین تأثیر را در کاهش آبخستگی پایه پل دارد؛ بنابراین در همین راستا در پژوهش حاضر شمع‌های فدا شونده و طوق مربعی در حالت گروه پایه مورد بررسی قرار گرفت. طوق مربعی دارای طول ضلع $2.5D$ می‌باشد و در تراز بستر که در پژوهش پیشین بیشترین تأثیر مثبت بر کنترل آبخستگی تک -

پایه نشان داده بود، روی پایه‌ها نصب شد (شکل ۵). همچنین با توجه به معیار Melville و Hadfield (1999) از ۵ شمع فداشونده استفاده شده است که قطر پایه ۶ برابر قطر شمع‌ها می‌باشد؛ بنابراین قطر شمع‌ها $3/33$ 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 ۶).



شکل ۳. منحنی تغییرات آبخستگی نسبت به زمان



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

جدول ۱. شرایط جریان در آزمایش‌های انجام شده

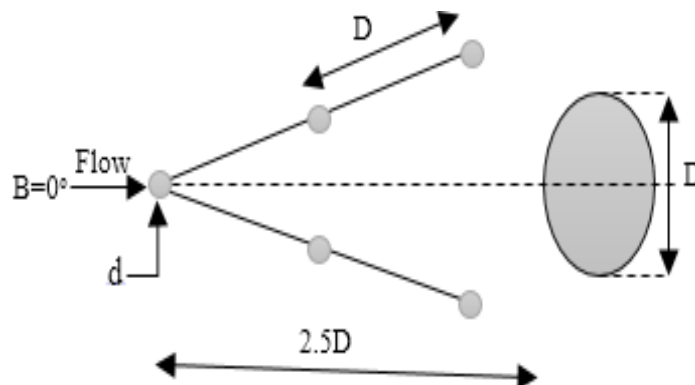
$d_{50}(mm)$	$\frac{D}{d_{50}}$	$y(m)$	$V_C(\frac{m}{s})$	$\frac{y}{D}$	$\frac{V}{V_C}$	Fr
۰/۷۸	۲۵/۶۴	۰/۱۲	۰/۳۴	۶	۰/۹۱	۰/۲۸۸



شکل ۵. نمایی از طوق استفاده شده و گودال آبخستگی ایجاد شده



شکل ۴. نمایی کلی از فلوم استفاده شده



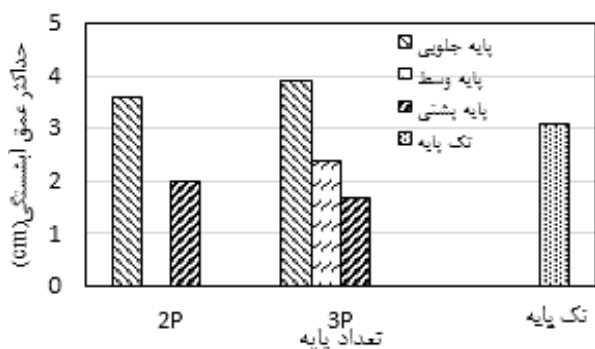
شکل ۶. آرایش شمع‌های فداشونده در برابر پایه

بحث و نتایج

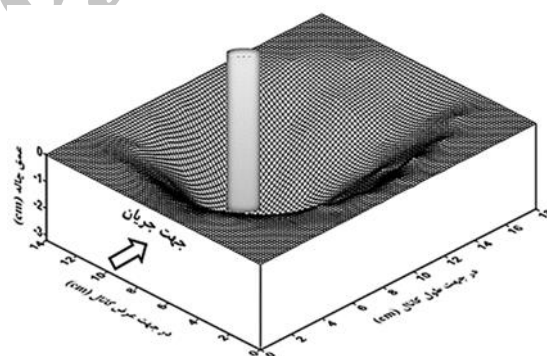
میزان آبشستگی در حالت گروه پایه در جهت جریان

به منظور مقایسه میزان آبشستگی در حالت گروه پایه با تک پایه در زمان تعادل ۵ ساعت، ابتدا آزمایشی روی پایه به قطر ۲ سانتیمتر انجام گرفت و مشاهده شد که بیشترین آبشستگی در ساعات اولیه تشکیل می‌شود و پس از ۵ ساعت از شروع آزمایش، گودال آبشستگی به صورت منظم و با حداکثر عمق ۳/۱ سانتیمتر در اطراف پایه شکل می‌گیرد که پروفیل آن در شکل (۷) نشان داده شده است. در گروه پایه تعداد و فاصله بین پایه‌ها فاکتور بسیار مهمی در میزان آبشستگی شکل گرفته اطراف پایه‌ها می‌باشد که در اینجا با انتخاب دو و سه پایه با فاصله 2.5D که مطابق با مطالعات Hannah (1978) بیشترین تأثیر عامل تقویت‌کننده مشاهده شده است، میزان آبشستگی بررسی شد. مشاهده شد که در حالت گروه پایه دوتایی در جهت جریان میزان آبشستگی در پایه اول به دلیل تأثیر عامل تقویت‌کننده به اندازه ۱۶/۱۳ درصد نسبت به تک پایه افزایش دارد و در پایه پشتی به دلیل وجود پایه بالادست و عامل حفاظت‌کنندگی آن،

