

بررسی آزمایشگاهی کارایی طوق نامتقارن مشبک در کاهش آبستگی موضعی پیرامون پایه پل با مقطع دایره‌ای

نرگس رئیسی^{۱*}، مهدی قمشی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۰

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* پست الکترونیک مسئول مکاتبه: n_raeesi123@yahoo.com

چکیده

تحقیقات نشان می‌دهند، از مؤثرترین عوامل تخریب پل‌ها، آبستگی موضعی در محل پایه‌ها است. یکی از روش‌های کاهش آبستگی اطراف پایه‌ها، نصب طوقه بر روی آن است. طوقه‌ها بستر را در مقابل جریان‌های گردابی اطراف پایه محافظت می‌کنند. در این تحقیق ضمن بررسی تأثیر طوق بعنوان یک سازه کنترل فرسایش پیرامون پایه پل، تأثیر شکل طوق نیز بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها نشان دادند که، ابعاد طوقه بر عملکرد آن تأثیر بسزایی دارد. نتایج نشان داد با افزایش ابعاد طوقه عملکرد آن بهبود می‌یابد. با مقایسه دو نوع طوقه، مشخص شد، طوقه با ابعاد بیضوی 3×6 عملکرد بهتری در کاهش آبستگی نسبت به طوقه با ابعاد بیضوی 3×4 دارد. طوقه‌های با ابعاد بزرگتر بدلیل اینکه مانع حرکت رسوبات ناشی از فعالیت گرداب برخاستگی در پائین‌دست پایه می‌شوند، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. از سوی دیگر با کاهش زبری در سطوح طوقه از ۴۰ درصد به ۱۵ درصد، میزان کاهش آبستگی از ۳۹ درصد به ۵۸ درصد نسبت به پایه بدون طوق افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آبستگی موضعی، بیضوی، پایه، طوق نامتقارن، سطح زبر.

Experimental Investigation of Asymmetrical Collar Performance on Local Scour Reduction Around Circular Bridge Pier

N Raesi^{*1}, M Ghomeshi²

Accepted: October 2, 2019

Received: January 4, 2021

¹- Ph.D. Student, Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

²- Prof., Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

*Corresponding Author Email: n_raesi123@yahoo.com

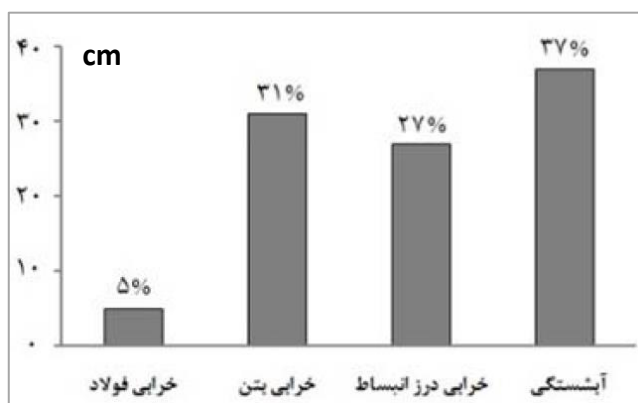
Abstract

Researches show that one of the most effective factors on bridges destruction is bridge piers scour. One of the methods used to reduce scour around bridge piers is installing collar. The collars protect the river bed against vortex flow in the vicinity of the piers. The role of collar as a control structure of bridge pier scour was investigated along with the effect of its shape. Experiments showed that the dimensions of the collar have a significant effect on its performance. The results showed that its performance improves with increasing the dimensions of the collar. By comparing the two types of collars, it was found that collars with (3×6) D elliptical dimensions have better performance in reducing scour than collar with (3×4) D dimensions. Larger collars performed better because they prevented the movement of sediments due to vortex activity at collar downstream. On the other hand, with the reduction of roughness in collar surfaces from 40% to 15%, the amount of scour reduction increases from 39% to 58% compared to the base without collar.

Keywords: Elliptically, Local scour, Pier, Rough area, Unsymmetrical collar.

از آبخستگی در میان سایر عوامل تخریب پل‌های کشور برجسته‌تر می‌باشد.

مقدمه



احداث یک پل در مسیر عبور یک رودخانه به جهت طراحی و محاسبه بهینه در ساخت پایه‌های آن بسیار حائز اهمیت است. بررسی اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه رودخانه برای دستیابی به اطلاعات فرسایش در بستر رودخانه تا دستیابی به حصول نتیجه در فاز مطالعاتی گسترده باید انجام گردد، که در صورت در نظر نگرفتن آن باید شاهد عواقب خطرناکی، از جمله تخریب پل بود. شکل ۱ عوامل مختلف خرابی پل‌ها را که توسط سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور در سال ۱۳۹۱ گزارش شده است، نشان می‌دهد (بی‌نام ۲۰۱۲). سهم تخریب ناشی

شکل ۱- عوامل مختلف خرابی پل‌ها مطابق گزارش سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور (بی‌نام ۲۰۱۲).

بر این مبنا در دهه ۸۰ تعداد ۱۸۳ پل در حوزه راه و ترابری استان خوزستان مورد بازدید و بررسی فنی قرار گرفتند. شکل ۲ آبشستگی ناشی از سیلاب سال ۱۳۸۰ در محل پل گلال کهنک در استان خوزستان را نشان می‌دهد، که موجب تخریب این پل شده بود (خادمی و همکاران ۲۰۱۰).



شکل ۲- تخریب ناشی از آبشستگی (پل گلال کهنک).

از این روی، تحقیق روی این مسأله از اهمیت زیادی برخوردار است. در چند دهه اخیر، محققان زیادی در سراسر دنیا، روش‌های مختلف محافظت در برابر آبشستگی را بویژه در پایه‌های پل مورد مطالعه قرار داده‌اند، که یکی از این روش‌ها استفاده از طوق می‌باشد. طوق^۱ صفحه‌ای محافظ با سطح صاف و ضخامت اندک، که اثرگذار در کاهش آبشستگی است. طوق نباید خیلی ضخیم باشد، چرا که ضخامت زیاد طوق، سبب ایجاد مانع در برابر جریان شده و آبشستگی را افزایش می‌دهد (درگاهی ۱۹۹۰). یک طوق در سطوح متفاوت روی پایه نسبت به بستر نصب می‌شود؛ که جریان را به دو ناحیه بالا و پائین طوق تقسیم

می‌کند. ناحیه بالای طوق بعنوان یک مانع در مقابل جریان رو به پایین^۲ عمل کرده و قدرت جریان رو به پایین را در اثر برخورد با طوق کاهش می‌دهد. در ناحیه پایین طوق، قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه بخشی از جریان گرداب نعل اسبی^۳ کاهش می‌یابد. کارایی یک طوق به اندازه و محل قرارگیری آن بر روی پایه نسبت به بستر بستگی دارد (کایاترک ۲۰۰۵). موقعی که طوق برای محافظت از آبشستگی روی پایه نصب می‌شود، جریان رو به پایین در حین برخورد به طوق از بستر منحرف شده و جلوی آبشستگی گرفته می‌شود (خزیمه‌نژاد و همکاران ۲۰۱۲). حُسن طوق آن است که احداث آن، حتی زمانی که آب رودخانه جریان دارد، قابل اجرا است (بلوچی ۲۰۱۰). در ادامه بخشی از تحقیقات انجام شده در خصوص تأثیر طوقه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار گرفته است. مونوکادا و همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که استفاده از طوقه‌ای با عرض دو برابر قطر پایه می‌تواند آبشستگی را ۵۵ تا ۹۶ درصد کاهش دهد. بر طبق نظر دفانتی و همکاران (۲۰۱۰) شرایط جریان بر میزان راندمان طوق در کاهش عمق آبشستگی مؤثر می‌باشد، نتایج آن‌ها نشان داد که طوق‌ها در سرعت‌های پایین جریان آب از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشند. خزیمه‌نژاد و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر ابعاد و موقعیت قرارگیری طوقه را بر کاهش آبشستگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش ابعاد طوقه عملکرد آن بهبود می‌یابد، همچنین با کاهش تراز نصب طوقه نسبت به بستر بر عملکرد آن افزوده می‌شود. خزیمه‌نژاد و قمشی (۲۰۱۳) عملکرد طوقه‌های متقارن^۱ و نامتقارن^۲ را بر کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل بررسی

