

بررسی آزمایشگاهی تأثیر طوق دایره‌ای بر آبشستگی پایه پل استوانه‌ای در جریان غیرماندگار

یوسف رجبی‌زاده^۱، سید علی ایوب زاده^{۱*}، کوروش قادری^۲

^۱ گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

کلمات کلیدی:

آبشستگی موضعی

پایه پل

طوق

کنترل آبشستگی

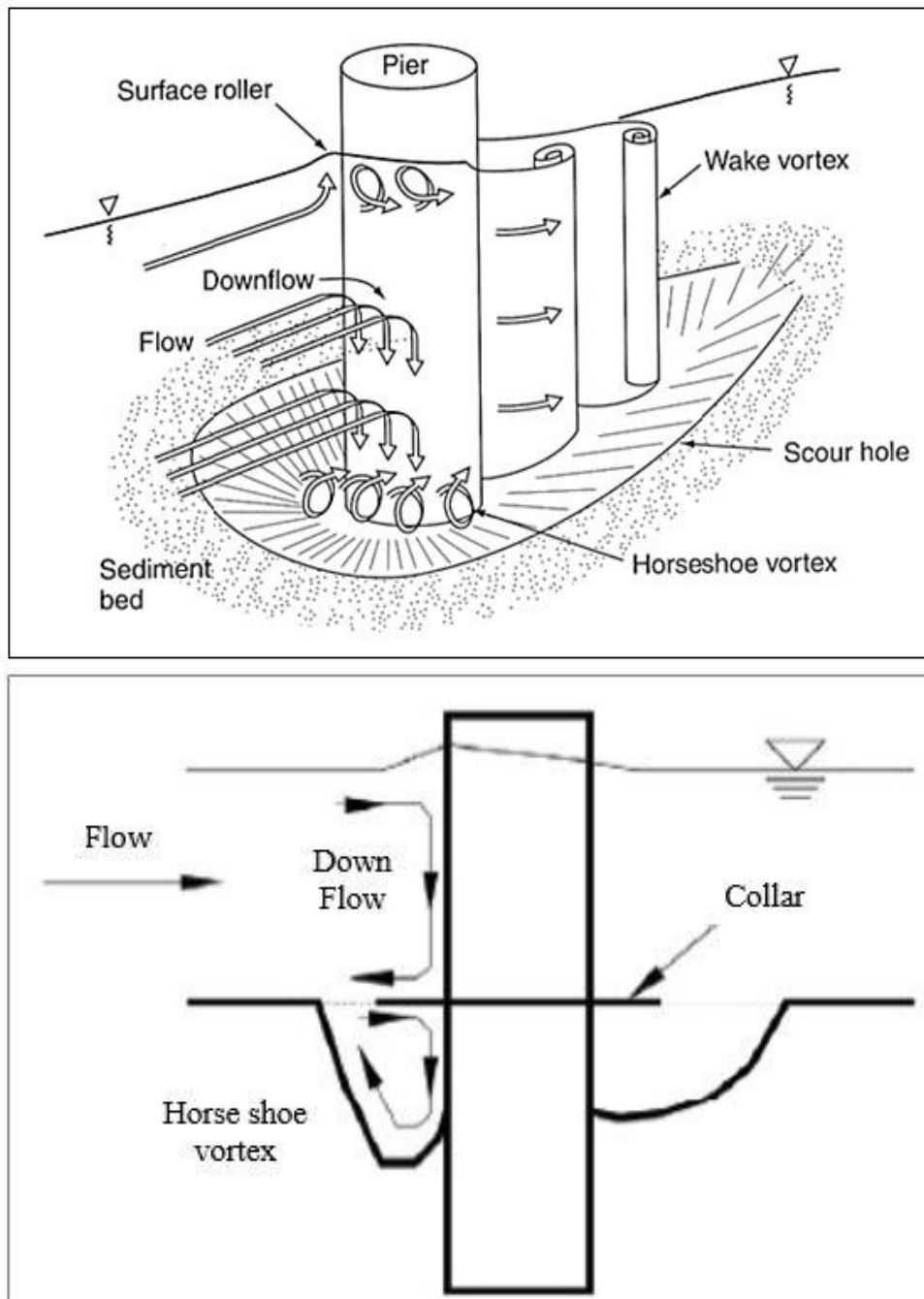
هیدروگراف

خلاصه: آبشستگی پایه پل یکی از عوامل اصلی تخریب پل‌ها در سراسر جهان است. علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در این زمینه انجام شده، مطالعه در این مبحث همواره مورد توجه محققین بوده و بررسی روش‌های مختلف در مقابله با آن ضرورت دارد. طوق سازه‌ای ساده و ارزان برای حفاظت در مقابل آبشستگی پایه پل می‌باشد. در این تحقیق تأثیر اندازه و ارتفاع نصب طوق بر آبشستگی پایه پل و تعیین بهترین شرایط عملکرد طوق در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌ها از سه اندازه طوق مختلف و سه ارتفاع نصب متفاوت نسبت به سطح بستر استفاده شد. پس از محاسبه درصد کاهش آبشستگی در تمامی حالات آزمایش و مقایسه آن‌ها، بررسی نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی و مقایسه‌ی حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده در حالات مختلف، مشخص شد که افزایش اندازه طوق و کاهش ارتفاع نصب طوق نسبت به سطح بستر سبب کاهش بیشتر عمق آبشستگی پایه پل می‌شود که این روند تغییرات در حالت جریان غیرماندگار مشهودتر بود. همچنین با مقایسه‌ی دو متغیر اندازه و ارتفاع نصب طوق مشخص شد که ارتفاع نصب طوق با نسبت بی‌بعد $H/D = 0.5$ در هر دو جریان ماندگار و غیرماندگار بهترین عملکرد و بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل دارد.

۱- مقدمه

تا مهندسان هیدرولیک با چگونگی عمل آبشستگی آشنایی کامل پیدا کنند [۱] دو عامل مهم باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شود: یکی برخورد به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه پل. الگوی جریانی که در اطراف پایه پل شکل می‌گیرد به طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط می‌باشد. با توجه به شکل ۱، برخورد جریان به پایه پل، جریان‌های گردابی را شکل داده و جدایی جریان از پایه باعث به وجود آمدن گردابه‌ای که به گرداب نعل‌اسبی موسوم است، خواهد شد. روش‌های متعددی برای حفاظت بستر رودخانه در برابر آبشستگی وجود دارد که با مکانیزم تضعیف جریان‌های گردابی سبب این مهم می‌شوند. یکی از این روش‌ها استفاده از سازه‌های دگرگون‌کننده جریان که باعث گسسته کردن میدان جریان اطراف سازه و در نتیجه کاهش قدرت فرسایشی جریان رو به پایین و گرداب‌های نعل‌اسبی می‌شوند [۲] یکی از سازه‌های دگرگون‌کننده

یکی از مهم‌ترین مشکلات مهندسی آب، ساخت پل‌ها و سازه‌های هیدرولیکی بدون توجه کافی به تغییرات هیدرولیکی و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌باشد. سازه‌های هیدرولیکی، رژیم یکنواخت جریان و حمل رسوب را بهم می‌زنند که ممکن است باعث فرسایش بستر رودخانه شوند. آبشستگی تعاریف متعددی دارد از جمله: وقوع فرسایش بستر و کناره‌ی آبراهه در اثر عبور جریان آب یا فرسایش بستر در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا وقوع فرسایش بستر در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی. از آنجا که در اثر آبشستگی بستر رودخانه فرسایش می‌یابد و این فرسایش باعث گود شدن بستر می‌گردد، ممکن است مخاطرات جدی را برای سازه مجاور به همراه داشته باشد. از این رو لازم است *نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ayyoub@modares.ac.ir



شکل ۱. الف) فرآیند آبشستگی اطراف پایه پل توسط جریان‌های گردابی [۴] ب) آبشستگی و الگوی جریان اطراف پایه محافظت شده با طوق [۵]
Fig. 1. a) The scour process around the bridge pier by vortex flow; b) Scour and flow pattern around collar protected pier

رو به پایین را گرفته و اثر فرسایشی این عوامل را تا حد زیادی خنثی کند. مطابق شکل ۱ یک طوق در هر سطحی نسبت به بستر نصب شود، جریان را به دو ناحیه بالا و پایین طوق تقسیم می‌کند. ناحیه بالای طوق به عنوان یک مانع در مقابل جریان رو به پایین عمل کرده

جریان که با تضعیف گرداب‌های اطراف سازه، سبب کاهش فرسایش می‌شود، سازه حفاظتی طوق است. طوق یک صفحه‌ی موازی با کف رودخانه، عمود بر پایه و به صورت یک سپر محافظ برای بستر دور پایه نصب می‌شود و می‌تواند در دماغه‌ی بالادست پایه، جلوی جریان

