

## Influence of Semicircular Collar Diameter and Its Alignment on Scour Depth and Flow Pattern around Bridge Abutment

HAMED SHAHSAVARI<sup>1\*</sup>, SOBHAN MORADI<sup>1</sup>, SAEEDREZA KHODASHENAS<sup>1</sup>

1. Department of Water Engineering, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
(Received: July. 17, 2019- Revised: Aug. 18, 2019- Accepted: Aug. 25, 2019)

### ABSTRACT

Reducing scouring is inevitable to prevent the destruction of hydraulic structures on the water flows. In this research, the effect of semicircular collar on the reduction of scour depth around the abutment was investigated with the aim of identifying the flow pattern changes around this structure. Experiments were carried out under clear water conditions. Semicircular collars were examined on semicircular abutments in two sizes 1.5L and 2L (L is abutment length against the flow) and at three different levels relative to the bed; bed alignment, 0.2L below and 0.2 above the bed. The results showed that the existence of the collar, in addition to reducing the final scour depth, caused a delay in the scouring process. This effect has also been increased by increasing the size of the collar. In addition, the position of collars with the same size can improve collar performance and efficiency on the design cost. Based on the results of the experiments, the collar with 2L size and under the bed showed better performance and reduced the final scour depth by 58% compared to the control abutment. Also, according to the experiments, the position of the collar under the bed showed better performance. By investigating the flow pattern around the abutment in conditions with and without collar, it was found that the collar reduces the flow velocity in different directions, especially in the upstream of the abutment. Also, its effect on downflow reduces the strength of the vortices and changes the reciprocating behavior and displacement of the vortices. So that the presence of collar has reduced the maximum downflow velocity at the upstream abutment by 39%.

**Keyword:** Clearwater, Scouring, Flow pattern, Abutment, Collar

## تأثیر قطر و رقوم کارگذاری طوق نیم‌دایره‌ای بر میزان عمق آبشستگی و الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل

حامد شهسواری<sup>۱\*</sup>، سبحان مرادی<sup>۱</sup>، سعیدرضا خدانشناس<sup>۱</sup>

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۵/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۳)

### چکیده

کاهش آبشستگی برای جلوگیری از تخریب سازه‌های هیدرولیکی که در مسیر جریان‌های آبی قرار می‌گیرند، امری اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق به بررسی اثربخشی طوق نیم‌دایره‌ای بر کاهش عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه با هدف مشخص شدن تغییرات الگوی جریان در اطراف این سازه پرداخته شد. آزمایش‌ها در شرایط آبشستگی آب‌زال و طوق‌ها به شکل نیم‌دایره‌ای بر روی تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره‌ای در دو اندازه  $۱/۵L$  و  $۲L$  (طول تکیه‌گاه در برابر جریان) و در سه تراز مختلف نسبت به بستر، هم‌تراز بستر و  $۰/۲L$  زیر و بالای بستر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که وجود طوق علاوه بر کاهش میزان عمق نهایی آبشستگی موجب تأخیر در روند آبشستگی نیز شده است، که این اثر بخشی با افزایش اندازه طوق بیشتر مشاهده می‌گردد. به‌علاوه تراز قرارگیری طوق‌های با اندازه برابر می‌تواند موجب عملکرد بهتر طوق و در نتیجه کارآمدی آن در هزینه تمام شده طرح باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها طوق با اندازه  $۲L$  و قرارگیری در زیر بستر عملکرد بهتری از خود نشان داد و موجب کاهش ۵۸ درصدی عمق نهایی آبشستگی نسبت به تکیه‌گاه شاهد شد. همچنین با بررسی مشخصات جریان در اطراف تکیه‌گاه در شرایط با و بدون طوق مشخص گردید که طوق باعث کاهش مقادیر سرعت در جهات مختلف بخصوص در بالادست تکیه‌گاه می‌شود و تأثیر آن بر روی جریان روبه‌پایین، موجب کاهش قدرت گرداب‌ها و تغییر رفتار رفت و برگشتی و جابجایی موقعیت گرداب‌ها می‌گردد. به طوری که وجود طوق مقدار ماکزیمم سرعت جریان روبه‌پایین را در بالادست تکیه‌گاه به میزان ۳۹ درصد کاهش داده است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌زال، آبشستگی، الگوی جریان، تکیه‌گاه، طوق

### مقدمه

آبشستگی موضعی، ناشی از وجود سازه‌هایی در مسیر جریان آب روی یک مرز فرسایش‌پذیر می‌باشد. به طوری که سازه‌های موجود می‌توانند نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش می‌یابد که در نهایت موجب ایجاد حفره در اطراف این موانع می‌شود (Ettema et al., 2010; Foti and Sabia, 2011; MacBroom, 2012). از این رو یکی از عوامل اصلی تخریب پل‌ها آبشستگی موضعی است که ناشی از عدم رعایت مسائل هیدرولیکی و مهندسی رودخانه در طراحی پل‌ها می‌باشد. مسلماً عواقب ناشی از عدم رعایت مسائل مهندسی رودخانه در پل‌سازی، جز صرف هزینه‌های زیاد و بی‌حاصل ثمری نخواهد داشت و لازم است در برنامه‌های مربوط به پل‌سازی، معیارهای هیدرولیکی در مطالعات طراحی و اجرای پل‌ها مورد توجه قرار گیرند. امروزه با ورود دستگاه‌های مدرن اندازه‌گیری جریان نظیر ADV و یا PIV، بررسی‌هایی در مورد تأثیر تکیه‌گاه‌ها و یا پایه‌های پل بر ساختار جریان انجام گرفته است (Sui et al.,

2006, Wang et al., 2008, Barbhuiya. and Dey, 2003).

اهمیت این اندازه‌گیری‌ها در این است که می‌توان با توسعه این مطالعات، تأثیر عوامل مختلف در ساختار جریان حول تکیه‌گاه‌ها و یا پایه‌های پل‌ها را بررسی کرد. (Ettema et al., 2017) نشان دادند که تحقیقات بیشتر در زمینه‌های میدان جریان اطراف پایه و تکیه‌گاه پل می‌تواند در برآورد عمق آبشستگی، مفید واقع شود. از این رو در ادامه برخی از مطالعات ساختار جریان، پیرامون تکیه‌گاه‌ها و پایه‌های پل که تاکنون صورت گرفته است آورده شده است.

(Muzzammil and Gangadhariah (2003) قدرت، جهت و وسعت گرداب‌های نعل اسبی حول پایه را اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که در حین آبشستگی وسعت گرداب نعل اسبی در ابتدا افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. (Afzalimehr et al., 2014) مشاهده کردند که در اطراف تکیه‌گاه، وجود پوشش گیاهی، نقش مهمی در کاهش تنش رینولدز در نزدیکی بستر دارد و باعث از بین بردن مقادیر منفی در توزیع تنش با تضعیف گردان فشار

آزمایش‌هایی انجام داده‌اند. آن‌ها با نصب طوق با اندازه‌های مختلف در ترازهای متغیر دریافتند که با فرارگیری طوق در تراز پایین‌تر از بستر، نتایج بهتری حاصل می‌شود. بر اساس این آزمایش‌ها، زمانی که طوق با اندازه  $2/25L_w$  (طول تکیه‌گاه در مقابل جریان) و پایین‌تر از تراز کف بستر قرار گیرد، آبشستگی تا  $88/9$  درصد کاهش می‌یابد.

(Khozeymehnezhad et al. (2014) با انجام ۷۲ آزمایش بر روی طوق‌های متقارن و نامتقارن به این نتیجه دست یافتند که عرض طوق در بالادست تکیه‌گاه موثرتر از بعد طولی آن است ولی در پایین‌دست، عرض تکیه‌گاه کم‌ترین نقش را در میان ابعاد هر دو نوع طوق در کاهش آبشستگی دارد. آن‌ها با بکارگیری طوق در ترازهای مختلف، نشان دادند که طوقه‌های زیر بستر عملکرد بهتری دارند. اما باید به این نکته توجه کرد که در طوقه‌های زیر بستر میزان آبشستگی بالای طوقه نیز جزئی از آبشستگی محسوب می‌شود و پایین بردن طوقه با این رویکرد از عملکرد آن می‌کاهد. در مطالعه‌ای دیگر Khozeymehnezhad and Ghomeshi (2016) نشان دادند که طوق‌های با سطح زبر به دلیل تغییر سریع‌تر رژیم لایه مرزی از آرام به آشفته و بنابراین تأخیر در وقوع جدایی جریان و به تبع آن تأخیر در وقوع جریان‌های برگشتی و حتی عدم وقوع آن‌ها، باعث کاهش بیشتر آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل می‌شوند به طوری که طوق‌های زبر نسبت به طوق‌های صاف هم‌اندازه خود در بهترین حالت، آبشستگی را به میزان ۱۴ درصد کاهش دادند. از سایر مطالعات بر روی طوق می‌توان به مطالعات (Mashair et al. (2004, Khosravi Nia et al. (2014) و (Ardeshir et al. (2013 اشاره کرد.

