بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر و رقوم کارگذاری طوقه مشبک بر کاهش آبشستگی پایه پل

محمد همتی[1*]، نصیبه قلی‌زاده[2] و سعیده دولتخواه[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

۳- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۷

چکیده

در این تحقیق تأثیر طوقه مشبک بر کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌هایی در یک فلوم به طول ٦ متر و عرض ۰/٦ متر انجام گرفت. برای بررسی پدیده آبشستگی از یک پایه پل استوانه‌ای با قطر ٦۰ میلی‌متر، چهار اندازه مختلف برای طوقه‌ها، سه تراز متفاوت کارگذاری طوقه‌ها در زیر بستر و در شرایط آب زلال استفاده گردید. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که کمترین عمق آبشستگی با وجود طوقه‌های با قطر ۲/۵ و سه برابر قطر پایه پل که در تراز ۰/۱ برابر قطر پایه در زیر بستر نصب شده بودند، رخ داد که در آن عمق آبشستگی در حدود ۷۳ درصد کاهش یافت؛ در حالی که عمق آبشستگی در اثر احداث طوقه‌های مشبک با قطر ۱/۵ و دو برابر قطر پایه نصب شده در تراز ۰/۵ برابر قطر پایه در زیر بستر، در حدود ٤۰ درصد کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که راندمان و کارایی طوقه‌های مشبک در حدود ۲۰ درصد بیشتر از طوقه‌های غیر مشبک می‌باشد. به‌طور کلی حجم آبشستگی اطراف پایه پل در اثر احداث طوقه‌های مشبک در ترازهای کارگذاری ۰/۱، ۰/۵ و یک برابر قطر پایه پل، به ترتیب در حدود ۵۸، ٦۰ و ۱۰ درصد کاهش یافت.

کلیدواژه‌ها: طوقه مشبک، مطالعه آزمایشگاهی، کنترل آبشستگی، پایه پل، تراز کارگذاری.

Experimental Investigation of the Effect of Diameter and Placement Level of Lattice Collars on Scour Reduction around Bridge Pier

M. Hemmati[1*], N. Gholizadeh[2] and S. Dolatkhah[3]

1*- Assistant Professor, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.
2- Undergraduate Student, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.
3- Undergraduate Student, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

Received: 22 December 2014 Accepted: 8 November 2015

Abstract

In this research, the effect of lattice collar on reducing scour around the bridge pier was experimentally studied. A series of experiments were conducted in a flume with length of 6m and width of 0.6m. For evaluation of scouring phenomenon a cylindrical pier 60 mm in diameter, four different sizes for collars and three various levels for collars placement were used in clear-water conditions. The results revealed that the minimum scour depth occurred with lattice collars with width of 2.5 and 3 times of the pier diameter ($2.5D_p$ and $3D_p$) that has been installed at the $0.1D_p$ level under the bed, where the maximum scour depth decreased by 73%. Whereas scour depth decreased by 40% due to installation of lattice collars with width of $1.5D_p$ and $2D_p$ at the $0.5D_p$ level

under the bed. Also, the result showed that the efficiency of lattice collars was about 20% more than non-lattice. Generally the scour volume around bridge pier at the 0.1 D_p, 0.5 D_p and D_p level under the bed decreased by 58%, 60% and 10%, respectively due to lattice collars installation.

Keywords: Lattice collar, Experimental study, Scour control, Bridge pier, Level placement.

مقدمه

یکی از دلایل مهم شکست پل‌ها در ایالات متحده و جهان، مربوط به آبشستگی می‌باشد. برآوردها حاکی از آن است که ۶۰ درصد شکست پل‌ها در نتیجه آبشستگی و عوامل هیدرولیکی می‌باشد (لندرز[1]، ۱۹۹۲). این شایع‌ترین علت شکست پل در بزرگراه‌های ایالات متحده است (کتل و مرو اریکسون[2]، ۱۹۹۸) که در آن در طول سال‌های ۱۹۶۱ الی ۱۹۷۶، ۴۶ مورد از ۸۶ مورد شکست پل در نتیجه آبشستگی نزدیک پای پل بوده است (پلازک و هانی[3]، ۱۹۹۵). بنابراین شناخت پدیده آبشستگی و به‌کار بردن تمهیدات لازم برای کاهش آبشستگی و کنترل آن بسیار ضروری می‌باشد. از جمله مطالعاتی که در مورد سازه‌های حفاظتی برای کنترل و کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

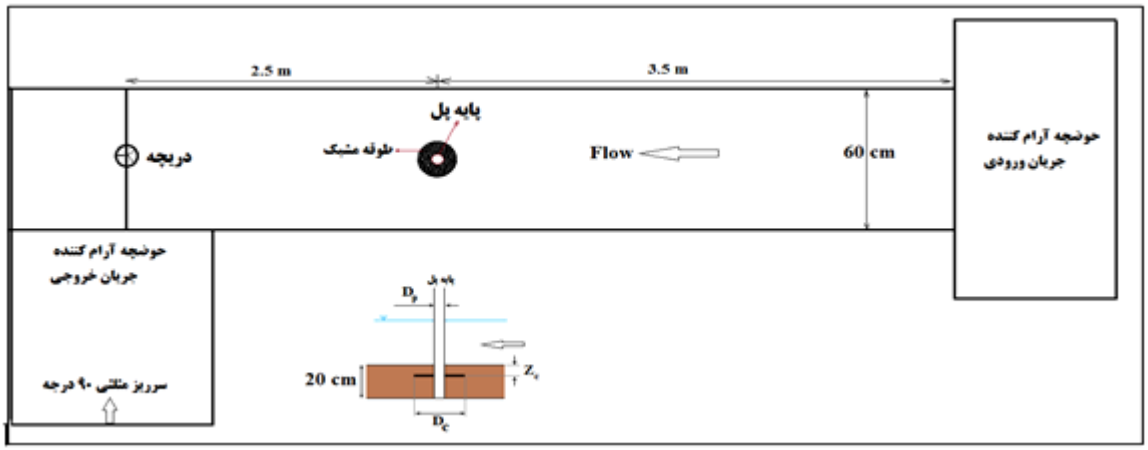
مصباحی و شمسایی (۱۳۹۲) گستره پوشش سنگچین را که پهنه‌ای به شعاع سه الی چهار برابر قطر پایه پل باشد برای حفاظت آبشستگی‌های پل و حداقل ضخامت پوشش سنگچین را سه برابر قطر متوسط سنگ در طراحی‌ها پیشنهاد دادند. قاسمی‌فرد و همکاران (۱۳۹۲) اعلام نمودند که پایه‌های قربانی شونده برای کنترل آبشستگی موضعی پایه‌های مستطیلی پل عملکرد مناسبی داشتند. نتایج مسجدی و غلامزاده محمودی (۱۳۹۰) نشان داد که افزایش قطر طوقه باعث کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل واقع در قوس ۱۸۰ درجه می‌شود. آزم و قمشی (۱۳۹۲) اثر شمع‌های حفاظتی را بر کاهش آبشستگی در پایه پل استوانه‌ای بررسی کردند و گزارش دادند که بهترین موقعیت قرارگیری شمعها در فاصله تقریبی سه برابر قطر پایه پل می‌باشد. این در حالی است که نتایج سینگ و همکاران[4] (۱۹۹۵) نشان داد که شمع حفاظتی با قطر برابر با قطر پایه پل در فاصله ۲D (D: قطر پایه پل) بالاتر از پایه، عملکرد بهتری در حفاظت دارد که حدود ۵۰ درصد آبشستگی در آن کاهش یافت. اسمعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۱) اعلام نمودند که رقوم کارگذاری فونداسیون تأثیر معنی‌داری بر عمق آبشستگی دارد، همچنین آنها گزارش دادند که سرعت جریان در مقایسه با عمق جریان تأثیر چشمگیری در توسعه زمانی آبشستگی برای پایه‌های گروهی کج دارند. کارگذاری طوق بر روی بستر باعث کاهش ۹۳ درصدی آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی پل در کانال مرکب می‌شود (عالم و همکاران، ۱۳۹۱) و ضخامت زیاد طوق باعث افزایش آبشستگی می‌گردد (درگاهی[5]، ۱۹۹۰). وجود طوق از تشکیل گرداب نعل اسبی جلوگیری نمی‌کند؛ اما اگر در محل مناسبی نسبت به تراز بستر قرار گیرد نقش موثری را در کاهش آبشستگی خواهد داشت (درگاهی، ۱۹۹۰). زراتی و عزیزی (۱۳۸۰) گزارش دادند که هر چه طوقه پایین‌تر نصب شود، درصد کاهش آبشستگی بیشتر خواهد بود. چیو[6] (۱۹۹۲) در مطالعه‌ای بیان نمود که اگر قطر طوقه دو برابر قطر پایه پل باشد عمق آبشستگی به میزان ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و کاربرد همزمان طوقه و شکاف، جایگزین مناسبی برای سنگ‌چین در حل مشکلات آبشستگی موضعی پایه‌های پل می‌باشد. سینگ و همکاران (۲۰۰۱) عمق ۰/۱D (D: قطر پایه پل) در زیر بستر را بهترین محل نصب طوقه گزارش کردند. زراتی و همکاران[7] (۲۰۰۴) نشان دادند که طوق‌های پهن‌تر و در ترازهای پایین‌تر در کاهش عمق آبشستگی موثرترند. شریعتی و همکاران (۱۳۹۰) اعلام نمودند که به‌کارگیری ترکیبی از طوقه و شکاف روی پایه، عمق آبشستگی را در حدود ۸۰ درصد کاهش داد. حسن‌پور و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل باله‌ای شکل با طوق، گزارش دادند که پایه باله‌ای شکل در مقایسه با حالت استوانه‌ای شکل باعث کاهش ۲۲ درصدی حداکثر عمق آبشستگی شد و استفاده از طوقی با قطر دو برابر قطر پایه، در پایه باله‌ای نسبت به استوانه‌ای حدود ۸۰ درصد عمق آبشستگی را کاهش داد. تفرجنوروز و همکاران[8] (۲۰۱۲) بیان کردند که اقدامات حفاظتی در مقابل آبشستگی در اطراف پایه پل، همچون پایه‌های قربانی شونده، دو پره مستغرق، طوقه و وجود شکاف در پایه، می‌توانند تا حدود ۳۵ درصد حداکثر عمق آبشستگی را کاهش دهند.