دادند [۸] نجم^۲ و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی عملکرد طوق مسطیلی به این نتیجه رسیدند که افزایش عرض طوق، با کاهش بیشتر عمق آبستگي همراه است که این کاهش آبستگي با افزایش نسبت عرض طوق به قطر پایه ($\frac{b}{D}$) از ۱/۵ به ۵، ۹۰ درصد گزارش شد [۹] کومکو^۳ و همکاران (۲۰۱۴) اثر طوق در عمق آبستگي پایه پل در ارتفاعات مختلف برای دو نوع بستر شن و ماسه با دانه بندی یکنواخت را ارزیابی کردند. نتایج آزمایش نشان داد که آبستگي در حالت با طوق در مقایسه با حالت بدون طوق ۷۰ تا ۱۰۰ درصد کاهش یافته و بهترین محل طوق زیر سطح بستر می‌باشد [۱۰] همچنین تحقیقاتی در مورد تأثیر سازه طوق بر حفاظت آبستگي اطراف تکیه‌گاه پل نیز صورت گرفته است؛ نظیر تحقیق کریمی و همکاران (۱۳۹۷) که تأثیر طوقی با ابعاد ۲/۵ برابر طول تکیه‌گاه و در ارتفاع‌های مختلف نصب بر روی کاهش آبستگي اطراف تکیه‌گاه پل را بررسی کردند و نتایج نشان داد که بیشترین میزان کاهش آبستگي در حالت هم سطح بودن بستر رسوبي با طوق می‌باشد [۱۱] خلاصه نتایج نشان داد که استفاده از طوق برای کاهش حداکثر عمق آبستگي قابل قبول و بهینه است. همچنین مطالعاتی نیز در زمینه تأثیرات جریان غیرماندگار بر آبستگي اطراف پایه پل انجام شده است؛ نظیر تحقیق لای^۵ و همکاران (۲۰۰۹) که اثر تغییرات زمانی هیدروگراف بر عمق آبستگي موضعی اطراف پایه پل تحت شرایط آب زلال را بررسی کردند. در این تحقیق با تجزیه و تحلیل خصوصیات توسعه عمق آبستگي اطراف پایه پل تحت تأثیر هیدروگراف‌های مختلف، یک رابطه برای تخمین حداکثر عمق آبستگي با رسوبات یکنواخت ارائه گردید. در این رابطه اثر غیرماندگار بودن جریان برگرفته از ترکیب عوامل شدت و زمان دبی اوج هیدروگراف می‌باشد. همچنین برای رسوب غیریکنواخت با اندازه رسوب مؤثر D_{84} ، این رابطه نتایج مناسب و قابل قبولی برای تخمین حداکثر عمق آبستگي تحت شرایط جریان غیرماندگار دارد [۱۲] طبرستانی و زرانی (۲۰۱۷) آبستگي موضعی اطراف پایه پل در جریان سیلابی (غیرماندگار) را بررسی کردند. در تحقیق مذکور اثر شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف و دبی اوج هیدروگراف بر آبستگي موضعی اطراف پایه پل ارزیابی شد. نتایج نشان داد که برای هیدروگراف‌ها با مدت زمان و دبی اوج مشابه، تأثیر

و قدرت جریان رو به پایین را در اثر برخورد با طوق کاهش می‌دهد. در ناحیه پایین طوق، قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد [۳]

بر طبق مطالعات گذشته، چيو^۱ (۱۹۹۲) تأثیر طوق‌های محافظ در کاهش آبستگي پایه پل را مورد آزمایش قرار داد و با استفاده از طوق با اندازه دو برابر قطر پایه ($2D$)، عمق آبستگي به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین او اظهار داشت که طراحی و کاربرد درست طوق می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنگ‌چین در حل مشکلات آبستگي موضعی پایه پل باشد [۳] حسن پور و همکاران (۱۳۹۲) آبستگي پایه پل باله‌ای شکل با طوق را بررسی کردند. در این تحقیق با نصب طوق در سطح بستر، سرعت آبستگي و عمق حفره آبستگي اطراف آن‌ها با پایه استوانه‌ای شکل مقایسه شده است. همچنین اثر طول در روی پایه‌های باله‌ای شکل نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پایه باله‌ای شکل با طول نسبی ۳/۸۵ به علت کاهش قدرت گرداب‌های نعل اسبی و حذف گرداب برخاستگی بیشترین کاهش آبستگي را از خود نشان داده و همچنین استفاده از طوقی با قطر ۲ برابر قطر پایه، در پایه باله‌ای شکل نسبت به پایه استوانه‌ای حدود ۸۰ درصد حداکثر عمق آبستگي را کاهش داده و زمان تعادل را نیز افزایش داد. لازم به ذکر است هرچه زمان تعادل بیشتر باشد در نتیجه فرسایش دیرتر رخ می‌دهد و عمر پایه پل افزایش می‌یابد [۶] زرانی و همکاران (۲۰۱۰) از طوق برای کنترل آبستگي اطراف پایه پل مسطیلی استفاده کردند. آزمایش‌ها برای جریان در شرایط آستانه حرکت رسوب با انحراف ۵ و ۱۰ درجه انجام گرفت و از طوق‌های با عرض مختلف و ترازهای متفاوت استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش عرض طوق و کاهش تراز، آبستگي به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بیشترین درصد کاهش آبستگي در این تحقیق به ترتیب ۷۴، ۵۶ و ۳۵ درصد ارزیابی شد [۷] سینگ^۲ و همکاران (۲۰۰۱) محل قرارگیری طوق بر روی پایه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که چنانچه فاصله بین تراز بستر و تراز نصب طوق افزایش یابد، بیشینه عمق آبستگي افزایش می‌یابد. بهترین محل نصب طوق در آزمایش آن‌ها $0.1D$ زیر سطح بستر رسوب بود که در این حالت طوق به پهنای $2/5D$ به اندازه ۱۰۰ درصد میزان آبستگي را نسبت به حالت بدون طوق کاهش

3 Negm

4 Kumcu

5 Lai

1 Chiew

2 Singh

و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. کانال اصلی دارای مقطع مستطیلی با عرض داخلی ۸۰ سانتی‌متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر، طول ۸ متر و شیب کف ثابت و برابر با ۰/۰۲۲ بود. در ابتدای فلوم مخزن جریان ورودی به کانال اصلی از مخزن زیرزمینی و انتهای آن مخزن جریان خروجی از کانال اصلی قرار داشت. دو پمپ گریز از مرکز آب را از مخزن زیرزمینی پمپاژ می‌کردند و به مخزن ورودی فلوم منتقل می‌نمود که توسط یک لوله به داخل کانال اصلی جریان می‌یافت و پس از عبور از روی کانال اصلی مجدداً به سیستم بر می‌گشت. میزان جریان ورودی به مخزن توسط شیرفلکه‌ای که بر روی آن نصب شده است قابل تنظیم بود. شکل ۲ و ۳ به ترتیب پلان و شماتیک نمای جانبی فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

۲-۲- شرایط آزمایش

به توصیه رادکیوی^۱ (۱۹۹۸) برای اجتناب از تشکیل فرم بستر (ریپل) قطر متوسط ذرات باید از ۰/۹ میلی‌متر بزرگتر باشد [۱۴] برای حذف اثر رسوبات روی عمق آبشستگی باید نسبت قطر پایه به قطر متوسط ذرات بزرگتر از ۲۵-۲۰ باشد. همچنین به توصیه شفافی بچستان (۱۳۹۴) برای حذف اثر غیریکنواختی ذرات بر آبشستگی موضعی لازم است که انحراف معیار هندسی ذرات کوچک‌تر از ۱/۳ باشد [۱] بنابراین از رسوب با D_{50} برابر ۰/۹۱ میلی‌متر استفاده گردید که منحنی دانه‌بندی رسوب موردنظر در شکل ۴ قابل مشاهده است. میزان یکنواختی دانه‌بندی رسوبات معمولاً با معیار انحراف

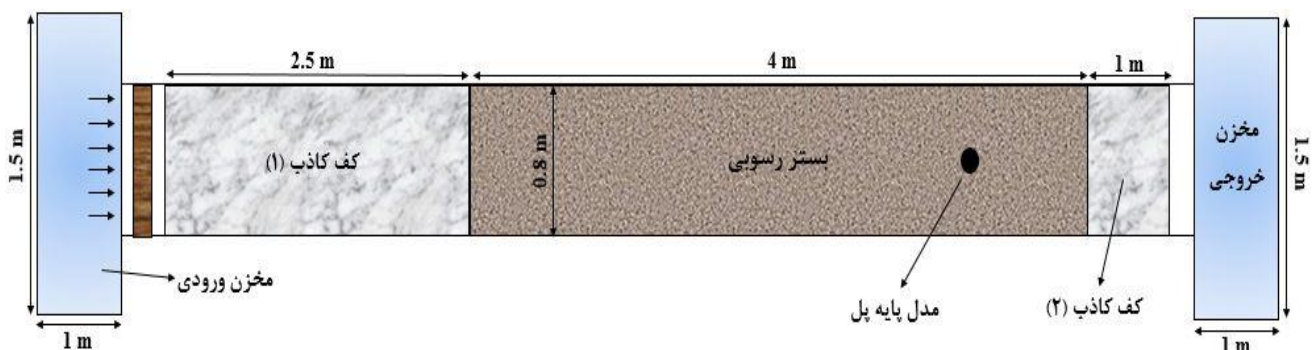
شاخه صعودی هیدروگراف بر عمق آبشستگی اهمیت چندانی ندارد؛ اما در شاخه نزولی هیدروگراف، عمق و عرض حفره آبشستگی وابسته به پارامتر T_r/T_f (زمان شاخه نزولی و T_r زمان شاخه صعودی) است. نتایج نشان داد که دبی اوج هیدروگراف مهمترین پارامتر در تأثیرگذاری بر توسعه حفره آبشستگی می‌باشد [۱۳] به دلیل اهمیت کاربردی و مهندسی مبحث حفاظت پل‌ها، تحقیق و بررسی روش‌های گوناگون حفاظتی در شرایط مختلف فیزیکی و هیدرولیکی ضرورت دارد؛ به همین دلیل در تحقیق حاضر تأثیر ویژگی‌های اندازه و ارتفاع نصب سازه‌ی حفاظتی طوق بر آبشستگی اطراف پایه پل در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار و مقایسه‌ی تأثیر طوق‌ها تحت این شرایط در جهت تکمیل تحقیقات گذشته مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق آزمایش‌های جریان غیرماندگار تحت شرایط هیدروگرافی متوالی (با سه توالی) و با نسبت زمان پیک هیدروگراف به زمان تعادل آبشستگی برابر ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفته که تاکنون در تحقیقات دیگر مبحث آبشستگی بررسی چندانی بر روی آن انجام نشده است. تحقیقات گذشته در زمینه بررسی آبشستگی پایه پل اکثراً در شرایط جریان ماندگار انجام شده و بیشتر بر شرایط فیزیکی روش‌های حفاظتی پایه پل تأکید شده است و کمتر به تأثیر شرایط جریان غیرماندگار بر این پدیده پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات فلوم آزمایشگاهی