در نهایت هدف از تحقیق حاضر ارائه روشی برای کنترل و کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل با شکل مقطع نیم‌دایره‌ای در پلان و بررسی عوامل موثر در این روش می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از طوق‌های نیم‌دایره‌ای هم شکل تکیه‌گاه به بررسی تأثیر این طوق‌ها بر مقدار تغییرات آبشستگی در جوار تکیه‌گاه پرداخته شد. همچنین میزان تأثیر روش اعمال شده بر روی الگوی جریان در اطراف این سازه بررسی گردید.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاه

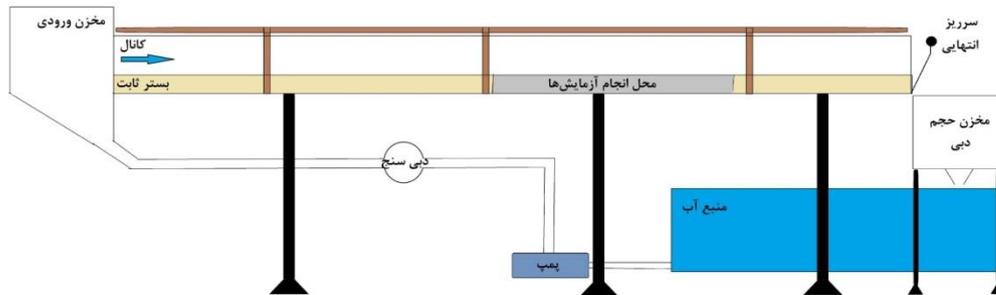
آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۷ متر، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۰ و ۳۶ سانتی‌متر با شیب کف  $0/02$  انجام گرفت. یک پمپ، آب را از مخزن اصلی به کانال با دبی  $10/5$  لیتر بر ثانیه انتقال می‌داد. کانال به یک مخزن حجم-زمان مجهز بود که به کمک آن دبی اندازه‌گیری می‌شد. یک سرریز قابل تنظیم در

نامطلوب و جریان روبه پایین در بالادست تکیه‌گاه می‌شود. در نتیجه کانال دارای دیواره پوشش گیاهی می‌تواند کاهش قابل ملاحظه‌ای در ماکزیمم عمق آبشستگی داشته باشد. آنها همچنین بیان کردند که در کانال دارای دیواره پوشش گیاهی، شکل گودال آبشستگی متفاوت از یک کانال ساده است که با افزایش سرعت در جهت جریان و کاهش سرعت عمودی مثبت نزدیک بستر در بالادست تکیه‌گاه، به خصوص در نزدیکی دیواره پوشش گیاهی، موجب کاهش قدرت گرداب‌های اولیه می‌شود. Koken and Constantinescu (2014) بر روی اثر درجه شیب طرف بالادست تکیه‌گاه بر الگوی جریان و تلاطم آن بحث کردند. آنها با مقایسه نتایج به دست آمده برای تکیه‌گاه با دیواره‌های شیب‌دار و قائم با طول مشابه دریافتند که این نوع تکیه‌گاه با جریان روبه پایین قوی‌تر و تشکیل یک سیستم گردابه‌ای نعل‌اسبی منسجم‌تر، باعث شکل‌گیری گودال آبشستگی عمیق‌تر می‌شود. Hong et al. (2015) خطوط هم‌سرعت دقیق و شکل سه‌بعدی سرعت‌ها و مقادیر آشفتگی را با سرعت‌سنج صوتی (ADV) اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که جریان منقبض شده در اطراف یک تکیه‌گاه و ساختارهای آشفته محلی در نزدیکی وجه پایین-دست پل از ویژگی‌های مهم میدان جریان هستند که موجب ایجاد حداکثر عمق آبشستگی در نزدیکی تکیه‌گاه شده‌اند.

همچنین یکی از راه‌حل‌های موثر در کاهش آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل، استفاده از صفحه‌ای به نام طوق می‌باشد. (Kayaturk et al. (2004 اثر طوق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها آزمایش‌ها را در فلومی به عرض  $1/5$  متر و با شیب کف  $0/01$  انجام دادند. پنج طول مختلف تکیه‌گاه ( $L_a$ ) و طوق‌هایی با عرض‌های ( $B_c$ ) مختلف در اطراف تکیه‌گاه‌ها در ارتفاع مختلف شامل سطح بستر،  $2/5$  و  $5$  سانتیمتر زیر بستر،  $2/5$  و  $5$  سانتیمتر بالای بستر قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش سائز طوق، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. آنها همچنین بیان نمودند اگر  $(L_a/y > 1)$  (عمق جریان) باشد، اثر طوق با کاهش  $L_a/B_c$ ، افزایش می‌یابد و در شرایط پایین‌تر از تراز بستر، کارایی طوق افزایش می‌یابد و متعاقباً اگر  $(L_a/y < 1)$  باشد، کارایی بیشتری در سطح بستر از خود نشان می‌دهد. Li et al. (2005) مطالعاتی در زمینه تأثیر طوق در کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه دیوار باله‌ای در حالت آب‌زال انجام دادند، آن‌ها دریافتند که اندازه طوق مؤثرترین پارامتر در کاهش میزان عمق آبشستگی است که عمق آبشستگی را تا  $75$  درصد کاهش می‌دهد. Karami et al. (2018) در زمینه عملکرد طوق بر پیشرفت آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی کوتاه، در شرایط آبشستگی آب‌زال،

تغییر تراز مشهودی در بین سطح انجام آزمایش با کف کانال ایجاد نشود. همچنین روی این سکوها با ذرات رسوبی مشابه با ذرات محل انجام آزمایشها در سراسر فلوم چسبانده شد تا تغییر زبری در طول کانال مشاهده نگردد (شکل ۱).

پایین دست، عمق آب در کانال را برای ایجاد جریان یکنواخت تنظیم می‌کرد. منطقه انجام آزمایشها در کانال، دارای طول ۱ متر و ارتفاع بستر ۱۲ سانتیمتر است که از ابتدای کانال ۵ متر فاصله دارد. در بالادست و پایین دست این محل، سکوهایی از جنس تفلون به طول ۱ متر و ارتفاع ۰/۱۲ متر نصب گردید، تا

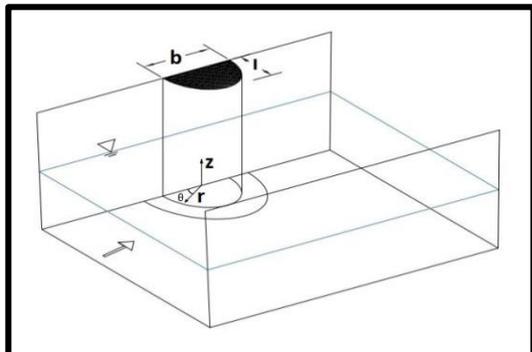


شکل ۱- شمایی از کانال مورد استفاده در این تحقیق

صورت گرفت (Shafai Bajestan 1994). بنابراین آزمایشی بدون حضور تکیه‌گاه در کانال برای تعیین آستانه حرکت ذرات انجام شد. زمانی که ذرات به طور چشمی در آستانه حرکت خود قرار گرفتند، نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی ( $u/u_c$ ) برابر ۰/۹۵ و عمق جریان ۱۲ سانتی‌متر بدست آمد. شکل (۲) نحوه قرارگیری تکیه‌گاه در کانال و رسوبات اطراف آن را نشان می‌دهد.

#### شرایط و مشخصات آزمایشها

برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی، طبق مطالعات Lança et al. (2013) اثرات انقباض در  $B/D \geq 5$  (عرض کانال و قطر پایه) بر عمق آبشستگی بی‌اثر است، بنابراین در این تحقیق این مقدار برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد که بر این اساس طول تکیه‌گاه از جنس پلاستیک تفلون ۳ سانتی-متر به دست آمد. در این تحقیق جهت مطالعه تأثیر طوق بر مکانیزم آبشستگی و تغییرات زمانی آن پارامترهایی چون اندازه طوق در دو اندازه  $1/5L$  و  $2L$  و نیز تراز قرارگیری طوق نسبت به بستر کانال (روی بستر،  $0/2L$  زیر بستر و بالای بستر) بررسی و مطالعه شده است. (Dargahi 1990) با بررسی آبشستگی روی طوقها دریافت طوق نباید خیلی ضخیم باشد، به این دلیل که ضخامت زیاد طوق، سبب ایجاد یک مانع در برابر جریان شده و آبشستگی را افزایش می‌دهد، بنابراین طوقهای موجود در این تحقیق، از جنس پلکسی گلس با ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشند و با استفاده از چسب سیلیکون به تکیه‌گاه متصل شده‌اند.



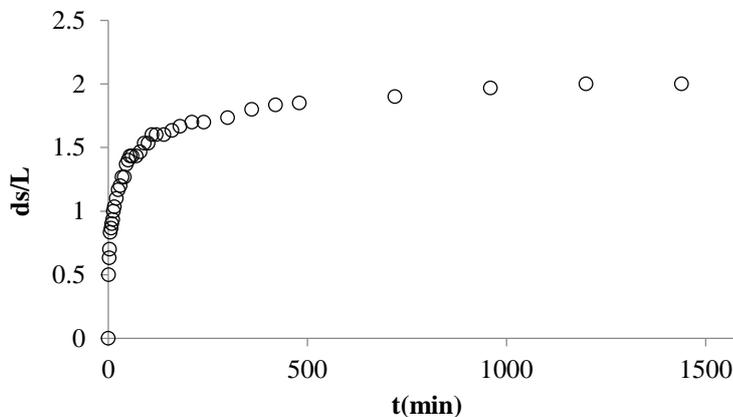
شکل ۲- نحوه‌ی اتصال طوقها به تکیه‌گاه

با توجه به مطالعات، زمانی به عنوان زمان تعادل آبشستگی انتخاب گردید که سه ساعت پس از آن، عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند (Kumar et al. 1999). در این تحقیق نیز

همچنین طبق نظر Raudkivi and Ettema (1983) برای جلوگیری از تشکیل ریبیل در طول آزمایش باید قطر متوسط ذرات بیش از  $0/7$  میلی‌متر باشد. (Melville 1992) بیان نمود زمانی که انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از  $1/3$  می‌باشد می‌توان از تأثیر غیریکنواختی ذرات بر عمق آبشستگی صرف‌نظر کرد. بنابراین از رسوبات غیرچسبیده با قطر متوسط  $0/72$  میلی‌متر، وزن مخصوص  $2/65$  و انحراف معیار هندسی  $1/13$  استفاده شد. با توجه به اینکه حداکثر عمق آبشستگی در شرایط جریان آب-زالال و در هنگامی که سرعت جریان در فلوم کمتر از سرعت آستانه حرکت باشد، رخ می‌دهد، همه آزمایشها در این شرایط

همچنین شرایط آزمایشگاهی، با در نظر گرفتن ۹۰ درصد عمق آبشستگی ماکزیمم کناره تکیه‌گاه، زمان اتمام آزمایش‌ها ۴۸۰ دقیقه (۸ ساعت) بدست آمد.

