

مقایسه عملکرد طوقه‌های مستطیلی متقارن و نامتقارن در کاهش آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل

حسین خزیمه نژاد^۱، مهدی قمشی^۲ و محمود شفاعی جبستان^۳

*۱- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دانشگاه شهید چمران و استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند Hkhozeymeh@birjand.ac.ir

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

۳- استاد دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۱۶

چکیده

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص شناخت مکانیسم آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی به خصوص پل‌ها انجام شده و روش‌هایی نیز جهت کنترل یا کاهش آبشستگی در اطراف آن‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. در زمینه‌ی آبشستگی اطراف پل‌ها تمرکز تحقیقات بیشتر بر روی پایه بوده است تا تکیه‌گاه، در حالی که بررسی آمار موجود بر روی شکست پل‌ها نشان می‌دهد که بیشتر مشکلات، مربوط به تکیه‌گاه بوده و در نتیجه هزینه‌های بیشتری نیز در این بخش صرف شده است. یکی از روش‌های کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه استفاده از طوقه است. طوقه صفحه‌ای تخت با ضخامت کم است که در اطراف پایه یا تکیه‌گاه نصب می‌شود. در تحقیق حاضر با انجام ۹۳ آزمایش تأثیر ابعاد مختلف طوقه‌های متقارن و نامتقارن بر روی کاهش آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل بررسی شد، علاوه بر این عملکرد آن‌ها نیز مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد هر دو نوع طوقه، بر عملکرد آن‌ها افزوده می‌شود. با مقایسه‌ی دو نوع طوقه مشخص شد که اگر عرض طوقه‌ی نامتقارن در بالادست نسبت به عرض آن در پایین‌دست تکیه‌گاه بزرگ‌تر باشد، نسبت به طوقه‌ی متقارن هم مساحت خود از عملکرد بهتری برخوردار خواهد بود. هم‌چنین تأثیر تراز نصب طوقه در حالت متقارن نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از عملکرد بهتر طوقه‌های زیر بستر نسبت به طوقه‌های روی بستر و بالاتر از بستر بود.

کلید واژه‌ها: آبشستگی، پایداری پل، تکیه‌گاه، طوقه

Comparison of Symmetrical and Unsymmetrical Rectangular Collars on Reduction of Local Scour at Bridge Abutment

H. Khozeime Nezhad¹, M. Ghomsh² and M. Shafai Bejestan³

- 1- Former Ph.D. Student of Shahid Chamran University and Assistant Professor, University of Birjand, Birjand, Iran.
- 2- Department of hydraulic structures, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.
- 3- Department of hydraulic structures, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

Received: 6 June 2012

Accepted: 18 Sep. 2012

Abstract

Already many studies have been done on the mechanism of scour around hydraulic structure especially bridges and methods for control or reduction of scour around them have been investigated and evaluated. In the field of scour around bridges, researches are more focus on scour of piers in compare with abutment. While the review of available information on the bridge required cost, the major problems are related to abutment. There fore most costs has spent in this part. One of the methods used to reduction of scour is collar. Collar is the flat plate with small thickness that can be installed around the piers or abutment. In this research 93 set of

experiments are performed to find the effect of different dimensions of symmetrical and unsymmetrical collars on reduction of scour around bridge abutment. Results show that increasing dimensions of both collars will increase the efficiency of performance. Comparing of both collars indicated, when the upstream width of collar was larger than its downstream width, its performance will be better than the symmetrical collar with uniform area. The influences of installing elevation of symmetrical collars were also investigated. The results show that the collars installed below the bed level have less scour in compare with the one installed on the bed or above the bed.

Keywords: Scour, Bridge stability, Abutment, Collar

مقدمه

مطالعات نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین دلایل تخریب پل‌ها پدیده‌ی آبشستگی است که علاوه بر تلفات جانبی، هزینه‌های زیادی را به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر کشورها تحمیل می‌کند. مطالعات انجام شده بر روی شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده نشان می‌دهد که در ۲۵ درصد آن‌ها تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب تکیه‌گاه، علت شکست پل بوده است (ملویل^۱، ۱۹۹۲). بر طبق مطالعات ایشان، از ۱۰۸ مورد شکست پل که در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۴ در نیویورک رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل بود. همچنین خاطر نشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌های شکست پل در نیویورک ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است.

مکانیسم جریان در اطراف تکیه‌گاه‌ها

تحقیقات در زمینه‌ی مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها توسط وانگ^۲ (۱۹۸۲)، تی^۳ (۱۹۸۴)، کوان^۴ (۱۹۸۴ و ۱۹۸۸)، کانداسمی^۵ (۱۹۸۵ و ۱۹۸۹)، دانگل^۶ (۱۹۹۴) و بسیاری دیگر نشان داده است که مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به مکانیسم آبشستگی در پایه پل‌ها است. جریان پایین‌رونده و گرداب اصلی در گوشه‌ی بالادست تکیه‌گاه پل، همراه با گرداب ثانویه و گرداب برخاستگی در قسمت میانی و گوشه‌ی انتهایی تکیه‌گاه پل باعث ایجاد فعل و انفعال پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها است. دیدن الگوی جریان اطراف تکیه‌گاه با استفاده از روش‌های بصری جریان توسط دستگاه‌های جت رنگ^۷، تزریق بلور رنگی^۸، کاغذ شناور^۹ و تونل دود^{۱۰} توسط

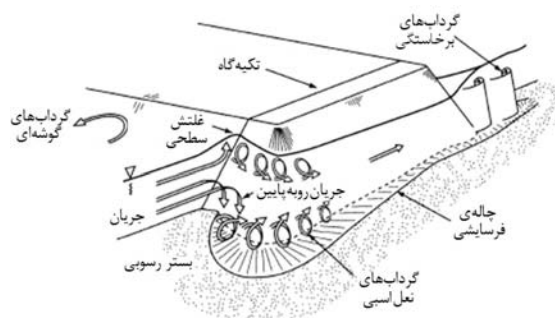
بسیاری از محققان از جمله لیو و همکاران^{۱۱} (۱۹۶۱) و گیل^{۱۲} (۱۹۷۰) انجام شده است. در شکل (۱) میدان جریان پیرامون تکیه‌گاه پل نشان داده شده است.