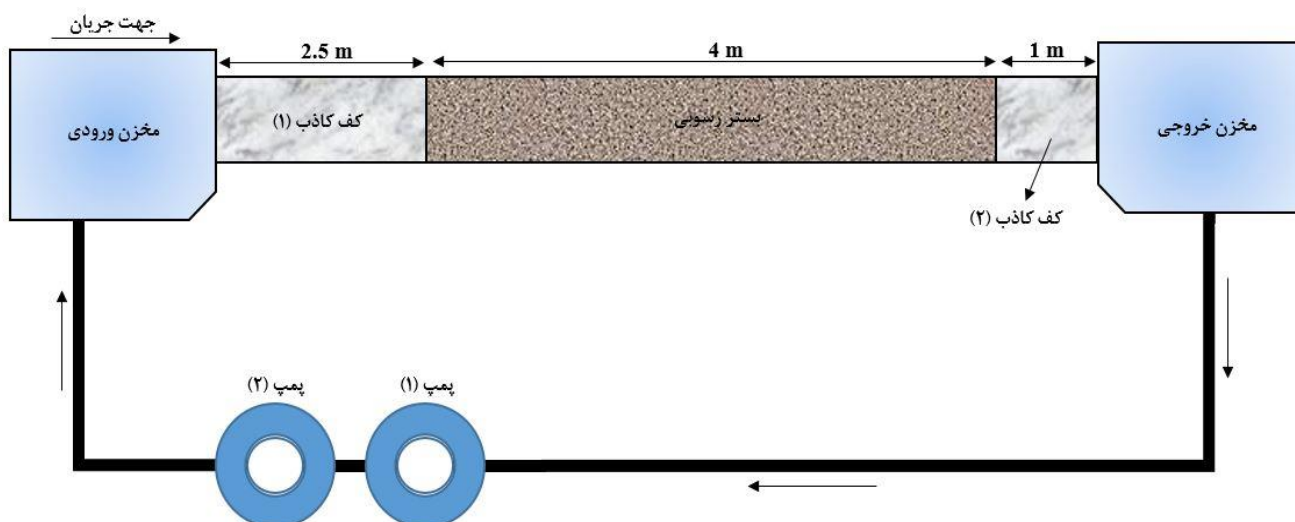
به منظور انجام این تحقیق از فلوم آزمایشگاهی با کف گالوانیزه و دیوار شیشه‌ای مستقر در آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی هیدرولیک

1 Raudkivi



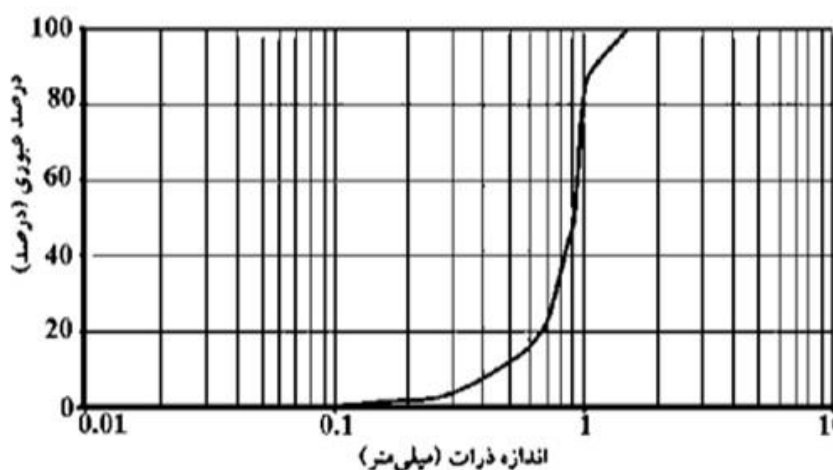
شکل ۲. پلان فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر

Fig. 2. Laboratory Flume Plan of the Present Research



شکل ۳. نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر

Fig. 3. Schematic view laboratory flume of the Present Research



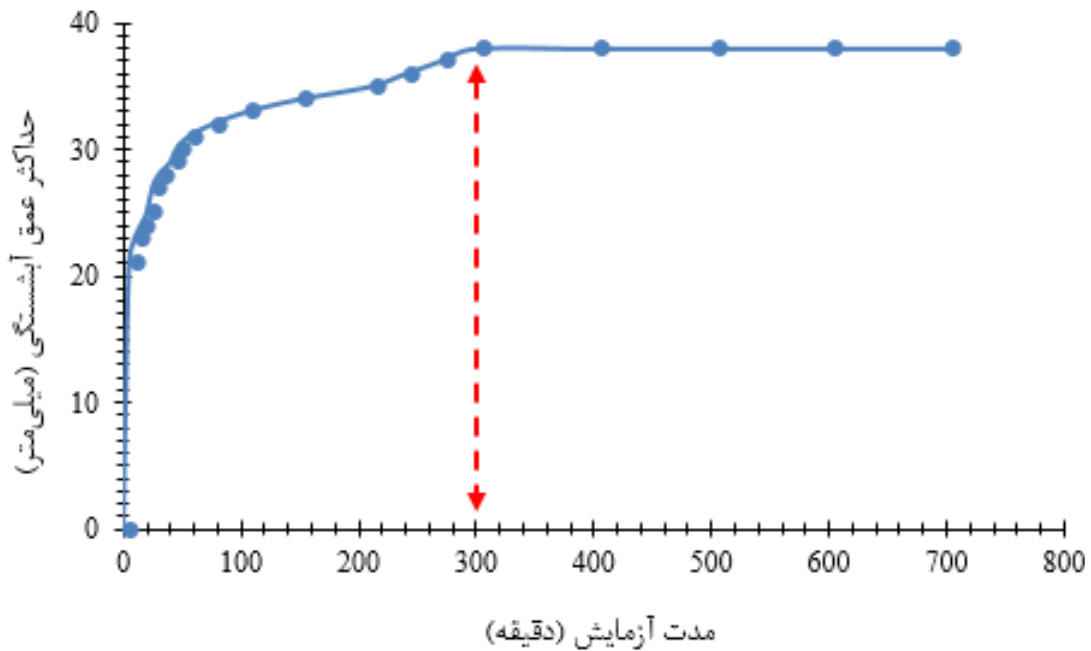
شکل ۴. منحنی دانه بندی رسوب مورد استفاده در آزمایش‌ها

Fig. 4. Sediment aggregation curve used in experiments

عمومی جریان و نیز گرداب‌های نعل اسبی با جریان تداخل یافته و موجب کاهش در جریان‌های رو به پایین و فعالیت گرداب‌های نعل اسبی و کاهش عمق آبشستگی می‌شود [۱۵] بنابراین باید عمق جریان به گونه‌ای انتخاب شود که تأثیر این پدیده بر میزان عمق آبشستگی از بین برود. پس حداقل عمق جریان انتخاب شده برای از بین بردن این اثر باید بیش از سه برابر عرض پایه باشد. در آزمایشگاه بر روی بستر کانال با دبی ثابت $34/8$ لیتر بر ثانیه، عمق‌های مختلفی از 30 تا 10 سانتی‌متر بدون حضور پایه ایجاد شد، تا حرکت یا عدم حرکت رسوبات بستر مورد مطالعه قرار بگیرد. در نهایت مقدار عمق

استاندارد هندسی ذرات، σ_g ، مشخص می‌شود. تحقیقات اتما (۱۹۸۰) نشان داد که با افزایش σ_g تغییرات عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [۱۵] بنابراین انحراف معیار ذرات رسوبی σ_g برابر $1/29$ و ضریب یکنواختی برای رسوبات $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ برابر $1/4$ در نظر گرفته شد.