برای تعیین زمان تعادل آبشستگی از این معیار استفاده شد. مطابق نمودار شکل (۳)، پس از ۲۴ ساعت گودال آبشستگی به تعادل رسید، اما با توجه به توسعه آبشستگی و تغییرات زمانی و



شکل ۳- روند آبشستگی تکیه‌گاه شاهد در مقابل زمان تعادل

اتفاق افتاد. لذا همین نقطه برای برداشت عمق آبشستگی در هر دو حالت با و بدون طوق به‌عنوان نقطه مبنا در تمامی آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفت. همچنین برای این که شکل و ابعاد هندسی گودال آبشستگی در زمان برداشت داده‌های سرعت تغییر نکند، با استفاده از سیمان و پودر سنگ که به نسبت یک‌به‌سه با هم ترکیب شدند، یک لایه بسیار نازک بر روی بستر متحرک پاشیده شد تا بستر تثبیت گردد. داده‌برداری سرعت، توسط دستگاه سرعت‌سنج ADV<sup>۱</sup> با فرکانس ۲۰۰ هرتز و در زمان دو دقیقه که نحوه‌ی قرارگیری آن در شکل (۴) آمده است، انجام گرفت.

نحوه انجام آزمایش‌ها به این گونه بود که ابتدا پیش از شروع هر آزمایش سطح رسوبات بستر با یک ترازنج تسطیح و صاف شده، سپس با توجه به وجود سرریز انتهایی کانال، آب به کمک یک شیلنگ با دبی کم وارد کانال می‌شد تا سطح آب به اندازه‌ی بالا آید که از حرکت رسوبات قبل از تنظیم دبی جلوگیری شود. در نهایت پس از گذشت مدت زمان آزمایش، با خاموش نمودن پمپ و تخلیه کامل آب کانال، پروفیل بستر به وسیله یک دستگاه عمق‌سنج مکانیکی اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است که ماکزیمم عمق آبشستگی بدون حضور طوق در گوشه بالادست تکیه‌گاه



شکل ۴- دستگاه ADV و نحوه برداشت داده‌ها اطراف تکیه‌گاه

در پنج زاویه ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ درجه در راستای هر زاویه چهار پروفیل برداشت شد که نقطه اول (پروفیل ۱) ۶/۵ سانتی‌متر از مرکز تکیه‌گاه فاصله دارد که به دلیل وجود شاخک‌های گیرنده

برای بررسی الگوی جریان، نیاز به اندازه‌گیری و داده‌برداری در اطراف تکیه‌گاه می‌باشد؛ بنابراین شبکه‌ای مشخص پیرامون تکیه‌گاه در نظر گرفته شد. بدین منظور با توجه به مرکز تکیه‌گاه

<sup>۱</sup>Acoustic Doppler Velocimetry

دینامیکی می‌باشند. با استفاده از نظریه باکینگهام و ترکیب بعضی از پارامترهای بی‌بعد با هم، رابطه (۱) به رابطه (۲) تبدیل خواهد شد.

(رابطه ۲)

$$Pr = f\left(\frac{L_c}{L}, \frac{Z_c}{y}, \frac{B}{L}, \frac{b}{L}, \frac{d_s}{L}, \frac{d_{sc}}{L}, \frac{D_{50}}{y}, \frac{t}{t_e}, Fr, Re, S\right)$$

که عبارات  $Fr$  و  $Re$  بترتیب عدد رینولدز و عدد فرود می‌باشند و  $Pr$  درصد کاهش آبشستگی است که از رابطه (۳) بدست می‌آید.

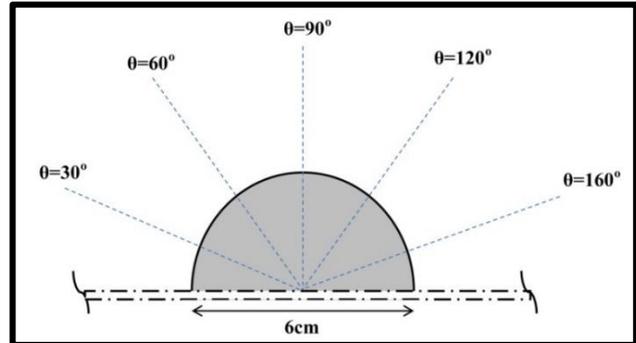
$$Pr = \frac{d_s - d_{sc}}{d_s} \times 100 \quad (3)$$

با توجه به ثابت بودن قطر متوسط مصالح و اثر پارامتر سرعت که در عدد فرود جریان لحاظ شده است و عدد فرود در آزمایش‌ها ثابت می‌باشد، از پارامترهای مربوطه صرف نظر شده است. به علاوه به علت اینکه محدوده عدد رینولدز برای این آزمایش‌ها نزدیک ۲۰۰۰۰ می‌باشد و جریان آشفته است، از پارامتر  $Re$  صرف نظر شد. پارامترهای  $S$ ،  $t/t_e$ ،  $B/b$  نیز به دلیل ثابت بودن، کنار گذاشته شدند. به دلیل این که پارامترهای  $d_s$  و  $d_{sc}$  از یک جنس هستند و می‌توان آن‌ها را یکی در نظر گرفت و همچنین چون درصد کاهش عمق نهایی گودال آبشستگی در این مقاله مد نظر است، در نهایت رابطه (۴) بدست خواهد آمد.

$$Pr = f\left(\frac{L_c}{L}, \frac{Z_c}{y}, \frac{d_s}{L}\right) \quad (4)$$

در جدول (۱) شرایط هر کدام از آزمایش‌ها آورده شده است. که پارامترهای  $L_c$  و  $Z_c$  به ترتیب به عنوان اندازه طوق و تراز قرارگیری طوق نسبت به سطح بستر مطرح هستند.

ADV نزدیک‌تر از این مقدار نمی‌توان شد. سایر نقاط (پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴) نیز به ترتیب ۸/۵، ۱۰/۵ و ۱۲/۵ سانتی‌متر از مرکز تکیه‌گاه فاصله دارند. شکل (۵) نقاط برداشت شده در اطراف تکیه‌گاه را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقاطع اندازه‌گیری جریان در زوایای مختلف

### آنالیز ابعادی

قبل از انجام آزمایش‌ها ابتدا به واسطه آنالیز ابعادی، پارامترهای مهم در پدیده آبشستگی در اطراف دماغه تکیه‌گاه همراه با طوق بررسی شد. عوامل مورد استفاده در تحلیل ابعادی عبارتند از:

(رابطه ۱)

$F(L, b, B, L_c, Z_c, D_{50}, d_s, d_{sc}, u, g, \gamma, \mu, \rho, \rho_s, t, t_e, S) = 0$   
 که در آن  $L$  طول تکیه‌گاه (شعاع تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای)،  $b$  عرض تکیه‌گاه (قطر تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای)،  $B$  عرض کانال،  $L_c$  میزان پیش‌آمدگی طوق در طول تکیه‌گاه (افزایش شعاع طوق نیم‌دایره‌ای نسبت به تکیه‌گاه)،  $Z_c$  فاصله عمودی طوق نسبت به بستر ثابت،  $D_{50}$  قطر متوسط رسوب،  $d_s$  و  $d_{sc}$  عمق آبشستگی به ترتیب بدون طوق و با طوق،  $u$  سرعت جریان،  $g$  شتاب جاذبه،  $\gamma$  عمق جریان،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذره رسوب،  $t$  زمان،  $t_e$  زمان تعادل،  $S$  شیب بستر و  $\mu$  ضریب لزوجت

جدول ۱- مشخصات و شرایط حاکم بر هر آزمایش

شماره آزمایش	اندازه طوق	تراز قرارگیری طوق	شرایط جریان ( $u/u_c$ )
۱	بدون طوق	---	۰/۹۵
۲	۱/۵L	هم‌تراز بستر	۰/۹۵
۳	۱/۵L	۰/۲L بالای بستر	۰/۹۵
۴	۱/۵L	۰/۲L زیر بستر	۰/۹۵
۵	۲L	هم‌تراز بستر	۰/۹۵
۶	۲L	۰/۲L بالای بستر	۰/۹۵
۷	۲L	۰/۲L زیر بستر	۰/۹۵

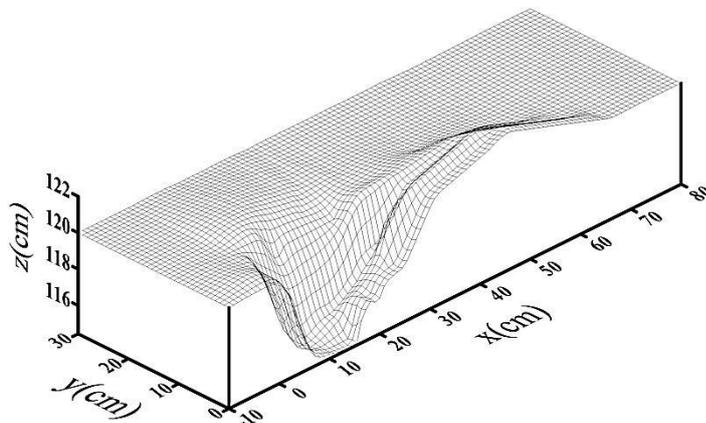
با و بدون طوق ارائه و بررسی خواهند شد. مطابق مشاهده‌های عینی در هنگام آزمایش‌ها، با نصب تکیه‌گاه شاهد و برقراری جریان، ذرات از جلوی تکیه‌گاه شروع به انتقال به پایین دست می‌نمایند و در پشت تکیه‌گاه انباشته می‌شوند. هر چه از زمان

### نتایج و بحث

#### روش حفاظتی طوق

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌های آبشستگی تکیه‌گاه پل

شدید است و بعد از آن هرچه به انتهای زمان آزمایش نزدیکتر گردید انتقال ذرات آرام‌تر شده و در انتها به یک تعادل نسبی ختم شد. در شکل (۶) توپوگرافی بستر برای تکیه‌گاه شاهد با ماکزیمم عمق ۵/۴ سانتی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۶- شکل حفره‌ی آبشستگی نهایی پس از رسیدن به زمان تعادل برای تکیه‌گاه شاهد

آبشستگی را داراست.