از جمله تحقیقات صورت گرفته در زمینه صفحات مشبک می‌توان به مطالعات روشن (۱۳۸۴) که به بررسی پدیده گرداب با استفاده از مدل فیزیکی و روش‌های استهلاک آن در آبگیر نیروگاه اول سد شهید عباسپور (کارون(I)) پرداختند، اشاره کرد. مدل مورد استفاده در آزمایش‌های آنها با مقیاس ۱:۱۸ ساخته شده بود. نتایج

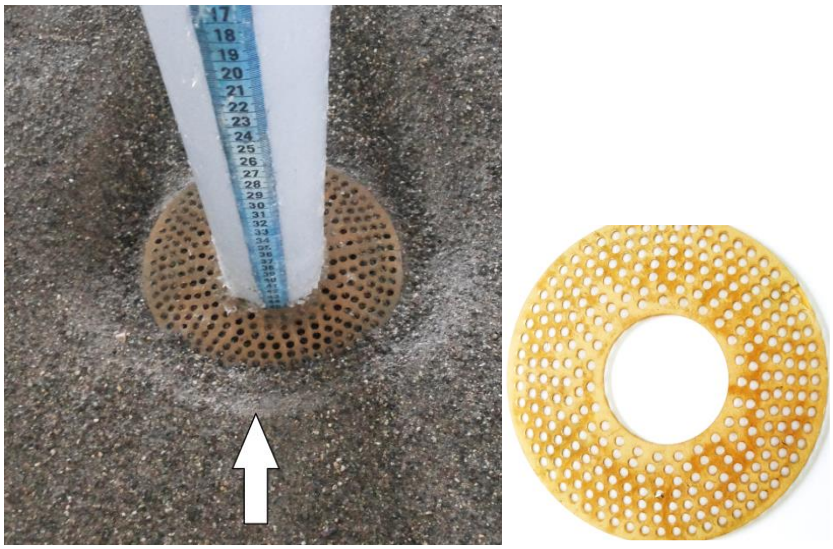
1- Lenders
2- Kettle and Merv Eriksson
3- Placzek and Haeni
4- Singh *et al.*
5- Dargahi
6- Chiew
7 - Zarrati *et al.*
8 - Tafarojnoruz *et al.*

تحقیق آنها نشان داد که استفاده از سرپوش مشبک بر روی پیشانی آبگیر، بهترین گزینه برای حذف گرداب می‌باشد. جلیلی (۱۳۹۲) به بررسی اثر استفاده از طوقه مشبک بر آبشستگی پایه‌های پل مکعبی و استوانه‌ای شکل پرداخت. ایشان از دو نوع شکل مکعبی و استوانه‌ای برای پایه پل، یک اندازه برای قطر طوقه، سه تراز کارگذاری برای طوقه استوانه‌ای و یک تراز برای طوقه دایره‌ای و سه درصد بازشدگی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ برای طوقه‌ها استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که طوقه‌های با درصد بازشدگی ۳۰ و ۴۰ بالاترین راندمان را در کاهش میزان آبشستگی به ترتیب در اطراف پایه پل مکعبی و استوانه‌ای ایجاد نمود. هاشمیان و جباری (۱۳۹۱) به بررسی اصول و کاربردهای به‌کارگیری صفحات مشبک در مصارف صوتی پرداختند. آنها اعلام نمودند که این صفحات هم به عنوان پوشش محافظتی و یا تزئینی روی مواد جاذب اصلی صوت به‌کار می‌روند و هم می‌توانند باعث ایجاد تشدید فرکانسی برای جذب صوت و هم به عنوان تفکیک جریان و کاهش اغتشاش جریان هوا به‌کار برده شوند.

تمام مطالعاتی که در زمینه طوقه به عنوان سازه حفاظتی پایه پل در بالا ذکر گردیدند مربوط به طوقه غیر مشبک بوده و تاکنون مطالعه‌ای در مورد عملکرد طوقه‌های مشبک در کنترل آبشستگی پای پل صورت نگرفته است؛ لذا در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر طوقه‌های مشبک در اندازه‌ها و ترازهای مختلف بر کنترل آبشستگی پرداخته خواهد شد.