طبق نظر اتما (۱۹۸۰)، در جریان‌های کم‌عمق، گرداب‌های موج‌کمانی ایجاد شده در سطح آب، به علت گردش در خلاف جهت



شکل ۵. نمودار زمان تعادل آبشستگی
 Fig. 5. Scour equilibrium time diagram

جدول ۱. دبی‌های واسنجی شده‌ی آزمایش برای ساخت هیدروگراف و عمق جریان در هر دبی

Table 1. Calibrated Discharges Experiments to Create Hydrographs and Depth of Flow at Each Discharge

عمق جریان (cm)	مقدار دبی جریان (L/s)	شماره ردیف
۱۱/۳۳	۳۱/۳	۱
۱۱/۹۰	۳۳/۷	۲
۱۲/۲۰	۳۴/۸	۳

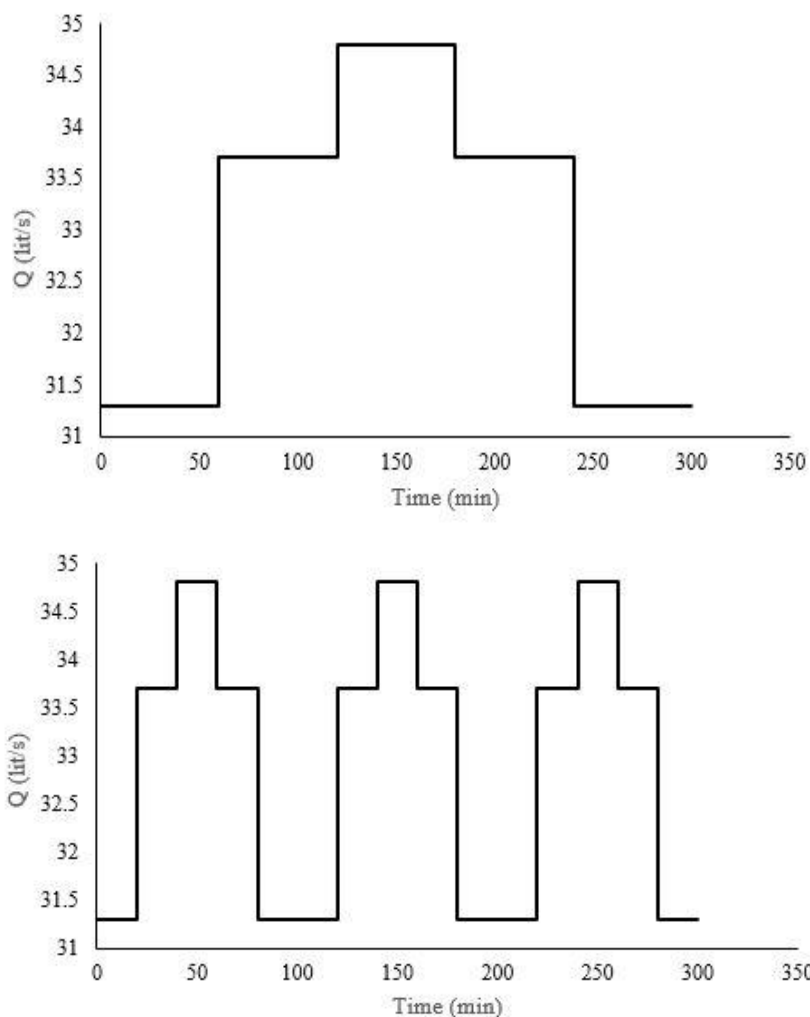
که در این تحقیق برای تولید جریان ماندگار استفاده شد، نشان داده شده است.

در این تحقیق برای ایجاد جریان غیرماندگار از روش هیدروگراف پله‌ای استفاده شد. به این صورت که از مجموع جریان‌های ماندگار با دبی‌های مختلف در گام‌های زمانی مشخص، یک جریان غیرماندگار ایجاد می‌شود. پس از تعیین دبی‌های مناسب، هیدروگراف موردنظر مطابق شکل ۶ بدست آمد و ملاحظه می‌شود که دبی پیک هیدروگراف برابر دبی جریان غیرماندگار در نظر گرفته شد و شکل هیدروگراف متقارن (نسبت زمان پیک جریان به زمان تعادل آبشستگی برابر ۰/۵ است) می‌باشد. در این تحقیق با توجه به شرایط آزمایشگاهی موجود،

آب ۱۲ سانتی‌متر تعیین گردید. معیار زمان تعادل در این آزمایش‌ها معیاری است که کومار^۱ و همکاران (۱۹۹۹) در تحقیقات خود در نظر گرفتند و آن مدت زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد [۱۶] در تحقیق حاضر نیز با توجه به شکل ۵ این مدت با انجام آزمایشی در دبی ۳۴/۸ لیتر بر ثانیه برابر ۵ ساعت برآورد شد.

میزان جریان ورودی به مخزن توسط شیرفلکه‌ای که بر روی آن نصب شده است قابل تنظیم بود و بر حسب تعداد دور شیرفلکه دبی‌های متشکل هیدروگراف واسنجی شد. مطابق جدول ۱ دبی‌هایی

1 Kumar



شکل ۶. الف) هیدروگراف پله‌ای متقارن تولیدی از چند جریان ماندگار، ب) هیدروگراف پله‌ای متقارن با سه توالی در مدت زمان تعادل آبشستگی
Fig. 6. a) Symmetric step hydrograph produced from several steady flow; b) Symmetrical step hydrograph with three sequences during scour equilibrium time

به قطر ۳ سانتی‌متر انتخاب شد. همچنین طوق‌های مورد استفاده در این تحقیق از جنس ورق گالوانیزه، شکل دایره‌ای، و با سه اندازه قطر که ضریبی از قطر پایه پل در نظر گرفته شد و از کوچک به بزرگ دارای قطر $2D$ ، $2/5D$ و $3D$ مطابق شکل ۷ طراحی شد. ارتفاعات نصب طوق روی پایه نسبت به سطح بستر نیز در سه ارتفاع $0/5D$ ، $1D$ و $2D$ بالای سطح بستر مطابق شکل ۷ مورد بررسی قرار گرفت.

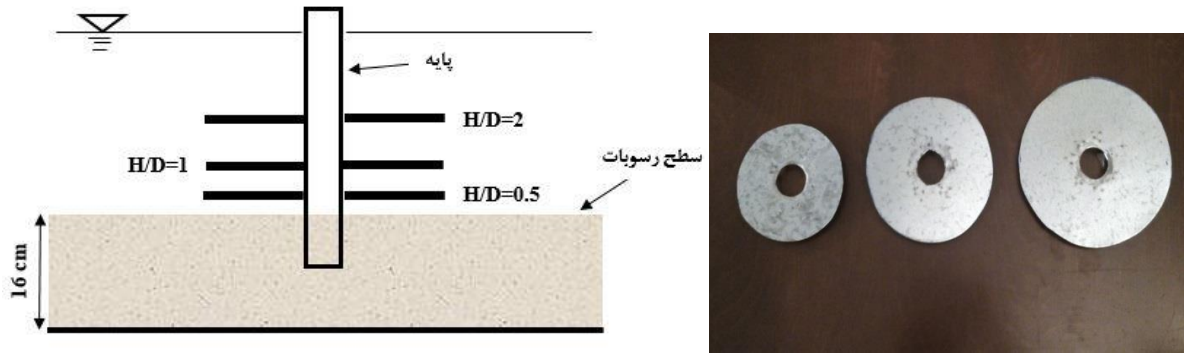
۲-۴- تحلیل ابعادی

آبشستگی یک پدیده بسیار پیچیده می‌باشد و تعداد پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل بسیار زیاد است، بنابراین لحاظ کردن

برای کاهش گام‌های زمانی تغییر دبی و شباهت بیشتر جریان به جریان غیرماندگار، از توالی هیدروگراف استفاده شد. مطابق شکل ۶ در مدت زمان آزمایش (مدت زمان تعادل آبشستگی در جریان ماندگار) سه توالی هیدروگراف در نظر گرفته شد که زمان تداوم هر هیدروگراف ۱۰۰ دقیقه است.

۲-۳- مدل‌های آزمایشگاهی

برای جلوگیری از تأثیر عمق جریان بر آبشستگی موضعی بنا به توصیه اتما و رادکیوی (۱۹۸۳) نسبت قطر پایه به عمق جریان باید کوچکتر از $0/7$ باشد [۱۷] از این‌رو پایه پل استوانه‌ای شکل فولادی



شکل ۷. الف) طوق‌های مورد استفاده در تحقیق در سه اندازه مختلف، ب) حالت‌های ارتفاع نصب طوق در تحقیق
 Fig. 7. a) Collars used in research in three different sizes; b) Collar mounting height modes in research

نظر گرفتن سرعت جریان، قطر پایه و جرم مخصوص آب به عنوان متغیرهای تکراری رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\frac{d_s}{D} = f_2 \left(\frac{y}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{U \cdot D}{\nu}, \frac{U_c}{U}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{U t_e}{D}, \frac{B}{D}, \frac{W}{D}, \frac{H}{D} \right) \quad (2)$$

محققین زیادی تأثیر پارامترهای بی‌بعد این رابطه را بر آبشستگی بررسی نموده‌اند؛ بنابراین اثر هر کدام از پارامترها بر رابطه (۲) مشخص می‌باشد که محدوده بی تأثیری هر کدام از آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

بنابراین در تحقیق حاضر، پارامترهای مربوط به سیال، ذرات رسوب، پارامترهای هیدرولیکی و هندسه فلوم ثابت در نظر گرفته می‌شود. به علاوه پارامتر زمان تعادل برای تمامی آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. بنابراین عمق آبشستگی بی‌بعد در جریان ماندگار به صورت رابطه (۳) خلاصه می‌شود:

$$\frac{d_s}{D} = f_3 \left(\frac{W}{D}, \frac{H}{D} \right) \quad (3)$$

در جریان غیرماندگار پارامترهایی که در هر رفتاری از پدیده مورد نظر دخالت دارند را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$d_s = f_4 \left(\frac{D, y_p, U_p, U_{cp}, g, \rho_w, \nu, \rho_s}{D_{50}, t_e, t_p, t_d, N, V_{hyd}, Shape_{hyd}}, \frac{B, W_{NS}, H_{NS}}{D} \right) \quad (4)$$