در شکل (۸)، خطوط کنتور برای تکیه‌گاه‌های طوق‌دار در اندازه‌های مختلف که بهترین عملکرد را داشته‌اند به همراه تکیه‌گاه شاهد برای مقایسه آورده شده است. بنابر شکل‌ها گودال آبشستگی برای حالت طوق با اندازه  $2L$  کوچک‌تر از  $1/5L$  و هردو کوچک‌تر از حالت بدون طوق می‌باشند. با توجه به توپوگرافی آورده شده، حجم انتقالی رسوب در صورت کاربرد طوق کاهش می‌یابد و عمق نهایی کمتری به دست می‌آید. می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از طوق با اندازه مناسب در طرح می‌تواند از حجم بتن‌ریزی کاسته و هزینه طرح را کاهش دهد.

شکل (۹) پروفیل طولی بستر را برای تکیه‌گاه شاهد و تکیه‌گاه با طوق کوچک‌تر ( $1/5L$ ) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوی به وجود آمده برای حالت طوق بالابستر نسبت به حالت بدون طوق تفاوت چندانی بخصوص در بالادست تکیه‌گاه ندارد که نشان از ناکارآمد بودن استفاده طوق در بالابستر نسبت به دو حالت دیگر است. اما با توجه به شکل (۷) الگوی بستر برای دو حالت قرارگیری طوق در رو و زیر بستر تا حدودی شبیه هم بوده است. در این اندازه طوق، طوق هم‌تراز بستر مفیدتر واقع شده است.

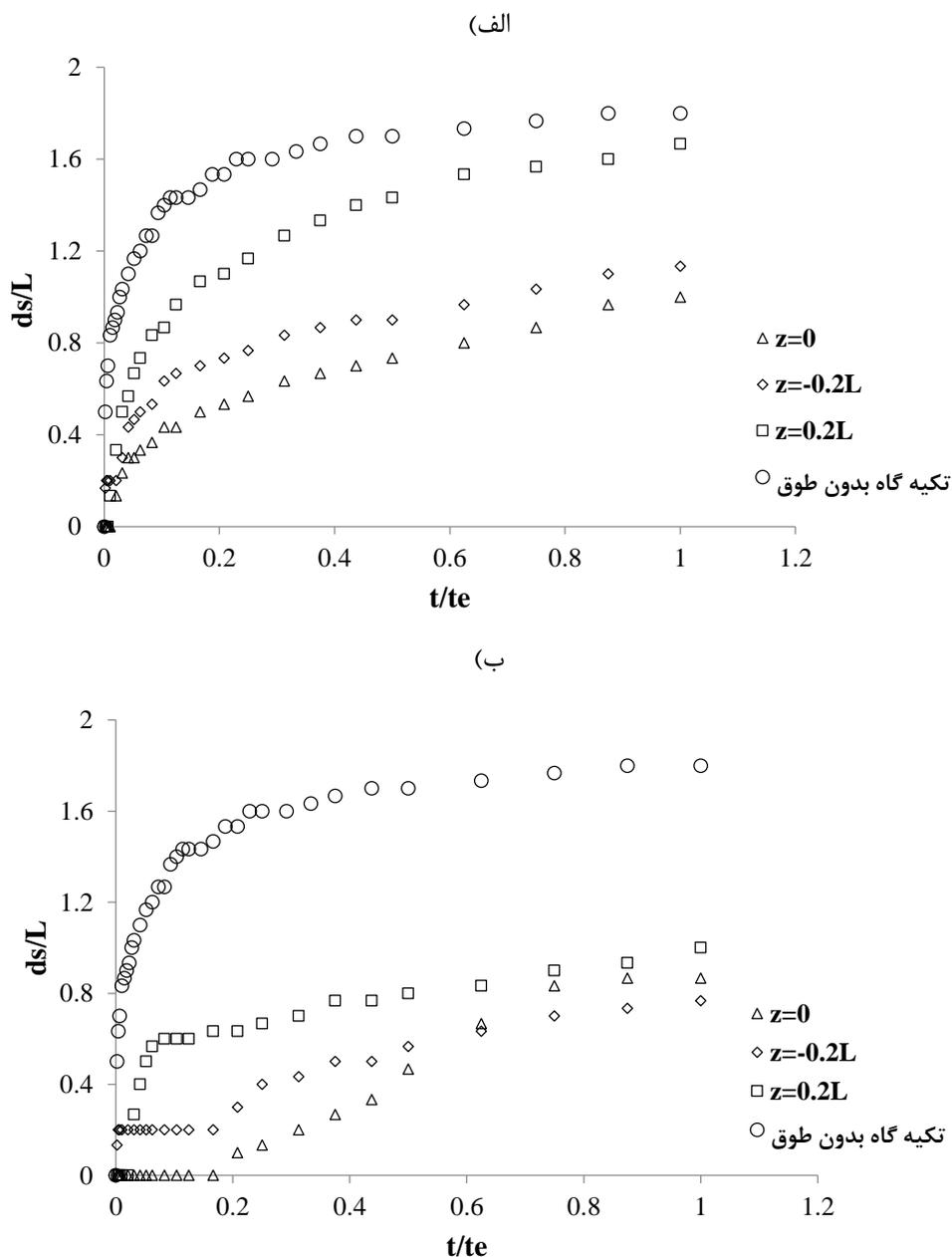
شکل (۱۰) پروفیل طولی بستر را برای تکیه‌گاه شاهد و تکیه‌گاه با طوق بزرگ‌تر ( $2L$ ) نشان می‌دهد. با توجه به الگوهای به وجود آمده با افزایش اندازه طوق نسبت به حالت قبل، میزان آبشستگی حول تکیه‌گاه و در نتیجه حجم انتقالی رسوب به پایین دست سازه کاهش یافته است. به نظر می‌رسد افزایش اندازه

شروع آزمایش می‌گذرد گرداب‌های نعل‌اسبی شکل (ولیه) در جلو تکیه‌گاه و گرداب‌های برخاستگی در پشت آن به نظر می‌رسد شدیدتر شده و موجب گسترش گودال آبشستگی از نظر ابعاد و عمق می‌شوند. این روند در دو ساعت اولیه شروع آزمایش بسیار