2- Down flow
3- Horse show vortex
1- Symmetrical
2- Unsymmetrical

1- Collar

برابر ۴ سانتی‌متر پرداختند، آزمایش‌ها تحت ۳ عدد فرود ۰/۱۹، ۰/۱۶ و ۰/۱۳ و در شرایط آب زلال انجام گرفت. برای شبیه سازی طوقه از صفحه‌های پلکسی مربعی و با طول ضلع 3B و دایره‌ای با قطر 3D استفاده شد. بطور کلی در این پژوهش عملکرد چهار طوقه ساده، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد مشبک در تغییرات حفره آبشستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در عدد فرود ۰/۱۹ برای پایه مکعبی طوقه ۳۰ درصد مشبک بالاترین راندمان با ۴۷ درصد کاهش آبشستگی، این در حالی است که برای پایه استوانه‌ای در همین عدد فرود طوقه ۴۰ درصد مشبک بالاترین راندمان را با ۳۴ درصد کاهش در میزان آبشستگی نسبت به سایر طوقه‌های مشبک دارد. خسروی‌نیا و همکاران (۲۰۱۱) آزمایش-هایی را در خصوص طوقه‌های نوزنقه‌ای برای کاهش آبشستگی بر آبشکن‌های بالدار انجام دادند، و عملکرد طوقه‌ها را نسبت به حالت بدون استفاده از طوق مورد بررسی قرار دادند.

نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از طوق در اطراف آبشکن تاثیر جریان رو به پائین را تا زمان توسعه آبشستگی به زیر طوق به تاخیر می‌اندازد و در این راستا طوق با طول ۸ سانتی‌متر عملکرد بهتری را با طوق‌های کوچکتر برای هر آبشکن داشت. نتایج آزمایش‌های (ثانی‌خانی و همکاران ۲۰۰۸) نشان داد، که طوق نصب شده در زیر و روی بستر به مراتب موثرتر از طوق‌های قرارگرفته در بالای بستر می‌باشند. در حالتیکه طوق‌ها بالاتر از سطح بستر قرار بگیرند فاصله ایجاد شده بین طوق و سطح بستر امکان تشکیل گرداب نعل اسبی را فراهم نموده و بهمین دلیل آبشستگی در جلوی پایه رخ خواهد داد.

بخشپوری و یحیوی (۲۰۱۶) عملکرد طوق را در کاهش عمق آبشستگی پایه پل‌های استوانه‌ای ارزیابی کردند. طوق‌های دایره‌ای و مربعی شکل با ابعاد یک، دو و سه برابر قطر پایه و در کانالی با ابعاد طولی ۶ متر و عرض ۰/۷ متر مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. با

و مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد، که تأثیر عرض طوقه در بالادست بسیار مؤثرتر از دو بُعد دیگر طوقه می‌باشد. عرض طوقه در پایین دست کمترین تأثیر را در کاهش آبشستگی در میان ابعاد هر دو نوع طوقه دارد. بهمین جهت طوقه نامتقارن هنگامی که عرض بالادست آن نسبت به پایین‌دست بزرگتر باشد نسبت به طوقه هم مساحت خود عملکرد بهتری نشان می‌دهد. در حالت عکس، عملکرد طوقه متقارن بهتر خواهد بود. گوگاس و دوگان (۲۰۱۳) به مطالعه عملکرد طوقه در کاهش آبشستگی پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که نصب همزمان ۵ طوقه با عرض دو برابر قطر پایه و به فواصل متفاوت بر روی تکیه‌گاه طی ۹۷ آزمایش، بر میزان کاهش آبشستگی به مقدار قابل توجهی اثر گذار می‌باشد، که موجب کاهش ۳۰ درصدی راندمان آبشستگی نسبت به شاهد بود. ایزدی نیا و حیدرپور (۲۰۱۶) تأثیر استفاده از همزمان طوق و کابل را در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند با نصب طوقه روی سطح بستر، در صورتی که کابل با زاویه ۱۵ درجه دور پایه پیچیده شود، کاهش آبشستگی ۲۵ درصد از حالتی که کابل با زاویه ۳۰ درجه حول پایه باشد بیشتر است. عالم (۲۰۱۲) تأثیر قرارگیری طوقه مشبک و ساده را بر آبشستگی تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار داد، نتایج نشان داد که استفاده از طوق مشبک میزان آبشستگی اطراف تکیه‌گاه را کاهش می‌دهد. در بین طوقه‌های مشبک، طوقه با درصد بازشدگی ۳۳ درصد بهترین عملکرد را داشت. بطوری که میزان کاهش آبشستگی طوقه مشبک نسبت به طوقه ساده برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و در ارتفاع‌های ۲ و ۴ سانتی‌متر به ترتیب ۹/۴ و ۱۰/۴ درصد است. او علت این امر را تأثیر مشبک نمودن طوقه‌ها در مقایسه با طوقه ساده و اثربخشی آن بر جریان‌های گردابی پیرامون پایه دانست. جلیلی (۲۰۱۴) به بررسی اثر طوقه‌های مشبک بر آبشستگی پایه‌های پل مکعبی و استوانه‌ای با طول ضلع و قطر

استفاده شده است، از سویی دیگر یک شیر یک طرفه در کف کانال به منظور سیستم زهکشی رسوبات تعبیه شد.

یک دریچه کشویی به منظور کنترل و تنظیم سطح آب در انتهای پائین دست این کانال طراحی گردیده است، که از طریق آن امکان برگشت آب به مخزن و زهکشی یا چرخش در سیستم وجود دارد. به این ترتیب جریان رفت و برگشتی در کل زمان آزمایش در کانال رقرار می‌باشد. در شکل ۳ نمایی از کانال و تجهیزات آزمایشگاهی نشان داده شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها مشاهده عملکرد سیستم‌های گردابی و نحوه حرکت ذرات و همچنین برداشت عمق آبشستگی در جلوی پایه برای مقایسه با نتایج آزمایش‌های مرحله بعدی بود. در تحقیق حاضر فرض بر این بود، که ۹۹ درصد عمق تعادل آبشستگی (عمق نهایی آبشستگی) در مدت زمان ۳۰۰ دقیقه اتفاق می‌افتد. در این صورت مطابق شکل ۷ حدود ۹۱ درصد عمق تعادل آبشستگی در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه اتفاق می‌افتد، و با توجه به اینکه هدف در تحقیق حاضر بررسی تأثیر ابعاد طوق-های نامتقارن و مقایسه عملکرد آنها می‌باشد، و این هدف با مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف فراهم می‌شود؛ لذا ۱۵۰ دقیقه بعنوان زمان آزمایش برای تمامی آزمایش‌ها انتخاب گردید. بنابراین ۲ آزمایش شاهد دیگر در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه انجام و عمق آبشستگی در جلوی پایه برداشت گردید. الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش بوسیله مترلیزری برداشت شد، و حداکثر عمق آبشستگی در جلوی پایه اتفاق افتاد.

در مراحل انجام آزمایش‌ها، تعیین ابعاد مدل و نیز تعیین مقادیر پارامترهای مجاز که بر میزان عمق آبشستگی مؤثرند، حائز اهمیت می‌باشد. از این رو، برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی طبق توصیه‌های چیو و ملویل (۱۹۸۷) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد.