تأثیر کلیه پارامترها در آبشستگی بسیار پیچیده و مشکل می‌باشد؛ به همین دلیل با گروه‌بندی مقادیر مهم به صورت پارامترهای بی‌بعد، تعداد متغیرهای موجود کاهش می‌یابد. این پارامترهای مؤثر عبارتند از خصوصیات جریان، خصوصیات رسوب و هندسه پایه. پس از تعیین پارامترهای بی‌بعد و با تغییر آن‌ها در آزمایشگاه، می‌توان نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر میزان آبشستگی را مورد بررسی قرار داد. از طرفی در این تحقیق آزمایش‌ها با دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار انجام می‌گیرد؛ بنابراین آنالیز ابعادی به روش π باکینگهام را برای دو جریان ماندگار و غیرماندگار به صورت مجزا بررسی می‌شود. در جریان ماندگار پارامترهایی که در هر رفتاری از پدیده مورد نظر دخالت دارند را می‌توان بصورت زیر فرموله کرد:

$$d_s = f_1 \left(\frac{D, U, U_c, y, g, \rho_w, \nu, \rho_s}{D_{50}, t_e, B, W, H} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، d_s عمق آبشستگی، D قطر پایه، U سرعت جریان، U_c سرعت بحرانی، y عمق جریان، g شتاب ثقل، ρ_w جرم مخصوص آب، ν لزجت سینماتیکی جریان، ρ_s جرم مخصوص ذرات جامد، D_{50} میانگین قطر ذرات، t_e زمان تعادل آبشستگی، B عرض فلوم، W قطر طوق و H ارتفاع نصب طوق نسبت به بستر می‌باشند. خصوصیات مورد بررسی در این تحقیق به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که انتخاب پارامترهای مؤثر با توجه به اصول اولیه مهندسی رسوب و بررسی مطالعات گذشته صورت گرفته است. با تحلیل ابعادی از روش π باکینگهام برای پارامترهای مذکور و در

غیرماندگار که در آزمایش‌ها ثابت می‌باشد، آورده شده است. با توجه به محدوده بی‌اثری برخی پارامترها بر آبستنگی و همچنین پارامترهای ثابت در این تحقیق که در قسمت تحلیل ابعادی جریان ماندگار ذکر شد؛ عمق آبستنگی بی‌بعد در جریان غیرماندگار به صورت رابطه (۶) است:

$$\frac{d_s}{D} = f_6 \left(\frac{W_{NS}}{D}, \frac{H_{NS}}{D} \right) \quad (6)$$

مشاهده می‌شود که پارامترهای مورد بررسی آزمایش‌ها در جریان ماندگار و جریان غیرماندگار یکسان است. در این صورت فقط با تغییر ابعاد طوق و ارتفاع نصب آن نسبت به بستر عمق آبستنگی بررسی می‌شود. همچنین پارامترهای بی‌بعد ثابت آزمایش‌های غیرماندگار در تحقیق حاضر با پارامترهای تحقیق باقریان (۱۳۹۷) در جدول ۴ مقایسه شد.

با توجه به شرایط متفاوت آزمایش‌ها و هیدروگراف مورد آزمایش در تحقیق حاضر و تحقیق باقریان (۱۳۹۷)، مقادیر ثابت در دو تحقیق مقداری تفاوت دارد و طبیعتاً اگر تحقیق حاضر با تحقیقات دیگر نیز از این جهت مقایسه گردد، مقدار پارامترهای بی‌بعد به علت تفاوت شرایط آزمایشگاهی و پژوهشی متفاوت است اما در حدود مشخصی هستند. همچنین با توجه به منابع موجود و برخی تحقیقات گذشته

در رابطه (۴) به جز پارامترهایی که برای جریان نیز ذکر شد، y_p عمق جریان در پیک هیدروگراف، U_p سرعت جریان در پیک هیدروگراف، U_{cp} سرعت بحرانی در پیک هیدروگراف، t_p زمان رسیدن به پیک هیدروگراف، t_d زمان تداوم هیدروگراف، N تعداد هیدروگراف‌های متوالی، V_{hyd} حجم زیر هیدروگراف، $Shape_{hyd}$ شکل منحنی هیدروگراف، W_{NS} قطر طوق در آزمایش‌ها جریان غیرماندگار و H_{NS} ارتفاع نصب طوق نسبت به سطح بستر در آزمایش‌ها جریان غیرماندگار می‌باشند. پس از تحلیل ابعادی با همان روندی که برای جریان ماندگار استفاده شد، پارامترهای بی‌بعد جریان غیرماندگار مطابق رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\frac{d_s}{D} = f_5 \left(\frac{y_p}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{U_p}{\sqrt{g \cdot D}}, \frac{U_p \cdot D}{v}, \frac{U_{cp}}{U_p}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{U_p t_e}{D}, \frac{U_p t_p}{D}, \frac{U_p t_d}{D}, N, \frac{V_{hyd}}{D^3}, Shape_{hyd}, \frac{B}{D}, \frac{W_{NS}}{D}, \frac{H_{NS}}{D} \right) \quad (5)$$

در این تحقیق مشخصات هیدروگراف در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت است. در جدول ۳ مقادیر کلیه‌ی پارامترهای بدون بعد جریان

جدول ۲. تأثیر پارامترهای بی‌بعد بر آبستنگی موضعی اطراف پایه پل

Table 2. The effect of dimensionless parameters on local scour around bridge pier

پارامتر بی‌بعد	محدوده بی‌اثر بر آبستنگی	محقق
$\frac{y}{D}$	> 3.5	Chiew and Melville (1987)
$\frac{D}{D_{50}}$	$> 20 - 25$	Raudkivi and Ettema (1983)
$\frac{B}{D}$	≥ 6.25	Raudkivi and Ettema (1983)
$\frac{U \cdot D}{v}$	> 7000	Franzetti and et al. (1994)
$\frac{U}{\sqrt{g \cdot D}}$	$\frac{U \cdot D}{v} > 7000$	Franzetti and et al. (1994)

جدول ۳. مقادیر پارامترهای بدون بعد ثابت در آزمایش‌ها جریان غیرمادگار

Table 3. Values of fixed dimensionless parameters in unsteady flow experiments

مقادیر ثابت	پارامتر بی‌بعد	مقادیر ثابت	پارامتر بی‌بعد
۲۱۷۵۰۰	$\frac{U_p t_e}{D}$	۴	$\frac{y_p}{D}$
۱۰۸۷۵۰	$\frac{U_p t_p}{D}$	۰/۰۳	$\frac{D_{50}}{D}$
۲۱۷۵۰۰	$\frac{U_p t_d}{D}$	۰/۶۶	$\frac{U_p}{\sqrt{g \cdot D}}$
۳	N	۱۰۸۷۵	$\frac{U_p \cdot D}{v}$
۱۱۶۰۰۰۰	$\frac{V_{hyd}}{D^3}$	۱/۰۵	$\frac{U_{cp}}{U_p}$
۲۶/۶	$\frac{B}{D}$	۱/۶۲	$\frac{\rho_s}{\rho_w}$

۵-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

در ابتدای هر آزمایش، سطح رسوبات موجود در کف فلوم به وسیله ماله بنایی کاملاً مسطح شد و سپس جریان کمی توسط شیر کنترل دبی، وارد سیستم شد. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوبات، با استفاده از مبدل^۱ تنظیم جریان، دبی افزایش می‌یافت، بدین ترتیب فرآیند آبشستگی در اطراف پایه پل آغاز می‌شد. پس از به تعادل رسیدن وضعیت جریان و رسوب در اطراف پایه پل، آزمایش متوقف می‌گردید. در ادامه آب باقیمانده در فلوم به آرامی تخلیه می‌شد؛ به نحوی که شکل حفره آبشستگی حول پایه پل بهم نخورد. سپس ابعاد و مشخصه‌های حفره آبشستگی اندازه‌گیری می‌گردید. برای اندازه‌گیری تغییرات بستر از یک عمق سنج مدرج (پوینت گیج) استفاده شد. این عمق سنج بر روی ریلی نصب بود که امکان حرکت

با استفاده از سازه حفاظتی طوق برای کاهش آبشستگی پایه پل، در جداول ۵ و ۶ شرایط تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات انجام شده مقایسه شده و تفاوت‌ها و شباهت‌های تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات بررسی گردیده است.

با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که شرایط اندازه طوق مورد بررسی در تحقیق حاضر تقریباً مانند تحقیقات دیگر می‌باشد و سعی شده که از بهترین حالات طوق استفاده شود. اما مطابق جدول ۶ تفاوت این تحقیق با تحقیقات دیگر در ارتفاع نصب طوق می‌باشد؛ به طوری که در تحقیق حاضر ارتفاعات بالای سطح بستر مورد بررسی قرار می‌گیرند تا مشخص شود در این محدوده با هر تغییر ارتفاع، روند تغییرات آبشستگی به چه صورت است و همچنین درصد کاهش آبشستگی ناشی از این فواصل از سطح بستر نسبت به ارتفاعات کمتر در تحقیقات دیگر مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد.