میزان آبشستگی نسبت به تک پایه به اندازه ۳۵/۴۸ درصد کاهش داشته است. در حالت گروه پایه سه‌تایی در جهت جریان، عمق آبشستگی در پایه جلویی ۲۵/۸ درصد نسبت به حالت تک پایه و ۸/۳۳ درصد نسبت به حالت دو پایه در جهت جریان، افزایش آبشستگی نشان داده است؛ بنابراین وجود دو پایه در پشت پایه اول تأثیر عامل تقویت‌کنندگی در میزان آبشستگی پایه اول را نسبت به حالتی که یک پایه در پشت پایه باشد، بیشتر کرده است. در پایه دوم عمق آبشستگی ۲۲/۵۸ درصد نسبت به تک پایه به علت حفاظت بودن پایه بالادست، کاهش نشان داده است و نسبت به حالت دو پایه، ۲۰ درصد افزایش آبشستگی نشان داده است که به دلیل وجود پایه پایین دست آن و اثر تقویت‌کنندگی آن در میزان آبشستگی آن می‌باشد. در پایه سوم عمق آبشستگی ۴۵/۱۶ درصد نسبت به تک پایه کاهش یافته است. اثر حفاظتی دو پایه در بالادست آن، باعث شده است که عمق آبشستگی در این پایه به شدت کاهش پیدا کند. تغییرات آبشستگی در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸. تغییرات آبشستگی گروه پایه در جهت جریان

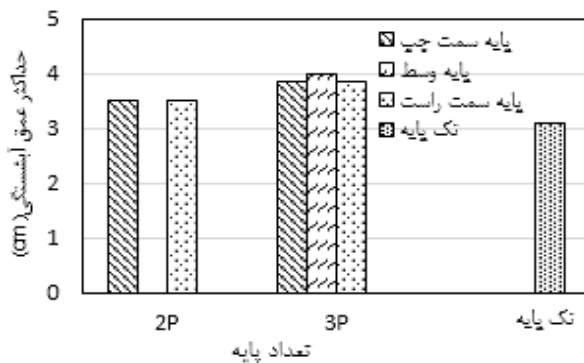


شکل ۷. پروفیل گودال آبشستگی اطراف تک پایه به قطر ۲ سانتیمتر

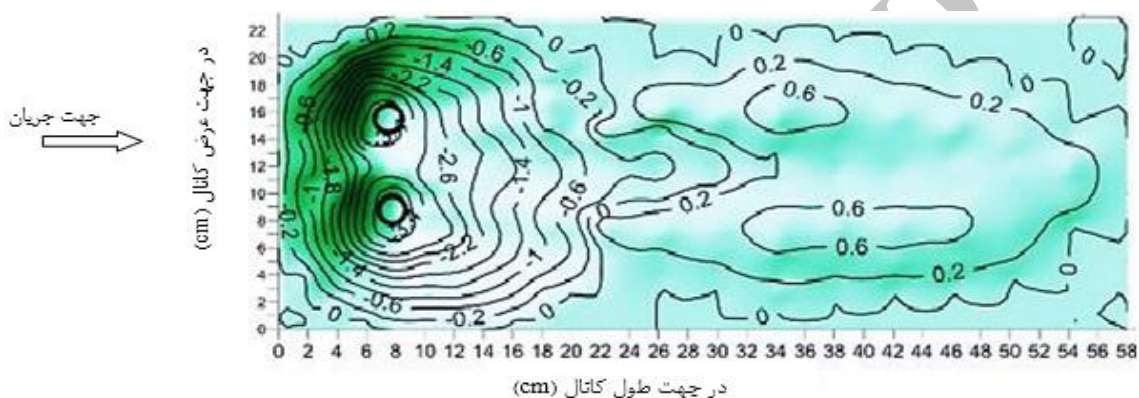
میزان آبشستگی در حالت گروه پایه در جهت عمود بر جریان

در حالتی که پایه‌ها عمود بر جریان هستند در فواصل کم به علت تداخل و فشردگی گرداب‌های نعل اسبی بین پایه‌ها و همچنین اضافه شدن آبشستگی در اثر تنگ‌شدگی مقطع ناشی از ضخامت پایه‌ها در برابر جریان به آبشستگی موضعی تک‌تک پایه‌ها، در این حالت میزان آبشستگی کل بیشتر از حالتی است که پایه‌ها در جهت جریان هستند. Adiban et al. (2002) بیان نمودند که هر چه فاصله بین پایه‌ها کمتر باشد ارتفاع بستر بین پایه‌ها که همان ناحیه تأثیر گرداب‌های نعل اسبی می‌باشد بیشتر کاهش می‌یابد و این کاهش ارتفاع باعث افزایش سرعت جریان‌های ایجاد شده در این ناحیه می‌شود که باعث می‌شود مواد بستر سریع‌تر و بیشتر فرسایش یابند که در اینجا نیز مشاهده شده است به طوری که در حالت دو پایه عمود بر جریان، عمق آبشستگی در هر دو پایه