کاربرد طوقه جهت کاهش آبشستگی

طوقه صفحه‌ای است که در ارتفاعات مختلف پایه‌ی پل و معمولاً نزدیک بستر در اطراف پایه قرار می‌گیرد. این صفحه‌ی محافظ به صورت یک سطح صاف و دارای ضخامت ناچیز است که در کاهش توسعه‌ی آبشستگی موثر می‌باشد. طوقه نباید خیلی ضخیم باشد، چرا که ضخامت زیاد طوقه، سبب ایجاد مانع در برابر جریان شده و آبشستگی را افزایش می‌دهد. یک طوقه که در هر سطحی نسبت به بستر نصب می‌شود، جریان را به دو ناحیه‌ی بالا و پایین طوقه تقسیم می‌کند. ناحیه‌ی بالای طوقه به عنوان یک مانع در مقابل جریان رو به پایین عمل کرده و قدرت جریان رو به پایین را در اثر برخورد با طوقه کاهش می‌دهد. در ناحیه‌ی پایین طوقه، قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد. کارایی یک طوقه به اندازه و محل قرارگیری آن بر روی پایه نسبت به بستر، بستگی دارد. موقعی که طوقه برای محافظت از آبشستگی روی پایه نصب می‌شود، جریان رو به پایین در حین برخورد به طوقه از بستر منحرف شده و جلوی آبشستگی گرفته می‌شود. تحقیقات انجام شده تقریباً همگی در زمینه‌ی تأثیر طوقه بر کاهش یا کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل بوده است و تقریباً می‌توان گفت در زمینه‌ی تأثیر طوقه بر کاهش یا کنترل آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های پل مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در ادامه بخشی از تحقیقات انجام شده در خصوص تأثیر طوقه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های پل مورد بررسی قرار گرفته است.

- 1- Melville
- 2- Wong
- 3- Tey
- 4- Kwan
- 5- Kandasamy
- 6- Dongol
- 7- Dye Injection
- 8- Dye Crystals
- 9- Paper Floats
- 10- Smoke Tunnel

- 11- Liu et al.
- 12- Gill



شکل ۱- میدان جریان پیرامون یک تکیه‌گاه پل

پایه با قرارگیری در سطح بستر به ترتیب ۵۰، ۶۸ و ۱۰۰ درصد میزان آبستتگی را در مقایسه با پایه‌ی بدون طوقه کاهش دادند. زراتی و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر طوقه بر کاهش آبستتگی اطراف پایه‌های مستطیلی با سه نوع زاویه قرارگیری پایه نسبت به جریان ۰، ۵ و ۱۰ درجه را ارزیابی کردند و دریافتند که هرچه طوقه عریض‌تر و ارتفاع آن نسبت به بستر کمتر باشد عملکرد بهتری خواهد داشت، هم‌چنین کارایی طوقه با افزایش زاویه‌ی قرارگیری پایه نسبت به جریان کاهش می‌یابد.

در تحقیق دیگری زراتی و همکاران (۲۰۰۶) عملکرد طوقه‌های مستقل و پیوسته همراه با سنگ‌چین را در گروه پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیبی از یک طوقه پیوسته و سنگ‌چین منجر به کاهش عمق آبستتگی به میزان ۵۰ و ۶۰ درصد به ترتیب در جلو و پشت پایه می‌شود. هم‌چنین عملکرد طوقه‌های مستقل بر روی هر پایه بهتر از عملکرد یک طوقه پیوسته بر روی دو پایه بود. آن‌ها مشاهده کردند که کارایی طوقه بر روی یک پایه‌ی مستطیلی بیشتر از دو پایه در یک امتداد می‌باشد.

مونوکادا و همکاران^۴ (۲۰۰۹) به مطالعه‌ی عملکرد طوقه و شکاف در کاهش آبستتگی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از طوقه‌ای با عرض دو برابر قطر پایه می‌تواند آبستتگی را ۵۵ تا ۹۶ درصد کاهش دهد.

بلوچی و همکاران (۱۳۸۶) آزمایش‌هایی را به منظور بررسی اثر طوقه بر روند آبستتگی موضعی انجام دادند. طوقه‌های دایره‌ای مسطح به کار رفته عبارت بودند از: طوقه با دو و سه برابر قطر پایه و هم مرکز با پایه و طوقه با سه برابر قطر پایه و هم مرکز با پایه و ناهم مرکز با پایه. نتایج نشان داد که وجود طوقه موجب تأخیر در زمان تعادل و کاهش عمق آبستتگی می‌شود. طوقه با قطر دو و سه برابر قطر پایه روی بستر به ترتیب آبستتگی را ۱۴/۵۸ درصد و ۳۵ درصد کاهش داد.

چیو^۱ (۱۹۹۲) تأثیر طوقه‌های محافظ را در کاهش آبستتگی پایه‌ی پل مورد آزمایش قرار داد و با استفاده از طوقه به اندازه دو برابر قطر پایه، عمق آبستتگی به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت، هم‌چنین او اظهار داشت که طراحی و کاربرد درست طوقه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنگ‌چین در حل مشکلات آبستتگی موضعی پایه‌های پل باشد.

کومار و همکاران^۲ (۱۹۹۹) با انجام آزمایش‌هایی تأثیر طوقه را بر کاهش آبستتگی بررسی کردند. ایشان از پایه‌هایی استوانه‌ای شکل با قطر ۶۱ و ۱۱۲ میلی‌متر و پنج اندازه‌ی مختلف طوقه با شکل دایره‌ای برای کاهش آبستتگی استفاده کردند. مطالعات نشان داد که هر چه طوقه بزرگ‌تر باشد تأثیر بیشتری بر کاهش خسارت ناشی از آبستتگی خواهد داشت. آن‌ها با استفاده از تحلیل آزمایش‌ها معادله‌ی زیر را برای محاسبه‌ی میزان عمق آبستتگی ارائه کردند:

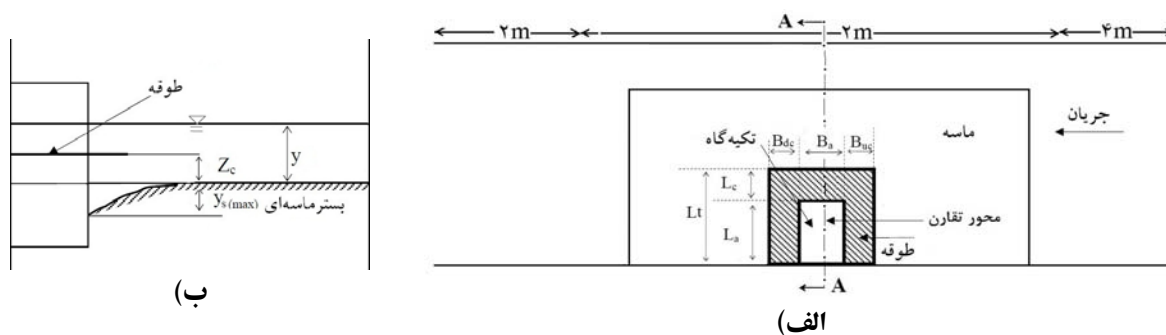
$$\frac{ds_p - ds_c}{ds_p} = 0.057 \left(\frac{B}{b}\right)^{1.612} \left(\frac{H}{y_0}\right)^{0.837} \quad (1)$$

که در آن ds_c : عمق آبستتگی پایه‌ی طوقه‌دار، ds_p : عمق آبستتگی پایه‌ی بدون طوقه، H : فاصله‌ی سطح طوقه تا سطح آب، y_0 : عمق جریان، B : قطر طوقه و b : عرض پایه است.

