

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر طوق در کاهش عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های مستطیلی و دیوارباله‌ای\*

عبداله اردشیر<sup>(۱)</sup> روح‌اله چراغی<sup>(۲)</sup> حجت کریمی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های کناری پل، از عوامل مهم در واژگونی و تخریب پل‌ها به شمار می‌آید. روش‌های متعددی مانند سنگ چین جهت مهار و مقابله با آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها وجود دارد؛ یکی از روش‌های کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه، استفاده از طوق محافظ در اطراف آن می‌باشد. در این مطالعه، تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر (تراز بالاتر، روی بستر و تراز پایین‌تر از بستر)، شکل و اندازه طوق به صورت ضریبی از طول تکیه‌گاه ( $L_a$ ) در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در حالت آستانه حرکت ذرات بستر و در حالت آبشستگی آب زلال، با مصالح بستر یکنواخت و تا زمان رسیدن به زمان تعادل نسبی انجام شده است. در این تحقیق عملکرد طوق کامل و تکیه‌ای به عنوان محافظ بستر بر روی دو نوع تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای ۴۵ درجه بررسی شده است و در تمامی آزمایش‌ها از تکیه‌گاه کوتاه (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کوچکتر مساوی یک) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول طوق میزان آبشستگی کاهش می‌یابد و مهم‌ترین پارامتر موثر در کاهش آبشستگی، طول طوق می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی در بهترین حالت، کاهش عمق آبشستگی کناره تکیه‌گاه مستطیلی (طوق در تراز پایین‌تر از بستر) و دیوار باله‌ای (طوق در تراز بستر) برای طوق به طول  $2/25L_a$  به ترتیب برابر است با  $87/8\%$  و  $67/8\%$  درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** تکیه‌گاه پل، کاهش عمق آبشستگی، طوق، مدل آزمایشگاهی و هیدرولیک کانال‌های باز.

## Experimental Study of Effect of Collar on Local Scour Reduction around Vertical and 45° Wing wall Abutments

A. Ardeshir

R. Cheraghi

H. Karami

**Abstract** Local scour around the abutment is of utmost importance in bridge failures. Numerous methods such as riprap have been proposed to reduce the destructive effects of scouring; one of the ways to harness and reduce the local scour depth is installed protective collars around the abutment. In this paper effect of collar elevation (upper level, bed level and lower level), collar geometry and its size as a multiplier of the length of the abutment ( $L_a$ ) have been experimentally investigated. All experiments were performed at the threshold of bed material motion under clear-water conditions and uniform-sized bed material. In this study the full-collar and partial collar performance as a bed protective on the two types of abutments; vertical wall and 45° wing wall abutment were investigated. The abutment considered in all experiments was short (ratio of abutment length to approach flow depth less than unity). Results from the experiments indicate that by increasing the collar width the local scour reduced and the collar width is utmost importance parameter in scour depth reduction. The Experimental results presented show in the best case, percentage of scour depth reduction that around the vertical wall (collar at lower bed elevation) and wing wall abutment (collar at streambed elevation) which is 2.25 times wider than the abutment width, was obtained 87.8 and 67.8.

**Key Words** Abutment, Scour depth reduction, Collars, Experimental model and open channel hydraulics.

\*تاریخ تصویب مقاله ۹۰/۱۰/۲۷ و تاریخ دریافت نسخه نهایی اصلاح شده ۹۱/۴/۱۴

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و رئیس پژوهشکده محیط زیست دانشگاه امیرکبیر

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(۳) نویسنده‌ی مسؤل: استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

### مقدمه

خرابی پل از لحاظ اجتماعی و اقتصادی مسئله‌ی بسیار مهمی به شمار می‌آید و در طی چندین دهه گذشته در این زمینه مطالعات فراوانی انجام شده است. تخریب پل‌ها در نتیجه آب‌شستگی پی یا تکیه‌گاه پل‌ها موجب ترغیب روزافزون پژوهشگران برای مطالعه و بررسی پدیده آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل و ارائه روشهای کنترل و کاهش آب‌شستگی شده است. یکی از روش‌های ارائه شده، نصب طوق محافظ در مجاورت تکیه‌گاه می‌باشد و تحقیقات اندکی در زمینه تأثیر طوق در کاهش آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه انجام شده است. طوق یک ورقه فولادی دایره‌ای یا مستطیلی متصل به پایه یا تکیه‌گاه پل است که ممکن است در ترازهای مختلف از بستر نصب شود. طوق صفحه‌ای با ضخامت کم جهت ایجاد تغییر الگوی جریان اطراف تکیه‌گاه و در نتیجه کنترل ابعاد آب‌شستگی است. طوق با قرارگیری در اطراف تکیه‌گاه و یا پایه‌پل به عنوان مانعی در برابر جریان رو به پایین و گردابه‌های ایجاد شده، با تغییر الگوی جریان آب موجب کاهش عمق آب‌شستگی در این محدوده می‌شود.

در چندین دهه گذشته مطالعات بسیاری جهت شناخت مکانیزم، توسعه آب‌شستگی و پدیده آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه، توسط افرادی چون ملویل [1]، دی و همکاران [2]، ملویل و همکاران [3] و مولیناس و همکاران [4] انجام شده است. اکثر آزمایش‌هایی که در زمینه تأثیر طوق بر روی پایه‌پل مورد بررسی قرار گرفته، توسط افرادی چون چيو [5]، کومار و همکاران [6] و مشاهیر و همکاران [7,8] انجام شده است. چيو در سال ۱۹۹۲ با انجام آزمایشاتی به بررسی تأثیر طوق، شکاف و ترکیب این دو بر روی کاهش آب‌شستگی پایه پل پرداخت [5]. کومار و همکاران در سال ۱۹۹۹ پس از انجام آزمایش‌هایی دریافتند که طوق در هر سطحی که قرار بگیرد، جریان

را به دو ناحیه بالایی و پایینی طوق تقسیم می‌کند و این مسئله باعث کاهش قدرت گردابه‌های ایجاد شده می‌شود [6]. مشاهیر و همکاران در سال ۲۰۰۴ به این نتیجه رسیدند که طوق با ابعاد سه برابر پایه مستطیلی بر روی بستر بهترین کارایی (کاهش عمق آب‌شستگی حدود ۶۰ درصد) را دارد [7]. هیولی و همکاران در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی در زمینه تأثیر طوق در کاهش آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در حالت آب‌زال انجام دادند، آنها دریافتند که اندازه طوق موثرترین پارامتر در میزان عمق آب‌شستگی است و همچنین به این نتیجه رسیدند که عمق آب‌شستگی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد [9]. کایاتورک و همکاران در سال ۲۰۰۴ در زمینه عملکرد طوق بر پیشرفت آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی بلند در آستانه حرکت ذرات بستر انجام داده‌اند. آنها با نصب طوق با اندازه‌های مختلف در ترازهای متغیر دریافتند که با قرارگیری طوق در تراز پایین تر از بستر نتایج بهتری حاصل می‌شود. بر اساس این آزمایش‌ها، زمانی که طوق در تراز ۵۰ میلی‌متر پایین‌تر از کف کانال قرار بگیرد، آب‌شستگی تا ۶۷ درصد کاهش می‌یابد [10].

در مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده، تأثیر و کارایی طوق اطراف تکیه‌گاه کوتاه (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کوچکتر مساوی یک) بررسی نشده است، همچنین میزان تأثیر طوق بر روی شکل‌های مختلف تکیه‌گاه مطالعه نشده است. بنابر این در تحقیق حاضر، تأثیر تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر (تراز بالاتر از بستر، روی بستر و پایین‌تر از بستر)، شکل طوق (طوق کامل و طوق تکه‌ای) و اندازه طوق، بر روی کاهش عمق آب‌شستگی پیرامون شکل‌های مختلف تکیه‌گاه کوتاه (مستطیلی و دیوار باله‌ای) بررسی شده است، همچنین توسعه زمانی آب‌شستگی در مجاورت تکیه‌گاه در حضور و بدون حضور طوق مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های تحقیق حاضر در فلوم مستطیلی به طول ۱۴ متر، عرض ۱ متر و عمق ۱ متر با شیب طولی ۰/۰۰۰۴ واقع در آزمایشگاه محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است (شکل ۱)؛ دیواره‌های فلوم از جنس شیشه‌ای قابل رویت، جهت مشاهده تغییرات سطح جریان آب و تغییرات بستر کانال، ساخته شده است. طول فلوم در بالادست محل قرارگیری تکیه‌گاه به گونه‌ای انتخاب شد که جریان کاملاً توسعه یافته باشد. برای محاسبه طول جریان توسعه یافته از رابطه‌ای که توسط کرک‌گز و آردیچ‌گلو [11] برای جریان در کانال‌های روباز ارائه شده است، استفاده گردید. جهت مشاهده تغییرات پروفیل بستر و جریان آب در همسایگی تکیه‌گاه، از جنس پلکسی گلس به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده است. در محدوده آزمایش، عمق ماسه ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این ضخامت بر اساس محاسبات اولیه با استفاده از روابط محققین قبلی و همچنین مشاهدات اولیه انتخاب گردید تا حداکثر عمق آبشستگی به کف فلوم آزمایشگاهی نرسد. قطر میانگین ذرات بستر ( $D_{50}$ ) ۰/۹۱ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ( $\sigma_g = 1.38 < 1.4$ )، چگالی نسبی ۲/۶۵ و سرعت برشی بحرانی ( $U_{*cr}$ ) ۰/۰۲۱ متر بر ثانیه است که از طریق دیاگرام شیلدز بدست آمده است.

در تمامی آزمایش‌ها تکیه‌گاه کوتاه ( $L_a/Y \leq 1.0$ ) مورد مطالعه قرار گرفته است و در حالت آبشستگی آب زلال تحت شرایط آستانه حرکت ذرات بستر هدایت شده است. طوق‌ها از جنس پلکسی گلس با ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشند و با استفاده چسب آکواریوم به تکیه‌گاه متصل شده است.

برای محاسبه و تنظیم مقادیر مختلف ( $U_{*cr}/U_{*cr}$ ) جهت محاسبه مقدار دبی آستانه حرکت، از رابطه (۱) که توسط لاچلان و ملویل [12] ارائه شده، استفاده گردیده است.

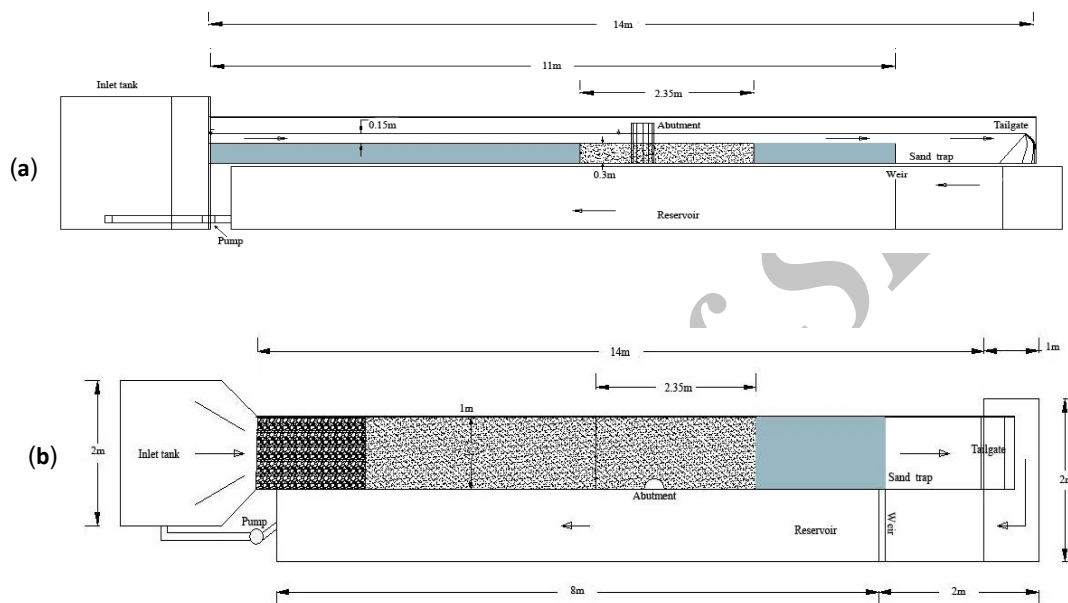
$$U_{*cr}/U_{*cr} = 5.75 \log(Y/K_s) + 6 \quad (1)$$

در این رابطه  $U$  سرعت متوسط جریان،  $U_{*cr}$  سرعت بحرانی ذرات بستر (آستانه حرکت ذرات)،  $U_{*cr}$  سرعت برشی بحرانی ذرات است که از دیاگرام شیلدز بدست می‌آید و برای شرایط حاکم بر آزمایش‌ها برابر با ۰/۰۲۱ متر بر ثانیه محاسبه گردید.  $Y$  عمق جریان در بالادست تکیه‌گاه و  $K_s$  زبری معادل مصالح بستر می‌باشد و با توجه به این‌که آزمایش‌ها در شرایط آب زلال ( $U/U_{*cr} < 1$ ) و بدون انتقال رسوب از بالادست انجام شده است این پارامتر برابر با  $2D_{50}$  می‌باشد. طبق تحقیقات انجام شده توسط ملویل حداکثر عمق آبشستگی، در شرایط آستانه حرکت ذرات بستر اتفاق می‌افتد [13]. بنابراین، نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. برای عمق جریان ۰/۱۵ متر، با در نظر گرفتن آستانه حرکت ذرات بستر، دبی جریان ۵۲ لیتر بر ثانیه بدست آمده است. دو نوع شکل تکیه‌گاه در این تحقیق مطالعه شده است که در ادامه ابعاد تکیه‌گاه تعریف شده است. طول طوق ( $W_c$ )، تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر ( $Z_c$ ) و نسبت سطح مقطع طوق به سطح مقطع کل (مجموع سطح مقطع تکیه‌گاه و طوق) که با نماد  $A_c/A_T$  در جدول (۱) نمایش داده شده است.  $VI$  و  $WI$  آزمایش برای حالت بدون طوق به ترتیب برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای،  $VT$  و  $WT$  آزمایش‌های با طوق کامل و  $VP$  و  $WP$  با طوق تکه‌ای است که به ترتیب برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای می‌باشد و شماره آزمایش‌ها با اعداد ۱ الی ۱۲ مشخص شده است.