به اندازه ۱۲/۹ درصد نسبت به تک پایه افزایش یافته است و به علت یکسان بودن شرایط هیدرولیکی در هر دو پایه، میزان آبشستگی برابر است. در حالت سه پایه عمود بر جریان، عمق آبشستگی در پایه وسط به اندازه ۳۰ درصد افزایش یافته است و در دو پایه کناری میزان آبشستگی تقریباً یکسان و ۲۴/۱۹ درصد نسبت به تک پایه افزایش عمق نشان داده است. یکسان نبودن میزان آبشستگی در پایه وسط نسبت به دو پایه کناری به دلیل تفاوت و بیشتر بودن سرعت جریان در تراز مرکزی کانال نسبت به طرفین می‌باشد که باعث شده است میزان آبشستگی در پایه وسط به مقدار بیشتری ایجاد شود. در شکل (۹) تغییرات آبشستگی در این حالت نشان داده شده است. پروفیل گودال آبشستگی در حالت دو پایه عمود بر جریان در شکل (۱۰) به عنوان مثال آورده شده است که گستردگی گودال آبشستگی به وضوح مشخص می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات آبستگي گروه پایه در جهت عمود بر جريان



شکل ۱۰. پروفیل گودال آبستگي در حالت دو پایه عمود بر جريان

نسبت به تک پایه ۶۷/۷۴ درصد و نسبت به گروه پایه بدون طوق ۷۲/۲۲ درصد کاهش نشان داده است. در پایه دوم نیز عمق آبستگي نسبت به تک پایه ۶۴/۵۲ درصد کاهش پیدا کرده است که این نسبت به حالت بدون طوق ۴۵ درصد می باشد؛ بنابراین طوق مربعی تأثیر بیشتری در کاهش آبستگي پایه جلویی نشان داده است و اثر تقویت کنندگی پایه پشتی بر پایه جلویی را کنترل کرده است درحالی که شمع های فدا شونده تأثیر حفاظتی بیشتری در پایه پشتی دارند. استفاده ترکیبی طوق مربعی و شمع فداشونده در هر دو پایه باعث کاهش شدید آبستگي شده است به گونه ای که در پایه جلویی باعث کاهش ۸۲/۳۳ درصدی آبستگي نسبت به تک پایه و کاهش ۸۲/۳۳ درصدی آبستگي نسبت به حالت بدون حفاظ شده است و در پایه پشتی نیز باعث کاهش ۱۰۹/۶۸ درصدی آبستگي نسبت به تک پایه و همچنین کاهش ۱۱۵ درصدی نسبت به حالت بدون شمع و طوق شده است که باعث تجمع رسوب در اطراف پایه پشتی شده است؛ بنابراین ترکیب شمع های فدا شونده و طوق مربعی باعث تعادل و بهبود بخشی اثر آن ها در کاهش آبستگي در هر دو پایه نسبت به کاربرد جداگانه آن ها شده است. در استفاده ترکیبی شمع های فدا شونده و طوق، شمع های

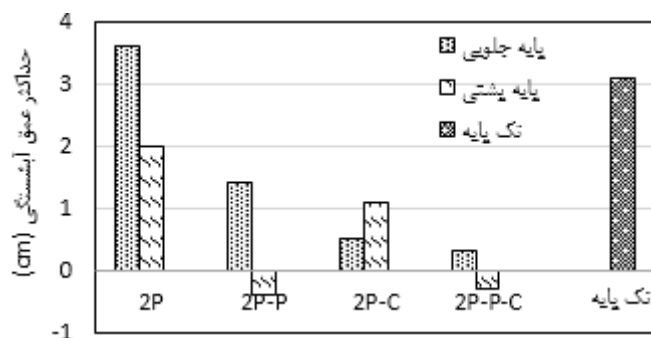
بررسی تأثیر شمع های فدا شونده و طوق در آبستگي گروه-

پایه دوتایی در جهت جريان

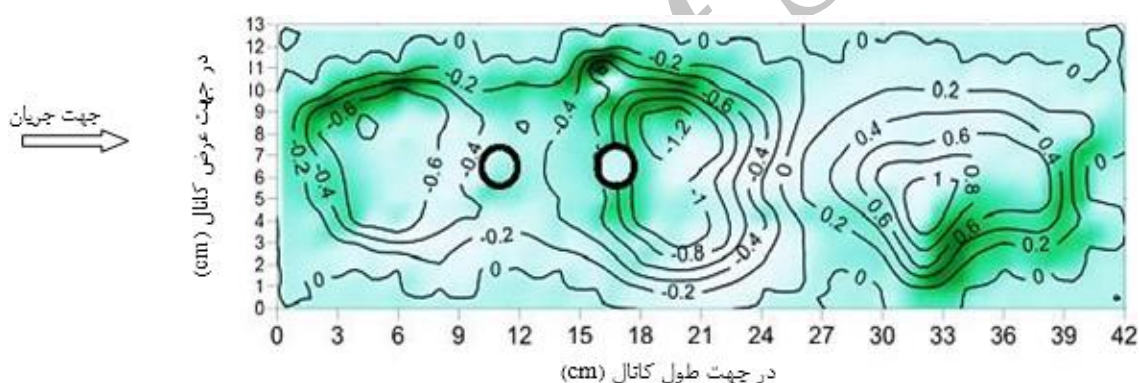
شمع های فداشونده با انحراف جريان به طرفین پایه ها و کاهش تأثیر گرداب های جاری و جريان های رو به پایین، باعث تأخیر در شروع آبستگي نسبت به حالت بدون استفاده از شمع می شوند همچنین با گذشت زمان باعث کاهش عمق آبستگي در هر دو پایه شده اند اما تأثیر بیشتری در کاهش آبستگي اطراف پایه پشتی نشان داده اند به گونه ای که باعث رسوب گذاری در اطراف این پایه شده اند که ناشی از انتقال رسوبات از گودال آبستگي پایه جلویی می باشد که باعث شده است میزان آبستگي در این پایه نسبت به تک پایه ۱۱۲/۹ درصد و نسبت به گروه پایه بدون کاربرد شمع ۱۲۰ درصد کاهش یابد و میزان آبستگي به صفر برسد. در پایه جلویی نیز عمق آبستگي نسبت به تک پایه ۵۴/۸۴ درصد کاهش یافته است که نسبت به حالت دو پایه بدون استفاده از شمع، ۶۱/۱۱ درصد کاهش می باشد؛ بنابراین استفاده از شمع های فداشونده، اثر حفاظتی پایه پشتی را تقویت کرده است و درعین حال اثر تقویت کنندگی پایه جلویی را نیز کاهش می دهد. استفاده از طوق مربعی نیز باعث کاهش آبستگي در هر دو پایه شده است به گونه ای که در پایه اول عمق آبستگي