سینگ و همکاران^۳ (۲۰۰۱) نیز عملکرد طوقه‌ها را در کاهش آبستتگی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش حاکی از آن بود که چنانچه فاصله‌ی بین تراز بستر و تراز نصب طوقه افزایش یابد، حداکثر عمق آبستتگی افزایش می‌یابد. بهترین محل نصب طوقه در این آزمایش‌ها برابر $(D) \cdot 0.17D$ (قطر پایه) زیر سطح بستر بود که در این حالت طوقه به پهنای دو برابر قطر پایه میزان آبستتگی را به میزان ۹۱ درصد کاهش داد. طوقه‌ها به ابعاد ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر قطر

- 1- Chiew
- 2- Kumar et al.
- 3- Sing et al.

4- Monocada et al.



شکل ۲- شماتیک ساده‌ای از مقطع آزمایش (الف) پلان (ب) مقطع A-A

اندازه‌ی رسوبات در آزمایش‌های مربوط به پایه‌های پل، معیارهای متعددی ذکر شده است؛ به عنوان مثال طبق نظر رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای این که اندازه‌ی رسوب تأثیری بر آبستگي ایجاد نکند و از تشکیل فرم بستر نیز جلوگیری شود، بایستی نسبت قطر پایه به اندازه‌ی رسوب بیشتر از ۲۰ الی ۲۵ باشد. هر چند برای تکیه‌گاه شرایط تقریباً متفاوت است اما اندازه‌ی رسوب در نظر گرفته شده با این معیار مطابقت دارد. در شکل (۲) شماتیک ساده‌ای از موقعیت طوقه و تکیه‌گاه در محل آزمایش نشان داده شده است.

آب از طریق پمپ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه پمپاژ شده و به قسمت ابتدایی فلوم که بخش آرام‌کننده می‌باشد هدایت می‌شود. در انتهای فلوم دریچه‌ی کنترل جهت تنظیم عمق در رقوم مورد نظر قرار دارد. سپس آب وارد حوضچه‌ی آرامش می‌شود. در انتهای حوضچه‌ی آرامش، سریز مثلی ۵۳ درجه‌ی استاندارد قرار دارد که دبی جریان توسط آن اندازه‌گیری می‌شود. آب پس از عبور از سریز، مجدداً وارد مخزن زیرزمینی آزمایشگاه می‌شود و به این ترتیب یک جریان رفت و برگشتی در کل زمان آزمایش در فلوم برقرار می‌باشد.

به طور کلی آبستگي به دو نوع آبستگي در حالت آب زلال و آبستگي در حالت بستر زنده تقسیم می‌شود. در حالت آب زلال $0.3 < V/V_c < 1$ می‌باشد، که V : سرعت متوسط جریان و V_c : سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب می‌باشد و در حالت بستر زنده سرعت جریان بیشتر از سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات می‌باشد و از آنجایی که در این حالت رسوبات بالادست به درون حفره‌ی آبستگي ریزش می‌کنند از میزان آبستگي کاسته می‌شود، بنابراین حداکثر عمق آبستگي در شرایط آستانه‌ی حرکت رسوبات یعنی $V/V_c = 1$ رخ می‌دهد (ملویل، ۱۹۹۲). عطف به توضیحات مذکور، کلیه‌ی آزمایش‌ها در تحقیق حاضر در شرایط آب زلال انجام شد. آزمایش‌ها در چهار دبی ۰/۰۴، ۰/۰۳۶، ۰/۰۳۲ و ۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه انجام گردید، با توجه به این که در همه‌ی آزمایشات عمق جریان دارای مقدار ثابت ۰/۱۵ متر بود، لذا در دبی‌های مذکور

ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۸۷) عملکرد طوقه‌های مربعی شکل را در کاهش آبستگي در اطراف پایه‌های پل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد طوقه آبستگي کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که طوقه‌های مستطیلی در مقایسه با طوقه‌های دایره‌ای شکل، تأثیر بیشتری بر پراکنده‌سازی و تضعیف عملکرد گرداب‌های ایجاد شده در اطراف پایه داشتند. نتایج نشان داد که استفاده از طوقه در تراز زیر بستر نسبت به سایر ترازا تأثیر بیشتری دارد.

شریعی و همکاران (۱۳۸۸) عملکرد طوقه با هندسه‌های متفاوت مربعی و دایره‌ای در اطراف پایه‌ی پل استوانه‌ای در ترازاها مختلف نسبت به تراز بستر را مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد طوقه‌های زیر سطحی نسبت به موقعیت‌های دیگر قرارگیری بهتر است.

آنچه که در بررسی منابع مشخص است، این است که ابعاد طوقه و تراز نصب آن بر روی پایه در عملکرد طوقه تأثیر بسزایی دارند، با علم به این نکته و با توجه به این که تاکنون مطالعه و تحقیقی در خصوص تکیه‌گاه انجام نشده است، تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر ابعاد مختلف طوقه‌های متقارن و نامتقارن در شرایط مختلف جریان و مقایسه‌ی عملکرد آن‌ها در کاهش آبستگي اطراف تکیه‌گاه انجام گردید، ضمن این که تأثیر تراز نصب طوقه‌های متقارن در یکی از شرایط جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول ۸ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۶ متر و شیب ثابت ۰/۰۰۳ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی‌گلاس و به ضخامت یک سانتی‌متر تشکیل شده‌اند. در فاصله‌ی ۴ متری از ابتدای فلوم یک جعبه‌ی فلزی قرار گرفته که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب حدود ۰/۷، ۰/۳ و ۰/۳ متر می‌باشد. این باکس از یک نمونه رسوب یکنواخت دارای انحراف معیار هندسی ۱/۲، چگالی ۲/۶۵ و قطر متوسط ۰/۷۶ میلی‌متر پر شده است به نحوی که پس از پرشدن در تراز بستر کانال قرار می‌گیرد. در خصوص

های متقارن $Z_c, (B_{uc}=B_{dc}=B_c)$: فاصله عمودی طوقه نسبت به بستر ثابت، φ_2 : ضریب شکل طوقه، d_s : قطر رسوب، y_s و y_{sc} : عمق آبشستگی به ترتیب با طوقه و بدون طوقه (با توجه به این که حداکثر عمق آبشستگی بدون حضور طوقه در گوشه‌ی بالادست تکیه‌گاه اتفاق افتاد لذا همین نقطه برای برداشت عمق آبشستگی در هر دو حالت با طوقه و بدون طوقه به عنوان نقطه‌ی مبنا در تمامی آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت)، Q یا V : (دبی یا سرعت جریان)، g : شتاب جاذبه، ν : عمق جریان، α : زاویه برخورد جریان با تکیه‌گاه، ρ : جرم مخصوص آب، $(\rho_s - \rho)$: جرم مخصوص مستغرق ذره‌ی رسوب و μ : ضریب لزوجت دینامیکی می باشند. با به کار بردن تئوری باکینگهام رابطه‌ی (۲) به رابطه‌ی (۳) تبدیل خواهد شد:

$$\text{Pr} = f(L_c / L_a, B_{uc} / L_a, B_{dc} / L_a, Z_c / y, Fr, L_a / B, L_a / B_a, d_s / y, G_S, Re, \alpha, \varphi_1, \varphi_2) \quad (3)$$