بررسی‌های صورت پذیرفته می‌توان گفت که نصب طوق در ترازهای پائین‌تر و همچنین بزرگ‌تر بودن ابعاد طوق بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق آبشستگی دارد. طوق‌های مربعی نیز نسبت به طوق‌های دایره‌ای تأثیر بیشتری بر کاهش عمق آبشستگی پایه پل دارند. مطابق آنچه اشاره شد بدلیل مکانیزم متفاوت جریان پیرامون پایه پل تأثیر هر کدام از ابعاد طوقه بر عملکرد آن در کاهش آبشستگی متفاوت است. از سویی دیگر، بررسی تغییرات مشبک صفحات طوق در جهت ارتقاء بازده آن صورت گرفت، از سویی تحقیق حاضر با هدف بررسی عملکرد طوقه‌های نامتقارن مشبک^۱ و تعیین ابعاد مناسب آن در کاهش عمق آبشستگی پیرامون پایه پل انجام گردید.

مواد و روش‌ها

امکانات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌های آبشستگی، از یک کانال مستطیلی با دیواره شیشه‌ای در آزمایشگاه مدل-های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد.

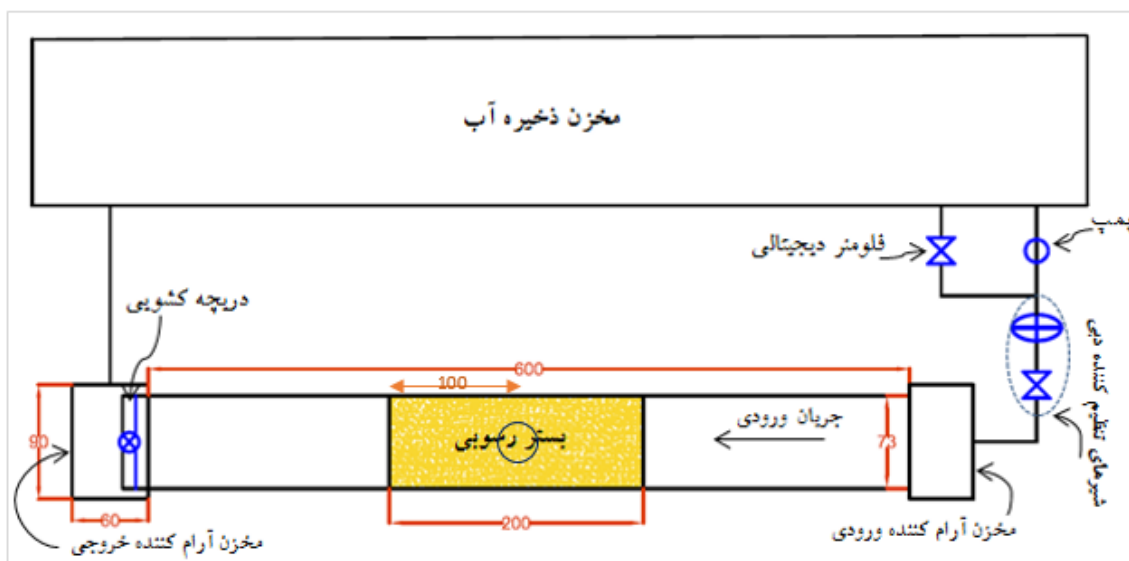
طول کانال ۶ متر، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۷۲ و ۶۰ سانتی‌متر بود. شیب کف کانال آزمایشگاهی قابل تغییر بوده و برای انجام آزمایش‌ها روی شیب نزدیک به صفر تنظیم شد. کانال در قسمت ابتدایی و انتهایی دارای مخزن آرام‌کننده است.

برای اندازه‌گیری دبی از یک فلومتر التراسونیک مدل مغناطیسی با دقت ۰/۰۰۱ لیتر بر ثانیه نصب شده در ابتدای کانال استفاده شد.

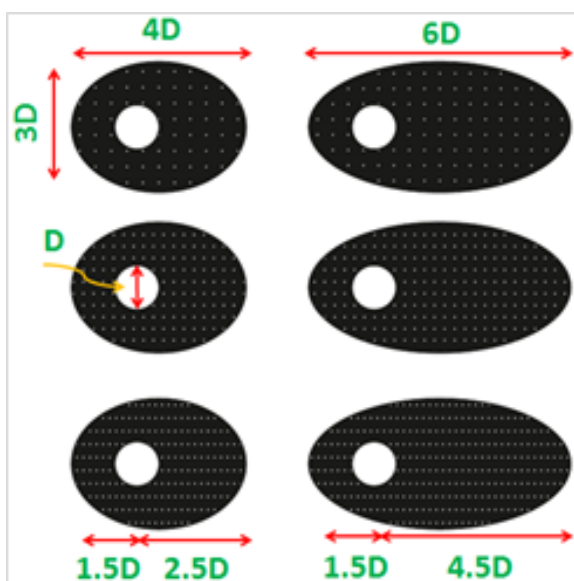
آب مورد نیاز بوسیله‌ی یک پمپ با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی به کانال منتقل می‌شد، به منظور حذف تلاطم جریان ورودی از یک توری مشبک بلافاصله پس از مخزن آرام‌کننده ورودی

با ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه شدند. با توجه به نتایج مطالعات بسیاری که در زمینه طوقه ساده انجام گرفته است، بر اساس پیشنهاد سینگ و همکاران (۲۰۰۹) از طوقه‌های متقارن با $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ برابر قطر پایه برای پایه‌های استوانه‌ای می‌توان استفاده کرد.

لذا پایه استوانه‌ای از جنس چوب به قطر ۴۰ میلی‌متر با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر برای جلوگیری از مستغرق بودن پایه استفاده گردید. برای اطمینان از نصب طوقه در ارتفاع مورد نظر از سطح بستر، پایه بوسیله دستگاه برش لیزری با دقت ۱ میلی‌متر مدرج شد. طوقه‌ها بصورت صفحاتی از جنس پلکسی گلاس و



شکل ۳- پلان کانال و تجهیزات آزمایشگاهی.

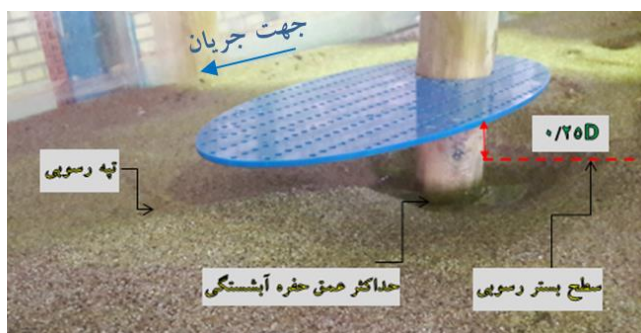


شکل ۴- نمایی از طوقه‌های مشبک نامتقارن.

از این رو، طوقه‌های نامتقارن با پیش‌آمدگی بیش از ۳ برابر قطر پایه رو به پائین‌دست که بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی دارند، مورد آزمایش قرار گرفتند. پس بمنظور بررسی اثر طوق نامتقارن در تحقیق مربوطه، تمامی طوقه‌ها در دو مدل ۴ و ۶ برابر قطر پایه در راستای طولی به منظور تضعیف جریان-های پایین‌رونده پیرامون پایه از صفحات بیضوی به ابعاد (3×6) و (3×4) تهیه شدند. این طوقه‌ها با سه درصد بازشدگی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد مشبک تهیه شدند (شکل ۴).