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر



شکل ۲- نمونه‌ای از طوقه مشبک با قطر D_p ۲/۵ و عملکرد آن در حفاظت از آبشستگی پایه پل

جدول ۱- پارامترها و محدوده تغییرات آنها در تحقیق حاضر

ردیف	پارامتر	محدوده تغییرات	توضیحات
۱	قطر طوقه (D_c)	۱/۵D_p، ۲D_p، ۲/۵D_p و ۳D_p	D_p: قطر پایه پل
۲	تراز کارگذاری طوقه (Z_c)	۰/۱ D_p، ۰/۵ D_p و ۱ D_p	تراز کارگذاری در زیر بستر می‌باشد
۳	درصد بازشدگی طوقه	۰ و ۳۰	درصد بازشدگی: نسبت سطح خالی به کل سطح طوقه
۴	دبی جریان	۴۰ لیتر در ثانیه	–
۵	عدد فرود جریان	۰/۳	سرعت جریان کمتر از ۰/۹۵ سرعت بحرانی
۶	قطر پایه پل	۶ سانتی‌متر	۱۰ درصد عرض کانال

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های مربوطه از مدل موجود در آزمایشگاه دکتر فرهودی گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه مطابق شکل (۱) استفاده گردید. عرض کانال ۶۰ سانتی‌متر، عمق کانال ۷۰ سانتی‌متر و طول کل کانال مستقیم شش متر می‌باشد. مواد رسوبی با قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر و به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در کف کانال استفاده شد. در ابتدای کانال از حوضچه‌ای به ابعاد ۱/۵× ۱/۵×۱/۵ متر برای آرام کردن جریان ورودی به کانال استفاده گردید و برای کنترل سطح آب در پایین‌دست از دریچه قطاعی استفاده شد. اندازه‌گیری دبی با استفاده از سرریز مثلثی با زاویه قائم که در قسمت انتهایی مدل (شکل ۱) واقع شده است میسر می‌گردید. طبق توصیه‌های چیو و ملویل[1] (۱۹۸۷) که در آن برای از بین بردن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی، قطر پایه پل نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد؛ لذا در تحقیق حاضر برای مدل کردن پایه پل، لوله پی‌وی‌سی به قطر شش سانتی‌متر انتخاب گردید. قطر طوقه‌ها بر اساس پیشنهادهای سینگ و همکاران (۲۰۰۱)، اتم[2] (۱۹۸۰) و مسجدی و غلامزاده محمودی (۱۳۹۰)، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ برابر قطر پایه پل انتخاب گردید. برای این منظور از صفحات پلگس‌گلاس به ضخامت سه میلی‌متر استفاده شد. برای مشبک کردن صفحات مستغرق ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اتوکد ۲۰۱۰، تعداد دایره‌های به قطر پنج میلی‌متر برای مشبک کردن طوقه‌ها تعیین و سپس بطور مساوی در سطح طوقه پخش شد به طوری که تمام فواصل طولی و عرضی دایره‌ها از یکدیگر برابر بود. درصد بازشدگی طوقه‌ها در تحقیق حاضر ثابت و برابر با۳۰ درصد بود و همچنین از طوقه غیر مشبک نیز برای ارزیابی عملکرد طوقه‌های مشبک استفاده گردید. در مرحله بعدی با استفاده از دستگاه لیزری مخصوص دایره‌های کوچک برش داده شد و طوقه با درصد بازشدگی مورد نظر برای کار آماده گردید. شکل (۲) نمونه‌ای از طوقه مشبک و عملکرد آن در حفاظت از آبشستگی پایه پل را نشان می‌دهد. پارامترها و محدوده تغییرات آنها در تحقیق حاضر در جدول (۱) ارائه شده است.

روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا طوقه مورد نظر در تراز کارگذاری مشخص روی پایه پل استوانه‌ای شکل تثبیت و سپس رسوبات در اطراف پایه پل و کف بستر به طور مسطح گسترانده می‌شد. بعد از بستن دریچه پایین دست، آب به آرامی وارد فلوم می‌شد که بعد از اطمینان از بالا بودن تراز آب در فلوم، دریچه به آرامی باز می‌شد و همزمان دبی نیز تنظیم می‌گردید؛ بعد از تنظیم دبی و شرایط جریان، عمق آبشستگی با گذشت زمان ثبت می‌شد. برای تعیین زمان به تعادل رسیدن عمق آبشستگی در اطراف پایه پل، ابتدا یک آزمایش به مدت هشت ساعت برای هر دو حالت بدون طوقه و با وجود طوقه انجام گرفت و مشخص گردید که بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی در دو و یا سه ساعت اول برای حالت بدون طوقه و یک ساعت اولیه برای حالت طوقه‌دار اتفاق می‌افتد؛ با این حال مدت زمان چهار ساعت برای انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر لحاظ گردید. این مدت زمان در مطالعات مربوط به اثر طوقه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه پل، در آزمایش‌های حسن‌پور و همکاران (۱۳۹۱) دو ساعت، جلیلی (۱۳۹۲) ۲/۵ ساعت، مسجدی و غلام زاده محمودی (۱۳۹۰) شش ساعت، عالم و همکاران (۱۳۹۱) چهار ساعت و کریمایی طبرستانی و زراتی[3] (۲۰۱۲) ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری تراز آب در پایین‌دست از عمق سنج مکانیکی نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای برداشت الگوی فرسایش و حداکثر عمق آبشستگی در انتهای آزمایش‌ها (بعد از زهکشی بستر و خارج کردن طوقه مشبک به طوری که الگوی فرسایش به هم نخورد) از متر لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. برای برداشت داده‌های مربوط به توسعه زمانی آبشستگی، از خط‌کش پارچه‌ای که به بدنه پایه پل متصل شده بود استفاده گردید. میزان دبی جریان ۴۰ لیتر در ثانیه و عدد فرود در پایین‌دست فلوم برابر با ۰/۳ بود که

1- Chiew and Melville
2- Ettem
3 - Karimaee-Tabarestani and Zarrati

در این شرایط سرعت جریان آب کمتر از ۰/۹۵ سرعت بحرانی برای حرکت ذرات رسوب در بستر کانال بود. دبی جریان با استفاده از سرریز مثلثی در پایین دست فلوم تنظیم می‌شد (شکل ۱). سرعت آستانه حرکت رسوب از دو روش محاسباتی و مشاهدات آزمایشگاهی تعیین گردید. ملویل[1] (۱۹۹۷) برای تعیین سرعت برشی بحرانی(U_{*c}) به ازای اندازه متوسط دانه‌های بستر از جنس کوارتز و دمای آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد روابط زیر را ارائه نمود که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد:

$$U_{*c} = 0.0115 + 0.0124\, d_{50}^{1.4} \quad (0.1\ \text{mm} < d_{50} < 1\ mm) \qquad (۱)$$

$$U_{*c} = 0.0305 d_{50}^{0.5} - 0.0065\, d_{50}^{-1} \quad (1\ \text{mm} < d_{50} < 100\ mm) \qquad (۲)$$

و برای سرعت بحرانی (V_c) از رابطه توزیع لگاریتمی سرعت استفاده نمود:

$$\frac{V_c}{U_{*c}} = 5.75 \log(5.53\ \frac{y}{d_{50}}) \qquad (۳)$$

با استفاده از روابط فوق، مقدار سرعت آستانه حرکت برای رسوبات تحقیق حاضر با قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر برابر با ۰/۳۷ متر بر ثانیه به‌دست آمد؛ اما بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی با عمق‌ها و سرعت‌های مختلف این مقدار ۰/۴۱ متر بر ثانیه به‌دست آمد. عمق جریان در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۱۷ سانتی‌متر بود. لذا آزمایش‌ها در بستر متحرک با آب زلال که بیشترین عمق آبشستگی در این حالت اتفاق می‌افتد، انجام گرفت. برای محاسبه حجم آبشستگی از نرم‌افزار سورفر نسخه ۹ استفاده گردید.