که در آن:

Pr : درصد کاهش عمق آبشستگی است که مقدار آن از رابطه‌ی (۴) استخراج می‌گردد، Fr : عدد فرود جریان، G_S : چگالی ذرات رسوب و Re عدد رینولدز جریان می‌باشد و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

$$\text{Pr} = \frac{(y_s - y_{sc})}{y_s} \times 100 \quad (4)$$

از میان پارامترهای بی‌بعد در رابطه‌ی (۳)، L_a / B ، L_a / B_a ، d_s / y ، G_S ، α ، φ_1 و φ_2 ثابت در نظر گرفته شدند. همچنین در تمامی آزمایش‌ها، عدد رینولدز برای اطمینان از برقراری جریان متلاطم ($Re > 2000$) مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) پارامترهای بی‌بعد و مقادیرشان در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

به ترتیب چهار مقدار $0/95, 0/86, 0/76$ و $0/67$ برای پارامتر V/V_c در مقطع آزمایشی برقرار گردید. محدوده‌ی در نظر گرفته شده تقریباً بخش عمده‌ای از محدوده‌ی فرسایشی موضعی جریان اطراف تکیه‌گاه را پوشش می‌دهد.

در این تحقیق از تکیه‌گاه مستطیلی از جنس آهن گالوانیزه به طول $0/2$ و عرض $0/12$ متر استفاده گردید. طوقه‌های استفاده شده از جنس پلکسی‌گلاس و به ضخامت ۳ میلی‌متر انتخاب شدند. طوقه‌ها به شکل مستطیلی و نسبت به محور طولی تکیه‌گاه دارای دو وضعیت متقارن و نامتقارن می‌باشند.

در شروع هر آزمایش ابتدا فلوم با نرخ کم جریان پر خواهد شد، این امر به این دلیل است که جلوی فرسایش ناشی از جریان در ابتدای آزمایش گرفته شود، سپس دبی آب به آرامی زیاد شده تا به دبی مورد نظر برسد، پس از تنظیم دبی توسط سرریز مثلی، به وسیله‌ی دریچه‌ی کنترل، آب در عمق مورد نظر یعنی $0/15$ متر قرار می‌گیرد. سپس آزمایش به مدت زمان تعیین شده - در خصوص تعیین زمان آزمایش در بخش نتایج و بحث توضیح داده خواهد شد. - ادامه پیدا کرده و پس از اتمام آزمایش، آب به آرامی از فلوم خارج می‌گردد. در انتها حداکثر عمق آبشستگی و الگوی رسوب‌گذاری ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه به وسیله‌ی متر لیزری برداشت می‌گردد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر میزان آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مجهز به طوقه به شرح زیر است:

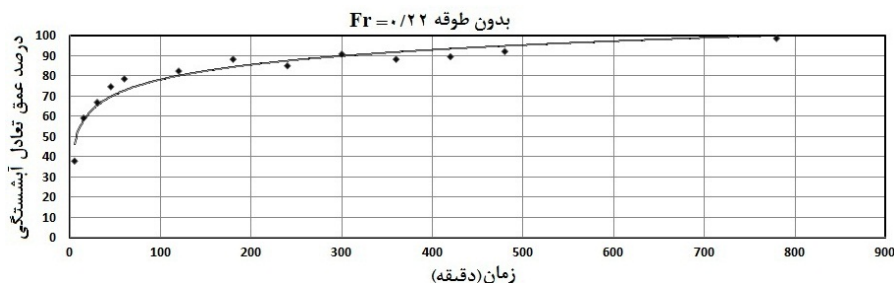
$$F(B, L_a, B_a, \varphi_1, L_c, B_{uc}, B_{dc}, Z_c, \varphi_2, d_s, y_s, y_{sc}, Q(V), g, y, \alpha, \rho, \rho_s - \rho, \mu) = 0 \quad (2)$$

که در آن:

B : عرض کانال، L_a : طول تکیه‌گاه، B_a : عرض تکیه‌گاه، φ_1 : ضریب شکل تکیه‌گاه، L_c : میزان پیش‌آمدگی طوقه در طول تکیه‌گاه، B_{uc} : میزان پیش‌آمدگی طوقه در عرض در بالادست تکیه‌گاه، B_{dc} : میزان پیش‌آمدگی طوقه در عرض در پایین‌دست تکیه‌گاه (در طوقه -

جدول ۱- پارامترهای بی‌بعد و مقادیر بررسی شده

پارامتر بی‌بعد	مقادیر مورد بررسی
L_c / L_a	$0/25, 0/375, 0/5, 0/625, 0/75, 1$
B_{uc} / L_a	$0/25, 0/375, 0/5, 0/75$
B_{dc} / L_a	$0, 0/25, 0/375, 0/5$
Z_c / y	$-0/2, -0/1, 0, 0/1, 0/2$
Fr	$0/15, 0/18, 0/2, 0/22$



شکل ۳- تغییر عمق آبستگي در مقابل زمان بدون حضور طوقه در شرایط $Fr = 0.22$

پس از تعیین سرعت آستانه‌ی حرکت، چهار آزمایش (برای هر عدد فرود یک آزمایش) به مدت زمان ۱۳ ساعت انجام گردید. در طول مدت آزمایش در زمان‌های مختلف عمق آبستگي در نقطه‌ی مینا برداشت گردید. با فرض این که در زمان ۱۳ ساعت ۹۹ درصد عمق تعادل آبستگي اتفاق بیفتد لذا عمق آبستگي در زمان‌های مختلف به درصد عمق تعادل آبستگي تبدیل شد. در شکل (۳) نتایج یکی از این آزمایش‌ها نشان داده شده است.