۲P، 2P-P، 2P-C و 2P-P-C به ترتیب معادل با گروه پایه دوتایی، دو پایه همراه با شمع‌های فداشونده، دو پایه همراه با طوق و دو پایه همراه با شمع‌های فداشونده و طوق می‌باشد. در شکل (۱۲) پروفیل گودال آبخستگی در حالت دو پایه در جهت جریان همراه با طوق مربعی نشان داده شده است.

فداشونده با اصلاح الگوی جریان و طوق مربعی با حفاظت از بستر در برابر گرداب‌های حاصل، میزان آبخستگی به شدت کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۱) تغییرات آبخستگی گروه- پایه دوتایی در جهت جریان با کاربرد روش‌های طوق، شمع‌های فداشونده و همچنین ترکیب آن‌ها نشان داده شده است و علائم



شکل ۱۱. مقایسه روش‌های کاهش آبخستگی در گروه پایه دوتایی در جهت جریان



شکل ۱۲. پروفیل گودال آبخستگی در حالت G2-Cq

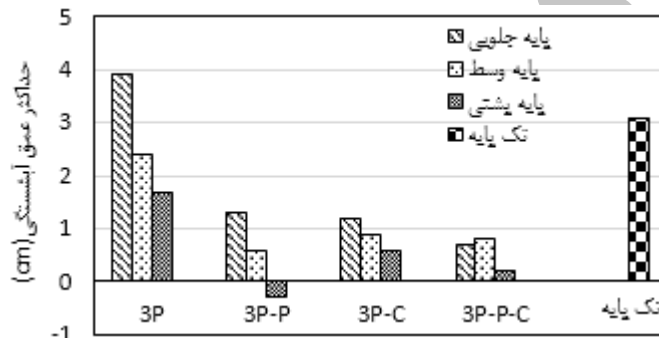
حالت گروه پایه سه‌تایی در جهت جریان، شمع‌های فدا شونده بیشترین تأثیر را در کاهش آبخستگی پایه پشتی دارند به‌گونه‌ای که باعث تجمع رسوب در این پایه شده‌اند. در مقایسه با شمع‌های فداشونده طوق مربعی بیشترین تأثیر کاهش آبخستگی را به ترتیب در پایه جلویی، پشتی و پایه وسط نشان داده است و باعث کاهش آبخستگی در هر سه پایه شده است به‌گونه‌ای که در پایه جلویی به میزان ۶۱/۲۹ درصد آبخستگی را نسبت به حالت تک پایه کاهش داده است و ۶۹/۲۳ درصد نسبت به گروه پایه بدون طوق کاهش آبخستگی نشان داده است؛ بنابراین استفاده از طوق اثر تقویت‌کنندگی را کنترل می‌کند. همچنین استفاده از طوق باعث کاهش آبخستگی در پایه وسط به مقدار ۷۱/۶۱ درصد کاهش نسبت به تک پایه و ۶۳/۳۳ درصد کاهش نسبت به گروه پایه بدون حفاظ نشان داده است که این در پایه سوم به ترتیب ۸۰/۶۴ درصد و ۶۴/۷ درصد کاهش می‌باشد؛ بنابراین طوق بیشترین تأثیر را در کاهش