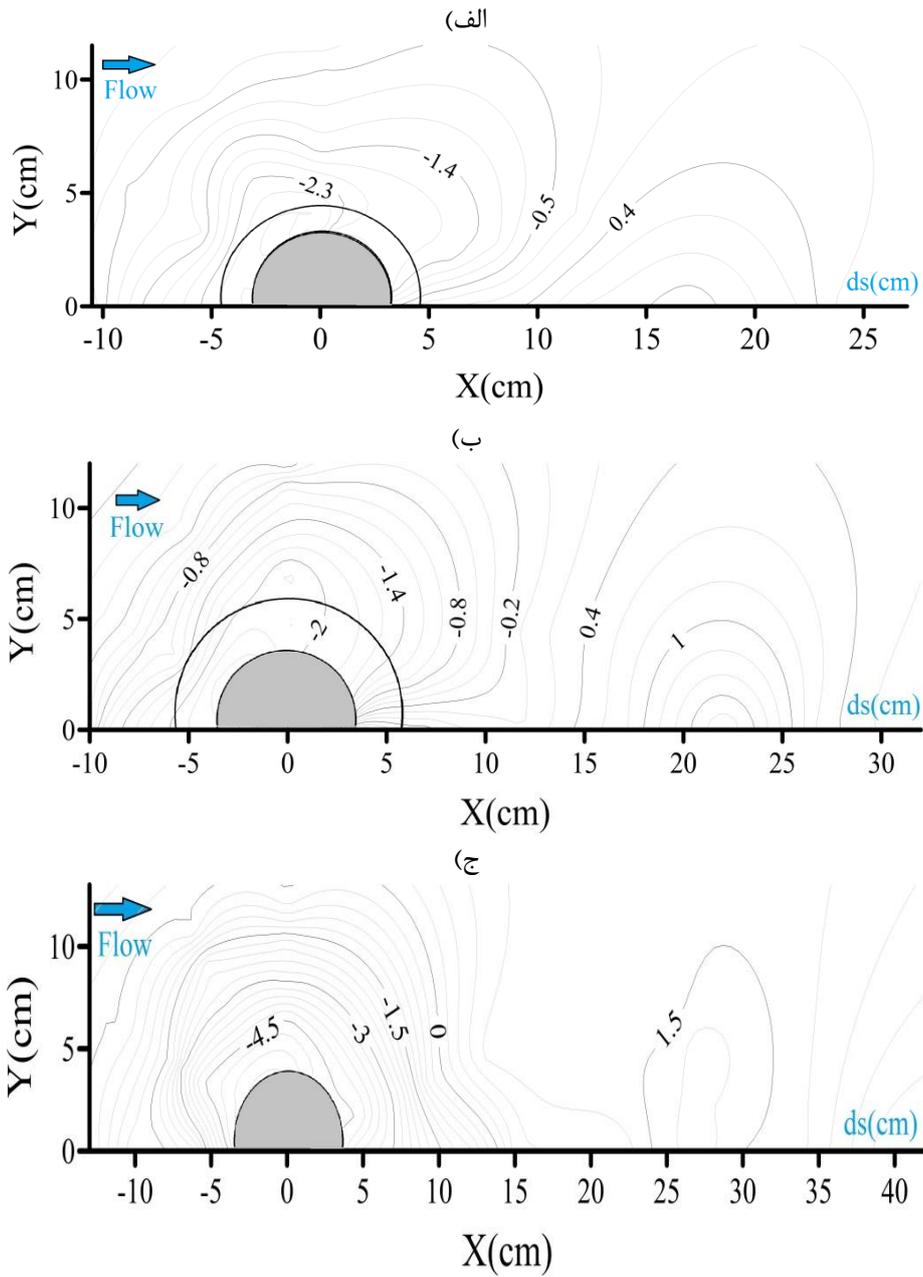
در شکل (۷)، روند آبشستگی برای تکیه‌گاه‌های طوق‌دار با اندازه  $1/5$  برابر طول تکیه‌گاه ( $1/5L$ ) در قسمت الف و برای تکیه‌گاه‌های طوق‌دار با اندازه ۲ برابر طول تکیه‌گاه ( $2L$ ) در قسمت ب در ترازهای مختلف با تکیه‌گاه شاهد برای مقایسه آورده شده است. آنچه از شکل (۷) در هردو قسمت الف و ب مشخص است، وجود طوق موجب تأخیر در روند آبشستگی شده است. در طوق با اندازه  $1/5L$  اگر طوق هم سطح بستر قرار بگیرد، بیشترین عملکرد را در کاهش عمق آبشستگی و تأخیر در آن را دارد و بدترین عملکرد مربوط به قرارگیری طوق بالاتر از تراز بستر است. همچنین در طوق با اندازه  $2L$  عملکرد طوق در تأخیر روند آبشستگی به ویژه در تراز قرارگیری هم‌تراز بستر و زیر بستر مشخص است. آنچه که در شکل (۷) قسمت ب دیده می‌شود قرارگیری طوق در تراز بستر، باعث تأخیر ۲۰ درصدی آبشستگی نسبت به طول تکیه‌گاه در آغاز می‌شود. برای حالتی که طوق زیر تراز بستر قرار گرفته، شروع جریان، موجب ایجاد ۱۰ درصدی آبشستگی در همان آغاز می‌شود اما تا ۲۰ درصد زمان تعادل، مقدار آبشستگی ثابت باقی می‌ماند و مجدداً روندی افزایشی دارد. تا ۶۰ درصد زمان تعادل ۸ ساعته، مشاهده می‌شود تأخیری که تراز قرارگیری طوق بر کاهش آبشستگی دارد، مشابه اثری است که روی طوق با اندازه  $1/5$  برابر طول تکیه‌گاه دارد. یعنی در هر دو اندازه طوق، قرارگیری آن در تراز بستر بهترین عملکرد را دارد. اما برای طوق با اندازه بزرگ‌تر، با افزایش زمان، طوق با قرارگیری در زیر تراز بستر عملکرد بهتری داشته به نحوی که در انتهای مدت زمان آزمایش، این تراز قرارگیری بیشترین کاهش عمق

میزان آبشستگی نهایی را برای دو اندازه طوق به کار رفته، نشان می‌دهد. به طور خلاصه افزایش اندازه طوق در هر تراز قرارگیری باعث کاهش عمق نهایی آبشستگی شده است. در این میان طوق با اندازه دو برابر طول تکیه‌گاه و تراز قرارگیری  $0.2L$  زیر بستر، عملکرد بهتری را از خود نشان داده و موجب کاهش ۵۸ درصدی عمق نهایی آبشستگی شده است. موضوع دیگر آن است که در اندازه‌های برابر طوق توجه به تراز قرارگیری آن می‌تواند موجب عملکرد بهتر طوق و در نتیجه کارآمدی آن در هزینه تمام شده طرح باشد.

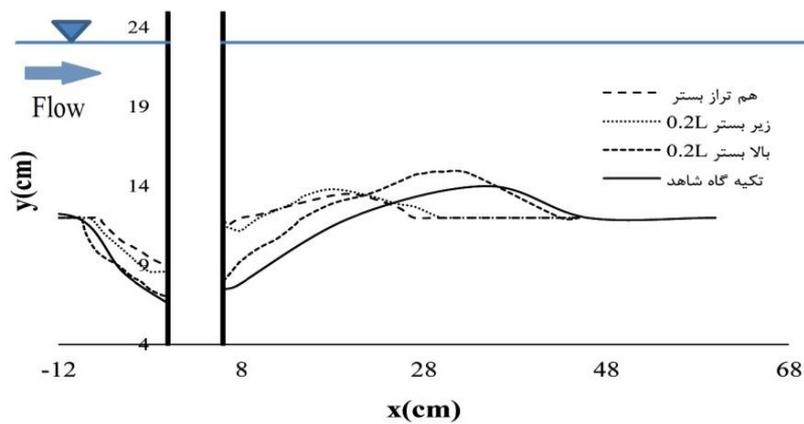
طوق باعث حفاظت بیشتر طوق از سطح فرسایشی بستر در مقابل گرداب‌های اولیه در بالادست و گرداب‌های برخاستگی در پایین- دست شده است. همچنین تراز قرارگیری طوق در زیر بستر از اثر بخشی بالاتری نسبت به دو حالت دیگر برخوردار بوده است. اما قابل ذکر است که طوق هم‌تراز بستر نیز از خود عملکرد خوبی نشان داده است و به حالت طوق زیر بستر نزدیک است. به همین دلیل می‌توان نتایج برخی از محققان که بهترین تراز قرارگیری را هم‌سطح بستر معرفی کردند را تایید کرد. برای درک بهتر، شکل (۱۱) تأثیر تراز قرارگیری طوق بر



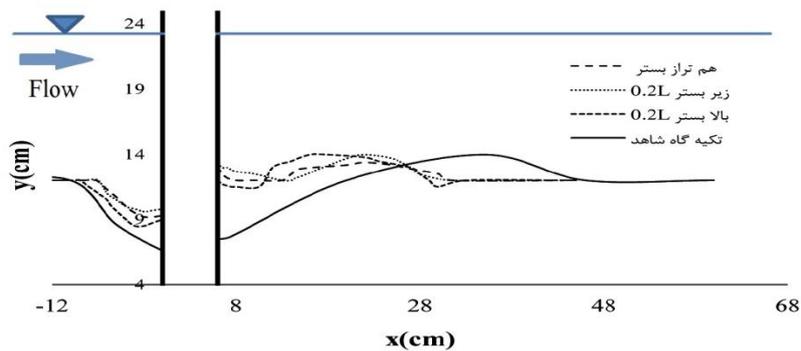
شکل ۷- نمودار توسعه زمانی آبشستگی برای الف) طوق با اندازه  $1/5L$  ب)  $2L$  در ترازهای مختلف



شکل ۸- نمایش توپوگرافی بستر بعد از اتمام آزمایش الف) تکیه‌گاه با طوق  $1/5L$  ب) تکیه‌گاه با طوق  $2L$  ج) تکیه‌گاه شاهد

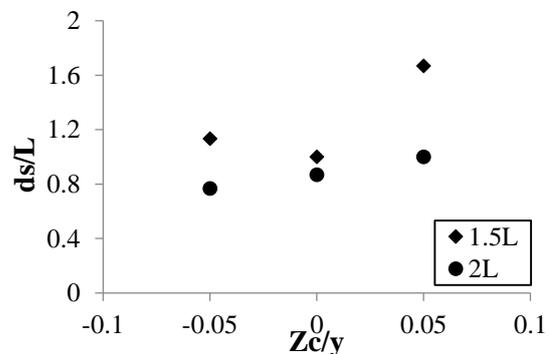


شکل ۹- پروفیل‌های طولی بستر برای تکیه‌گاه با طوق کوچک‌تر در تراز قرارگیری متفاوت



شکل ۱۰- پروفیل‌های طولی بستر برای تکیه‌گاه با طوق بزرگ‌تر در تراز قرارگیری متفاوت

جدول (۲) میزان درصد کاهش عمق آبشستگی را برای بهترین حالت به کار رفته در این آزمایش و تحقیقات سایر محققین نمایش می‌دهد. آنچه که از نتایج این محققان می‌توان دریافت آن است که طوق به عنوان یک روش موثر موجب کاهش در عمق نهایی آبشستگی و تأخیر در روند آن می‌شود. محققان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار را اندازه طوق معرفی کردند. اکثر مطالعات پیرامون تکیه‌گاه‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل است و تفاوت در میزان اثر بخشی طوق مربوط به شرایط مختلف مطالعاتی و آزمایشگاهی است.