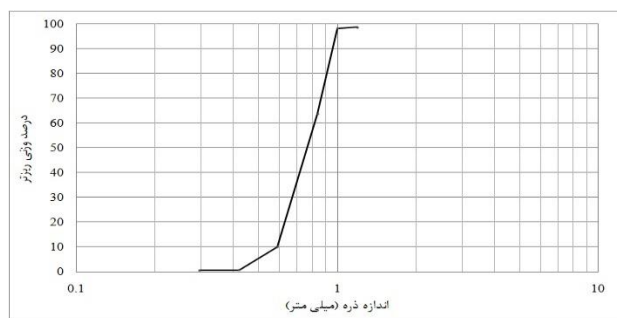
در فاصله ۲ متری از ابتدای کانال یک باکس برابر عرض فلوم با طول حدود ۲ متر و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. این باکس از یک نمونه رسوب یکنواخت دارای انحراف معیار هندسی $0/22$ ، چگالی $2/65$ و قطر متوسط $0/73$ میلی‌متر پر شد. بنحوی که پس از پر شدن هم‌تراز بستر کانال قرار گرفت. در خصوص اندازه رسوبات در آزمایش‌های مربوط به پایه‌های پل، معیارهای متعددی ذکر شده است؛ بعنوان مثال طبق نظر رادکیوی (۱۹۹۹) برای این-که اندازه رسوب تأثیری بر آبشستگی ایجاد نکند و از تشکیل فرم بستر نیز جلوگیری شود، بایستی قطر پایه به اندازه رسوب، بیشتر از ۲۰ الی ۲۵ باشد. با توجه به شرایط ذکر شده، برای تأمین رسوبات بستر از ماسه باقی‌مانده بین الک‌های ۲۰ و ۳۰ در محدوده اندازه ذرات $0/59$ تا $0/83$ میلی‌متر استفاده شد. شکل ۶ الف) جانمایی پایه پل استوانه‌ای در بستر رسوبی کانال آزمایشگاهی به‌مراه طوقه و شکل ۶ ب) منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی مورد استفاده را نشان می‌دهد. از سویی، در جدول ۱ مشخصات مصالح رسوبی مورد استفاده نشان داده شده است.

روی هر یک از این صفحات با توجه به باز شدگی مورد نیاز سوراخ‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر با دستگاه برش لیزری ایجاد شد. برای نصب طوقه‌ها روی پایه، ابتدا قطعه‌های کوچکی به شکل مربع از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۲ میلی‌متر بعنوان تکیه‌گاه روی پایه و در تراز مورد نظر نصب گردید، و پس از حصول اطمینان از تراز بودن طوقه در ارتفاع مورد نظر، طوقه و پایه توسط چسب آکوارיום بهم چسبانده شدند. شکل ۵ نمایی از طوق نصب شده روی پایه در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

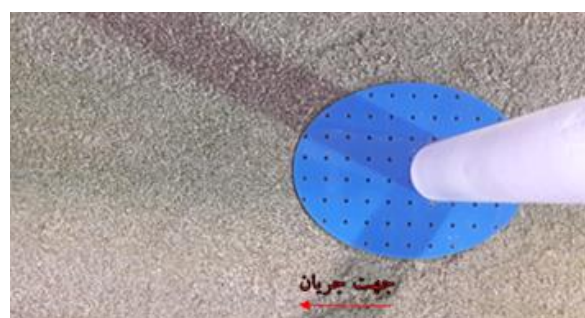


شکل ۵- نمایی از نصب طوقه نامتقارن (3×6) و 40%

مشبک روی پایه استوانه‌ای در تراز $0/25D$.



(ب)



(الف)

شکل ۶- الف) جانمایی پایه پل استوانه‌ای به‌مراه طوقه در بستر رسوبی کانال آزمایشگاهی (نما از بالا)

ب) منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی در بستر.

جدول ۱- مشخصات رسوب استفاده شده در بستر کانال.

پارامتر	d_{84}	d_{83}	d_{50}	d_{30}	d_{16}	d_{10}	C_u	σ_g	φ
مقدار	۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۵۹	۱/۴۱	۱/۲۲	۲۹/۲

آزمایش‌ها در عمق ثابت ۰/۱۲ متر انجام شد، از آنجایی که حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آستانه حرکت رسوبات رخ می‌دهد؛ یعنی $V/V_c = 1$ که V سرعت متوسط جریان و V_c سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب می‌باشد (ملویل ۱۹۹۷)، در دبی مذکور مقدار ۰/۹۴ برای پارامتر V/V_c در مقطع آزمایشی برقرار گردید.

تعیین سرعت آستانه حرکت رسوبات

سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان، در چند مرحله محاسبه گردید، و سپس درستی آن با رابطه نیل (۱۹۷۳): $V_c = 31.08 K_u \Theta_c^{1/2} y^{1/6} d_{50}^{1/3}$ ، که در آن V_c سرعت بحرانی (m/s)، y عمق جریان (m)، d_{50} اندازه متوسط ذرات (m)، $K_u = 1$ ضریب ثابت و Θ_c پارامتر شیلدنز از دیگرام بدست آمد؛ محاسبه گردید. در جدول ۲ شرایط حاکم بر آزمایش‌ها را ذکر شده است.

جدول ۲- شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایش‌های تحقیق حاضر.

V/V_c	$V (ms^{-1})$	$Y (m)$	$Q (m^3 s^{-1})$	$Fr = V/\sqrt{gy}$	$Re = VR/\nu$
۰/۹۴	۰/۴۱	۰/۱۲	۰/۰۳۵	۰/۳۷	۳۶۹۰۰
۰/۸۱	۰/۳۵	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۳۲	۳۱۵۰۰

از سوی دیگر، عمق آبشستگی موضعی در محل پایه‌های پل وابسته به زمان بوده و در طول زمان افزایش می‌یابد. که بمنظور تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، یک آزمایش ۵ ساعته با سرعت نسبی^۱ ۰/۹۴ انجام گرفت. در طول مدت آزمایش تغییرات سطح بستر رسوبی به کمک متر لیزری برداشت گردید. متر لیزری توسط یک قالب از جنس پلکسی‌گلاس که به دیواره‌های فلوم محکم شده بود، کنترل می‌شد. قالب بشکلی طراحی گردید که سر متر لیزری به عمق ۵ میلی‌متر درون آب قرار گیرد، و اشعه لیزر خروجی برای اندازه‌گیری عمق

آبشستگی فقط محیط آب را ببیناید. سپس نتایج بدست آمده برای محیط آب کالیبره شد. از سوی دیگر، در طی مدت زمان آزمایش‌ها تغییرات سطح بستر رسوبی از طریق مدرج نمودن پایه پل کنترل می‌شد. زمان تعادل (۱۵۰ دقیقه) بر اساس اندازه‌گیری انجام شده نسبت به سطح اولیه و تشکیل حفره آبشستگی نسبت به زمان بدست آمد (شکل ۷). سپس در شروع هر آزمایش ابتدا کانال با نرخ کم جریان پر خواهد شد، این امر به این دلیل است که جلوی فرسایش ناشی از جریان ورقه‌ای در ابتدای آزمایش گرفته شود، سپس دبی آب به آرامی زیاد می‌شود تا به دبی مورد نظر برسد، پس از تنظیم دبی بوسیله دریچه کنترل، آب در عمق مورد نظر یعنی

1- V/V_c

شکل ۷- منحنی توسعه زمانی حفره آبهستگی برای پایه استوانه‌ای الف) داده‌های آزمایشگاهی ب) رابطه سامر ۱۹۹۳.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر پدیده آبهستگی اطراف پایه پل مجهز به طوق به شرح زیر است:

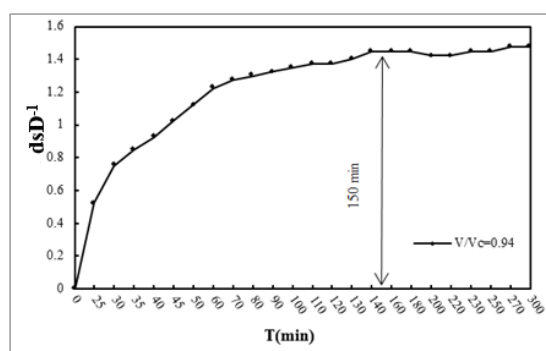
$$f_1(d_s, y, B, D, D_{50}, V, V_c, g, \rho, \nu, \rho_s, t, C_D, \sigma, B_C, L_C, t_C, z_C, \varphi_C, \alpha) = 0 \quad [۷]$$

که در آن d_s عمق آبهستگی، y عمق جریان، B عرض کانال، D قطر پایه پل، D_{50} قطر متوسط رسوبات بستر، V سرعت جریان، V_c سرعت بحرانی جریان، g شتاب ثقل، ρ جرم واحد حجم، ρ_s جرم واحد حجم رسوبات، θ لزوجت سینماتیکی سیال، t زمان، C_D ضریب شکل پایه، σ انحراف معیار ذرات رسوبی، B_C قطر بزرگ طوقه، L_C قطر کوچک طوقه، t_C ضخامت طوقه، Z_C تراز قرارگیری طوقه از سطح بستر، α درصد بازشدگی (مشبک بودن طوقه) و φ_C شکل طوقه می‌باشند. و با در نظر گرفتن، y ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکراری و بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی و بکار بردن تئوری باکینگهام رابطه ۱ پس از دستیابی به تمامی اعداد بی‌بعد حاصله از پارامترها و ترکیب بخشی از آنها با هم به رابطه ۲ تبدیل خواهد شد:

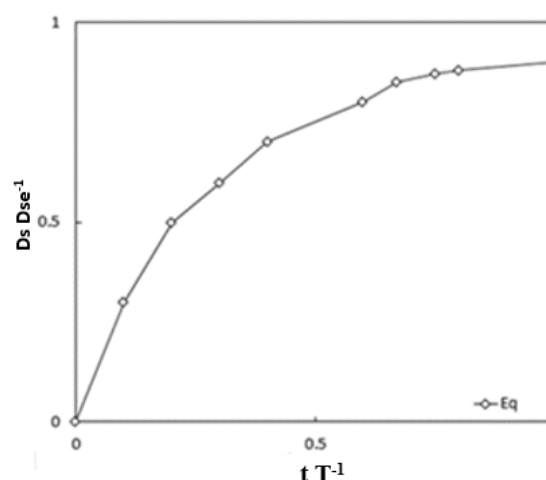
$$\frac{d_s}{D} = f_2 \left(R_e, F_r, t, \alpha, \varphi_C, \frac{t_C}{D}, \frac{z_C}{D}, \frac{B_C}{D}, \frac{L_C}{D} \right) \quad [۸]$$

از میان پارامترهای بی‌بعد در رابطه ۲، پارامترهای شکل طوقه، ضخامت طوقه، سرعت بحرانی جریان و همچنین مدت زمان تمامی آزمایش‌ها که معادل با (زمان تعادل) در نظر گرفته شده است بعلت ثابت بودن در روند آزمایش‌ها از رابطه حذف شده، و از سویی در تمامی آزمایش‌ها عدد رینولدز برای اطمینان از برقراری جریان متلاطم ($R_e > 2000$) مورد بررسی قرار گرفت (چاو ۱۹۸۹)، بهمین دلیل می‌توان از آن نیز صرف نظر

۰/۱۲ متر قرار می‌گیرد. سپس آزمایش به مدت زمان تعیین شده ادامه پیدا کرده، و پس از اتمام آزمایش آب به آرامی از کانال خارج می‌گردد. در انتها حداکثر عمق آبهستگی و الگوی رسوبگذاری ایجاد شده در اطراف پایه پل بوسیله متر لیزری برداشت می‌گردد. بر اساس نظر سامر (۱۹۹۳) نوسانات زمانی برای تخمین عمق آبهستگی طبق رابطه $ds = dse \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{T} \right) \right)$ می‌باشد، که در این رابطه T مدت زمانی است که آبهستگی توسعه می‌یابد و t مدت زمان کل آزمایش می‌باشد، از این رو برای درستی در تخمین میزان آبهستگی در رسیدن به زمان تعادل از این رابطه استفاده شد، مطابق نمودار شکل (۷-ب) میزان آبهستگی تا ۹۰ درصد به میزان تعادل رسیده است.



(الف)



(ب)

$$\%R = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100 \quad [4]$$

آزمایش‌های بدون حضور طوقه (آزمایش‌های شاهد)

مشاهده شد که، با افزایش عدد فرود حفره آبخستگی توسعه طولی، عرضی و عمقی بیشتری می‌یابد، همچنین تپه رسوبی با ارتفاع بیشتر و در فاصله بیشتری از پای پل تشکیل می‌شود. همچنین بیشترین عمق ناشی از آبخستگی در جلوی پایه ایجاد و در دو سمت به صورت متقارن رو به پایین دست پایه از عمق آن کاسته می‌شود و در پشت پایه، مواد جدا شده از جلوی پایه انباشته می‌گردد. در جدول ۳ تغییرات عمق بی‌بعد آبخستگی بدون حضور طوقه آورده شده است. در شکل ۸ الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در آزمایش شاهد ۱۵۰ دقیقه‌ای نشان داده شده است.

جدول ۳- تغییرات عمق بی‌بعد آبخستگی d_s/D
(آزمایش شاهد).

$Fr = 0.37$	$Fr = 0.32$	$\frac{d_s}{D}$	$\frac{d_s}{D}$
۱/۶۲	۱/۴۷	۰.۴۰	۰.۴۰

رابطه دی (۲۰۰۹) یک روش جامع برای تخمین عمق تعادل آبخستگی است.

$$K_1 \quad , d_s = 2yk_1k_2k_3k_4 (D/y)^{0.65} Fr^{0.43}$$

ضریب تصحیح شکل پایه $(1/1 - 0/9)$ ، K_2 ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان با پایه، K_3 ضریب تصحیح برای شرایط مختلف بستر (آب زلال: $1/1 - 1/3$) و K_4 ضریب مسلح سازی بستر. عمق بدون بعد

کرد، و رابطه بدون بعد بصورت رابطه ۳ قابل ارائه می‌باشد:

$$\frac{d_s}{D} = f_3 \left(Fr, \alpha, \frac{z_c}{D}, \frac{B_c}{D}, \frac{L_c}{D} \right) \quad [3]$$

نتایج و بحث

بمنظور بررسی تأثیر حضور طوقه بر آبخستگی پایه پل استوانه‌ای آزمایش‌ها به دو دسته به شرح زیر تقسیم‌بندی شدند:

دسته اول، آزمایش‌های بدون حضور طوقه (آزمایش‌های شاهد): آزمایش‌های این بخش طبق جدول ۳ به منظور مشاهده تأثیر جریان‌های گردابی اطراف پایه پل و برداشت عمق حداکثر آبخستگی برای مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش‌های در حضور طوقه انجام گرفته است. در این حالت آبخستگی از جلوی پایه با شکل‌گیری جریان رو به پائین و به صورت متقارن نسبت به محور پایه شروع شد، با عمیق شدن حفره آبخستگی و قدرت گرداب‌های نعل اسبی، مواد رسوبی از جلو و اطراف پایه شسته شده و بصورت پشته در پشت پایه جمع می‌شوند. همزمان با گسترش حفره آبخستگی و ایجاد منطقه کم فشار پشت پایه، گرداب برخاستگی نیز تشکیل شده و رسوبات حمل شده توسط جریان را به پائین دست انتقال می‌دهند. با افزایش شدت جریان حفره آبخستگی وسیع‌تر شد، و عمق حداکثر آبخستگی نیز افزایش یافت. جدول ۳ تغییرات عمق بی‌بعد آبخستگی (d_s/D) را بدون حضور طوقه نشان می‌دهد.