بررسی تأثیر شمع‌های فدا شونده و طوق در آبخستگی گروه- پایه سه‌تایی در جهت جریان

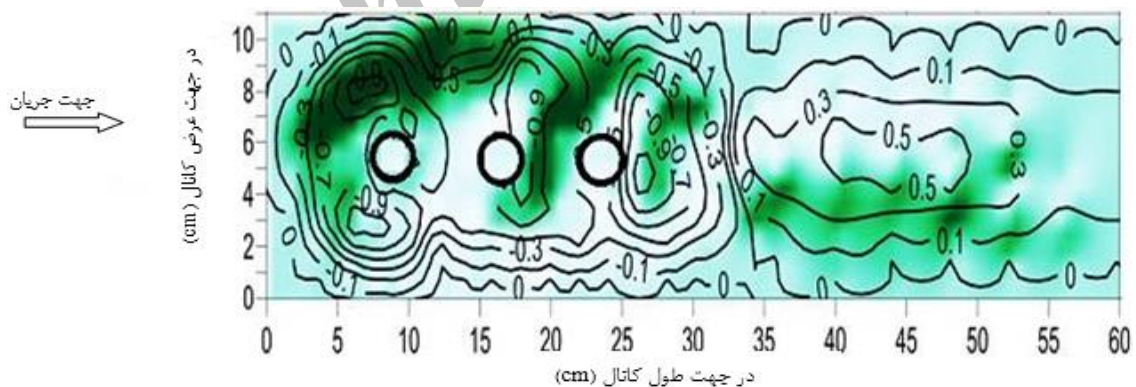
در حالت گروه پایه سه‌تایی در جهت جریان، شمع فدا شونده در هر سه پایه نقش مثبتی در کاهش آبخستگی نشان داده است. به‌گونه‌ای که در پایه جلویی به‌اندازه ۵۸/۰۶ درصد آبخستگی را نسبت به تک پایه کاهش داده است و همچنین ۶۶/۶۶ درصد نسبت به گروه پایه بدون شمع، آبخستگی را در پایه جلویی کاهش داده است؛ بنابراین شمع‌های فداشونده اثر تقویت‌کنندگی پایه‌های پشتی بر آبخستگی پایه جلویی را تا حدودی کنترل کرده است. در پایه وسط نیز میزان آبخستگی به‌اندازه ۸۰/۶۴ درصد نسبت به تک پایه کاهش داده است که این نسبت به حالت گروه پایه بدون استفاده از شمع‌های فدا شونده ۷۵ درصد می‌باشد و در پایه سوم نیز ۱۰۹/۶۸ درصد نسبت به تک پایه و ۱۱۷/۶۴ درصد نسبت به حالت بدون شمع آبخستگی کاهش پیدا کرده است؛ بنابراین می‌توان گفت که در

نشانگر آبستگی نهایی اطراف پایه‌ها نمی‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که در مدت‌زمان بیشتر از ۵ ساعت نتایج حاصله متفاوت باشد. Pirmohammadi و Heidarpour (2006) با بررسی عملکرد طوق در کاهش آبستگی گروه‌پایه سری دوتایی و سه‌تایی در جهت جریان به این نتیجه رسیدند که آبستگی پایه‌های دارای طوق با یک تأخیر زمانی نسبت به پایه بدون طوق آغاز می‌شود و وجود طوق زمان رسیدن به تعادل را افزایش می‌دهد و عمق آبستگی را کاهش می‌دهد. همچنین به این نتیجه رسیدند که تأثیر طوق در کاهش عمق آبستگی در پایه‌های عقبی نسبت به پایه‌های جلویی بیشتر می‌باشد. در شکل (۱۴) پروفیل گودال آبستگی در حالت سه پایه در جهت جریان همراه با طوق مربعی به‌عنوان نمونه آورده شده است که تغییرات ابعاد گودال آبستگی به‌وضوح مشخص می‌باشد.

آبستگی پایه جلویی نشان داده است و همچنین اثر حفاظتی پایه‌های پشتی را نیز کنترل کرده است. استفاده ترکیبی از شمع‌های فداشونده و طوق مربعی نیز بیشترین تأثیر مثبت را به ترتیب بر پایه پشتی، جلویی و پایه وسط نشان داده است به‌گونه‌ای که به ترتیب ۹۳/۵۵ درصد، ۷۷/۴۲ درصد و ۷۴/۱۹ درصد کاهش نسبت به تک پایه داشته است که این نسبت به گروه‌پایه بدون حفاظت به ترتیب ۸۸/۲۳ درصد، ۸۲/۰۵ درصد و ۶۶/۶۶ درصد کاهش می‌باشد؛ بنابراین نسبت به دو روش دیگر بیشترین تأثیر را در کاهش آبستگی پایه پشتی نشان داده است و همچنین باعث کنترل اثر تقویت‌کنندگی پایه جلویی شده است. در شکل (۱۳) تغییرات آبستگی در این حالت نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که این نتایج در مدت‌زمان ۵ ساعت از شروع آزمایش‌ها حاصل شده است و



شکل ۱۳. مقایسه روش‌های کاهش آبستگی در گروه‌پایه سه‌تایی در جهت جریان



شکل ۱۴. پروفیل گودال آبستگی در حالت G3-Cq

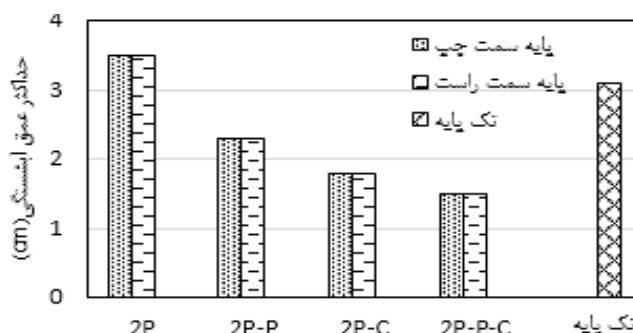
۴۸/۵۷ درصد کاهش نسبت به گروه دوتایی بدون حفاظ نشان داده است و این در حالی است که ترکیب شمع‌های فدا شونده و طوق، میزان آبستگی را به ترتیب به‌اندازه ۵۱/۶۱ درصد نسبت به تک پایه و ۵۷/۱۴ درصد نسبت به حالت بدون حفاظ کاهش داده است؛ بنابراین ترکیب شمع‌های فدا شونده و طوق بیشترین تأثیر را در کاهش آبستگی نسبت به دو روش دیگر نشان داده است. همچنین با مقایسه دو روش شمع‌های فداشونده و طوق