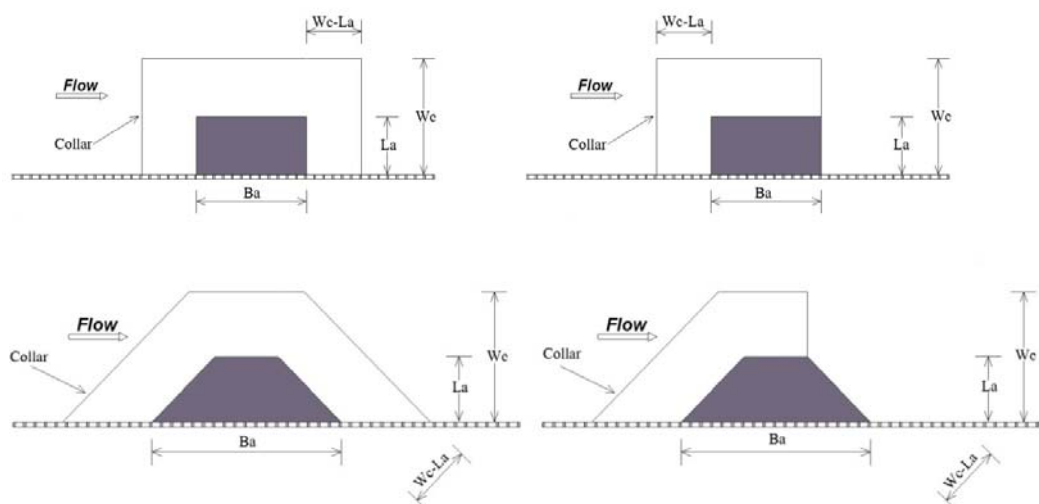
در شکل (۲) تصویر شماتیکی از ابعاد تکیه‌گاه و طوق، به صورت جداگانه برای دو نوع تکیه‌گاه، رسم شده است. در تمامی آزمایش‌ها  $L_a$  و  $B_a$  برای تکیه‌گاه مستطیلی به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۳۰ متر و در تکیه‌گاه دیوار باله‌ای به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۴۵ متر در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل زیر مشخص می‌باشد در طوق تکه‌ای قسمت پایین دست تکیه‌گاه بدون محافظ می‌باشد و تأثیر این پارامتر نیز

می‌باشد و در طول کانال به وسیله دست حرکت می‌کند. در هر آزمایش بیش از ۴۰۰۰۰ داده مربوط به تغییرات بستر اطراف تکیه‌گاه به صورت (X,Y,Z) برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار Surfer توپوگرافی بستر رسم گردیده است.

مورد بررسی قرار گرفته است. جهت برداشت تغییرات بستر فلوم اطراف تکیه‌گاه پس از اتمام آزمایش‌ها از دستگاه دیجیتالی بسترنگار معروف به Laser Bed Profiler (LBP) استفاده گردیده است. این دستگاه قادر به برداشت تغییرات بستر با دقت ۰/۱ میلی‌متر در مقاطع ۱ میلی‌متری عرض کانال



شکل ۱ (a) نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی؛ (b) پلان فلوم آزمایشگاهی و اجزای مختلف آن



شکل ۲ پلان تکیه‌گاه و طوق: (a-1,2) طوق کامل و تکه‌ای در تکیه‌گاه مستطیلی؛ (b-1,2) طوق کامل و تکه‌ای در تکیه‌گاه دیوار باله‌ای

جدول ۱ پارامترهای متغیر در انجام آزمایشها

آزمایش	$W_c/L_a$	$Z_c/L_a$	$A_c/A_T$
V1	۰	-	۰
VT2	۲/۲۵	۰	۰/۸۰۲
VT3	۲	۰	۰/۷۵
VT4	۱/۷۵	۰	۰/۶۷۳
VT5	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۸۰۲
VT6	۲	-۰/۲	۰/۷۵
VT7	۱/۷۵	-۰/۲	۰/۶۷۳
VT8	۲/۲۵	+۰/۲	۰/۸۰۲
VP9	۲/۲۵	۰	۰/۷۲۶
VP10	۲	۰	۰/۶۶۷
VP11	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۷۲۶
VP12	۲	-۰/۲	۰/۶۶۷
W1	۰	-	۰
WT2	۲/۲۵	۰	۰/۷۹۳
WT3	۲	۰	۰/۷۳۹
WT4	۱/۷۵	۰	۰/۶۶۱
WT5	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۷۹۳
WT6	۲	-۰/۲	۰/۷۳۹
WT7	۱/۷۵	-۰/۲	۰/۶۶۱
WT8	۲	+۰/۲	۰/۷۳۹
WP9	۲/۲۵	۰	۰/۶۹
WP10	۲	۰	۰/۶۲۵
WP11	۲/۲۵	-۰/۲	۰/۶۹
WP12	۲	-۰/۲	۰/۶۲۵

### شرح آزمایشها و تحلیل نتایج

در این تحقیق جهت مطالعه تأثیر طوق بر مکانیزم آب‌شستگی و تغییرات زمانی آن پارامترهایی چون طول (جلو آمدگی) طوق، شکل (کامل یا تکه‌ای) طوق و همچنین تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر کانال (کف بستر، تراز بالاتر و پایین تر) بررسی و مطالعه شده است. آزمایشها در دو بخش بدون طوق و در حضور طوق بررسی شده است. برای حالت قرارگیری

طوق در کنار تکیه‌گاه، سه حالت بر اساس تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر مطالعه شده است.