دسته دوم، آزمایش‌ها با حضور طوقه: در این مرحله ۱۲ آزمایش طبق جدول ۵ انجام گرفت. درصد کاهش آبخستگی با استفاده از نتایج آزمایش‌های شاهد و رابطه ۴ در جدول ۴ آورده شده است. در رابطه مذکور، d_1 معرف حداکثر عمق آبخستگی در آزمایش شاهد و d_2 معرف حداکثر عمق آبخستگی در حضور طوقه می‌باشند.

دست توسعه پیدا کردند و عمق آن‌ها افزایش یافت. که خلاصه نتایج آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- درصد کاهش آبشستگی با حضور طوقه.

نوع طوقه	مشبک نامتقارن	Z_c (mm)	درصد کاهش آبشستگی (%R)	
			$Fr = 0.37$	$Fr = 0.32$
۱۵٪	۳۰٪	۰/۲۵ D	۴۴	۴۴
			۳۰	۳۳
۱۵٪	۳۰٪	۰/۲۵ D	۳۵	۳۵
			۵۵	۵۹
۳۰٪	۴۰٪	۰/۲۵ D	۴۶	۵۷
			۴۳	۴۰

آبشستگی با رابطه دی (۲۰۰۹) مقایسه گردیده است. بطوریکه در جدول ۴ مشخص است، نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر با ضریب همبستگی ۰/۹۲ همخوانی خوبی را نشان می‌دهد.

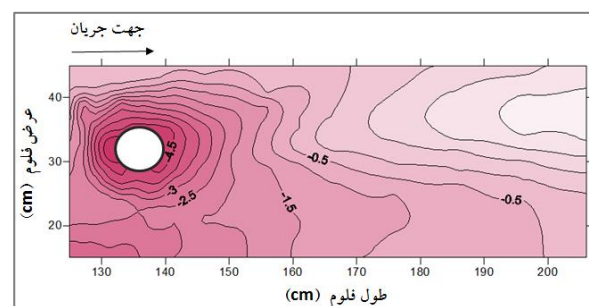
جدول ۴- مقایسه عمق بدون بعد آبشستگی

با رابطه دی (۲۰۰۹).

V/V_c	d_s/D تحقیق حاضر	d_s/D رابطه دی
۰/۹۴	۱/۶۲	۱/۵۸
۰/۸۱	۱/۴۷	۱/۳۵

مقایسه عملکرد دو مدل طوقه بر مبنای پیش‌آمدگی طوق

مطابق شکل ۹ با افزایش ابعاد طوقه نامتقارن عملکرد طوقه (درصد کاهش آبشستگی) در تشکیل الگوی آبشستگی پیرامون پایه پل افزایش یافته است. در اشکال (الف) و (ب) کارایی طوقه‌های نامتقارن طولی و مشبک در مقابل تغییر ابعاد آن‌ها به ترتیب در اعداد فرود ۰/۳۷ و ۰/۳۲ نشان داده شده است. با افزایش درصد پیش‌آمدگی طوقه در راستای طولی از مرکز پایه پل از ۴۱ درصد به ۷۵ درصد مطابق شکل ۴ تغییر محسوسی در میزان عملکرد طوقه (%R) مطابق رابطه ۴ ایجاد کرده است. این نکته نشان می‌دهد، که طوقه‌های نامتقارن (3×6) نسبت به طوقه‌های نامتقارن (3×4) در کاهش آبشستگی موثرتر بوده است. بدین معنا که گرداب‌های اولیه در نزدیکی دیواره پایه پل قدرت بالایی دارند، اما بعلاوه داخل لایه مرزی ناشی از حضور طوق؛ برای محافظت بستر توانسته است، آبشستگی را به شکل قابل قبولی کاهش دهد. همانطور که در بخش تحلیل ابعادی گفته شد؛ در شکل ۹، (Z) تراز قرارگیری طوقه از سطح بستر می‌باشد.



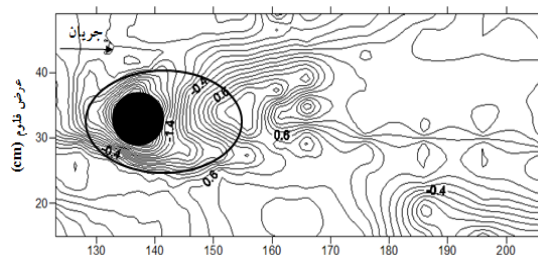
شکل ۸- الگوی آبشستگی در آزمایش شاهد (عدد فرود ۰/۳۷).

آزمایش‌ها با حضور طوقه‌های نامتقارن مشبک:

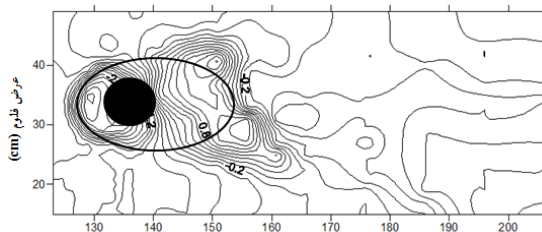
در تحقیق حاضر، ۶ طوقه نامتقارن مشبک مورد آزمایش قرار گرفت؛ و عملکرد طوقه‌های بیضوی (3×4) و (3×6) نامتقارن طولی و با ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد مشبک در فاصله 0.25D (۱ سانتی‌متر بالای سطح بستر) تحت اعداد فرود ۰/۳۷ و ۰/۳۲ بررسی شد. با نصب طوقه در اطراف پایه ابتدا آبشستگی در اثر وجود گرداب‌های برخاستگی در پائین‌دست پایه ایجاد گردید. در این حالت برخلاف حالت پایه بدون طوقه، گرداب نعل اسبی از ابتدا مشاهده نشد. با گذشت زمان در دو طرف پایه در لبه‌های طوق، شیارهایی ایجاد شدند. این شیارها به مرور به سمت بالادست و پائین

آبشستگی بویژه آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی^۱ جریان می‌باشد. در حالت نصب طوقه (3×4) نیز مشابه طوقه (3×6) الگوی فرسایش و رسوبگذاری مشابهی رخ داده است.

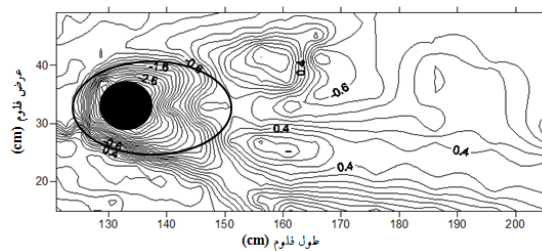
نصب طوقه ضمن کاهش کمتر عمق چاله آبشستگی از ارتفاع رسوبات نهشته شده در پائین دست نیز کاسته است. شکل ۱۱ نصب طوقه (3×4) در تراز 0.25D از بستر رسوبی در عدد فرود 0.37 را نشان می‌دهد. طوقه ۱۵ درصد مشبک بیشترین میزان کاهش آبشستگی را دارا می‌باشد.