در شکل (۳) محور عمودی، درصد عمق تعادل آبستگي و محور افقی زمان آزمایش می‌باشد. در تمامی این آزمایش‌ها، شروع آبستگي از گوشه‌ی بالادست تکیه‌گاه بود، در ابتدا به سرعت بر عمق آبستگي افزوده شد، به طوری که مطابق شکل (۳) در یک ساعت اول آزمایش حدود ۷۹ درصد عمق آبستگي اتفاق افتاد، پس از آن میزان آبستگي به تدریج کاهش پیدا کرد. از ساعت سوم به بعد، مقدار بسیار کمی بر عمق آبستگي افزوده شد. در طول آزمایش، رسوبات از دیواره چاله‌ی آبستگي به درون چاله ریزش کرده و پس از حمل درون آن به پشته‌ی رسوب پایین دست افزوده می‌شدند. پشته‌ی رسوبی به تدریج به سمت پایین دست حرکت کرده و به این ترتیب توسعه‌ی چاله‌ی آبستگي در طول زمان آزمایش مرتباً ادامه پیدا می‌کرد. در تحقیق حاضر فرض بر این بود که ۹۹ درصد عمق تعادل آبستگي (عمق نهایی آبستگي) در مدت زمان سیزده ساعت اتفاق می‌افتد. در این صورت مطابق شکل (۳) حدود ۹۱ درصد عمق تعادل آبستگي در مدت زمان ۵ ساعت اتفاق می‌افتد و با توجه به این که در تحقیق حاضر، هدف بررسی تأثیر ابعاد طوقه‌های مختلف و همچنین تأثیر تراز نصب طوقه می‌باشد با مقایسه‌ی نتایج آزمایشات مختلف فراهم می‌شود، لذا مدت زمان ۵ ساعت به عنوان زمان آزمایش برای تمامی آزمایش‌ها انتخاب گردید. برای ۳ آزمایش دیگر نیز نمودارهایی مشابه نمودار شکل (۳) استخراج گردید. در سه آزمایش دیگر با اعداد فرود 0.20 ، 0.18 و 0.15 در زمان ۵ ساعت به ترتیب ۹۲، ۹۴ و ۹۶ درصد عمق تعادل آبستگي اتفاق افتاد. یکی دیگر از نکاتی که در نتایج این سری از آزمایشات شاهد نهفته است، این است که با کاهش عدد فرود، زمان رسیدن به عمق تعادل آبستگي کاهش می‌یابد.

در جدول (۱) اعداد فرود 0.22 ، 0.2 ، 0.18 و 0.15 به ترتیب مربوط به شرایط V/V_c برابر 0.95 ، 0.86 ، 0.76 و 0.67 می‌باشند.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تحقیق حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج در چهار بخش ارائه شده‌اند: بخش اول مربوط به نتایج آزمایش‌های شاهد است که بدون حضور طوقه انجام گردید. بخش دوم نتایج آزمایش‌های مربوط به طوقه‌های متقارن، بخش سوم طوقه‌های نامتقارن و در بخش چهارم نیز تأثیر تراز نصب طوقه در حالت متقارن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

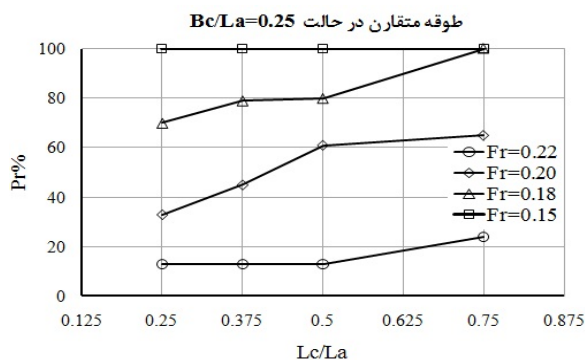
نتایج آزمایش‌های بدون حضور طوقه (آزمایش‌های شاهد)

در این مرحله ابتدا سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب، بدون حضور تکیه‌گاه تعیین شد. یکی از روش‌های تعیین سرعت آستانه‌ی حرکت، استفاده از سرعت بحرانی است. سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان، در چند مرحله محاسبه گردید. مقدار سرعت آستانه‌ی حرکت برابر 0.28 متر بر ثانیه تعیین شد. درستی مقدار تعیین شده برای سرعت آستانه‌ی حرکت با تعدادی از روابط تجربی مقایسه شد. از جمله‌ی این روابط تجربی رابطه‌ی نیل است؛ نیل [به نقل از ارونقی و همکاران، ۱۳۸۸] برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی رابطه‌ی زیر را مطرح کرده است.

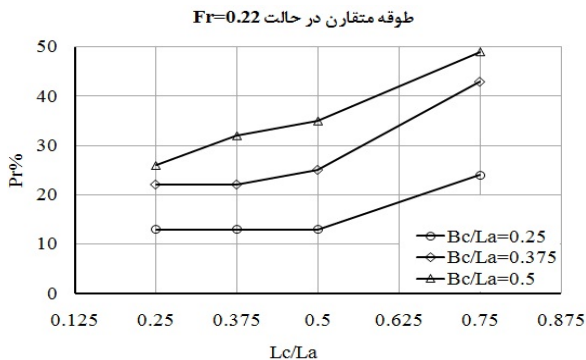
$$V_c = 31.08 K_u \theta_c^{1/2} y^{1/6} d_{50}^{1/3} \quad (5)$$

که در آن:

V_c : سرعت بحرانی بر حسب متر بر ثانیه، y : عمق آب بر حسب متر، d_{50} اندازه‌ی متوسط ذرات بر حسب متر و K_u : ضریب ثابتی است که مقدار آن در سیستم متریک ۱ و در سیستم انگلیسی $1/81$ می‌باشد. θ_c : پارامتر شیلدز بحرانی است که از دیاگرام شیلدز قابل محاسبه است.



(ب)



(الف)

شکل ۴- تأثیر ابعاد طوقه‌های متقارن بر کاهش آبستگي اطراف تکیه‌گاه

(الف) در حالت $Fr = 0.22$ برای همهی طوقه‌ها (ب) در حالت $B_c / L_a = 0.25$ برای همهی اعداد فرود

در این آزمایش‌ها، آبستگي از گوشه‌ی بالادست طوقه شروع شده و به تدریج به زیر طوقه توسعه یافته و به تکیه‌گاه نزدیک می‌شود. ابعاد طوقه نقش بسزایی در توسعه‌ی آبستگي در زیر طوقه دارد. همان‌گونه که در شکل (۴-الف) ملاحظه می‌شود با افزایش ابعاد طوقه، عمق آبستگي کاهش می‌یابد. در مقادیر پایین B_c/L_a ، افزایش L_c/L_a تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش آبستگي ندارد اما برای همهی مقادیر L_c/L_a پارامتر B_c/L_a موثر بوده و افزایش آن تأثیر بسیار مثبتی در کاهش آبستگي ایفا می‌کند که این نکته نشان از تأثیر بیشتر بعد B_c نسبت به L_c می‌باشد. در شکل (۴-ب) تأثیر ابعاد طوقه در اعداد فرود متفاوت در کاهش آبستگي اطراف تکیه‌گاه در حالت $B_c / L_a = 0.25$ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، با کاهش عدد فرود، عملکرد طوقه افزایش می‌یابد.