نتایج و بحث

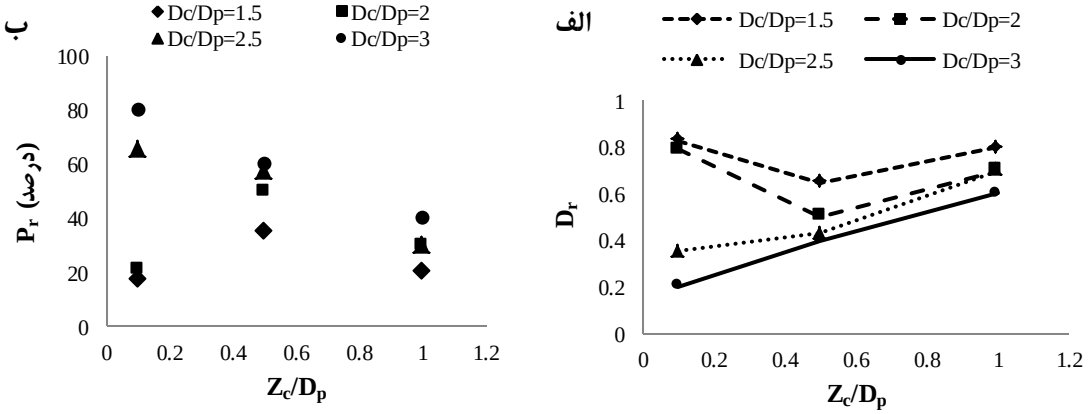
تأثیر تراز نسبی کارگذاری طوقه مشبک (Z_c/D_p) و قطر نسبی طوقه (D_c/D_p) بر حداکثر عمق نسبی آبشستگی

تحقیق حاضر تلاشی بود برای ارزیابی تأثیر طوقه‌های مشبک بر کنترل آبشستگی اطراف پایه پل منفرد. برای رسیدن به این هدف در تحقیق حاضر از سه تراز مختلف D_p ،۰/۱ D_p ،۰/۵ D_p و ۱ D_p در زیر بستر (D_p: قطر پایه پل) برای کارگذاشتن طوقه‌های مشبک و از چهار طوقه با قطرهای برابر با ۱/۵ D_p، ۲ D_p، ۲/۵ D_p و ۳ D_p استفاده گردید که نتایج آنها در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. روند تغییرات حداکثر عمق نسبی آبشستگی (نسبت حداکثر عمق آبشستگی با وجود طوقه به حالت بدون آن) (D_r) در مقابل عمق نسبی کارگذاری برای حالت‌هایی که قطر طوقه ۱/۵ و دو برابر قطر پایه پل باشد (D_c/D_p=1.5 , 2) بسیار متفاوت از روندی است که برای طوقه‌های با قطر بزرگ‌تر (۲/۵ و سه برابر قطر پایه پل) رخ داده است (شکل ۳). برای طوقه‌های با قطر D_p ۱/۵ و D_p۲، بیشترین عمق نسبی آبشستگی در ترازهای کارگذاری D_p ۰/۱ و D_p و کمترین مقدار آن در تراز D_p ۰/۵ روی داده است. یعنی در این طوقه‌ها، بهترین و مناسب‌ترین تراز کارگذاری D_p ۰/۵ در زیر بستر می‌باشد (شکل ۳ الف). اما در طوقه‌های با قطر بزرگ‌تر از D_p۲ (۲/۵ و ۳=D_c/D_p)، با افزایش تراز کارگذاری، عمق نسبی آبشستگی افزایش می‌یابد و مناسب‌ترین تراز برای احداث طوقه‌ها در این حالت‌ها، ۰/۱ برابر قطر پایه پل در زیر بستر می‌باشد (شکل ۳ الف). مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن بود که با افزایش قطر طوقه به همراه کاهش تراز کارگذاری طوقه‌ها، گستره آبشستگی در اطراف پایه پل و حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه پل کاهش یافت. زیرا طوقه‌های مشبک با قطر بزرگ‌تر در کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی که عامل اصلی آبشستگی در اطراف پایه پل می‌باشد، مؤثرتر از طوقه‌های کوچک بوده و در نتیجه آن آبشستگی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن کارگذاری طوقه‌ها (به‌خصوص طوقه‌های با قطر بزرگ‌تر) در ترازهای پایین باعث افزایش گستره آبشستگی و حداکثر عمق آبشستگی می‌گردد زیرا تا ترازی که طوقه در زیر بستر قرار گرفته است آبشستگی مثل حالتی که هیچ گونه طوقه‌ای وجود ندارد، اتفاق می‌افتد و بعد از رسیدن به طوقه عملکرد طوقه باعث کاهش و توقف آبشستگی می‌گردد. شکل (۳ ب) نتایج مربوط به راندمان طوقه مشبک را نشان می‌دهد. راندمان طوقه مشبک از نظر کاهش عمق آبشستگی ($P_r(\%) = 100 \times (D_{so} - D_s)/D_{so}$) بررسی شد که در آن D_{so} و D_s به ترتیب حداکثر عمق آبشستگی در حالت بدون طوقه و با وجود طوقه مشبک می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش تراز کارگذاری طوقه‌ها، درصد کاهش عمق آبشستگی و یا راندمان طوقه (P_r) کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر طوقه‌های مشبک مخصوصاً طوقه‌های با قطر بزرگ‌تر، در ترازهای کارگذاری کم، عملکرد بهتری را در کاهش عمق آبشستگی دارند. به‌طور نمونه طوقه‌های با قطر D_p۳، باعث کاهش ۸۰ و ۴۰ درصدی عمق آبشستگی به ترتیب در ترازهای D_p ۰/۱ و D_p شده است (شکل ۳ ب). علاوه بر آن نتایج تحقیق حاضر بیانگر تأثیر قابل توجه طوقه‌های مشبک در کاهش عمق آبشستگی و کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی می‌باشد.

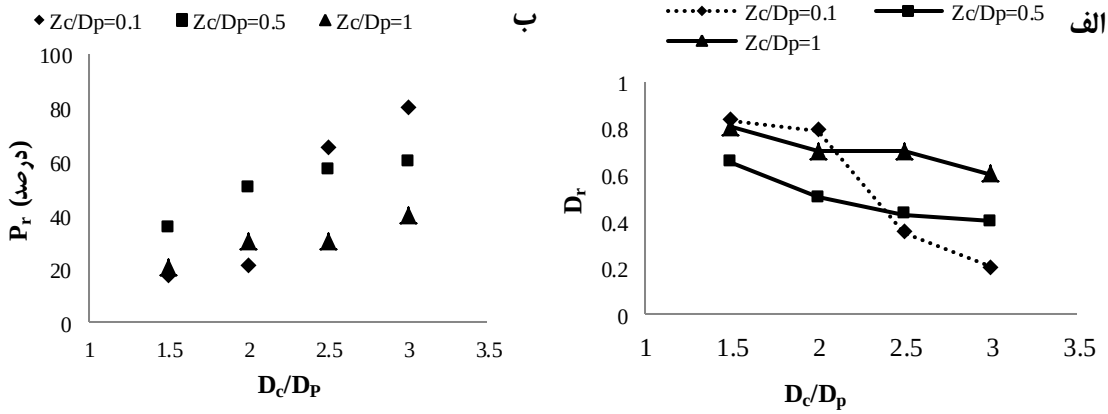
تأثیر قطر طوقه بر حداکثر عمق نسبی آبشستگی و درصد کاهش آبشستگی در ترازهای مختلف به ترتیب در شکل‌های (۴ الف) و (۴ ب) نشان داده شده است. افزایش قطر طوقه باعث کاهش حداکثر عمق نسبی آبشستگی می‌گردد؛ زیرا قطرهای بزرگ‌تر در

1- Melville

کاهش قدرت گردابه مورد اشاره در فوق، عملکرد مناسبی دارند. روند کاهشی عمق آبشستگی با افزایش قطر طوقه برای ترازهای کارگذاری Z_c/D_p=۰/۵ و Z_c/D_p=۱ مشابه بوده و با شیب کمی کاهش می‌یابد؛ اما روند تغییرات در تراز قرارگیری D_p ۰/۱ متفاوت با بقیه ترازها بوده و عمق نسبی آبشستگی بین دو قطر طوقه $2D_p$ و $2/5D_p$ به‌شدت کاهش می‌یابد (شکل ۴ الف). به طوری که عمق آبشستگی در قطر $2/5D_p$ نسبت به قطر $2D_p$ در تراز D_p ۰/۱ در حدود ۴۴ درصد کاهش یافته است (شکل ۴ ب). زیرا عامل اصلی کاهش قدرت گردابه‌های نعل اسبی و دور کردن آنها از پایه پل بخصوص در تراز D_p۰/۱، اندازه طوقه می‌باشد که اندازه D_p ۲/۵ و بزرگ‌تر از آن قطری است که عملکرد طوقه در آن حالت مؤثرتر می‌باشد. با تغییر قطر طوقه مشبک از D_p ۱/۵ الی $3D_p$، عمق آبشستگی در محدوده ۱۷ الی ۸۰ درصد برای تراز D_p ۰/۱، ۳۵ الی ۶۲ درصد برای تراز $0/5D_p$ و ۲۰ الی ۴۰ درصد برای تراز کارگذاری D_p، نسبت به حالت بدون طوقه کاهش یافت (شکل ۴ ب). زیرا بزرگ بودن قطر طوقه‌ها، در کاهش قدرت گردابه‌ها بیشتر مؤثر بوده و از نفوذ و شکل‌گیری گردابه‌های نعل اسبی قوی جلوگیری می‌کند که در نتیجه آن، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.