### آزمایش بدون طوق

با توجه به اهمیت مسئله زمان در آزمایشها ابتدا آزمایش‌هایی جهت تعیین زمان تعادل نسبی آب‌شستگی به مدت ۷۰ ساعتی، انجام گردیده و با

طوق آب‌شستگی با شدت کم‌تری اتفاق می‌افتد. با نصب طوق در کناره تکیه‌گاه شروع آب‌شستگی در دو ناحیه‌ی گوشه بالادست طوق و گوشه پایین دست طوق رخ می‌دهد و تحت تأثیر گردابه‌های برخاستی حفره‌ای در پایین دست طوق ایجاد می‌گردد. میزان آب‌شستگی در ناحیه بالادست طوق در مجاورت تکیه‌گاه مستطیلی بیش‌تر از تکیه‌گاه دیوار باله‌ای می‌باشد. همچنین، آب‌شستگی در ناحیه پایین دست طوق با توجه به این مسئله که گرداب برخاستی اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای شدید‌تر از تکیه‌گاه مستطیلی است، بیشتر است. نرخ آب‌شستگی این دو ناحیه وابسته به اندازه طوق است؛ بدین صورت که با افزایش اندازه طوق، میزان نسبت آب‌شستگی ناحیه بالادست به پایین دست کاهش می‌یابد. این حفره با گذشت زمان حجیم‌تر شده و از زیر طوق به سمت بالادست توسعه می‌یابد. با گسترش حفره در زیر طوق مسیری جهت عبور جریان از زیر طوق ایجاد شده و سپس ذرات زیر طوق توسط جریان به تدریج انتقال می‌یابد. انتقال ذرات ماسه زیر طوق به گونه‌ای است که آب‌شستگی به سمت گوشه بالادست تکیه‌گاه میل پیدا می‌کند. در طوق تکه‌ای با توجه به حذف تکه‌ی واقع در پایین دست طوق، ناحیه گوشه پایین دست طوق در مجاورت پایین دست تکیه‌گاه قرار می‌گیرد. در طوق تکه‌ای اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای شروع آب‌شستگی مانند تکیه‌گاه مستطیلی می‌باشد با این تفاوت که عمق آب‌شستگی در ناحیه پایین دست بیش‌تر است.

برای بهترین حالت، طوق با طول  $2.25L_0$  عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه مستطیلی  $9/2$  سانتی‌متر ( $64/2$  درصد کاهش) است و مقدار عمق ماکزیمم آب‌شستگی کل در فاصله‌ی  $32$  سانتی‌متری از تکیه‌گاه،  $11/6$  سانتی‌متر ( $47/3$  درصد کاهش) می‌باشد. برای تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در بهترین حالت، طوق با طول  $2.25L_0$  عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه را  $67/3$  درصد کاهش داده است و مقدار عمق ماکزیمم

توجه به توسعه آب‌شستگی و تغییرات زمانی، با در نظر گرفتن  $95$  درصد عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه زمان تعادل نسبی  $40$  ساعت بدست آمده است. زمان تعادل نسبی آب‌شستگی این‌گونه تعریف می‌شود که پس از گذشت  $2$  ساعت تفاوت عمق آب‌شستگی کمتر از  $1$  میلی‌متر باشد [2]. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که آب‌شستگی تحت تأثیر جریان روبه‌پایین در همسایگی نوک دماغه بالادست تکیه‌گاه و با زاویه تقریبی  $45$  درجه شروع شده و با تشدید مکانیزم آب‌شستگی و ایجاد گردابه نعل اسبی، ذرات بستر در اختیار جریان اصلی قرار گرفته و به پایین دست منتقل می‌گردد. در مرحله اول آب‌شستگی (حدود  $60$  درصد میزان آب‌شستگی کل)، برای تکیه‌گاه مستطیلی  $140$  دقیقه و تکیه‌گاه دیوار باله‌ای  $100$  دقیقه پس از شروع آزمایش، رخ داده است. سرعت حفر کناره تکیه‌گاه بسیار سریع بوده و رفته رفته نرخ آب‌شستگی کاهش یافته و پس از آن مرحله گسترش آب‌شستگی و وسیع شدن آب‌شستگی در همسایگی تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد. در نهایت با گذشت زمان با استهلاک انرژی جریان گردابه، فرآیند آب‌شستگی به تعادل نسبی می‌رسد. حداکثر عمق آب‌شستگی ( $d_s$ ) برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای به ترتیب  $24/5$  و  $20/8$  سانتی‌متر و در مجاورت تکیه‌گاه بدست آمده است.

### طوق در تراز بستر

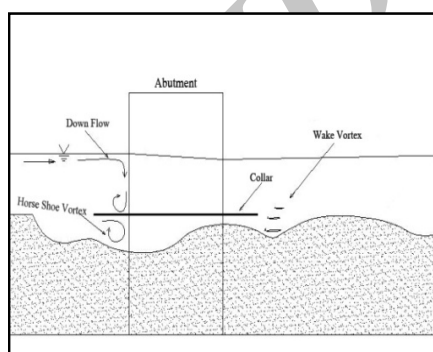
با نصب طوق محافظ در کناره تکیه‌گاه، جریان روبه‌پایین هنگام برخورد به طوق از بستر منحرف می‌شود و از برخورد مستقیم جریان به بستر جلوگیری می‌شود [5]، در نتیجه طوق باعث جابجایی آب‌شستگی از محل تکیه‌گاه و کاهش آن می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، برخلاف حالت بدون طوق که آب‌شستگی به سرعت در کناره تکیه‌گاه (بالادست و پایین دست) مشاهده می‌شود، در ساعات اولیه در گوشه

$d_s$  حداکثر عمق آبشستگی پیرامون کوله می باشد. زمان شروع آبشستگی کناره دیوار تکیه گاه (مدت زمان رسیدن حداکثر آبشستگی به کناره تکیه گاه) برای آزمایش های VT2، VT3 و VT4 به ترتیب برابر ۱۲۰۰ (۲۰ ساعت)، ۱۸۰ و ۱۰۰ دقیقه پس از شروع آزمایش می باشد و در آزمایش های VP9 و VP10 به ترتیب پس از ۸۱۰ (۱۳/۵ ساعت) و ۱۵۰ دقیقه، آبشستگی در گوشه بالادست تکیه گاه اتفاق می افتد. این زمان برای آزمایش های WT2، WT3 و WT4 به ترتیب برابر ۷۸۰ (۱۳ ساعت)، ۱۸۰ و ۶۰ دقیقه پس از شروع آزمایش می باشد و در آزمایش های WP9 و WP10 به ترتیب پس از ۶۹۰ (۱۱/۵ ساعت) و ۱۲۰ دقیقه آبشستگی در گوشه بالادست تکیه گاه اتفاق می افتد.

تغییرات توپوگرافی بستر در محدوده ۵ الی ۷ متری از ابتدای فلوم در شکل های (۶ و ۵) نشان داده شده است. در این شکل ها X جهت مسیر جریان (طول فلوم) و Y عرض فلوم است. بررسی این شکل ها نشان می دهد که با افزایش طول طوق محل قرارگیری عمق ماکزیمم آبشستگی به ناحیه ای دورتر از مجاورت تکیه گاه منتقل شده است. برای طوق با عرض ۲ برابر طول تکیه گاه، عمق ماکزیمم کل آبشستگی در کناره تکیه گاه رخ می دهد. در حالی که با افزایش عرض طوق فاصله عمق ماکزیمم از تکیه گاه بیشتر می شود. همچنین با افزایش طول طوق، با توجه به خطوط تراز آبشستگی سطحی از بستر که تحت تأثیر آبشستگی قرار گرفته برای تکیه گاه مستطیلی به طور میانگین حدود ۲۰ درصد افزایش می یابد.