1 invertor

جدول ۴. مقایسه پارامترهای بی بعد ثابت آزمایش‌ها جریان غیرماندگار در تحقیق حاضر با تحقیق باقریان (۱۳۹۷)

Table 4. Comparison of fixed dimensionless parameters of nonsteady flow experiments in the present study with Bagherian (2018)

پارامتر بی بعد	تحقیق حاضر	تحقیق باقریان (۱۳۹۷)
$\frac{y_p}{D}$	۴	۳/۲
$\frac{U_p}{\sqrt{g \cdot D}}$	۰/۶۶	۰/۴۵
$\frac{U_p \cdot D}{v}$	۱۰۸۷۵	۱۵۸۶۵
$\frac{U_{cp}}{U_p}$	۱/۰۵	۱/۰۵
$\frac{U_p \cdot t_e}{D}$	۲۱۷۵۰۰	۲۸۵۵۷
$\frac{U_p \cdot t_p}{D}$	۱۰۸۷۵۰	۱۴۲۷۸/۵
$\frac{U_p \cdot t_d}{D}$	۲۱۷۵۰۰	۲۸۵۵۷
N	۳	۱
$\frac{V_{hyd}}{D^3}$	۱۱۶۰۰۰۰	۵۹۷۰۴۰

جدول ۵. مقایسه شرایط اندازه طوق تحقیق حاضر با برخی تحقیقات گذشته

Table 5. Comparison of the collar size in present research with some previous research

نام محقق	D (cm)	W/D
شریعتی (۱۳۸۸)	۲/۵	۲/۵ و ۲، ۱/۵
قاسمی گورتی (۱۳۹۴)	۳	۲/۵ و ۲
امینی (۱۳۹۵)	۶	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵
زراتی و عزیزی (۱۳۸۰)	۵	۱ و ۰/۵
غلامزاده محمودی و شفاعی بچستان (۱۳۸۸)	۳	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵
تحقیق حاضر	۳	۳ و ۲/۵، ۲

جدول ۶. مقایسه شرایط ارتفاع نصب طوق تحقیق حاضر با برخی تحقیقات گذشته

Table 6. Comparison of the collar height of mounting in present research with some previous research

H/D	D (cm)	نام محقق
-۰/۴ و ۰، +۰/۴	۲/۵	شریعتی (۱۳۸۸)
-۰/۴ و -۰/۱، ۰	۳	قاسمی گورتی (۱۳۹۴)
-۰/۲۵ و ۰، +۰/۲۵	۶	امینی (۱۳۹۵)
-۱ و -۰/۵، -۰/۱	۶	مسجدی و همکاران (۲۰۱۰)
+۰/۵ و -۰/۵، -۰/۱	۴	اتما (۱۹۸۰)
۰/۲ و ۰، -۰/۲	۵	ثانی خانی و همکاران (۱۳۸۷)
۲ و ۱، ۰/۵	۳	تحقیق حاضر

داده شده است. ابعاد حفره آبستنگی نیز اندازه‌گیری شد که بر این اساس طول حفره آبستنگی برابر ۲۲ سانتی‌متر و عرض حفره نیز برابر ۲۰ سانتی‌متر مشخص شد. همچنین پروفیل حفره آبستنگی اطراف پایه پل در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

۳-۲- آبستنگی پایه پل در حالت بدون طوق در جریان غیرماندگار

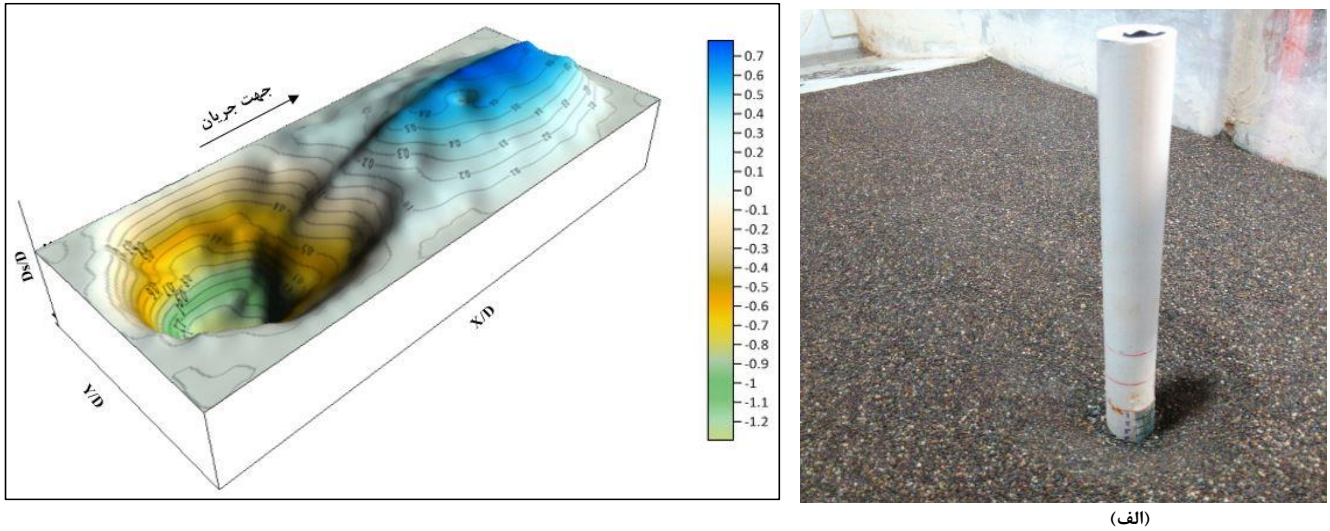
برای حالت بدون طوق و با جریان غیرماندگار آزمایشی انجام گردید. در این آزمایش نیز مانند حالت ماندگار آبستنگی ابتدا از جلوی پایه آغاز شد و سپس به طرفین پایه توسعه یافت. پس از مدتی اندک آبستنگی به پایین دست پایه رسید و به مرور پشته‌ای در قسمت پشت پایه تشکیل یافت. اما به علت مدت زمان کمتر حداکثر دبی نسبت به جریان ماندگار، حداکثر عمق آبستنگی در این حالت کمتر شد. به طوری که در مقایسه با حالت ماندگار عمق آبستنگی حدود ۱۸ درصد (عمق آبستنگی ۳/۱ سانتی‌متر) کاهش گردید. با توجه به نمودار توسعه زمانی، در ابتدای آزمایش و تا انتهای هیدروگراف توالی اول، بیشترین تغییرات آبستنگی قابل مشاهده است و سرعت آبستنگی در این محدوده بسیار بود. در توالی هیدروگراف دوم نیز در محدوده پیک هیدروگراف مقداری کاهش عمق آبستنگی مشاهده شد ولی در توالی سوم، کاهش عمق آبستنگی بسیار ناچیز بود. برای درک بهتر نتایج در شکل ۹ نمودار توسعه زمانی آبستنگی جریان ماندگار و غیرماندگار در حالت بدون طوق رسم شده است. در این شکل مشخص است که در حالت جریان غیرماندگار که در ابتدا

در جهت طولی و عرضی را فراهم می‌ساخت. در ابتدا آزمایش بدون استفاده از طوق انجام شد و سپس طوق‌ها با اندازه‌های مختلف و در ارتفاعات نصب مختلف نسبت به پایه پل نصب شدند و تأثیر این سازه روی پایه پل در آزمایش‌ها بررسی گردید. در این آزمایش‌ها مشخصات آبستنگی در حالت نهایی برای پایه پل اندازه‌گیری گردید و بر اساس نوع طوق نمودارهای بی‌بعد مربوط به آن‌ها رسم شد.