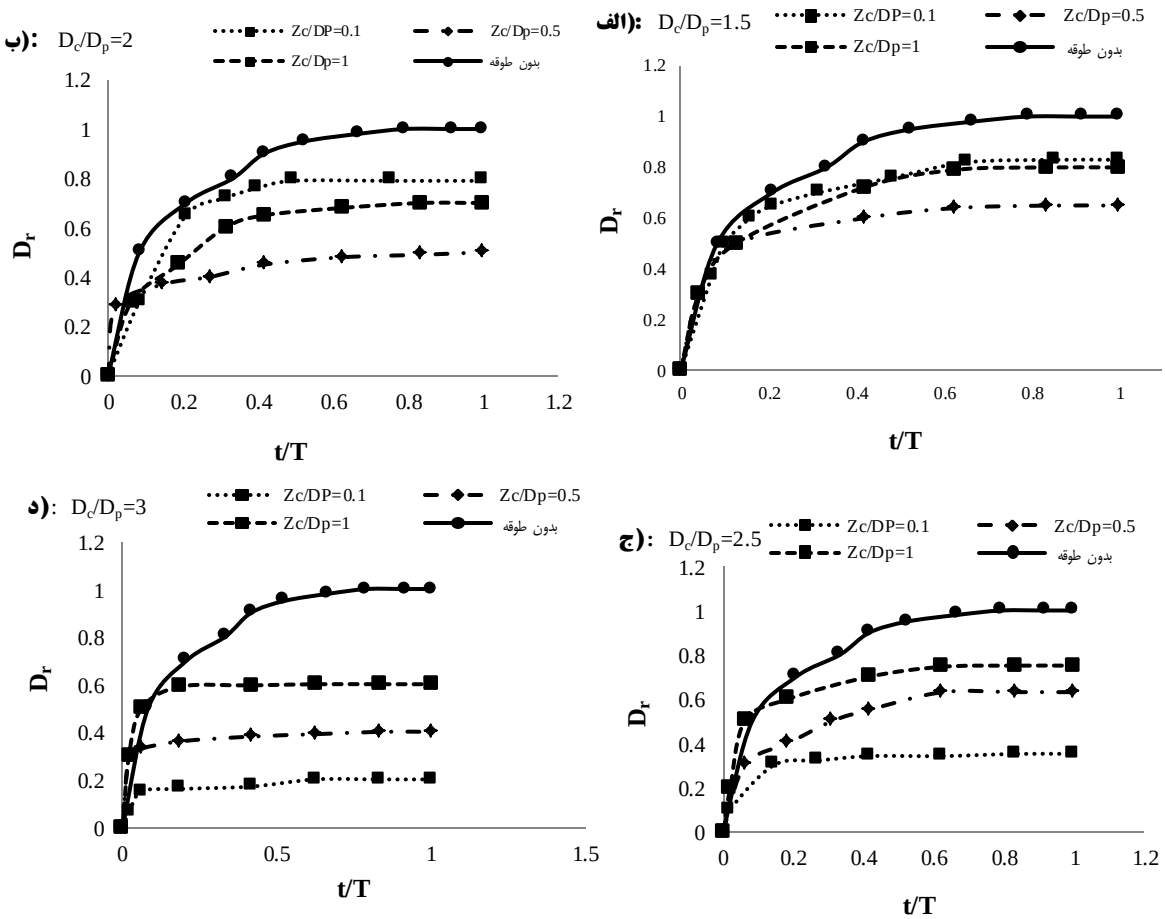
شکل ۳- تأثیر تراز نسبی کارگذاری طوقه مشبک بر : الف) حداکثر عمق نسبی آبشستگی (D_r) و ب) درصد کاهش عمق آبشستگی (P_r)



شکل ٤- تأثیر قطر نسبی طوقه مشبک بر: الف) حداکثر عمق نسبی آبشستگی (D_r) و ب) درصد کاهش عمق آبشستگی (P_r)

تأثیر تراز کارگذاری طوقه مشبک (Z_c/D_p) در توسعه زمانی آبشستگی اطراف پایه پل

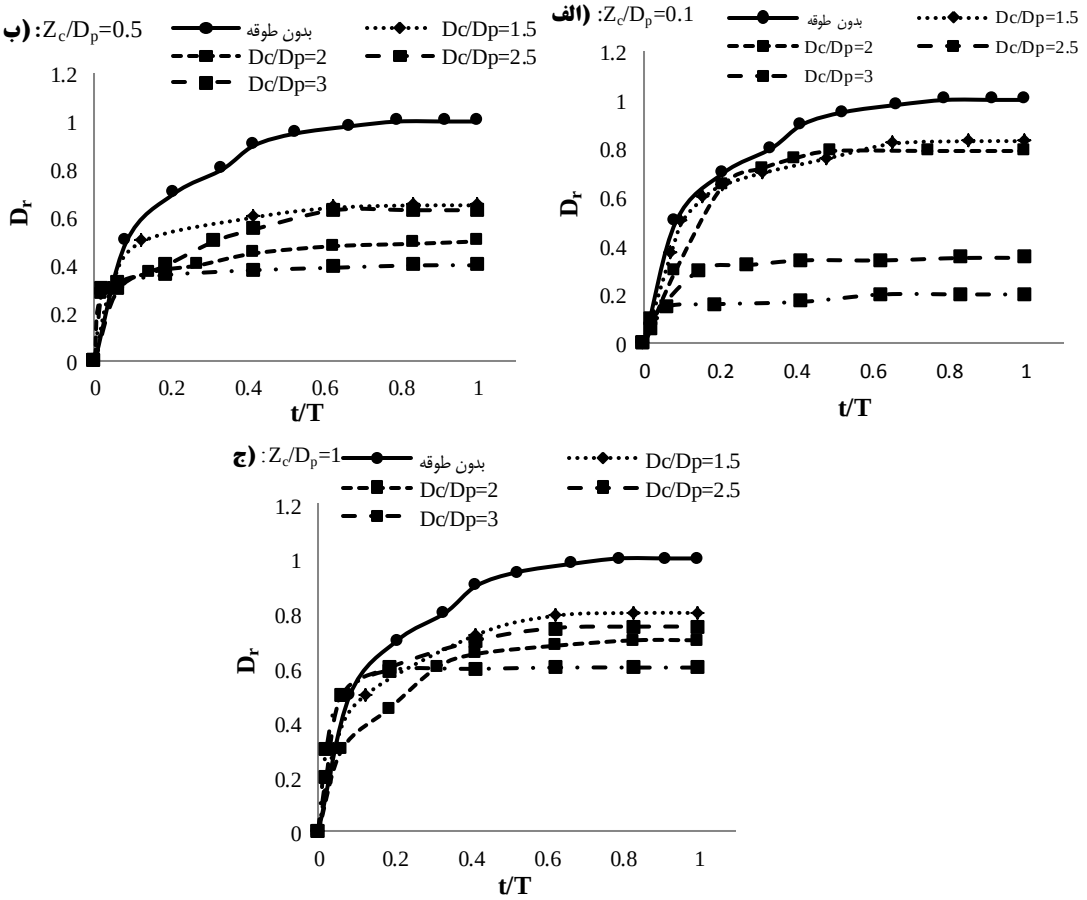
توسعه زمانی آبشستگی اطراف پایه پل در ترازهای مختلف کارگذاری طوقه‌های مشبک و حالت بدون آن در شکل‌های (۵ الف) الی (۵ د) نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی در نصف زمان آزمایش‌ها یعنی در دو ساعت اول ($t/T=0.5$) اتفاق می‌افتد. روند توسعه زمانی آبشستگی برای ترازهای کارگذاری $۰/۱D_p$ و $۱D_p$ زیر بستر در حالتی که قطر طوقه ۱/۵ برابر قطر پایه پل است مشابه می‌باشد که این امر نشان دهنده تأثیر کم قطر طوقه مذکور در تراز کارگذاری ۰/۱ برابر قطر پایه پل در زیر بستر می‌باشد. زیرا در صورتی طوقه مؤثر عمل می‌کند که توسعه آبشستگی در زیر آن محدود شود که این امر در این حالت اتفاق نیفتاده است (شکل ۵ الف). موارد فوق برای شکل (۵ ب) که در آن قطر طوقه دو برابر قطر پایه پل است نیز تا حدودی صادق می‌باشد. اما توسعه زمانی آبشستگی برای حالت‌هایی که قطر طوقه $۲/۵ D_p$ و $۳ D_p$ (به ترتیب شکل‌های ۵ ج و ۵ د) است تا حدودی متفاوت با دو شکل (۵ الف) و (۵ ب) می‌باشد. زمان به تعادل رسیدن آبشستگی در اثر احداث طوقه مشبک با قطر $۳D_p$ و در تمامی ترازهای قرارگیری طوقه‌ها (شکل ۵ د)، سریع‌تر از حالت بدون طوقه و بقیه شکل‌ها می‌باشد؛ به طوری که بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی در ۲۰ درصد زمان کل آزمایش‌ها (یک ساعت اولیه) اتفاق می‌افتد.