با نصب طوق در مجاورت تکیه گاه به دلیل حفر ذرات بستر در قسمت خارجی طوق، یک کانال کوچک در این طوق ایجاد می شود و در نتیجه مسیر عبور جریان آب به ناحیه ای دورتر از تکیه گاه منحرف می شود.

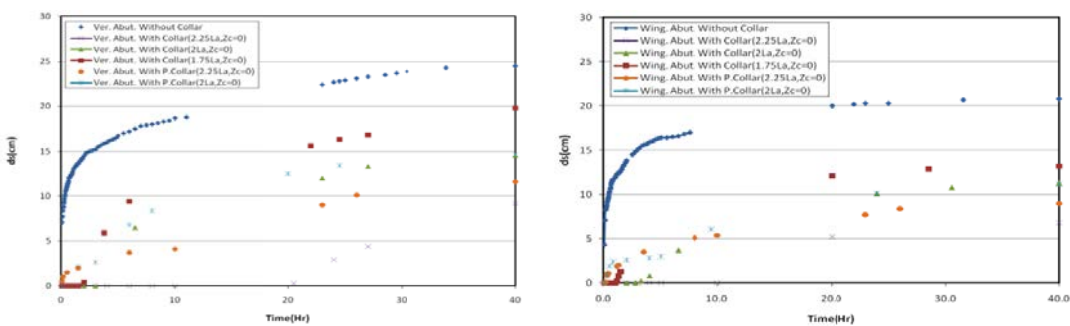
آبشستگی کل در فاصله ی ۱۹ سانتی متری از تکیه گاه، ۱۱/۸ سانتی متر (۴۳/۳ درصد) می باشد. همچنین تفاوت عمق آبشستگی ماکزیمم کناره تکیه گاه دیوار باله ای برای طوق کامل و تکه ای درصد کاهش عمق آبشستگی ماکزیمم کناره تکیه گاه برای طوق کامل و تکه ای به طول  $2L_0$  تقریباً برابر (به ترتیب ۴۵/۶ و ۴۶/۲ درصد) می باشد. پروفیل طولی تغییرات بستر در حضور طوق با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، به صورت شماتیک در شکل (۳) رسم شده است.



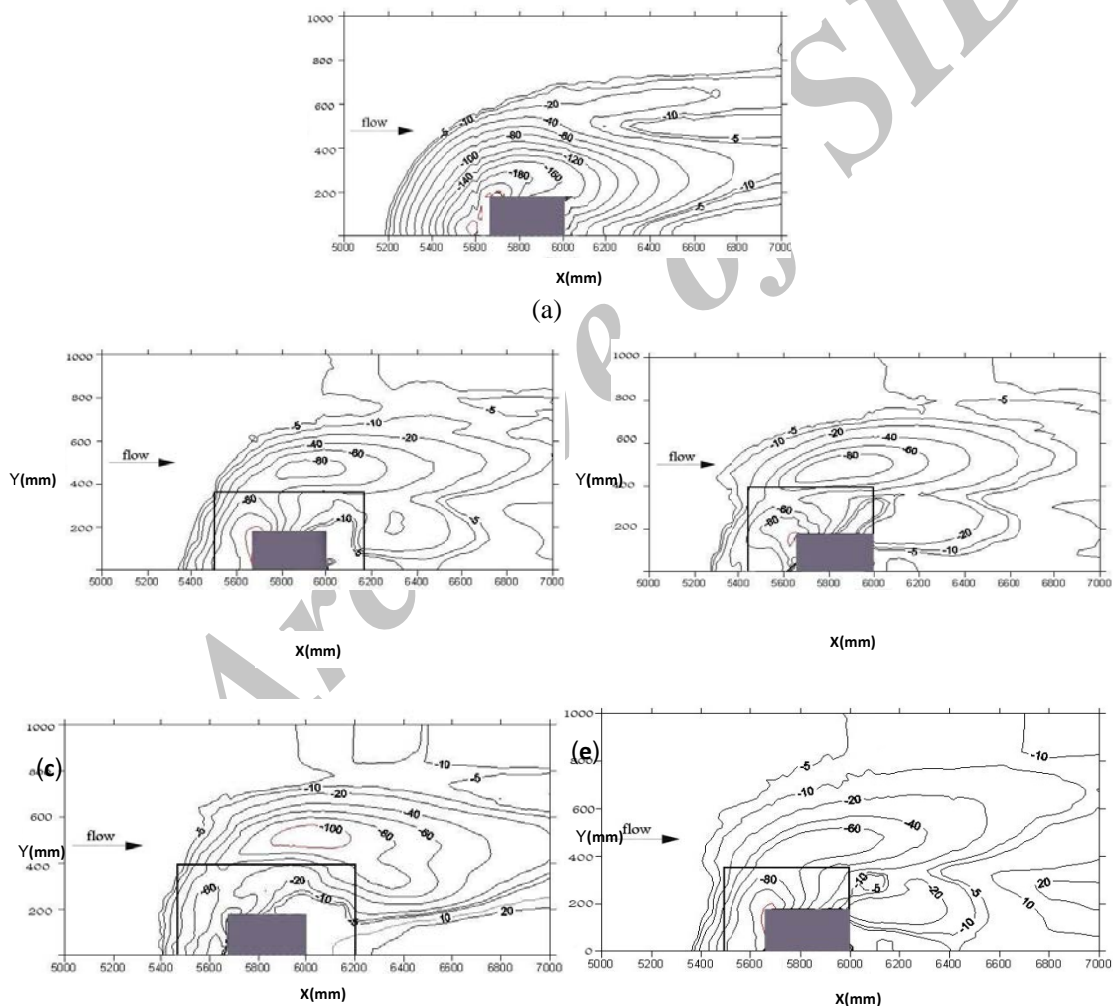
شکل ۳ نمای کلی از پروفیل طولی تغییرات بستر در محدوده تکیه گاه

مطابق نمودار تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی (شکل ۴) شروع آبشستگی در گوشه بالادست تکیه گاه در تمامی آزمایش ها در حضور طوق کامل و تکه ای، به تأخیر می افتد؛ مدت زمانی که آبشستگی از گوشه خارجی طوق شروع شده و از زیر طوق به کناره تکیه گاه می رسد به عنوان مدت زمان شروع آبشستگی در نظر گرفته شده است.