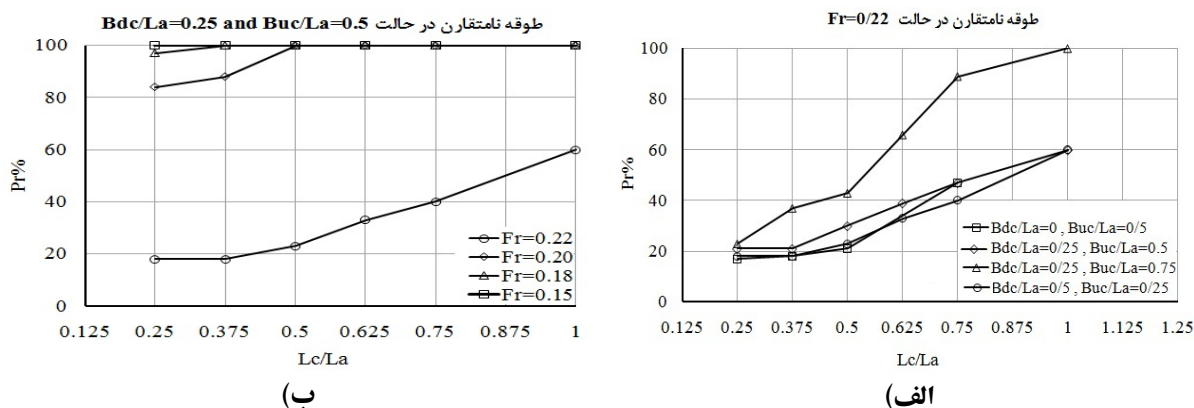
نتایج آزمایش‌های مربوط به طوقه‌های نامتقارن

این طوقه‌ها نسبت به محور تقارن تکیه‌گاه از تقارن برخوردار نبوده یا به عبارتی عرض طوقه در بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه با هم برابر نمی‌باشد. در این تحقیق، تعداد ۲۲ طوقه‌ی نامتقارن با ابعاد مختلف (B_{uc}/L_a برابر ۰/۱۵ و ۰/۱۷۵ و B_{dc}/L_a برابر ۰ و ۰/۲۵ و ۰/۵ و L_c/L_a برابر ۰/۲۵، ۰/۳۷۵، ۰/۵، ۰/۶۲۵، ۰/۷۵ و ۱) در شرایط مختلف جریان (Fr برابر ۰/۱۵، ۰/۱۸، ۰/۲۰ و ۰/۲۲) در سطح بستر مورد آزمایش قرار گرفتند به طور کلی برای بررسی طوقه‌های نامتقارن تعداد ۴۱ آزمایش انجام گرفت. نمونه‌ای از نتایج آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است.

در مرحله‌ی دوم آزمایش‌های شاهد، چهار آزمایش دیگر به مدت زمان پنج ساعت برای چهار عدد فرود مختلف جریان انجام گردید و عمق آبستگي در نقطه‌ی مبنا، برداشت گردید. نتایج این چهار آزمایش برای مقایسه عملکرد طوقه‌ها به عنوان شاهد و مبنا مورد استفاده قرار گرفتند. الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش به وسیله‌ی متر لیزری برداشت گردید. همان‌طور که قبلاً گفته شد حداکثر عمق آبستگي در گوشه‌ی بالادست تکیه‌گاه اتفاق افتاد. جهت کاهش آبستگي دو نوع طوقه‌ی متقارن و نامتقارن با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

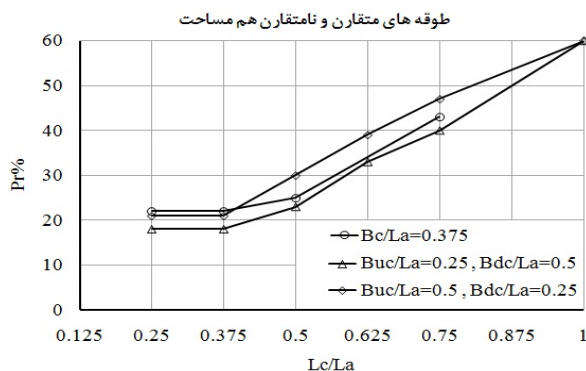
نتایج آزمایش‌های مربوط به طوقه‌های متقارن

محور طولی تکیه‌گاه مطابق شکل (۲) به عنوان محور تقارن معرفی و نوع طوقه به لحاظ متقارن و نامتقارن بودن بر اساس این محور مشخص گردید. تعداد ۱۲ طوقه‌ی متقارن با ابعاد مختلف (B_c/L_a برابر ۰/۲۵، ۰/۳۷۵ و ۰/۵ و L_c/L_a برابر ۰/۲۵، ۰/۳۷۵، ۰/۱۸، ۰/۲۰ و ۰/۲۲) روی سطح بستر مورد آزمایش قرار گرفتند، در هر کدام از شرایط جریان تعداد آزمایش‌ها متفاوت بود به عنوان مثال در $Fr = 0.22$ تعداد ۱۲ آزمایش انجام شد در حالی‌که در $Fr = 0.15$ نیاز به انجام همهی آزمایش‌ها نبود و با طوقه‌ای به ابعاد $B_c / L_a = L_c / L_a = 0.25$ که کوچک‌ترین طوقه بود، آبستگي به میزان ۱۰۰ درصد کنترل گردید. بنابراین نیاز به انجام آزمایش با طوقه‌های بزرگ‌تر نبود، برای سایر شرایط جریان نیز این نکته مد نظر قرار گرفت و به این ترتیب تعداد ۳۱ آزمایش در این مرحله انجام گرفت. نمونه‌ای از نتایج آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۵- تأثیر ابعاد طوقه‌های نامتقارن در کاهش آبستگی اطراف تکیه‌گاه

الف) در حالت $Fr = 0.22$ برای همه‌ی طوقه‌ها (ب) در حالت $B_{dc} / L_a = 0.25$ و $B_{uc} / L_a = 0.5$ برای همه‌ی اعداد فرود



شکل ۶- مقایسه‌ی عملکرد تعدادی از طوقه‌های متقارن و نامتقارن با مساحت یکسان

ایجاد می‌کند که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. مطابق شکل (۵-ب) در طوقه‌های نامتقارن نیز با کاهش عدد فرود، عملکرد طوقه افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی عملکرد طوقه‌های متقارن و نامتقارن

با توجه به توضیحاتی که در بخش قبلی در خصوص طوقه‌های نامتقارن داده شد، در صورتی که در یک طوقه‌ی نامتقارن، بعد بالادست طوقه (B_{uc}) نسبت به بعد پایین دست آن (B_{dc}) بزرگ‌تر باشد طوقه‌ی نامتقارن نسبت به طوقه‌ی متقارن هم مساحت خود از عملکرد بهتری برخوردار خواهد بود اما اگر وضعیت عکس این حالت باشد عملکرد طوقه متقارن بهتر خواهد بود. این نکته در شکل (۶) که به عنوان نمونه برای تعدادی از طوقه‌ها ترسیم شده نیز کاملاً مشهود است.