بررسی تأثیر شمع‌های فدا شونده و طوق در آبستگی گروه-پایه دوتایی در جهت عمود بر جریان

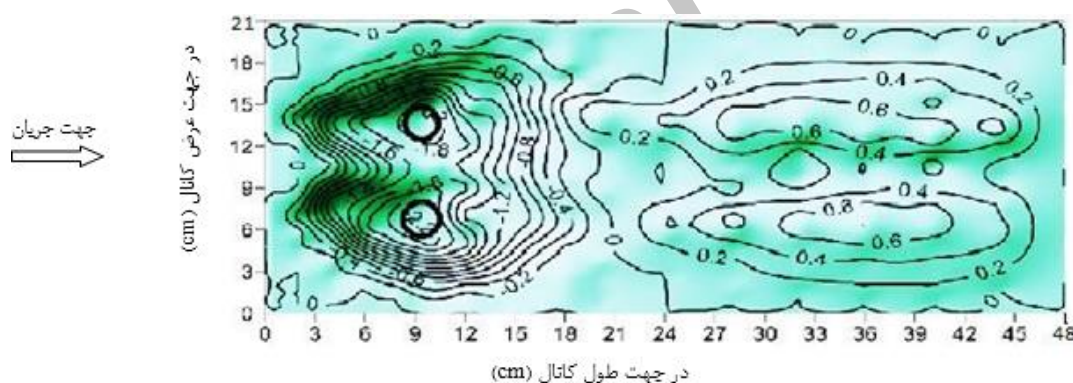
در گروه‌پایه دوتایی عمود بر جریان به دلیل یکسان بودن شرایط هیدرولیکی در هر دو پایه میزان اثرگذاری روش‌های حفاظتی یکسان است. استفاده از شمع‌های فدا شونده، آبستگی را به میزان ۲۵/۸ درصد نسبت به حالت تک پایه کاهش داده است که این نسبت به گروه‌پایه بدون حفاظ ۳۴/۲۸ درصد کاهش می‌باشد. طوق مربعی نیز ۴۱/۹۳ درصد نسبت به تک پایه و

طوق شسته شوند و عمق گودال آبستگي افزایش یابد و کارایی طوق در کنترل آبستگي کم شود بنابراین استفاده از شمع‌های فداشونده به‌عنوان تغییردهنده الگوی جریان در اطراف پایه‌ها در ترکیب با طوق‌های مربعی می‌تواند راهکاری مناسب جهت کاهش پتانسیل آبستگي اطراف پایه‌ها باشد. در شکل (۱۶) پروفیل گودال آبستگي در حالت دو پایه عمود بر جریان همراه با شمع‌های فداشونده نشان داده شده است.

در کاهش آبستگي، کاربرد طوق تأثیر بیشتری نشان داده است. تغییرات آبستگي در این حالت در شکل (۱۵) نشان داده شده است. پیش‌بینی می‌شود که استفاده از طوق‌های مربعی در مدت‌زمان تعادل بیشتر، به دلیل تشکیل شیارهای آبستگي ناشی از برخورد جریان به لبه‌های تیز طوق در پشت پایه و گسترش آن‌ها با زمان، بنابراین با گذشت زمان و برخورد شیارهای آبستگي با پایه‌ها و شسته شدن ذرات، رسوبات زیر



شکل ۱۵. مقایسه روش‌های کاهش آبستگي در گروه پایه دوتایی در جهت عمود بر جریان



شکل ۱۶. گودال آبستگي در حالت G2V-P

نسبت به حالت بدون حفاظ کاهش داده است که این در پایه‌های کناری به ترتیب ۴۱/۹۳ درصد و ۵۳/۲۴ درصد کاهش می‌باشد. همچنین طوق مربعی نیز میزان آبستگي در پایه وسط را به میزان ۴۵/۱۶ درصد نسبت به حالت تک پایه و ۵۷/۵ درصد نسبت به گروه پایه بدون استفاده از طوق کاهش داده است که این در پایه‌های کناری به ترتیب برابر با ۵۱/۶۱ درصد و ۶۱ درصد کاهش می‌باشد؛ بنابراین استفاده از طوق مربعی تأثیر بیشتری نسبت به شمع‌های فداشونده در کاهش آبستگي گروه پایه سه‌تایی عمود بر جریان نشان داده است. استفاده ترکیبی از شمع‌های فداشونده و طوق مربعی بیشترین تأثیر را در کاهش آبستگي نشان داده است که به این دلیل می‌باشد که در روش ترکیبی، شمع‌های فداشونده با تغییر الگوی جریان نزدیک شونده به پایه و همچنین طوق‌های مربعی نیز با خنثی کردن اثر فرساینده‌گی گرداب‌ها بر بستر رسوبات، میزان