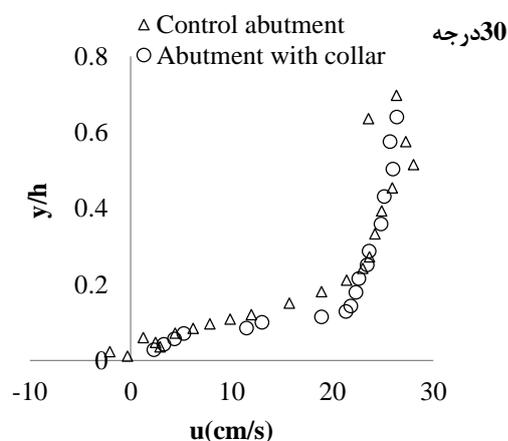
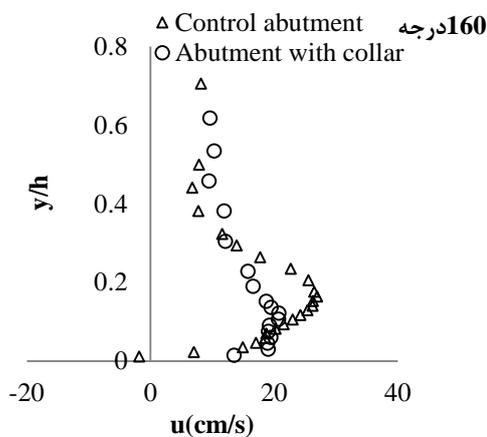


شکل ۱۱- تأثیر تراز قرارگیری طوق بر عمق نهایی آبشستگی

جدول ۲- مقایسه عملکرد طوق در این تحقیق با سایر محققین

محققان و سال تحقیق حاضر	شرایط آزمایش	شکل تکیه‌گاه و طوق	نتایج و میزان کاهش آبشستگی
کریمی و همکاران (۲۰۱۸)	آبشستگی آب‌زال و در ترازهای مختلف	هر دو نیم‌دایره‌ای	عملکرد بهتر طوق با افزایش اندازه و تراز قرارگیری در زیر بستر، موجب کاهش ۵۸ درصدی عمق نهایی آبشستگی
هیولی و همکاران (۲۰۰۶)	در شرایط آبشستگی آب‌زال و در ترازهای مختلف بستر	تکیه‌گاه مستطیلی	بهترین عملکرد طوق در زیر بستر و موجب کاهش ۸۸/۹ درصدی آبشستگی
کایاترک (۲۰۰۴)	شرایط آبشستگی آب‌زال و در ترازهای مختلف	تکیه‌گاه دیوار باله‌ای	اندازه طوق مؤثرترین پارامتر در کاهش میزان عمق آبشستگی است و عمق آبشستگی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد.
مشاهیر و همکاران (۲۰۰۴)	آبشستگی آب‌زال و در ترازهای مختلف	هر دو مستطیلی	با افزایش سایز طوق، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد در بهترین حالت، طوق در زیر بستر موجب کاهش ۶۷ درصدی عمق آبشستگی می‌شود.
خزیمه‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳)	شرایط آبشستگی آب‌زال	هر دو مستطیلی	طوق با ابعاد سه برابر پایه بر روی بستر بهترین کارایی و موجب کاهش عمق آبشستگی حدود ۶۰ درصد
اردشیر و همکاران (۱۳۹۱)	شرایط آبشستگی آب‌زال، تراز قرارگیری و اندازه آن‌ها	هر دو مستطیلی با طوق- های متقارن و نامتقارن	طوق‌ها با افزایش اندازه و قرارگیری در تراز زیر بستر بهترین عملکرد و میزان کاهش آبشستگی بین ۱۵ تا ۹۰ درصد برای اندازه طوق‌های متفاوت
خسروی نیا و همکاران (۱۳۹۰)	آبشستگی آب‌زال و به ازای قرارگیری در سطح بستر	مستطیلی و دوزنقه‌ای، طوق‌های متقارن و نامتقارن مستطیلی و دوزنقه‌ای	طوق متقارن برای تکیه‌گاه مستطیلی در زیر تراز بستر موجب کاهش ۸۷/۸ درصدی، همچنین طوق متقارن برای تکیه‌گاه دوزنقه‌ای در روی تراز بستر موجب کاهش ۶۷/۸ درصدی
		آبشکن بالدار و طوق‌های دوزنقه‌ای	با افزایش عرض طوق، کاهش عمق و افزایش تأخیر زمانی آبشستگی بیش‌تر می‌شود. درصد کاهش آبشستگی از ۱۵ تا ۱۰۰ درصد برای طوق‌های با عرض مختلف

تغییرات سرعت کم می‌باشد و سرعت دارای نوسانات کمتری نسبت به پروفیل تکیه‌گاه شاهد است. همچنین در درون گودال با توجه به گذر جریان از بخش بزرگ‌تری از مقطع در تکیه‌گاه شاهد به دلیل آبشستگی بزرگ‌تر،  $u$  کوچک‌تر از شرایط حضور تکیه‌گاه طوق دار است. در محدوده‌ی اندازه‌گیری داده‌ها، در تکیه‌گاه شاهد مقادیر سرعت نزدیک به صفر و حتی منفی مشاهده و جدایی جریان رخ داده است که نشان دهنده ورتکس‌های قوی‌تری در بالادست گودال نسبت به تکیه‌گاه طوق دار است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اگر امکان نزدیک شدن به تکیه‌گاه به دلیل محدودیت دستگاه ADV و همچنین استفاده از مدلی بزرگ‌تر وجود داشت احتمالاً می‌توان شاهد مقادیر بزرگ‌تر و بیشتری از سرعت منفی در جلو تکیه‌گاه‌ها بود. در زاویه  $160^\circ$  درجه نیز به دلیل کاهش سرعت طولی در نزدیکی بستر و افزایش آن در سطح آب نسبت به تکیه‌گاه شاهد، نشان از ضعیف شدن گرداب‌های برخاستگی در پشت تکیه‌گاه دارد.



شکل ۱۲- مقایسه توزیع پروفیل‌های سرعت طولی در زوایای  $160^\circ$  و  $30^\circ$  در اطراف تکیه‌گاه طوق دار و شاهد

مکانی این پارامتر گردیده است.

#### پروفیل‌های سرعت عرضی جریان (v)

در حالت کلی برای هر دو تکیه‌گاه سرعت‌های عرضی روند خاصی را دنبال نمی‌کنند، هرچند در داخل گودال سرعت‌های بالا نیز مشاهده می‌شود که این گواه بر سه‌بعدی بودن جریان و انتقال آشفتگی می‌باشد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که نیمرخ‌های سرعت در راستای جانبی حدوداً روندی مشابه با حالت بدون طوق طی می‌کنند با این تفاوت که سرعت‌ها از نظر اندازه در این حالت کوچک‌ترند. با توجه به شکل (۱۴) در زاویه  $30^\circ$  درجه در نزدیکی بستر مقادیر سرعت در راستای جانبی برای تکیه‌گاه شاهد دارای

#### بررسی و تغییرات الگوی جریان

برای بررسی بهتر و دلایل موثر بر تأثیرگذاری طوق بر کاهش آبشستگی در ادامه به بررسی ساختار جریان پیرامون تکیه‌گاه با و بدون طوق پرداخته خواهد شد. از این رو با توجه به قسمت‌های پیشین تکیه‌گاه طوق دار با بهترین عملکرد (طوق با اندازه  $2L$  و  $0.2L$  زیر بستر) با تکیه‌گاه شاهد مورد مقایسه قرار داده شده است.

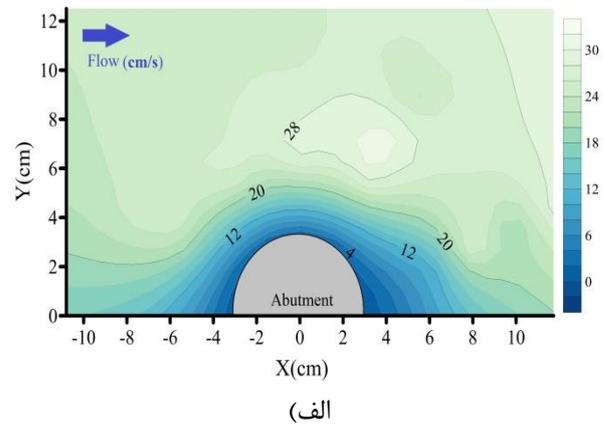
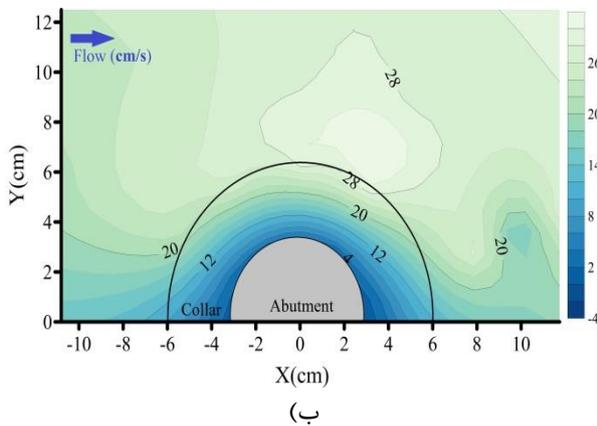
#### پروفیل‌های سرعت در جهت جریان (u)

از آنجا که در نزدیک تکیه‌گاه‌ها مقدار تغییرات زیادتر است و هدف اصلی بررسی ساختار جریان در نزدیکی تکیه‌گاه‌هاست و به دلیل کمبود فضا، در ادامه فقط پروفیل (۱) که نزدیک‌ترین فاصله را به تکیه‌گاه دارد ( $3/5$  سانتی‌متر، به دلیل محدودیت شاخک‌های ADV نمی‌توان نزدیک‌تر شد) در قسمت بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه مورد بحث و مقایسه قرار گرفت. با توجه به شکل (۱۲) در زاویه  $30^\circ$  و  $160^\circ$  درجه مشاهده می‌شود که در نزدیکی بستر به علت وجود طوق و در نتیجه گودال آبشستگی کوچک‌تر،