شکل ۵- تأثیر تراز کارگذاری طوقه مشبک در توسعه زمانی آبشستگی اطراف پایه پل

تأثیر قطر طوقه مشبک (D_c/D_p) در توسعه زمانی آبشستگی اطراف پایه پل

نتایج تأثیر قطر طوقه مشبک بر توسعه زمانی آبشستگی در سه تراز مختلف نصب در زیر بستر و مقایسه آن با حالت بدون طوقه در شکل‌های (۶ الف) الی (۶ ج) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در تمامی ترازهای نصب، با افزایش قطر طوقه‌های مشبک، عملکرد آنها در کاهش عمق آبشستگی بهتر شده است. روند توسعه زمانی آبشستگی در طوقه‌های با قطر ۱/۵ و دو برابر قطر پایه پل و همچنین طوقه‌های با قطر ۲/۵ و سه برابر قطر پایه پل با هم یکسان بوده و عملکرد قطرهای بزرگ‌تر طوقه مشبک ($۲/۵D_p$ و $۳D_p$) در کاهش عمق آبشستگی نسبت به دو قطر دیگر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به عبارتی دیگر اندازه‌های بزرگ‌تر طوقه مشبک به دلیل تأثیر بیشتر در استهلاک گردابه‌ها و آن‌هم در تراز ۰/۱ زیر بستر، امکان آبشستگی زیاد را میسر نمی‌سازد و لذا عمق آبشستگی بطور چشمگیری کاهش یافته است (شکل ۶ الف). لذا با افزایش قطر طوقه سطح طوقه افزایش یافته و با دور کردن گردابه-های موجود از پایه پل، به دلیل مشبک بودن باعث استهلاک آن نیز می‌شود و نتایج این تحقیق نیز حاکی از آن است که در تمامی ترازهای قرارگیری، طوقه با اندازه سه برابر قطر پایه پل بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی ایجاد کرده است (شکل‌های ۶ الف تا ۶ ج).

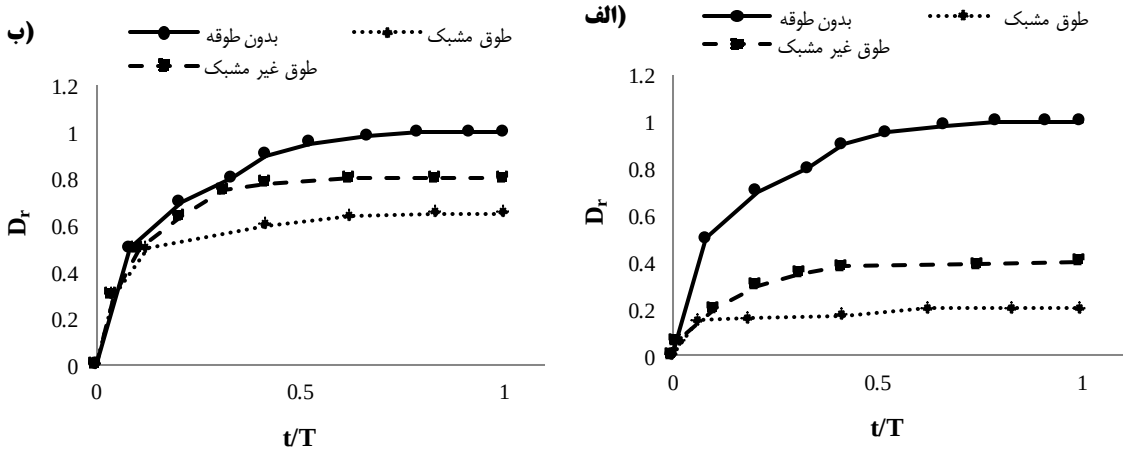


شکل ٦- تأثیر قطر طوقه های مشبک در توسعه زمانی آبشستگی در ترازهای مختلف قرارگیری آن در زیر بستر

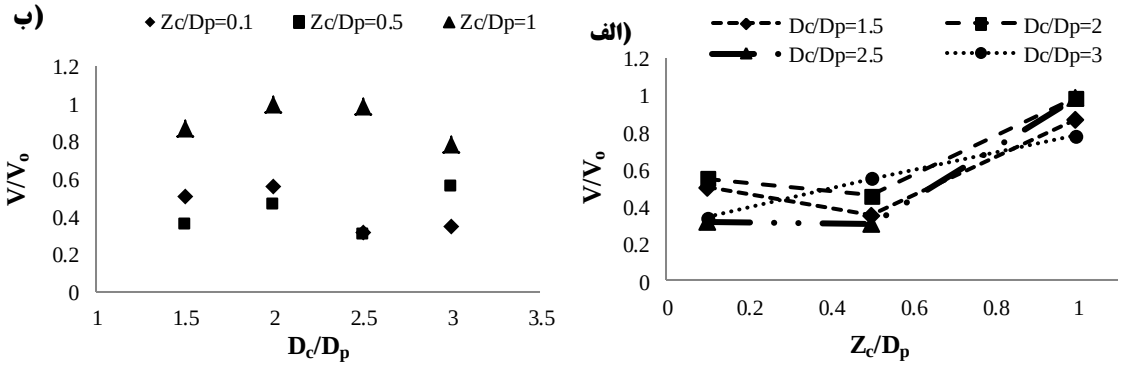
نتایج مربوط به مقایسه کارایی طوقه‌های مشبک و غیر مشبک در تراز D_p۰/۱ زیر بستر و برای حالتی که قطر طوقه سه برابر قطر پایه پل است، در شکل (۷ الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد طوقه مشبک در مقایسه با حالت غیر مشبک آن، کارایی بهتری را در کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه پل از خود نشان داده است (شکل ۷ الف). این روند در شکل (۷ ب) که در آن قطر طوقه مشبک ۱/۵ برابر قطر پایه پل و تراز کارگذاری طوقه D_p ۰/۵ زیر بستر می‌باشد نیز صادق است. زیرا عملکرد وجود طوقه در اطراف پایه پل دور کردن جریان‌های گردابه‌ای نعل اسبی و برخاستگی از اطراف آن می‌باشد؛ اما ایجاد حالت مشبک در آن علاوه بر مورد مذکور، باعث استهلاک و کاهش قدرت گردابه‌ها نیز می‌شود که این امر عملکرد طوقه مشبک را در کاهش عمق آبشستگی نسبت به طوقه غیر مشبک مناسب‌تر می‌سازد. به‌طور متوسط می‌توان گفت که عملکرد طوقه‌های مشبک در کاهش عمق آبشستگی در حدود ۲۰ درصد بیشتر از حالت غیر مشبک آن می‌باشد. لذا استفاده از طوقه‌های مشبک برای کنترل آبشستگی در اطراف پایه پل مناسب‌تر از غیر مشبک می‌باشد.