(الف)



(ب)

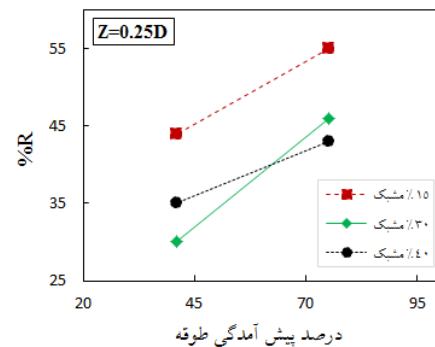


(ج)

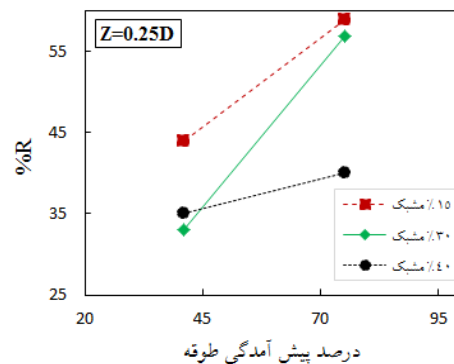
شکل ۱۱- الگوی آبشستگی با حضور طوقه (3×6) در

فاصله 0.25D از بستر رسوبی در عدد فرود 0.37

(الف) ۱۵٪ مشبک (ب) ۳۰٪ مشبک (ج) ۴۰٪ مشبک.



(الف)



(ب)

شکل ۹- کارایی طوقه‌های نامتقارن مشبک در مقابل تغییر ابعاد آن‌ها.

(الف) عدد فرود 0.37 (ب) عدد فرود 0.32

تأثیر نامتقارنی بر عملکرد طوقه‌ها

با نصب طوقه در فاصله 0.25D از بستر رسوبی در عدد فرود 0.32 مطابق با شکل ۱۰ رسوبات دارای توزیع یکنواخت‌تری نسبت به آزمایش شاهد شده‌اند.

نصب طوقه ضمن کاهش حداکثر عمق آبشستگی در جلوی پایه پل از ارتفاع رسوبات نهشته شده نیز کاسته است.

نکته دیگر اینکه رسوبات تا فاصله قابل توجهی در پائین دست تپه‌های رسوبی وجود ندارند، عدم تشکیل تپه‌های رسوبی در اطراف پایه در وضعیت نصب طوقه یکی از محاسن نصب طوقه می‌باشد؛ چرا که توزیع نامناسب رسوبات و وجود تپه‌های رسوبی باعث انسداد جریان در بین پایه‌های پل شده که خود به نوعی مسبب

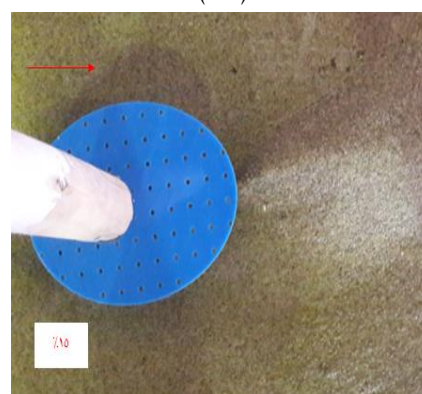
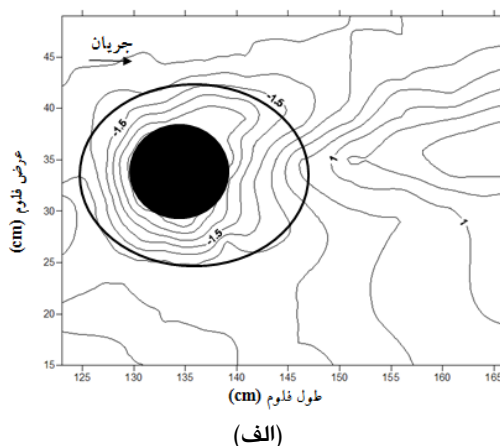
مقایسه نتایج آزمایش‌های طوقه‌های نامتقارن

مشبک: $(3 \times 4) / (3 \times 6)$

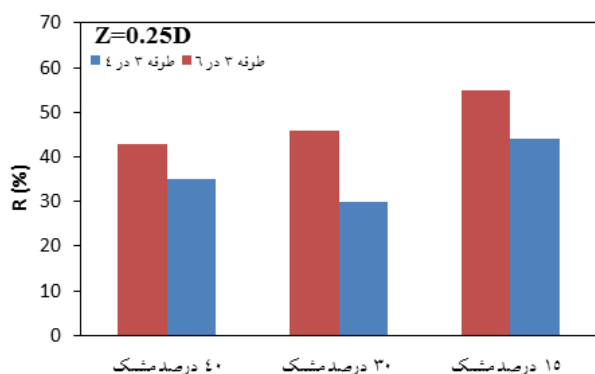
در کلیه آزمایش‌های انجام شده با حضور طوقه از میزان تشکیل حفره آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد طبق جدول ۵ و بر مبنای رابطه ۴ تحت عنوان درصد کاهش آبشستگی، کاسته شده است.

با توجه به نتایج می‌توان گفت که طوقه‌های نامتقارن (3×6) نسبت به طوقه‌های (3×4) در کاهش آبشستگی موثرتر بوده است (شکل ۱۲). بررسی مکانیزم جریان پیرامون پایه نشان می‌دهد، که در پائین‌دست پایه پل گردابه‌های برخاستگی با مراکز کم-فشار به جهت رسوب‌گذاری نهشته‌های رسوبی فعال هستند.

بنابراین به نظر می‌رسد طوقه‌های (3×6) مانع از فعالیت بخشی از این گرداب‌ها شده، در حالی که در طوقه‌های (3×4) این گرداب‌ها قادر به فعالیت بیشتری هستند، که این امر موجب افزایش عملکرد طوقه نامتقارن (3×6) می‌باشد. در شکل ۱۳ نیز پروفیل طولی رسوبات پیرامون پایه در وضعیت با و بدون طوقه در عدد فرود 0.37 نشان داده شده است.

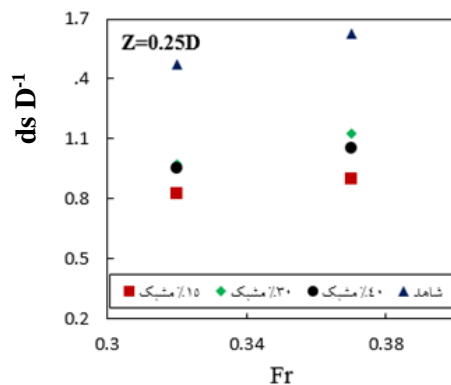


شکل ۱۱- الف) الگوی آبشستگی ب) توپوگرافی بستر با حضور طوقه ۱۵٪ مشبک در فاصله $0.25D$ از بستر رسوبی.



شکل ۱۲- راندمان کاهش آبشستگی با حضور طوقه در عدد فرود 0.37 .