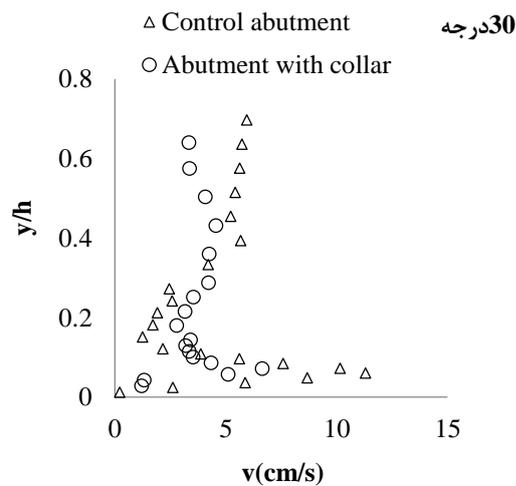
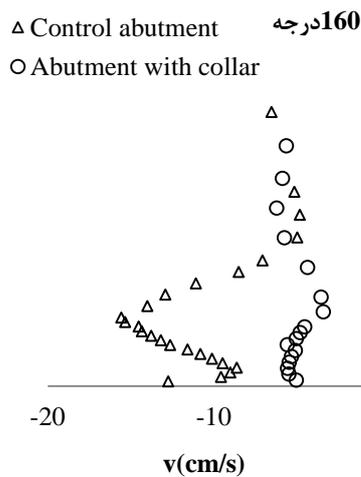
با توجه به شکل (۱۳) حداکثر سرعت در تمامی حالت‌ها در کنار و حدوداً در پایین‌دست تکیه‌گاه رخ می‌دهد که به دلیل تنگ‌شدگی مقطع می‌تواند باشد. جدایی جریان در نزدیکی تکیه‌گاه بخصوص در جلو و پشت آن با توجه به تغییر علامت سرعت متوسط طولی رخ داده است. منطقه‌ی wake در پایین‌دست تکیه‌گاه کاملاً مشهود است. از آنجایی که منطقه برخاستگی در انتقال سیال به پایین‌دست جریان کمک نمی‌کند، جریان در ناحیه مجاور آن با سرعت حرکت می‌کند و سیال اضافی را انتقال می‌دهد (Ahmed and Rajaratnam 1998). اما آنچه که مشخص است حضور طوق باعث تغییرات مقادیر سرعت طولی و جابه‌جایی

برای تکیه‌گاه شاهد نشان از وجود گرداب‌های چرخشی شدید در پشت تکیه‌گاه را دارد. ولی این مقادیر برای تکیه‌گاه با طوق در مقایسه با شاهد نشان از کاهش قدرت گرداب‌های برخاستگی را می‌دهد.

مقادیر مثبت و بزرگ‌تری نسبت به تکیه‌گاه طوق‌دار است که این تفاوت سرعت‌ها می‌تواند نشانه هدایت جریان از روی طوق به سمت پایین‌دست باشد. در زوایای ۱۶۰ درجه سرعت‌های منفی و بزرگ در کف و کاهش شدید سرعت‌های منفی در سطح آب



شکل ۱۳- پلان خطوط کنتور سرعت طولی (u) در الف) تکیه‌گاه شاهد و ب) تکیه‌گاه طوق‌دار در ارتفاع ۵ میلی‌متر از بستر



شکل ۱۴- مقایسه توزیع پروفیل‌های سرعت عرضی در زوایای ۱۶۰ و ۳۰ درجه در اطراف تکیه‌گاه طوق‌دار و شاهد

آبشستگی می‌باشد. در این تراز ( $z=5\text{mm}$ ) جدایی جریان در بالادست تکیه‌گاه به دلیل وجود گرداب‌های اولیه و ثانویه کاملاً مشهود می‌باشد. حضور طوق به عنوان یک روش کاهش آبشستگی اثر قابل ملاحظه‌ای به جدایی جریان بخصوص در نواحی پایین‌دست تکیه‌گاه گذاشته و مقادیر سرعت عرضی کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهند.

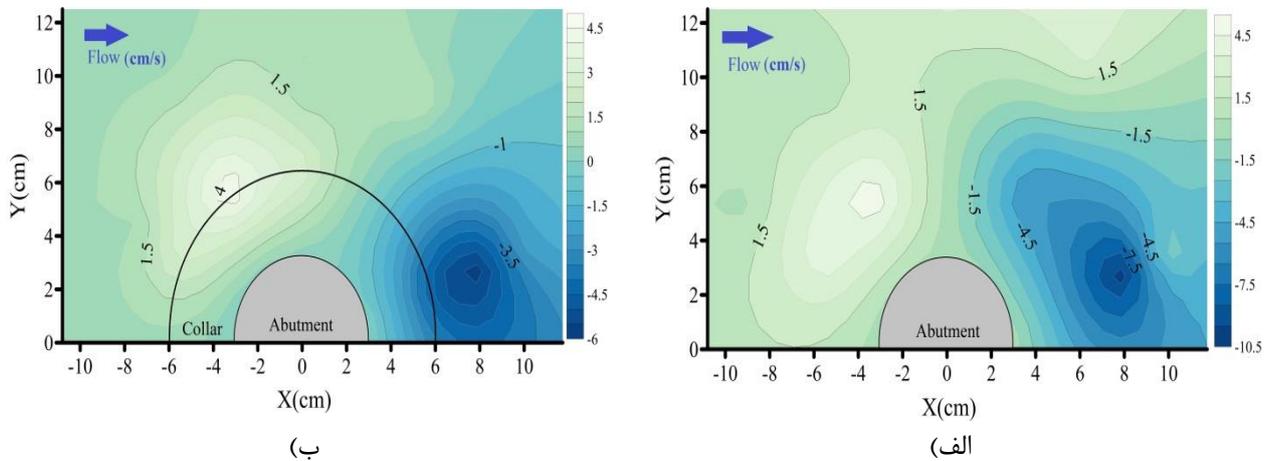
#### پروفیل‌های سرعت قائم (w)

توزیع پروفیل‌های سرعت قائم در اطراف تکیه‌گاه با طوق و تکیه‌گاه شاهد برای زوایای مشخص شده در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۶) در زاویه ۳۰ درجه سرعت جریان رو به پایین نسبت به تکیه‌گاه شاهد به طور مشخص کاهش پیدا

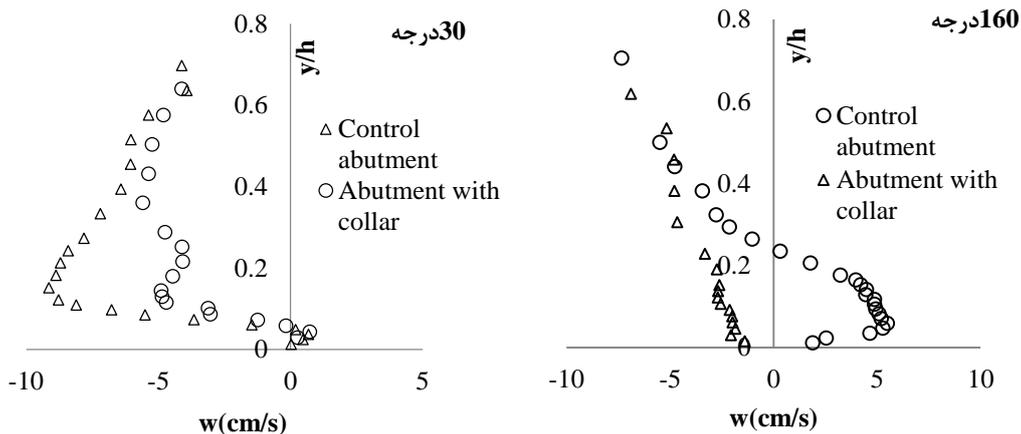
از روی خطوط هم‌سرعت عرضی در شکل (۱۵) می‌توان چنین برآورد کرد که برای تمامی حالت‌های آورده شده در این شکل سرعت عرضی در بالادست تکیه‌گاه به سمت مرکز کانال منحرف می‌شود که برای دور زدن تکیه‌گاه امری طبیعی می‌باشد. در پایین‌دست تکیه‌گاه نیز مقادیر منفی سرعت عرضی نشان از انحراف جریان به پشت تکیه‌گاه و ایجاد گرداب‌های برخاستگی در این نواحی را نشان می‌دهد (Afzalimehr et al. 2017). (2003) Barbhuiya and Dey نشان دادند که در بالادست جریان بدون حضور تکیه‌گاه مقدار سرعت عرضی در ابتدا مقدار ناچیزی است ولی با نزدیک شدن به تکیه‌گاه (به‌خصوص در درون حفره) افزایش چشمگیری می‌یابد که نشان از انحراف جریان در حفره

بالا به دلیل برخورد جریان به بستر و حرکت رو به بالا و به وجود آمدن گردابها را دارد. روند جریان قائم در زاویه ۱۶۰ درجه در هر دو تکیه‌گاه در سطح آب حدوداً یکسان است ولی در حفره و نزدیک بستر سرعت‌های قائم در تکیه‌گاه طوق دار دارای مقادیر کمتر و با علامت منفی‌اند که به نظر می‌رسد به خاطر کوچک شدن گودال به دلیل تاثیرات طوق بر روی گرداب‌های برخاستگی می‌باشد. در شرایطی که مقادیر مثبت سرعت قائم در این ناحیه برای تکیه‌گاه شاهد نشان از گرداب‌های مکنده به سمت بالا ناشی از گرداب‌های برخاستگی قوی می‌باشد.