تأثیر قطر و تراز کارگذاری طوقه مشبک بر حجم آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای

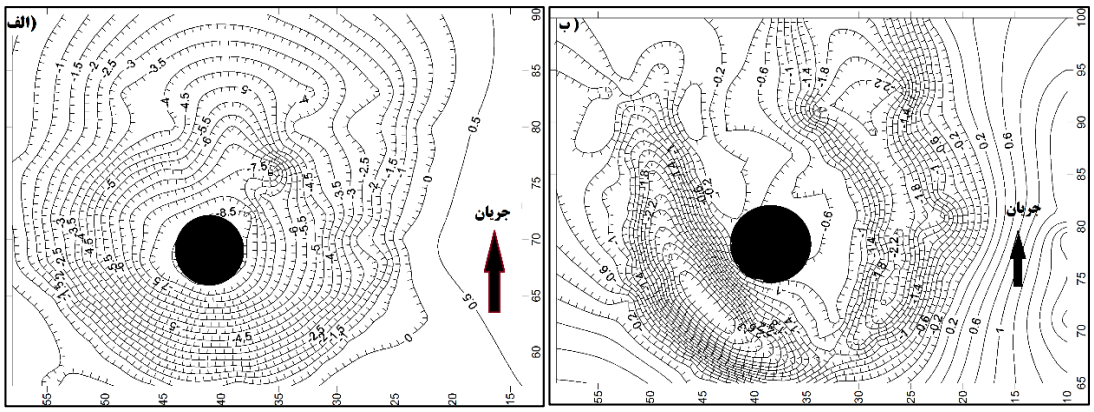
حجم آبشستگی اطراف پایه پل، یکی دیگر از پارامترهایی است که در تحقیق حاضر سعی شده است تا تأثیر قطر و تراز کارگذاری طوقه مشبک بر آن بررسی گردد. نسبت حجم آبشستگی با وجود طوقه مشبک (V) به حجم آبشستگی در حالت بدون طوقه (V_o) در مقابل ترازهای مختلف کارگذاری و قطرهای مختلف طوقه به ترتیب در شکل‌های (۸ الف) و (۸ ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸ الف) ملاحظه می‌گردد حجم نسبی آبشستگی در تراز قرارگیری D_p ($Z_c/D_p=1$) زیر بستر بیشترین مقدار را دارد؛ یعنی در این تراز، حجم آبشستگی نزدیک به حجم آبشستگی در حالت بدون طوقه می‌باشد. زیرا با افزایش رقوم کارگذاری، طوقه تأثیری در کاهش فرسایش رسوبات بالای عمق کارگذاری خود ندارد و فرسایش آن قسمت مثل حالت بدون طوقه اتفاق می‌افتد لذا این امر باعث افزایش عمق و حجم رسوبات فرسایش یافته در اطراف پایه پل می‌گردد. کمترین مقدار حجم نسبی آبشستگی برای طوقه‌های با قطر ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر قطر پایه پل در تراز D_p۰/۵ و برای طوقه با اندازه سه برابر قطر پایه پل در تراز D_p ۰/۱ زیر بستر شکل گرفته است (شکل ۸ الف). بطور متوسط حجم آبشستگی در اثر احداث طوقه‌های مشبک در ترازهای ۰/۱، ۰/۵ و یک برابر قطر پایه پل به ترتیب به میزان ۵۸ درصد، ۶۰ درصد و ۱۰ درصد کاهش یافته است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که تراز کارگذاری D_p۱ برای احداث طوقه‌های مشبک با هر اندازه‌ای مناسب نمی‌باشد (شکل ۸ الف). اما همان‌طور که در شکل (۸ ب) ملاحظه می‌گردد قطر طوقه تأثیر معنی‌دار بر حجم نسبی آبشستگی ندارد و اصلی‌ترین عامل در حجم آبشستگی همان تراز کارگذاری طوقه‌ها می‌باشد.



شکل ۷- مقایسه عملکرد طوقه‌های مشبک و غیر مشبک در توسعه زمانی آبشستگی: الف) $Z_c/D_p=0.1, D_c/D_p=3$ و ب) $Z_c/D_p=0.5, D_c/D_p=1.5$.



شکل ۸- حجم نسبی آبشستگی اطراف پایه پل در مقابل: الف) تراز کارگذاری و ب) قطر طوقه مشبک



شکل ۹- الگوی فرسایش اطراف پایه پل: الف) بدون وجود طوقه و ب) طوقه مشبک با مشخصات $D_c/D_p=3$, $Z_c/D_p=0.1$