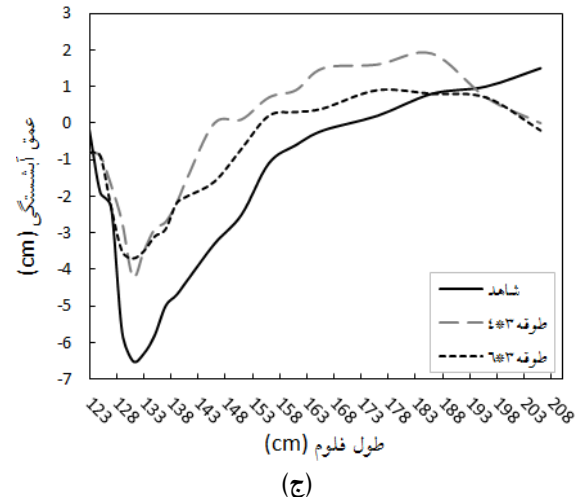
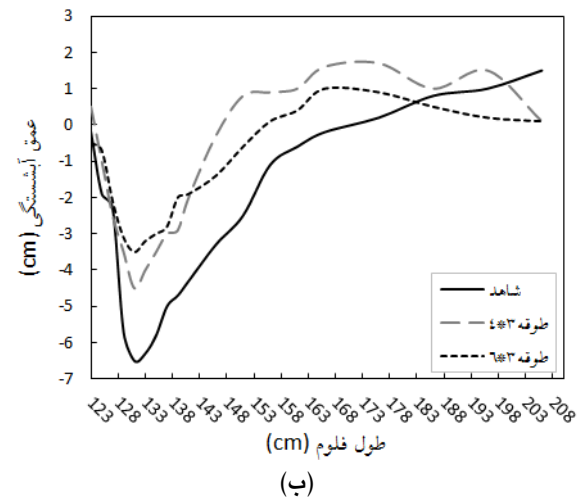
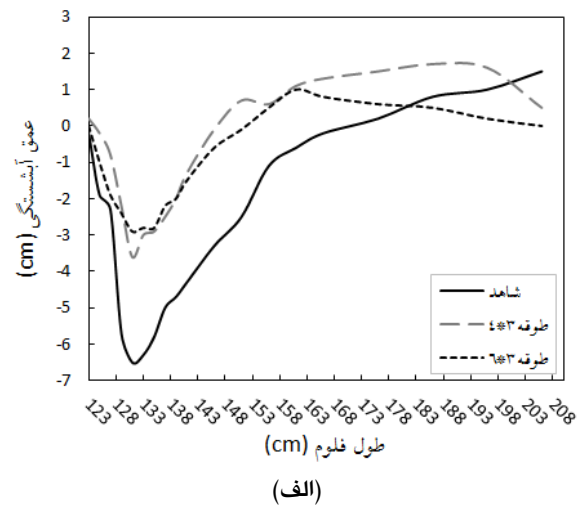
بطور کلی با افزایش عدد فرود جریان و در نتیجه افزایش قدرت جریانات گردابه‌ای راندمان استفاده از طوقه‌ها در ترازهای متفاوت کاهش یافت. شکل (۱۴) تغییرات بی‌بعد حداکثر عمق آبشستگی در مقابل تغییرات عدد فرود جریان را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین اعماق آبشستگی نسبت به آزمایش‌های شاهد در کلیه اعداد فرود مربوط به طوقه ۳۰ درصد مشبک است. در عدد فرود ۰/۳۲ کمترین عمق مربوط به طوقه ۱۵ درصد مشبک می‌باشد. تغییرات عمق بی‌بعد آبشستگی برای این طوقه نسبت به سایر طوقه‌ها کمتر است، که نشان دهنده تأثیر مثبت طوقه ۱۵ درصد مشبک بر کاهش آبشستگی در شدت‌های بالای جریان است.



شکل ۱۴- تغییرات عمق بی‌بعد آبشستگی با تغییر عدد فرود جریان.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر، عملکرد دو مدل طوقه (۳×۶) و (۳×۴) در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، که افزایش ابعاد طوقه عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. در حالت نصب طوقه رسوبات پیرامون پایه توزیع یکنواختی دارند و اختلاف بین گودترین و مرتفع‌ترین نقاط بستر به بیش از ۵۰ درصد حالت بدون طوقه کاهش می‌یابد. در عدد فرود ۰/۳۷ طوقه (۳×۴) با ۴۱ درصد پیش-



شکل ۱۳- پروفیل طولی رسوبات بستر پیرامون پایه در آزمایش طوقه و آزمایش شاهد. (الف) ۱۵٪ مشبک، (ب) ۳۰٪ مشبک و (ج) ۴۰٪ مشبک.

محدوده گرداب توسط طوقه کنترل می‌شود، عملکرد آن‌ها نسبت به طوقه (3×4) بیشتر می‌باشد و بنابراین در صورت استفاده از این طوقه بعنوان سازه کنترل آبشستگی مناسب معرفی می‌شود.

آمدگی در راستای طولی به سمت پایین دست؛ حداکثر ۴۴ درصد کنترل کاهش آبشستگی را بهبود می‌بخشد، که در همین عدد فرود طوقه (3×6) با ۷۵ درصد پیش-آمدگی حداکثر ۵۵ درصد به عملکرد طوقه در کاهش آبشستگی کمک می‌کند.

بررسی طوقه‌های با ابعاد بزرگتر نشان داد که در طوقه‌های (3×6) به دلیل اینکه بخش زیادی از

منابع مورد استفاده

- Alam Z, 2012. The effect of lattice crown in reducing scour of bridge support. M.Sc. Thesis. Department of River Engineering, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract).
- Anonymous, 2012. Report of the National Roads and Transportation Organization on the Stability of Bridges, Tehran. (In Persian)
- Balouchi M, 2010. Scour Controlling Around Bridge Piers by Changing the Shape of Collar. VDM publishing, Germany.
- Bakhshpuri K and Yahyaei S, 2016. Evaluation of collar performance in reducing the depth of scour of the bridge base. National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, Iran. (In Persian with English abstract).
- Chow VT, 1989. Hand book of Applied Hydrology. Mc Graw Hill Book Co, New York.
- Chiew YM and Melville BW, 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 15-26.
- Dargahi B, 1990. Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(10): 1197-1214.
- Defanti E, Dipasquale G and Poggi D, 2010. An experimental study of scour at bridge piers: collars as a counter measure, P.6. In proceedings of the 1st European Congress IAHR, Edinburg. UK.
- Dey S, 2009. Maximum scour depth at pier in around beds. *Journal of Civil Engineering*. 13(2): 137-142.
- Gogus M and Dogan A, 2013. Effect of collars on scour reduction at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 15(2): 130-140.
- Izadinia E and Heidarpour M, 2016. Simultaneous use of cable and collar to prevent local scouring around bridge pier. *International Journal of Sediment Research* 27(5): 394-401.
- Jalili A, 2014. The effect of using mesh crown on scouring of bridge foundations. M.Sc. Thesis, Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian with English abstract).
- Kayaturk SY, 2005. Scour and scour protection at bridge abutment. PhD. Thesis, Middle East Technical University.
- Khademi Kh, Khozaymeh Nezhad H and Shafaei Bajestan M, 2010. Irregular harvesting of riverine materials in Khuzestan province. Third National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management. Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract).
- Khozaymeh Nezhad H, Ghomeshi M and Shafai Bejestan M, 2012. Investigation of collar in different sizes and bed level as a bridge abutment scour countermeasure. *Ecology Environment and Conservation* 18(4): 963-966.

- Khozeymeh Nezhad H and Ghomeshi M, 2013. Comparison of symmetrical and unsymmetrical rectangular collars on scour reduction of bridge abutment. *Middle East Journal of Scientific Research* 18(8): 1099-1104.
- Khosravi Nia P, Hosseinzadeh Dalir AS, Farsadizadeh D and Fakheri Fard B, 2010. The effect of collar in reducing scour around the breakwaters. *Water and Soil Science- University of Tabriz*. (In Persian with English abstract).
- Melville BW, 1997. Pier and abutment scour. Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(2): 125-136.
- Monocad MAT, Aguirre-pe J, Bolivar JG and Flores EJ, 2009. Scour protection of circular bridge pier with collars and slots. *Journal of Hydraulic Research* 47(1): 119-126.
- Neill CR, 1973. *Guide to Bridge*. Hydraulic University of Toronto Press. Toronto, Canada.
- Raudkivi A, 1999. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(3): 338-350.
- Samer M, 1993. Time development of local scour at bridge pier. MSc. Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- Sani Khani H, Hosseinzadeh Dalir AS and Farsadizadeh D, 2008. Application of rectangular and circular collars in reducing scouring of bridge piers. *Journal of Agricultural Science* 7 (4): 1-16. (In Persian with English abstract).
- Singh CP, Setia B and Verma DVS, 2009. Collar-Sleeve combination as a scour protection device around a circular pier. *Proceedings of 29th congress on Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery*, September, Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing, China.