در شکل (۴)، Ver.Abut نشان دهنده تکیه گاه مستطیلی، Wing.Abut نشان دهنده تکیه گاه دیوار باله ای، Without.Collar برای حالت بدون طوق، With.Collar برای حالات در حضور طوق کامل، و With P.Collar برای حالات در حضور طوق تکه ای و



شکل ۴ نمودار تغییرات عمق آب شکستگی ماکزیمم کناره بدون طوق و با طوق در تراز بستر نسبت به زمان برای (a) تکیه‌گاه مستطیلی و (b) تکیه‌گاه دیوار باله‌ای



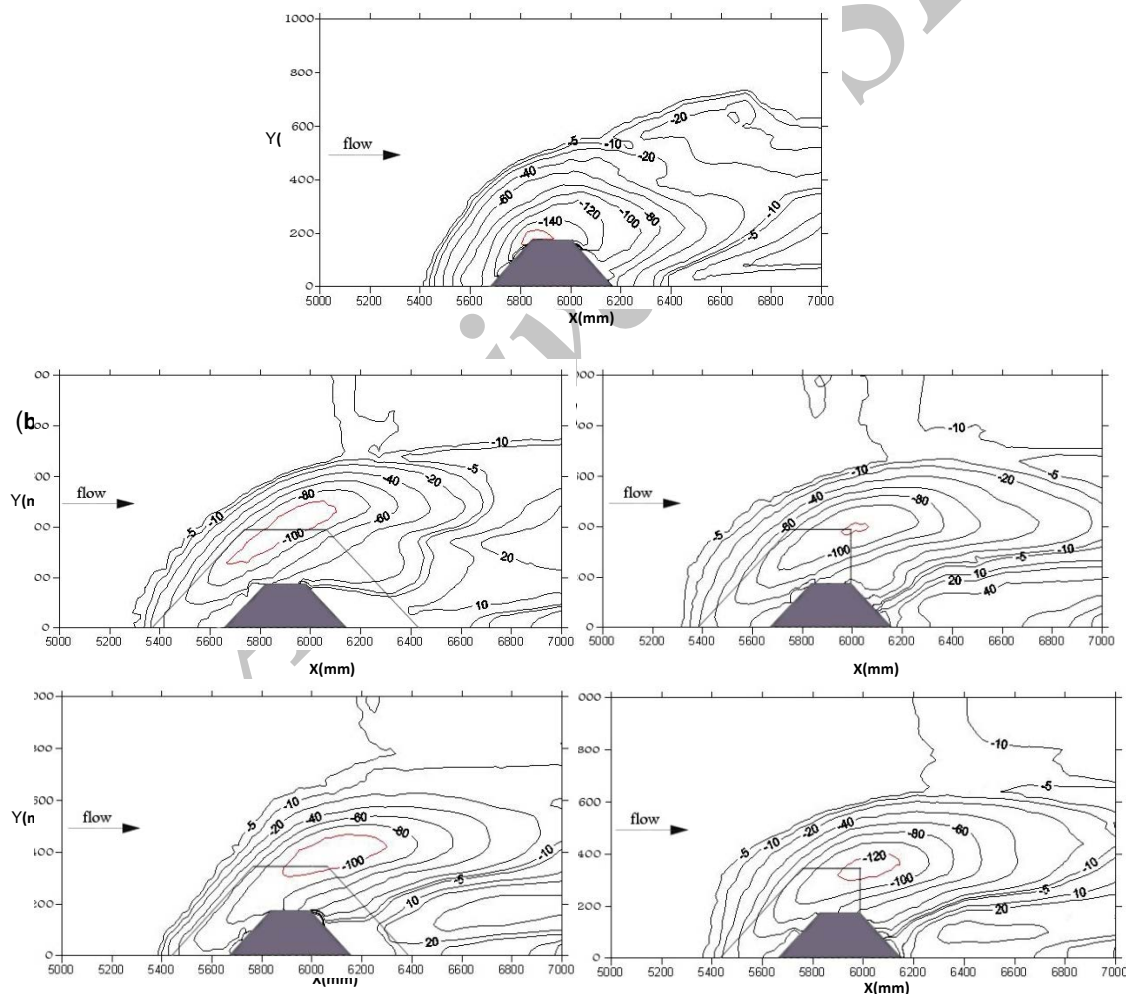
شکل ۵ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه مستطیلی (a) حالت بدون طوق؛ (b) طوق با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$ ؛ (c) طوق با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$ ؛ (d) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$  و (e) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$



### طوق در تراز پایین تر از بستر

در این قسمت از آزمایش‌ها، طوق در تراز  $Z_c = -3\text{cm}$  نصب گردیده است. بدلیل نصب طوق در تراز پایین‌تر از بستر، آب‌شستگی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول آب‌شستگی که در دقایق اول آزمایش رخ می‌دهد، ذرات ماسه‌ای روی طوق به سرعت شسته شده و پس از برخورد مستقیم جریان آب به طوق ابعاد آب‌شستگی افزایش یافته و تا گوشه خارجی طوق ادامه پیدا می‌کند. در مرحله دوم آب‌شستگی همانند حالت قرارگیری طوق در تراز بستر، آب‌شستگی به زیر طوق راه پیدا کرده و نهایتاً به کناره تکیه‌گاه می‌رسد.

با توجه به شکل (۶)، محل قرارگیری عمق ماکزیمم آب‌شستگی کل در طوق‌های کامل و تکه‌ای، در محدوده گوشه خارجی طوق می‌باشد که این مقدار برای این پنج آزمایش ۱۱/۸ الی ۱۲/۹ سانتی‌متر از کناره تکیه‌گاه دیوار باله‌ای می‌باشد. تفاوت بارز بین طوق‌های کامل و تکه‌ای، انباشته شدن ذرات رسوب بیش‌تر در پایین‌دست تکیه‌گاه برای حالت طوق تکه‌ای می‌باشد. این مسئله با توجه به ایجاد مسیر باریک زیرین طوق و همچنین کاهش میزان گرداب برخاستی برای طوق کامل با توجه به حضور طوق در پایین‌دست تکیه‌گاه توجه پذیر است.