تأثیر احداث طوقه مشبک بر الگوی فرسایش در اطراف پایه پل

در اثر برخورد جریان یکنواخت به پایه پل، جریان پایین رونده و گردابه‌های نعل اسبی باعث ایجاد آبشستگی در اطراف پایه گردیده و گردابه‌های برخاستگی به همراه جریان آب رسوبات شسته شده را به پایین‌دست انتقال داده و سرانجام رسوبات ته نشین می‌شوند. هر چه قدرت گردابه‌های نعل اسبی بیشتر باشد عمق و حجم آبشستگی افزایش خواهد یافت. لذا وجود طوقه مخصوصاً طوقه‌های مشبک علاوه بر دور کردن گردابه‌ها از اطراف پایه پل، باعث کاهش قدرت آنها نیز می‌شوند که نتیجه آن، کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل خواهد بود. نتایج الگوی فرسایش اطراف پایه پل در حالت بدون طوقه (شکل ۹ الف) و با وجود طوقه مشبک با قطر سه برابر قطر پایه پل و در تراز $۰/۱D_p$ (شکل ۹ ب) نشان دهنده آن است که وجود طوقه مشبک علاوه بر کاهش عمق آبشستگی، باعث تغییر در الگو و شکل فرسایش نیز شده است. به عبارتی وجود طوقه مشبک باعث شده است که مکان حداکثر عمق آبشستگی که در حالت بدون طوقه در مجاورت پایه پل شکل گرفته بود از پایه فاصله گرفته و آبشستگی در زیر طوقه بخصوص در اطراف پایه پل اتفاق نیفتد. همچنین با مقایسه دو شکل مذکور ملاحظه می‌گردد که در اثر احداث طوقه مشبک علاوه بر اینکه آبشستگی قابل توجهی در بالادست پایه پل اتفاق نیفتاده است، بلکه رسوبگذاری در پایین‌دست پایه نیز صورت گرفته است (شکل ۹ ب). در حالی که در حالت بدون طوقه، رسوب‌گذاری در فاصله‌ای دورتر از پایه در پایین‌دست روی داده و پایین‌دست پایه دچار فرسایش شده است (شکل ۹ الف). لذا این امر بیانگر تأثیر طوقه مشبک در کاهش قدرت گردابه‌های برخاستگی که عامل اصلی انتقال ذرات رسوبی به پایین‌دست است، می‌باشد. لازم به ذکر است که به غیر از طوقه با اندازه D_p ۱/۵ و آن‌هم در ترازهای کم زیر بستر ($۰/۱D_p$)، الگوی فرسایش در اکثر طوقه‌ها مشابه یکدیگر و تنها فرق آنها در حداکثر عمق آبشستگی بود که دلیل آن بیشتر به خاطر تراز کارگذاری می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای بررسی تأثیر طوقه‌های مشبک بر حداکثر عمق و حجم آبشستگی در اطراف پایه پل از چهار اندازه مختلف طوقه مشبک با قطر ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ برابر قطر پایه پل در سه تراز کارگذاری ۰/۱، ۰/۵ و ۱ برابر قطر پایه پل در زیر بستر استفاده گردید و عملکرد طوقه‌های مشبک و غیر مشبک نیز با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تراز کارگذاری D_p ۰/۵ زیر بستر، مناسب‌ترین تراز برای نصب طوقه‌های مشبک با قطر ۱/۵ و دو برابر قطر پایه پل می‌باشد که در آن به‌طور متوسط، حداکثر عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون طوقه در حدود ۴۰ درصد کاهش یافت. بهترین عملکرد طوقه‌های با اندازه ۲/۵ و سه برابر قطر پایه پل در کاهش عمق آبشستگی در تراز D_p ۰/۱ زیر بستر اتفاق افتاد که به‌طور متوسط عمق آبشستگی ۷۳ درصد نسبت به حالت بدون طوقه کاهش یافت. افزایش قطر طوقه مشبک، به دلیل استهلاک زیاد گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی، باعث کاهش حداکثر عمق نسبی آبشستگی در بالادست و افزایش رسوب‌گذاری در پایین‌دست پایه پل شد. همچنین نتایج نشان داد که طوقه‌های مشبک عملکرد بهتری نسبت به حالت غیر مشبک آن داشتند؛ به‌طوری‌که حداکثر عمق آبشستگی در طوقه‌های مشبک در حدود ۲۰ درصد کمتر از حالت غیر مشبک آن اتفاق افتاد. علاوه بر آن نتایج نشان داد که به‌طور متوسط حجم آبشستگی در اثر احداث طوقه‌های مشبک در ترازهای ۰/۱، ۰/۵ و یک برابر قطر پایه پل به ترتیب به میزان ۵۸ درصد، ۶۰ درصد و ۱۰ درصد کاهش یافت و قطر طوقه تأثیر معنی‌دار در کاهش و یا افزایش حجم نسبی آبشستگی نداشت.

منابع

۱- آزم ن. و م. قمشی. ۱۳۹۲. اثر شمع‌های حفاظتی بر کاهش آبشستگی در پایه پل استوانه‌ای. نشریه دانش آب و خاک، ۳۳(۳): ۱۳۴ -۱۲۳.

۲- اسمعیلی ورکی م. جعفری م. ح. و س. موسی‌پور. ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رقوم کارگذاری فونداسیون بر حداکثر آبشستگی پایه گروه کج. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۱-۱۹ اردیبهشت ، اصفهان، ایران.

۳- جلیلی آ. ۱۳۹۲. بررسی اثر استفاده از طوقه مشبک بر آبشستگی پایه‌های پل. رساله کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- حسن‌پور، ن.، حسین‌زاده دلیر، ع. و م. ارونقی. ۱۳۹۲. بررسی آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل باله‌ای شکل با طوق. مجله دانش آب و خاک تبریز، ۲۳(۳): ۲۳۴ -۲۲۱.

۵- روشن، ر. ۱۳۸۴. بررسی پدیده گرداب با استفاده از مطالعات مدل فیزیکی و روشهای استهلاک آن در آبگیر نیروگاه‌ها. مجموعه مقالات کارگاه آموزشی مدلسازی در آبیاری و زهکشی، ۲۴ آذرماه، تهران، صفحه‌های ۱۲۱ تا ۱۳۶.

۶- زراتی، ا. ر. و م. عزیزی. ۱۳۸۰. کنترل آبشستگی در اطراف پایه‌پای پل. نشریه دانشکده فنی، ۳۵(۱): ۳۳-۲۱.

۷- شریعتی، ح.، خداشناس، س. ر. و ک. اسماعیلی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی کارکرد با هم طوق و شکاف بر میزان آبشستگی موضعی در پایه پل. نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۳(۱): ۹۶-۸۵.

۸- عالم، ز.، قمشی، م. و س. محمدی. ۱۳۹۱. کاربرد طوق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه مستطیلی پل در کانال مرکب. فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۱۰: ۴۱-۲۹.

۹- قاسمی‌فرد، م.، حیدرپور، م. و م. ح. صداق. ۱۳۹۲. کنترل آبشستگی موضعی پایه‌های مستطیل پل در حضور پایه‌های قربانی شونده. همایش مهندسی عمران و توسعه پایدار، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران.

۱۰- مسجدی، ع. و م. غلامزاده محمودی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه. مجله علوم، فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۵:۳۸-۲۷.

۱۱- مصباحی، م. و ا. شمسایی. ۱۳۹۲. بررسی و مقایسه معیارهای انتخاب پوشش سنگچین جهت حفاظت پایه‌های پل. همایش مهندسی عمران و توسعه پایدار، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد.

۱۲- هاشمیان، س. م. و س. م. جباری. ۱۳۹۱. اصول و کاربردهای به‌کارگیری صفحات مشبک در مصارف صوتی. دومین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

13- Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge Piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(9): 1260-1269.

14- Chiew, Y.M. and B.W. Melville. 1987. Local scour around bridge Piers. Journal of Hydraulic. Research. 25(1): 15-26.

15- Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring. Journal of Hydraulic Engineering. 116(10): 1197-1214.

16- Ettem, R. 1980. Scour at bridge piers. Report No.216,University of Aucland, School of Engineering, New Zealand.

17- Karimaee-Tabarestani M. and A.R. Zarrati. 2012. Effect of collar on time development and extent of scour hole around cylandrical bridge piers. International Journal of Engineering, 25(1): 11-16.

18- Kettle, P. E., and P. E. Merv Eriksson.1998. Bridge scour evaluation: Screening, analysis, and countermeasures. United States Department of Agriculture Forest Service Technology and Development Program.

19- Landers, M. N. 1992. Bridge scour data management. Proceedings of the Hydraulic Engineering, August 2–6, Maryland. Published by American Society of Civil Engineers.

20- Melville, B. W. 1997. Pier and abutment scour: Integrated approach. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(2): 125-136.

21- Placzek, G., and F.P. Haeni. 1995. Surface-geophysical techniques used to detect existing and infilled scour holes near bridge piers: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4009, 44 p.

22- Singh, K.K., Verma, D.V.S., and N.K. Tiwari. 1995. Scour protection at circular bridge piers. 6th Internatinal Symposium on River Sedimentation. New Delhi, India.

23- Singh, C.P., Setia, B., and D.V.S. Verma. 2001. Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. Proceedings of Theme D, 29th Congress on Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery, Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing, China, PP. 16-21.

24-Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., and F. Calomino. 2012. Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour. Journal of Hydraulic Engineering, 138(3):297–305.

25- Zarrati, A.R. Gholami, H., and M.B. Mashahir. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 42(1): 97-103.