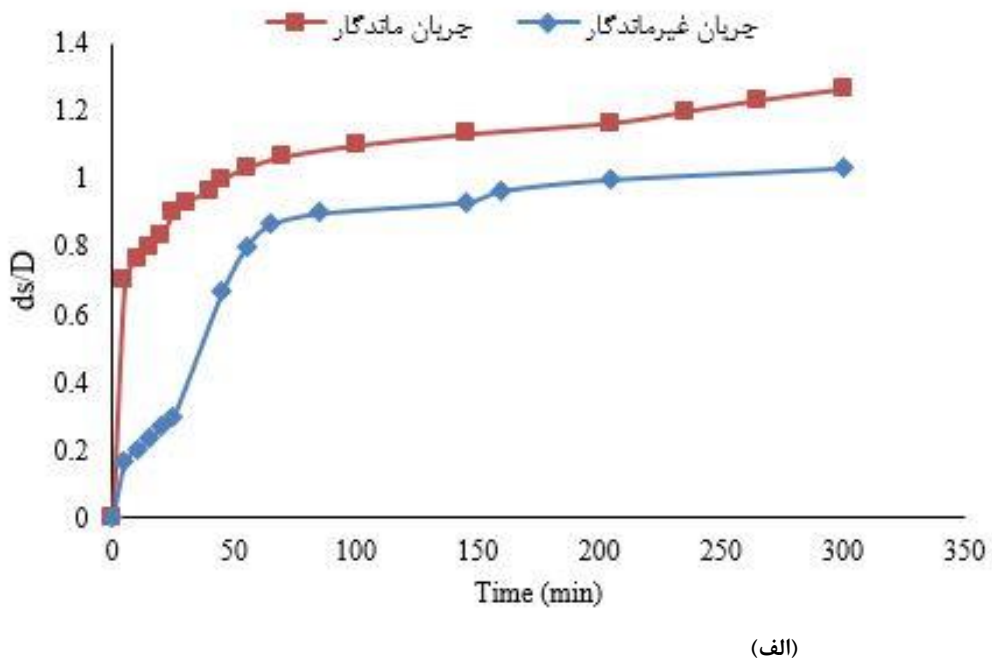
۳- نتایج و بحث

۳-۱- آبستنگی پایه پل در حالت بدون طوق در جریان ماندگار

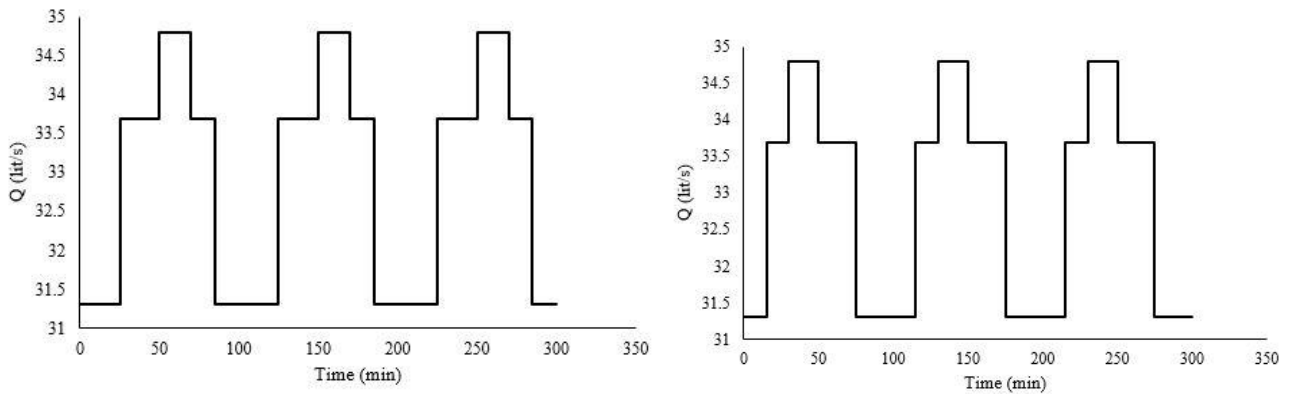
با توجه به اهداف تحقیق و تحلیل بهتر نتایج، ابتدا آزمایش بدون طوق انجام شد. در این آزمایش که دارای مقادیر دبی ۳۴/۸ لیتر بر ثانیه و عدد فرود برابر با ۰/۶۶ بود، آبستنگی ابتدا از جلوی پایه آغاز شد و سپس به طرفین پایه توسعه یافت. پس از مدتی اندک، آبستنگی به پایین دست پایه رسید و به مرور پشته‌ای در قسمت پشت پایه تشکیل یافت. سرعت آبستنگی در این آزمایش در ابتدا بسیار زیاد بود و به تدریج کاهش یافت؛ تا اینکه در زمان تعادل مشخص شده عمق نهایی آبستنگی ثابت گردید. در ساعت اول آزمایش سرعت آبستنگی بیشتر بود به طوری که بیش از ۸۴ درصد آبستنگی در این بازه زمانی صورت گرفت. در ساعات بعدی توسعه آبستنگی کمتر شد و از ساعت سوم تا پنجم افزایش ناچیزی داشت. در نهایت عمق آبستنگی نهایی در آزمایش شاهد ۳/۸ سانتی‌متر به دست آمد. در شکل ۸ نمایی از حفره آبستنگی ایجاد شده در اطراف پایه پل نشان



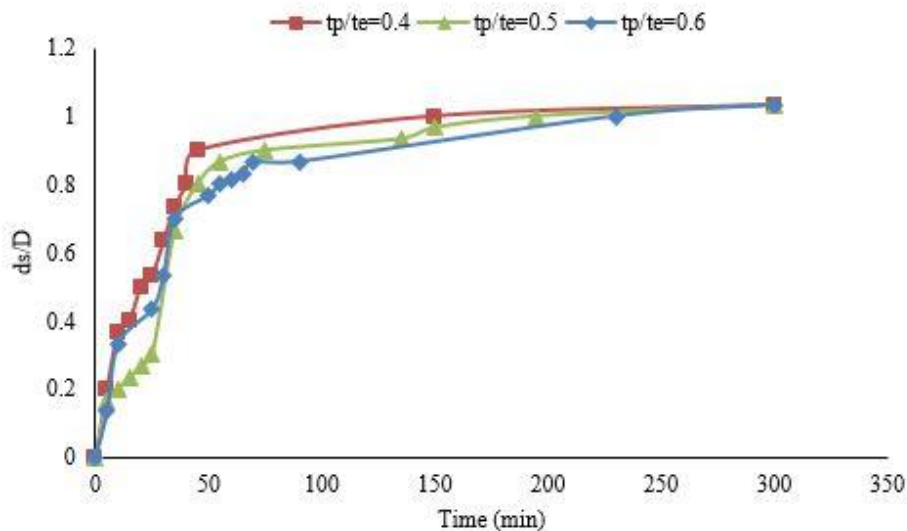
شکل ۸. الف) نمایی از حفره آبشستگی ایجاد شده اطراف پایه پل در آزمایش شاهد، ب) پروفیل حفره آبشستگی در اطراف پایه پل
 Fig. 8. a) View of the scour hole created around the bridge pier in the reference experiment; b) Scour hole profiles around bridge pier



شکل ۹. نمودار توسعه زمانی آبشستگی جریان ماندگار و غیرماندگار در حالت بدون طوق
 Fig. 9. Temporal development scour diagram of steady and unsteady flow in without collar mode



شکل ۱۰. الف) هیدروگراف با $t_p/t_e=0.4$ ، ب) هیدروگراف با $t_p/t_e=0.6$
 Fig. 10. a) Hydrograph with $t_p/t_e=0.4$; b) Hydrograph with $t_p/t_e=0.6$



شکل ۱۱. نمودار توسعه زمانی آبخستگی حالت شاهد جریان غیرماندگار با سه زمان دبی پیک مختلف
 Fig. 11. Temporal development scour diagrams in reference state of unsteady flow with three different peak-discharge times

مشخص شود. با توجه به شکل ۱۰ یک آزمایش با هیدروگراف با $t_p/t_e=0.4$ و یکی با $t_p/t_e=0.6$ انجام شد. نتایج نشان داد که عمق آبخستگی در هر دو حالت مشابه هیدروگراف اصلی است (۳/۱ سانتی متر) و تنها تفاوت در روند توسعه زمانی حفره آبخستگی می باشد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در حالت $t_p/t_e=0.4$ به دلیل اینکه زودتر به دبی پیک می رسد، در مدت زمان یکسان، در برخی بازه های زمانی عمق بیشتری فرسایش می یابد و در حالت $t_p/t_e=0.6$ دیرتر به دبی پیک می رسد که نتیجه

شدت جریان نسبت به جریان ماندگار کمتر است، آبخستگی دیرتر و به میزان کمتری رخ می دهد و با نزدیک شدن به دبی پیک، عمق آبخستگی افزایش قابل توجهی می یابد. به عبارتی، افزایش و کاهش مکرر شدت جریان باعث کاهش آبخستگی نسبت به حالت جریان ماندگار (دبی ثابت و معادل با دبی پیک جریان غیرماندگار) می گردد. همچنین دو آزمایش دیگر برای حالت شاهد غیرماندگار با زمان دبی پیک (متفاوت با هیدروگراف اصلی) $t_p/t_e=0.5$ انجام شد تا تأثیر تغییر این پارامتر هیدروگراف بر آبخستگی اطراف پایه پل

جدول ۷. فهرست آزمایش‌های تحقیق حاضر
Table 7. List of present research experiments

شماره آزمایش	نوع جریان	شکل طوق	H/D	W/D	درصد کاهش آبشستگی
۱	ماندگار	دایره‌ای	۲	۲	۱۰/۵۲
۲	ماندگار	دایره‌ای	۲	۲/۵	۱۳/۱۵
۳	ماندگار	دایره‌ای	۲	۳	۱۸/۴۲
۴	ماندگار	دایره‌ای	۱	۲	۱۳/۱۵
۵	ماندگار	دایره‌ای	۱	۲/۵	۲۱/۰۵
۶	ماندگار	دایره‌ای	۱	۳	۳۴/۲۱
۷	ماندگار	دایره‌ای	۰/۵	۲	۳۶/۸۴
۸	ماندگار	دایره‌ای	۰/۵	۲/۵	۳۹/۴۷
۹	ماندگار	دایره‌ای	۰/۵	۳	۴۲/۱۰
۱۰	غیرماندگار	دایره‌ای	۲	۲	۶/۴۵
۱۱	غیرماندگار	دایره‌ای	۲	۲/۵	۱۶/۱۲
۱۲	غیرماندگار	دایره‌ای	۲	۳	۱۹/۳۵
۱۳	غیرماندگار	دایره‌ای	۱	۲	۲۹/۰۳
۱۴	غیرماندگار	دایره‌ای	۱	۲/۵	۳۵/۴۸
۱۵	غیرماندگار	دایره‌ای	۱	۳	۴۱/۹۳
۱۶	غیرماندگار	دایره‌ای	۰/۵	۲	۱۰۰
۱۷	غیرماندگار	دایره‌ای	۰/۵	۲/۵	۱۰۰
۱۸	غیرماندگار	دایره‌ای	۰/۵	۳	۱۰۰

در آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود که در جریان ماندگار، در اندازه طوق D_3 و در ارتفاع نصب $0/D_5$ با کاهش $42/10$ درصدی نسبت به آزمایش بدون طوق بهترین حالت برای حفاظت در برابر آبشستگی اطراف پایه پل نسبت به حالات دیگر است. اما در جریان غیرماندگار، بیشترین درصد کاهش آبشستگی ممکن یعنی کاهش 100 درصدی را حتی برای کوچکترین اندازه طوق یعنی اندازه D_2 را در ارتفاع نصب $0/D_5$ داشت که مقایسه آن با ارتفاع نصب کمتر از آن در جریان غیرماندگار یعنی ارتفاع D_1 که کاهش $41/93$ درصدی عمق آبشستگی را به همراه داشت، بیانگر تأثیر چشمگیر ارتفاع نصب در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل می‌باشد. لازم به ذکر است که ارتفاع روی سطح بستر هم برای کوچکترین اندازه طوق یعنی اندازه

معکوس حالت دیگر است. در نتیجه در روند توسعه حفره آبشستگی هیدروگراف اصلی تقریباً در محدوده‌ی مابین این دو حالت وجود دارد.