کرده است که به نظر به دلیل وجود طوق در برابر این نوع جریان می‌باشد. در تکیه‌گاه طوق دار جریان به دو دسته جریان بالا و پایین طوق تقسیم می‌شود. مطابق قسمت الف شکل (۱۶) جریان در بالای طوق از سطح آب، با حرکت به پایین نسبت به تکیه‌گاه شاهد روند کاهشی قدر مطلق سرعت را طی می‌کند که به دلیل وجود طوق و نقش آن در برابر جریان رو به پایین است. اما جریان در پایین طوق دوباره با افزایش سرعت رو به پایین همراه بوده و سپس تا نزدیکی بستر روند کاهشی به خود می‌گیرد؛ حتی روی بستر مقادیر سرعت مثبت می‌شوند که نشان از جریان رو به



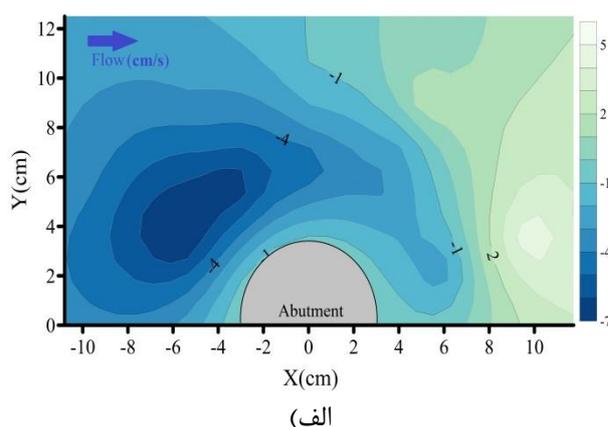
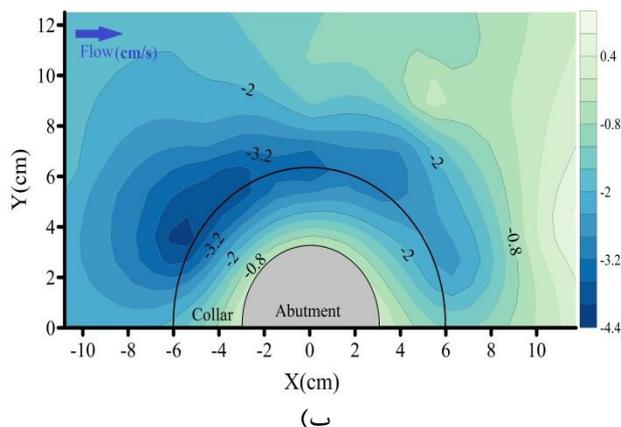
شکل ۱۵- پلان خطوط کنتور سرعت عرضی (الف) در الف) تکیه‌گاه شاهد و (ب) تکیه‌گاه طوق دار در ارتفاع ۵ میلی‌متر از بستر



شکل ۱۶- مقایسه توزیع پروفیل‌های سرعت قائم در زوایا ۳۰ و ۱۶۰ درجه در اطراف تکیه‌گاه طوق دار و شاهد

انحراف بیشتر این جریان و حفاظت بیشتر از بستر می‌گردد. در پایین دست تکیه‌گاه نیز اعمال روش محافظتی باعث کاهش بیشتر سرعت‌های قائم در این نواحی شده که در نتیجه آن کاهش قدرت گرداب‌های برخاستگی را در پی داشته است.

از مقایسه سرعت قائم برای حالت‌های طوق دار و تکیه‌گاه شاهد در شکل (۱۷)، می‌توان دریافت که وجود طوق باعث کاهش سرعت جریان روبه پایین و در نتیجه کاهش قدرت گرداب‌های اولیه در بالادست تکیه‌گاه می‌شود. همچنین وجود طوق نیز باعث



شکل ۱۷- پلان خطوط کنتور سرعت قائم (w) در الف) تکیه‌گاه شاهد و ب) تکیه‌گاه طوق‌دار در ارتفاع ۵ میلی‌متر از بستر

## نتیجه‌گیری

بهرتری را از خود نشان داده و موجب کاهش ۵۸ درصدی عمق نهایی آبشستگی شده است.

تراز قرارگیری طوق‌ها با اندازه برابر می‌تواند موجب عملکرد بهتر طوق و در نتیجه کارآمدی آن در هزینه تمام شده طرح باشد. به گونه‌ای که در این تحقیق قرارگیری طوق کوچک‌تر ( $1/5L$ ) روی بستر و قرارگیری طوق بزرگ‌تر ( $2L$ ) زیر تراز بستر بهترین عملکرد را دارا می‌باشند.

با توجه به بررسی پروفیل‌های سرعت جریان در جهات x,y,z در اطراف تکیه‌گاه، گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی که عوامل اصلی ایجاد آبشستگی می‌باشند، در اطراف تکیه‌گاه شناسایی شدند. با نصب و به کارگیری طوق، وجود طوق موجب کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش قدرت گرداب‌ها و جابه‌جایی موقعیت آن‌ها در اطراف تکیه‌گاه گردید.

در پژوهش حاضر از روش طوق نیم‌دایره‌ای شکل در تکیه‌گاه به منظور کنترل و کاهش آبشستگی استفاده شده است. نتایج نشان داد که طوق‌ها در شرایط مختلف در کاهش عمق آبشستگی و تأخیر در روند آبشستگی موثر بوده‌اند. همچنین برای محاسبه‌ی دقیق عمق آبشستگی و شناخت هر چه بهتر آن، نیاز به فهم بیشتری از الگوی جریان و مکانیزم‌های حاکم بر آبشستگی موضعی و انتقال رسوب در اطراف تکیه‌گاه‌هاست. به طور خلاصه می‌توان به نتایج زیر در این مطالعه اشاره کرد:

افزایش اندازه طوق در هر تراز قرارگیری باعث کاهش عمق نهایی آبشستگی شده است. در این میان طوق با اندازه دو برابر طول تکیه‌گاه ( $2L$ ) و تراز قرارگیری ( $0/2L$ ) زیر بستر، عملکرد

## REFERENCES

- Afzalimehr, H., Bakhshi, S., Gallichand, J. and Sui, J. (2014), "Effect of Vegetated-banks on Local Scour around a Wing-wall Abutment with Circular Edges", *Journal of Hydrodynamics*, 26(3), pp 447-457.
- Afzalimehr, H., Moradian, M., & Singh, V. P. (2017). Flow Field around Semielliptical Abutments. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(2), 04017057.
- Ahmed, F., & Rajaratnam, N. (1998). Flow around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(3), 288-300.
- Ardeshir, A., Cheraghi, R. and Karami, H., (2013) "Experimental Study of Effect of Collar on Local Scour Reduction around Vertical and 45° Wing wall Abutments", *Journal of Civil Engineering*, 24(1), pp. 59-70. (In Farsi).
- Barbhuiya, A.K. and Dey, S. (2003), "Vortex Flow Field in a Scour Hole around Abutments", *International Journal of Sediment Research*, 18(4), pp 1-16.
- Dargahi B. (1990). Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116(10): 1197-1214.
- Ettema, R., Constantinescu, G. and Melville, B.W. (2017). Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch (Doctoral dissertation, American Society of Civil Engineers).
- Ettema, R., Nakato, T. and Muste, M., (2010). Estimation of scour depth at bridge abutments. *NCHRP 20-24. Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Foti, S. and Sabia, D. (2011). "Influence of scour of foundations on the dynamic response of an existing bridge." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 295-304.
- Hong, S. H., Sturm, T. W., & Stoesser, T. (2015). Clear Water Abutment Scour in a Compound Channel for Extreme Hydrologic Events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(6), 04015005.
- Karami, H., Hosseinjanzadeh, H., Hosseini, K., & Ardeshir, A. (2018). Scour and three-dimensional flow field measurement around short vertical-wall abutment protected by collar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 141-152.
- Kayaturk, S.Y., Kokpinar, M.A. and Gogus, M (2004). "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.
- Khosravi Nia, P., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., Fakheri - Fard, A. (2014). 'Effect of Collar on Scour Reduction Around Abutments', *Water and Soil Science*, 21(1), pp. 15-28. (In Farsi).
- Khozeymehnezhad, H., Ghomeshi, M. (2016). 'Experimental Investigation of Collar Performance with Rough Surface on Local Scour Reduction around Bridge Abutment with Rectangular Section', *Water and Soil Science*, 26(1-1), pp. 213-223. (In Farsi).
- Khozeymehnezhad, H., ghomeshi, M., hafaeeibajestan, M. (2014). 'Comparison of Symmetrical and Unsymmetrical Rectangular Collars on Reduction of Local Scour at Bridge Abutment', *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(2), pp. 1-12. (In Farsi).
- Koken, M., & Constantinescu, G. (2014). Flow and turbulence structure around abutments with sloped sidewalls. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7), 04014031.
- Kumar, V., Raju, K.G.R. and Vittal, N., (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), pp.1302-1305.
- Lança, R. M. Fael, C. S. Maia, R. J. Pêgo, J. P. and Cardoso, A. H. (2013). Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), pp. 1117-1125.
- Li, H.M.T., Kuhnle, R. and Barkdoll, B.M.T., (2005). *Countermeasures against scour at abutments*. Lab Publ, 49, p.150.
- MacBroom, J. G. (2012). Bridge scour and sediment analysis for river restoration projects, Paper presented at the World Environmental and Water Resources Congress, Albuquerque, NM, DOI: 10.1061/9780784412312.252.
- Mashair, M.B., Zarrati, A.R. and Rezayi, A.R (2004). "Time Development of Scouring around a Bridge Pier Protected by Collar", *2nd International Conference on Scour and Erosion*, ICSE-2, Singapore, 8 p.
- Melville, B. W (1992). "Local Scour at Bridge Abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, pp 615-631.
- Muzzammil, M .and T. Gangadhariah. (2003). The mean characteristics of horseshoe vortex at a cylindrical pier. *J. Hydraul. Res.* 41: 285-297.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1983). Clear-Water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109(3), pp. 338-350.
- Shafai Bajestan, M. 1994. *Hydraulics of Sediment*. Ahvaz. univ. press. 327p. (In Farsi).
- Sui, J., Hicks, F. and Menounos, B. (2006), "Observations of Riverbed Scour under a Developing Hanging Ice Dam", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), pp 214-218.
- Wang, J., Sui, J. and Karney, B.W. (2008), "Incipient Motion of Non-cohesive Sediment under Ice Cover", *Journal of Hydrodynamics*, 20(1), pp 117-124.