بررسی تأثیر شمع‌های فدا شونده و طوق در آبستگي گروه-

پایه سه‌تایی در جهت عمود بر جریان

در گروه پایه سه‌تایی عمود بر جریان در پایه وسط به دلیل قرارگیری در تراز مرکزی کانال و بیشتر بودن سرعت در این تراز نسبت به ترازهای دیگر و همچنین افتادن گودال آبستگي دو پایه کناری بر گودال آبستگي پایه وسط، بنابراین میزان آبستگي در این پایه نسبت به دو پایه کناری بیشتر می‌باشد و در دو پایه کناری به دلیل یکسان بودن شرایط هیدرولیکی میزان آبستگي یکسان به دست آمده است؛ بنابراین در کاربرد شمع‌های فداشونده، طوق و همچنین ترکیب آن‌ها تأثیر یکسانی در کاهش آبستگي دو پایه کناری حاصل شده است و در پایه وسط میزان آبستگي اندکی بیشتر از دو پایه دیگر به دست آمده است. به گونه‌ای که شمع‌های فداشونده میزان آبستگي را در پایه وسط به میزان ۲۹ درصد نسبت به تک پایه و ۴۵ درصد

عملکرد بهتری نسبت به استفاده جداگانه از هر روش در هر دو پایه دارد به گونه‌ای در پایه پشتی میزان آبخستگی به صفر رسیده است و در پایه جلویی نیز آبخستگی به میزان ۸۳/۳۳٪ کاهش یافته است.

۲- در گروه پایه سه‌تایی در جهت جریان، استفاده از روش‌های ذکر شده منجر به کاهش آبخستگی در هر سه پایه شده است. استفاده از شمع‌های فداشونده اثر حفاظتی بیشتری را به ترتیب در پایه پشتی با ۱۱۷/۶۴٪ کاهش، پایه وسط با ۷۵٪ کاهش و پایه جلویی با ۶۶/۶۶٪ کاهش، نشان داده است. طوق مربعی به ترتیب اثر حفاظتی بیشتری را در پایه جلویی با ۶۹/۲۳٪ کاهش، پایه پشتی با ۶۴/۷٪ کاهش و پایه وسط با ۶۳/۳۳٪ کاهش نشان داده است. استفاده از ترکیب این دو روش باعث تعادل و بهبود آبخستگی در هر سه پایه نسبت به استفاده جداگانه هر کدام از روش‌ها دارد و به ترتیب تأثیر مثبتی را در کاهش آبخستگی پایه پشتی با ۸۸/۲۳٪ کاهش، جلویی با ۸۲٪ کاهش و پایه وسط با ۶۶/۶۶٪ کاهش نشان داده است.

۳- در گروه پایه دو تایی عمود بر جریان، استفاده از روش‌های ذکر شده تأثیر حفاظتی یکسانی را بر هر دو پایه دارد و منجر به کاهش آبخستگی در هر دو پایه شده است و به ترتیب ترکیب دو روش طوق و شمع فداشونده با ۵۷/۱۴٪ کاهش، طوق با ۴۸/۵۷٪ کاهش و شمع فدا شونده با ۳۴/۲۸٪ کاهش اثر بیشتری را در کاهش آبخستگی نشان داده‌اند.

۴- در گروه پایه سه‌تایی عمود بر جریان، در استفاده از هر سه روش میزان آبخستگی در دو پایه کناری به مقدار بیشتری کنترل شده است و در پایه وسط به ترتیب روش ترکیبی با ۶۷/۵٪ کاهش، طوق مربعی با ۵۷/۵٪ کاهش و شمع‌های فدا شونده با ۴۵٪ کاهش در کنترل آبخستگی تأثیر داشته‌اند.

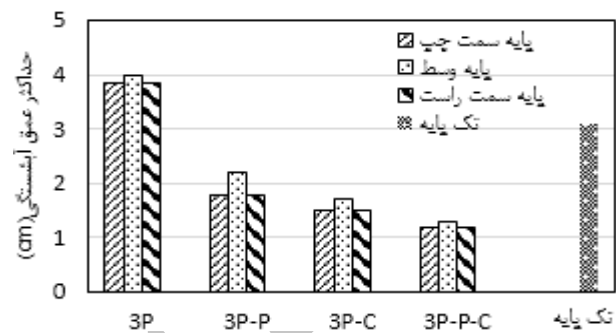
۵- استفاده ترکیبی شمع‌های فدا شونده و طوق مربعی در همه آرایش‌ها تأثیر بیشتری در کاهش آبخستگی نشان دادند و با استفاده از این روش هم الگوی جریان مخرب اطراف پایه تغییر می‌کند و هم بستر در برابر گرداب‌های حاصل محافظت می‌شود بنابراین کارایی بیشتری را در کاهش آبخستگی نشان می‌دهد.

REFERENCES

Adiban, H., Heidarpour, M., and Afzalimehr, H. (2002). The effect of distance of piers on performance of the slot in reducing the local scour at cylindrical bridge pier group. *Proceedings of the Sixth International Seminar on River Engineering*, Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran. (In Farsi)

Abdelazim, M. N., Gamal, M. M., Yasser, M. A., and Amira, A. F. (2009). Optimal shape of collar to minimize local scour around bridge pier.