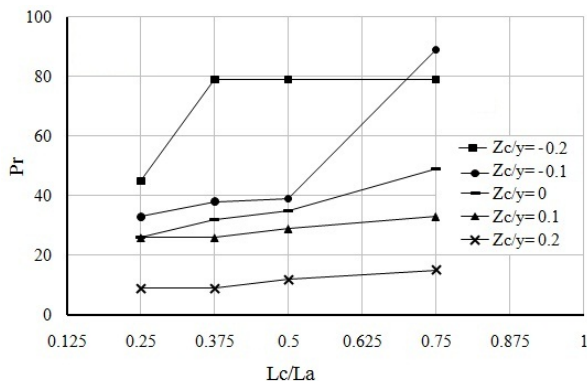
روند آبستگی در این طوقه‌ها نیز مشابه طوقه‌های متقارن است. در این طوقه‌ها نیز ابعاد طوقه نقش مهمی در کاهش آبستگی دارد، همان‌طور که در شکل (۵-الف) مشخص است بعد پایین دست طوقه (B_{dc}) نسبت به بعد بالادست طوقه (B_{uc}) تأثیر کمتری در کاهش آبستگی دارد. این نکته در خصوص مقادیر کوچک B_{dc} کاملاً واضح است چرا که افزایش B_{dc}/L_a از مقدار صفر به 0.25 تأثیر محسوسی در کاهش آبستگی ایجاد نکرده است. در حالی که در خصوص B_{uc} وضع به این صورت نیست و افزایش B_{uc}/L_a از مقدار 0.25 به 0.5 تأثیر قابل ملاحظه‌ای را در کاهش آبستگی ایجاد نموده است. با توجه به شکل (۵-الف) در خصوص مقایسه‌ی تأثیر ابعاد طوقه‌های نامتقارن، این نکته محرز است که بعد L_c موثرترین بعد طوقه و پس از آن B_{uc} و در نهایت B_{dc} می‌باشد که تقریباً تأثیر کمی در کاهش آبستگی ایفا می‌کند. این نکته در مقایسه‌ی طوقه‌های متقارن و نامتقارن وضعیت کاملاً دوگانه‌ای را

بالای بستر از عملکرد بهتری برخوردارند. در طوقه‌های زیر بستر، مصالح روی طوقه به سرعت شسته شده که در حقیقت جزئی از آبستتگی محسوب شده و بنابراین از این جهت، نصب طوقه در ترازهای پایین‌تر از عملکرد آن می‌کاهد. و این نکته در شکل (۷) با مقایسه‌ی طوقه در تراز (Z_c/y برابر -0.2 و -0.1) کاملاً مشهود است. در شکل (۸) نقش طوقه در کاهش عمق آبستتگی در اطراف تکیه‌گاه و انتقال چاله‌ی آبستتگی به نقطه‌ای دورتر از تکیه‌گاه به تصویر کشیده شده است. در این شکل الگوی فرسایش و رسوب-گذاری در حالت $Fr = 0.22$ بدون طوقه و برای طوقه با ابعاد $L_c / L_a = 0.75$ ، $B_c / L_a = 0.5$ در تراز $Z_c / y = -0.1$ نشان داده شده است.

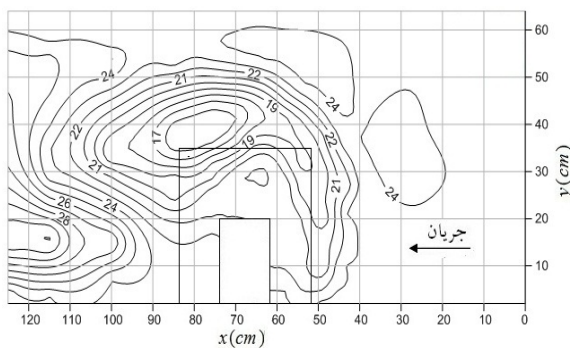
نتایج آزمایش‌های مربوط به تراز نصب طوقه

یکی از نکاتی که در خصوص طوقه مطرح است، تراز نصب طوقه می‌باشد، جهت بررسی این موضوع طوقه‌های متقارن $B_c / L_a = 0.5$ در چهار تراز مختلف غیر از بستر در حالت $Fr = 0.22$ مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج در شکل (۷) نشان داده شده است.

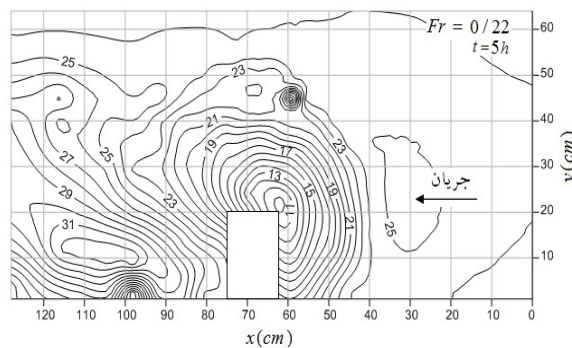
با توجه به شکل (۷) تراز نصب طوقه، تأثیر بسزایی در کاهش آبستتگی اطراف تکیه‌گاه دارد. هر چه تراز نصب طوقه نسبت به بستر کاهش یابد عملکرد طوقه افزایش می‌یابد. طوقه‌های بالای بستر تأثیر کمی در کاهش آبستتگی دارند که با افزایش فاصله از بستر تأثیر طوقه کمتر هم می‌شود که دلیل آن فعال شدن گرداب-های نعل اسبی می‌باشد که در طوقه‌های روی بستر تقریباً کنترل شده بودند. همچنین طوقه‌های زیر بستر نسبت به طوقه‌های بستر و



شکل ۷- تأثیر تراز نصب طوقه در کاهش آبستتگی اطراف تکیه‌گاه (طوقه‌ی متقارن در حالت $Fr = 0.22$ و $B_c / L_a = 0.5$)



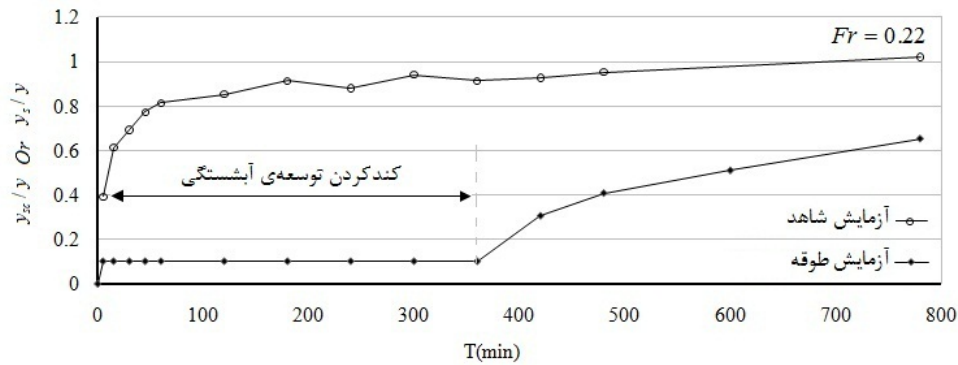
(ب)



(الف)

شکل ۸- الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش در اطراف تکیه‌گاه در شرایط $Fr = 0.22$

(الف) بدون طوقه (ب) مجهز به طوقه با ابعاد $L_c / L_a = 0.75$ و $B_c / L_a = 0.5$ در تراز $Z_c / y = -0.1$



شکل ۹- تأخیر در وقوع زمان تعادل و توسعهی آبهستگی توسط طوقه با ابعاد $B_c / L_a = 0.5$ و $L_c / L_a = 0.75$ در $Fr = 0.22$ تراز $Z_c / y = -0.1$ در شرایط