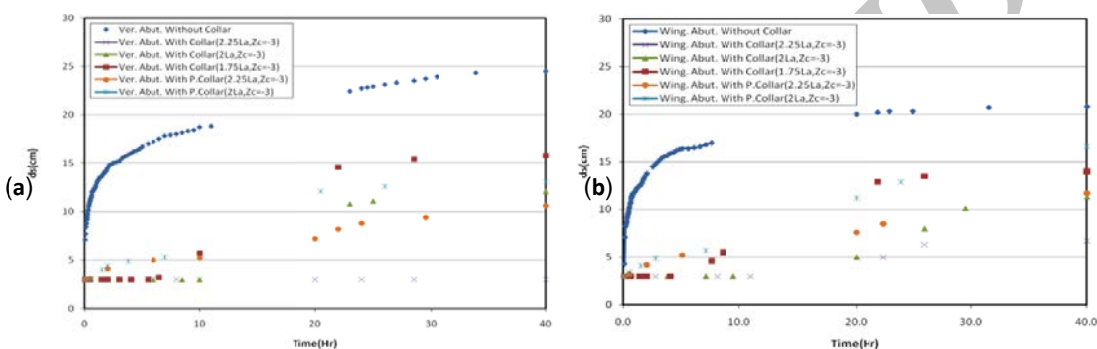


شکل ۶ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه دیوار باله‌ای (a) حالت بدون طوق؛ (b) طوق با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$ ؛ (c) طوق با

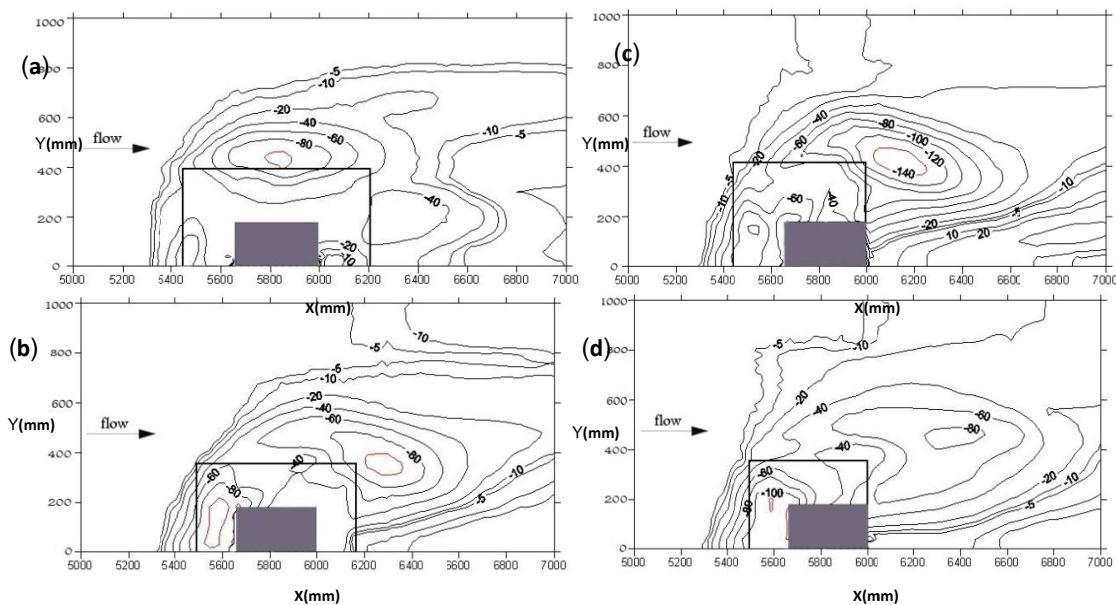
(d) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = 0$  و (e) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = 0$

عمق ماکزیمم آب‌شستگی از تکیه‌گاه دورتر می‌شود. علاوه بر این، هر چه طوق در تراز پایین‌تری قرار می‌گیرد عمق آب‌شستگی کناره‌ی تکیه‌گاه کاهش یافته و عمق حداکثر آب‌شستگی از تکیه‌گاه فاصله گرفته است. همچنین، زمان شروع آب‌شستگی کناره دیوار تکیه‌گاه برای آزمایش‌های WT7، WT6، WT5، WP11 و WP12 به ترتیب برابر با ۱۰۲۰ (۱۷ ساعت)، ۹۶۰ (۱۶ ساعت)، ۳۳۰ (۵/۵ ساعت)، ۹۰۰ (۱۵ ساعت) و ۷۲۰ (۱۲ ساعت) دقیقه می‌باشد.

همانطور که در شکل (۷-ا) مشخص است مدت زمان شروع آب‌شستگی کناره دیوار تکیه‌گاه (مدت زمان رسیدن حداکثر آب‌شستگی به کناره تکیه‌گاه) برای آزمایش‌های VT6، VT7، VP11 و VP12 به ترتیب ۶۶۰ (۱۱ ساعت)، ۳۶۰ (۶ ساعت)، ۹۰۰ (۱۵ ساعت) و ۴۲۰ (۷ ساعت) دقیقه می‌باشد. عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه در این حالت نسبت به زمانی که طوق با طول برابر بر روی بستر قرار گرفته، کاهش می‌یابد. برای این حالت نیز همانند حالتی که طوق در کف بستر قرار می‌گیرد، هر چه طول طوق بیشتر می‌شود

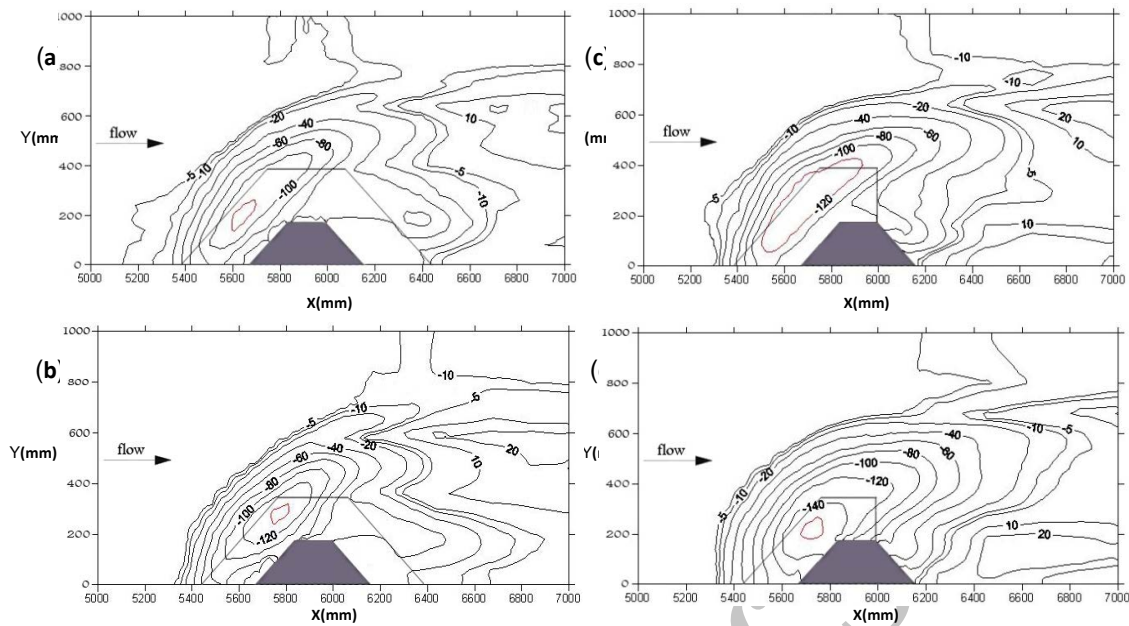


شکل ۷ نمودار تغییرات عمق آب‌شستگی ماکزیمم کناره بدون طوق و با طوق در تراز پایین‌تر از بستر نسبت به زمان برای (a) تکیه‌گاه مستطیلی و (b) تکیه‌گاه دیوار پاله‌ای