آبخستگی به شدت کاهش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که باعث شده است میزان آبخستگی در پایه وسط به اندازه ۵۸ درصد نسبت به تک پایه و ۶۷/۵ درصد نسبت به گروه-پایه بدون حفاظ کاهش پیدا کند. این مقادیر در پایه کناری به ترتیب برابر ۶۱/۲۹ درصد و ۶۸/۸۳ درصد کاهش به دست آمده است. در شکل (۱۷) تغییرات آبخستگی در این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۷. مقایسه روش‌های کاهش آبخستگی در گروه پایه سه‌تایی در جهت عمود بر جریان

نتیجه‌گیری کلی

در مطالعه حاضر تأثیر استفاده از شمع‌های فدا شونده، طوق مربعی و ترکیب این دو روش در کنترل آبخستگی موضعی گروه‌پایه‌های دو و سه‌تایی استوانه‌ای واقع در امتداد یک خط با فاصله 2.5D در جهت طولی و عرضی جریان و در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار گرفته است نتایج حاصل نشان داد که استفاده از هر سه روش منجر به کاهش حداکثر عمق آبخستگی در پایه‌ها می‌شود اما بسته به آرایش پایه‌ها میزان کاهش در اطراف هر کدام از پایه‌ها متفاوت می‌باشد و نتایج زیر به دست آمد:

۱- در حالت گروه پایه دو تایی در جهت جریان، شمع‌های فدا شونده با کاهش ۱۲۰٪ آبخستگی، نسبت به پایه پشتی و طوق مربعی با کاهش ۷۲/۲۲٪ آبخستگی، نسبت به پایه جلویی اثر حفاظتی بهتری نشان داده است به گونه‌ای که در استفاده از شمع‌های فداشونده میزان آبخستگی در پایه پشتی به صفر رسیده است. با این حال ترکیب شمع فداشونده با طوق مربعی

Thirteenth International Water Technology Conference, Zagazig University.

Ataei-Ashtiani, B., and Beheshti, A.A. (2006). Experimental investigation of clear- water local scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(10), 1100-1104.

Ataei-Ashtiani, B., and Aslani-Kordkandi, A. (2012). Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole. *European Journal of Mechanics. B/ Fluids*. 36, 152-166. www.SID.ir

- Babaeyan-Koopaei, K., and Valentine, E.M. (1999). Bridge pier scour in selfformed laboratory channels. *The XXVIII IAHR Congress*, PP: 22-27.
- Beg, M. (2014). Mutual interference of bridge piers placed in staggered arrangement on local scour. *Proceedings of the Seventh International Conference on Scour and Erosion*, Perth, Western Australia, 483-488.
- Beg, M., and Beg, S. (2015). Scour hole characteristics of two unequal size bridge piers in tandem arrangement. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 21(1), 85-96.
- Bozkuş, Z., and Çeşme, M. (2010). Reduction of scouring depth by using inclined piers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(12), 1621-1630.
- Breusers, N. H. C., and Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring*. 2nd Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- Chiew, Y.M., and Mellville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.
- Diwedat, A. S. I. (2013). Investigating the impact of pile group arrangement on local scour around bridge pier using physical model. *Journal of Nile Water Science and Engineering*, 6(2), 12-25.
- Franzetti, S., Malavasi, S., and Piccinin, C. (1994). Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare. Proc., XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 2, 13-24 (In Italian).
- Gao, P., Duan, M., Zhong, C., Yuan, Z., and Wang, J. (2013). Current induced scour around single piles and pile groups. *Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering*, Alaska, USA, 472-477.
- Ghasemi Gavarti, Z. (2015). Effect of sacrificial pile with slot and collar on reduction of local scour around bridge pier. MS Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi)
- 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.
- Hannah, C.R. (1978). Scour at pile groups. *Research Rep. No. 28-3*, Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Heidarpour, M., Afzalimehr, H., and Khodarahmi, Z. (2007). Local scour protection of circular bridge pier groups using slot. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(3). (In Farsi)
- 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.
- Hosseini, R., and Amini, A. (2015). Scour depth estimation methods around pile groups. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 00(0000), 1-13.
- 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.
- Melville, B. W., and Hadfield, A. C. (1999). Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, 125, 50.
- Melville, B. W., and Sutherland, A. J. (1989). Design method for local scour at bridge pier. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand, 114(10), 22-30.
- Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- Movahedi, N., Dehghani, A.A., Aarabi, M.J., and Zahiri, A.R. (2014). Experimental study of local scouring around two side-by-side piers with raft footing. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(1).
- Nazariha, M. (1996). *Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups*. Ph. D Dissertation, University of Ottawa, Canada. pp. 212.
- Nouh, M. (1986). Local scour at pile groups in meandering channels. *Proc. Of IAHR, Symp. On Scale Effects in Modeling Sediment Transport Phenomenon*, Toronto, Canada, 25-28 Aug, 164-179.
- Özalp, M. C. (2013). *Experimental investigation of local scour around bridge pier groups*. MSc thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Pirmohammadi, R., and Heidarpour, M. (2006). Comparison of the performance of collar in scour reduction in group of two or three cylindrical bridge pier. *Seventh International Congress of Civil Engineering*, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Raudkivi, A.J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- Raudkivi, A.J., and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.
- Shafaei - Bejestan, M. (2011). *Hydraulic of sediment transport* (2th ed). Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran. (In Farsi)
- Singh, C. P., Setia, B. and Verma, D.V.S. (2001). Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. *Proc 29 th IAHR Congress*, 202-209.
- Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and Calomino, F. (2012). Evaluation of flow-altering countermeasure against bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers*, 138(3), 297-305.
- Vittal, N., Kothiyari, U.C., and Haghghat, M. (1994). Clear-water scour around bridge pier group. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 120(11), 1309-1318.
- 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.