نتیجه‌گیری

با انجام ۳۱ آزمایش بر روی طوقه‌های متقارن و ۴۱ آزمایش بر روی طوقه‌های نامتقارن با ابعاد مختلف، مشخص گردید که طوقه یک سازه‌ی بسیار مؤثر جهت کاهش آبهستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها می‌باشد. نمودارهای کاربردی در خصوص تأثیر ابعاد هر دو نوع طوقه در شرایط مختلف جریان استخراج گردید. همچنین نتایج نشان داد که تأثیر عرض طوقه در بالادست بسیار مؤثرتر از دو بعد دیگر طوقه می‌باشد، عرض طوقه در پایین‌دست کم‌ترین تأثیر را در کاهش آبهستگی در میان ابعاد هر دو نوع طوقه دارد. به همین جهت طوقه‌ی نامتقارن هنگامی که عرض بالادست آن نسبت به پایین‌دست بزرگ‌تر باشد نسبت به طوقه‌ی هم‌مساحت خود عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. در حالت عکس، عملکرد طوقه‌ی متقارن بهتر خواهد بود. تراز نصب طوقه در کاهش آبهستگی اطراف تکیه‌گاه تأثیر بسزایی دارد. هر چه ارتفاع نصب طوقه افزایش می‌یابد از عملکرد آن کاسته می‌شود. با مقایسه‌ی ترازهای مختلف نصب طوقه، مشخص شد که طوقه‌های زیر بستر عملکرد بهتری دارند، اما بایستی توجه داشت در طوقه‌های زیر بستر میزان آبهستگی بالای طوقه نیز جزئی از آبهستگی محسوب می‌شود بنابراین پایین بردن طوقه با این رویکرد از عملکرد آن می‌کاهد. همچنین با انجام یک آزمایش طولانی‌مدت، نقش طوقه در کندکردن آبهستگی و به تأخیر انداختن زمان تعادل محرز گردید.

یکی دیگر از نکاتی که در خصوص طوقه قابل ذکر است و تقریباً در تمامی منابع به آن پرداخته شده است، نقش مؤثر طوقه در کندکردن توسعهی آبهستگی و به تعویق انداختن زمان تعادل می‌باشد. از آن‌جایی که معمولاً مدت زمان وقوع یک سیل به مراتب کوچک‌تر از زمان تعادل آبهستگی می‌باشد لذا این نکته یکی از مزایای طوقه به عنوان سازه‌ی کاهش‌دهنده‌ی فرسایش می‌باشد. شکل (۹) این نکته را تأیید می‌کند. در این شکل عمق بی‌بعد آبهستگی در آزمایش طوقه با ابعاد $B_c / L_a = 0.5$ و $L_c / L_a = 0.75$ در تراز $Z_c / y = -0.1$ در شرایط $Fr = 0.22$ در مدت زمان سیزده ساعت مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود تا زمان شش ساعت فقط همان میزان آبهستگی بالای طوقه که در همان ابتدای آزمایش اتفاق افتاد، رخ داده است، آبهستگی هر چند به زیر طوقه کشیده شده است اما هنوز به تکیه‌گاه و نقطه‌ی مبنا نرسیده است. پس از این ساعت آبهستگی به نقطه‌ی مبنا رسیده و به تدریج بر میزان عمق آبهستگی افزوده می‌شود و پس از آن شکل منحنی توسعهی عمق آبهستگی در آزمایش طوقه مشابه آزمایش بدون طوقه می‌گردد. آنچه که از بررسی شکل (۹) به دست می‌آید این است که در وضعیت بدون طوقه آبهستگی در زمان کوتاه‌تری به وضعیت تعادل رسیده و پس از زمان ۱۳ ساعت، منحنی تقریباً شیب ثابتی پیدا می‌کند، حال آن‌که با وجود طوقه در زمان ۱۳ ساعت نیز آبهستگی متوقف نشده و به نظر می‌رسد منحنی در زمان طولانی‌تری به شیب تقریباً ثابت خود برسد. با توجه به شکل (۹) مدت زمانی را که طوقه امنیت تکیه‌گاه را تأمین می‌کند نیز قابل استخراج است.

منابع

- ۱- ارونقی، ه.، فرسادی زاده، د.، حسین زاده دلیر، ع. و ا. فاخری فرد. ۱۳۸۸. تعیین ابعاد مناسب طوق مستطیلی در کاهش آبستنگی پایه پل. مجله دانش آب و خاک، ۱۹(۱): ۵۱ تا ۶۴.
- ۲- بلوچی، م.، چمنی، م.، ر. و م. ک. بیرامی. ۱۳۸۶. بررسی اثر تغییر شکل طوق بر روند و میزان آبستنگی موضعی. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
- ۳- ثانی خانی، ه.، حسین زاده دلیر، ع. و د. فرسادی زاده. ۱۳۸۷. عملکرد طوق‌های مربعی شکل کاهش آبستنگی در اطراف پایه‌های پل. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۴- شریعتی، ح.، خداشناس، س.ر. و ک. اسماعیلی. ۱۳۸۸. مقایسه عملکرد طوق مربعی و دایره‌ای در آبستنگی موضعی در پایه پل. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 5- Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 118(9): 1260-1269.
- 6- Dongol, D. M. S. 1994. Local scour at bridge abutments. Report No. 544, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 7- Gill, M. A. 1970. Bed erosion around obstructions in rivers. Ph.D. thesis, The University of London (Imperial College of Science and Technology).
- 8- Kandasamy, J. K. 1985. Local scour at skewed abutments. School of Engineering Report No. 375, University of Auckland.
- 9- Kandasamy, J. K. 1989. Abutment scour. Rep. No. 458, School of Engineering., University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- 10- Kumar, V., Ranga Raju, K. G. and N. Vittal. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(12): 1302-1305.
- 11- Kwan, F., 1984. Study of abutment scour. Report No. 328, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 12- Kwan, F., 1988. Study of abutment scour. Report No. 451, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 13- Liu, M. K., Chang, F. M. and M. M. Skinner. 1961. Effect of bridge construction on scour and backwater. Report No. CER60-HKL22, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- 14- Melville, B.W., 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 118(4): 615-631.
- 15- Monocad, M. A. T., Aguirre-Pe, J., Bolivar J. C. and E. J. Flores. 2009. Scour protection of circular bridge piers with collars and slots. *Journal of Hydraulic Research*, 47(1): 119-126
- 16- Raudkivi, A., and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(3): 338-350.

- 17- 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. Septamber 16-21, pp. 202-209.
- 18- Tey, C. B. 1984. Local scour at bridge abutments. Report No. 329, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 19- Wong, W. H. 1982. Scour at bridge abutments. Report No. 275, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- 20- Zarrati A. R., Gholami H. and M. B. Mashahir. 2004. Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 42(1): 97-103.
- 21- Zarrati, A. R., Nazariah, M. and M. B. Mashahir. 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge piergroups using collars and riprap. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(2): 154-162.