شکل ۸ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه مستطیلی (a) طوق با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$ ; (b) طوق با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$ ; (c)

طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$  و (d) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$



شکل ۹ توپوگرافی بستر در محدوده تکیه‌گاه دیوار باله‌ای (a) طوق با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$ ؛ (b) طوق با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$ ؛ (c) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2.25, Z_c/L_a = -0.2$  و (d) طوق تکه‌ای با  $W_c/L_a = 2, Z_c/L_a = -0.2$

باله‌ای به عنوان نمونه آزمایشی انتخاب شده که در تراز ۳ سانتی‌متر بالاتر از بستر قرار گرفته است. با توجه به این‌که طوق جریان اطراف تکیه‌گاه را به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم می‌کند، در ناحیه پایینی طوق، مکانیزم آب‌شستگی همانند حالت بدون طوق می‌باشد و در نتیجه نرخ آب‌شستگی سریع، قابل پیش‌بینی می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده درصد کاهش عمق آب‌شستگی زمانی که طوق در تراز بالاتر از بستر قرار گرفته نسبت به حالتی که طوق در تراز بستر یا پایین‌تر از بستر مقدار کم‌تری بدست آمده است. عمق ماکزیمم آب‌شستگی تکیه‌گاه مستطیلی و تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در کناره تکیه‌گاه رخ می‌دهد که به ترتیب حدود ۳۵ و ۲۴ درصد کاهش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

توسعه زمانی آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه در حضور طوق با اندازه، شکل و ترازهای مختلف قرارگیری طوق در این تحقیق مطالعه و بررسی شده است. مشاهده شد که در تمامی حالات، با افزایش طول

با توجه به توپوگرافی تغییرات بستر (شکل ۹ و ۸)، هر چه طول طوق بیشتر می‌شود عمق ماکزیمم آب‌شستگی کل از تکیه‌گاه دورتر می‌شود. در تمامی حالات با کاهش تراز قرارگیری طوق، فاصله محل وقوع عمق آب‌شستگی ماکزیمم نسبت به تکیه‌گاه دیوار باله‌ای کاهش می‌یابد و در فاصله نزدیکتری قرار می‌گیرد.

برای طوق کامل به طول  $2.25L_a$ ، عمق آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه دیوار باله‌ای  $6/7$  سانتی‌متر و محل وقوع عمق آب‌شستگی ماکزیمم در فاصله‌ی  $15/5$  سانتی‌متری از کناره تکیه‌گاه  $12/5$  سانتی‌متر بدست آمده است. برای طوق تکه‌ای با طول برابر در فاصله‌ی  $17/7$  سانتی‌متری از کناره تکیه‌گاه  $14/2$  سانتی‌متر و در کناره‌ی تکیه‌گاه  $11/7$  سانتی‌متر می‌باشد.

### طوق در تراز بالاتر از بستر

برای بررسی این پارامتر، طوق به طول  $2/25$  برابر تکیه‌گاه مستطیلی و طوق به طول ۲ برابر تکیه‌گاه دیوار

تکه‌ای افزایش یافته است؛ در حالی که برای تکیه‌گاه دیوار باله‌ای روند تغییرات تقریباً خطی می‌باشد. بیشترین کاهش عمق آب‌شستگی در تکیه‌گاه مستطیلی برابر  $87/8\%$  درصد است که با بکاربردن طوق با طول  $2.25L_a$ ، تراز قرارگیری  $-0.2L_a$ ، سطح مقطع  $0.802A_T$  (شرایط آزمایش VT5) حاصل می‌شود در حالیکه بیشترین کاهش عمق آب‌شستگی در دیوار باله‌ای برابر  $77/8\%$  درصد است و برای طوق با طول  $2.25L_a$ ، تراز قرارگیری  $-0.2L_a$  و سطح مقطع  $0.793A_T$  (آزمایش WT5) مشاهده گردید

طوق، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد، همچنین، محل وقوع عمق ماکزیمم آب‌شستگی به ناحیه‌ای دورتر از تکیه‌گاه منتقل می‌گردد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها و مقایسه میزان کاهش آب‌شستگی کناره تکیه‌گاه در حضور طوق، برای تکیه‌گاه مستطیلی و دیوار باله‌ای به ترتیب تراز پایین‌تر از بستر ( $Z_c = -3\text{cm}$ ) و تراز بستر ( $Z_c = 0\text{cm}$ ) بهترین تراز قرارگیری طوق می‌باشد. با مقایسه طوق تکه‌ای با طوق کامل با سطوح مقطع تقریباً برابر، برای تکیه‌گاه مستطیلی درصد کاهش عمق آب‌شستگی برای طوق

### مراجع

- Melville, B. W., "Local Scour at Bridge Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, pp 615-631, (1992).
- Dey, S. and Barbhuiya, A.K., "Time Variation of Scour at Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp. 11-23, (2005).
- Melville, B., van Ballegooy, S., Coleman, S., and Barkdoll, B., "Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, pp. 563-574, (2006).
- Molinas, A., Kheireldin, K., Wu, and Baosheng., "Shear Stress around Vertical Wall Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, pp. 822, (1998).
- Chiew, Y.M., "Scour Protection at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, pp. 1260-1269, (1992).
- Kumar, V., Ranga Raju, K.G., and Vittal, N., "Reduction of Local Scour around Bridge Piers Using Solts and Collars", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, pp. 1302-1305, (1999).
- Mashair, M.B., Zarrati, A.R. and Rezayi, A.R., "Time Development of Scouring around a Bridge Pier Protected by Collar", *2nd International Conference on Scour and Erosion, ICSE-2*, Singapore, 8 p, (2004).
- Mashahir, M.B., Zarrati, A.M. and Mokallaf, E., "Application of Riprap and Collar to Prevent Scouring around Rectangular Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, pp. 183-187, (2010).
- Hua Li, Roger A. Kuhnle, Brian D. Barkdoll, "Countermeasures Against Scour at Abutments", *Report No. 49 Oxford, Mississippi*, (2006).
- Kayaturk, S.Y., Kokpinar, M.A. and Gogus, M., "Effect of Collar on Temporal Development of Scour around Bridge Abutments", *2nd International Conference on scour and erosion, IAHR*, Singapore, 14-17 November, pp. 180-186, (2004).
- Kirkgoz, M .S., Ardichoghlu, M., "Velocity profiles of developing and developed open channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1099-1015, (1997).
- Lauchlan, C.S., Melville, B.W., "Riprap protection at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, pp. 412-418, (2001).
- Melville, B.W., "Pier and Abutment scour: Integrated approach.", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123(2), 125-136, (1997).