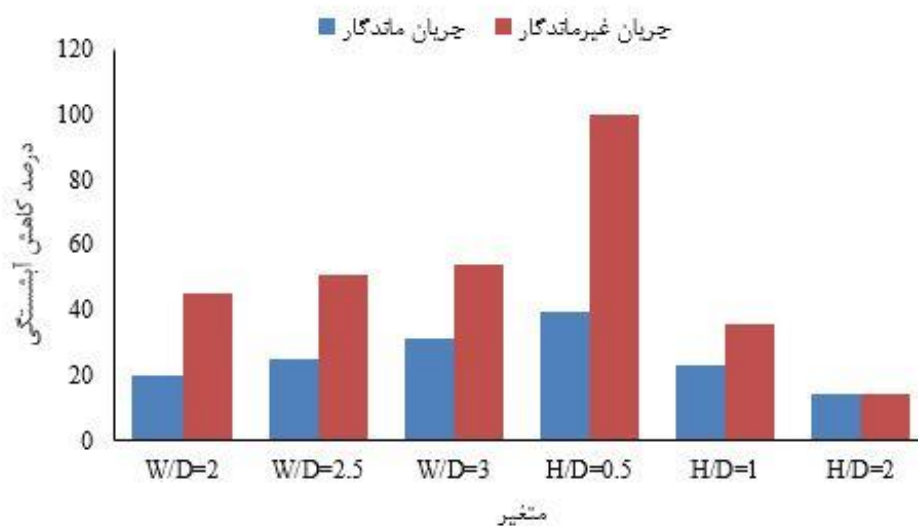
۳-۳- آبشستگی پایه پل با حفاظت طوق

در ابعاد و اندازه‌های مختلف طوق و در ارتفاع نصب متفاوت آزمایش‌ها با استفاده از سازه حفاظتی طوق صورت گرفت که پس از انجام آزمایش‌ها مشخص شد که پروفیل‌های برداشت بستر آبشستگی متفاوت است و در حالت اندازه‌ی طوق D_3 و ارتفاع نصب $0/D_5$ بهترین عملکرد را در حداکثر کاهش آبشستگی نسبت به آزمایش بدون طوق در هر دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار را داشت. در جدول ۷ شرح آزمایش‌های صورت گرفته نشان داده شده است.

جدول ۸. مقایسه میانگین عمق‌های آبخستگی متغیرهای اندازه و ارتفاع نصب طوق

Table 8. Comparison of the average scour depths the variables of size and height mounting collar

نوع متغیر	ارتفاع نصب طوق (H/D)						اندازه طوق (W/D)					
	غیرماندگار			ماندگار			غیرماندگار			ماندگار		
نسبت بی بعد	۲	۱	۰/۵	۲	۱	۰/۵	۳	۲/۵	۲	۳	۲/۵	۲
$(cm) ds_{avg}$	۲/۶۶	۲	۰	۳/۲۶	۲/۹۳	۲/۳۰	۱/۴۳	۱/۵۳	۱/۷۰	۲/۶۰	۲/۸۶	۳/۰۳
درصد کاهش آبخستگی	۱۴/۱۹	۳۵/۴۸	۱۰۰	۱۴/۲۱	۲۲/۸۹	۳۹/۴۷	۵۳/۸۷	۵۰/۶۴	۴۵/۱۶	۳۱/۵۷	۲۴/۷۳	۲۰/۲۶

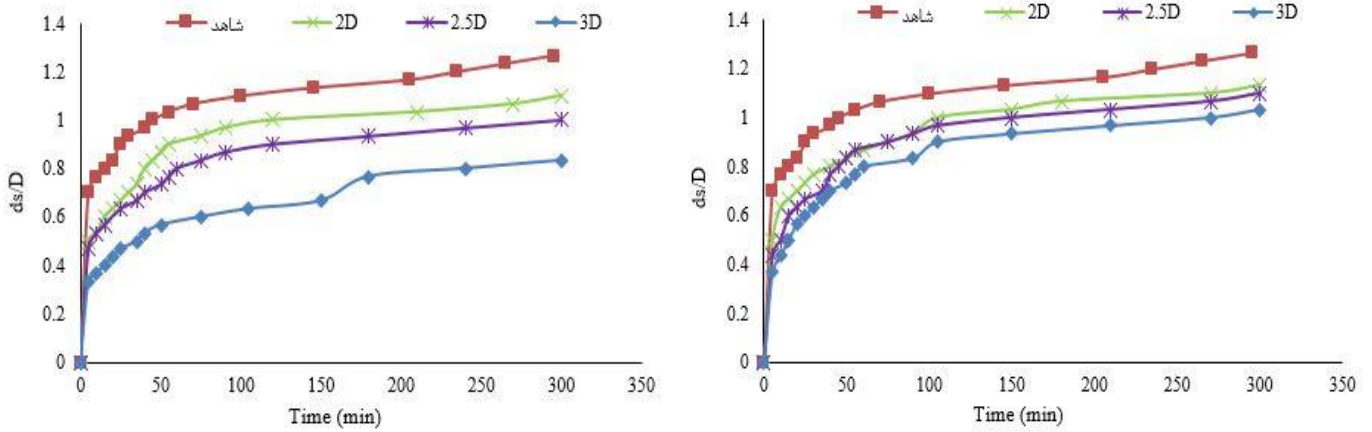


شکل ۱۲. مقایسه درصد کاهش آبخستگی متوسط عمق‌های متغیرهای اندازه و تراز نصب طوق در جریان ماندگار و غیرماندگار

Fig. 12. Comparison of percentage of average scour reduction depths the variables of size and height mounting of collar in steady and unsteady flow

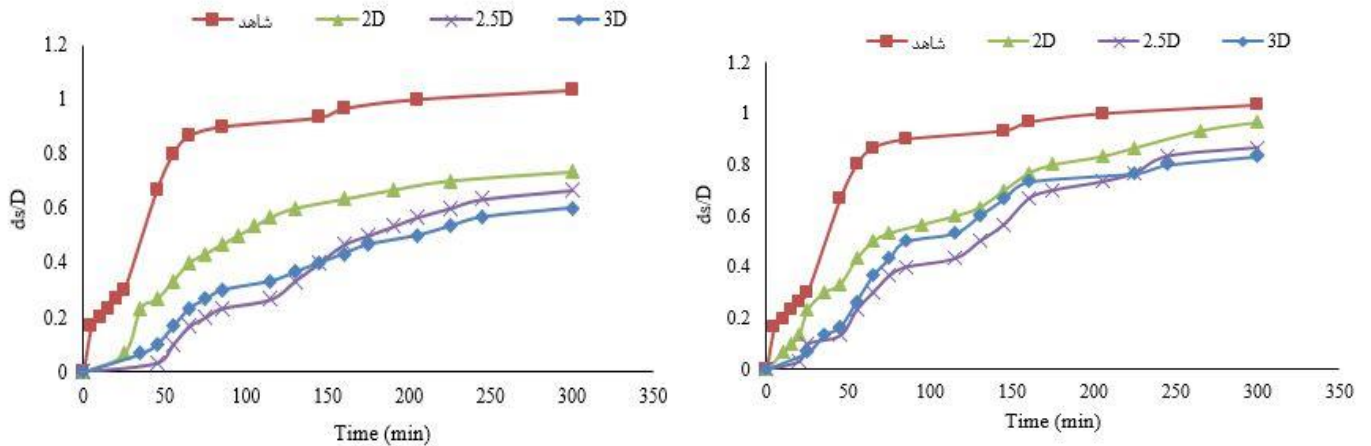
کاهش آبخستگی اطراف پایه پل می‌شود. نصب طوق بر روی پایه پل، مانع جریان روبه‌پایین ناشی از برخورد به پایه پل می‌شود و باعث تضعیف آن می‌گردد؛ به همین دلیل با کاهش ارتفاع نصب و افزایش اندازه طوق، جریان کمتری به زیر آن نفوذ کرده و گردابه‌های ضعیف‌تری ایجاد می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش آبخستگی اطراف پایه پل است. همچنین با توجه به اینکه جریان غیرماندگار تحت

$D2$ بررسی گردید که در این ارتفاع نیز کاهش ۱۰۰ درصدی عمق آبخستگی را به همراه داشت. با نصب طوق فضای تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی محدود می‌شود و با کاهش ارتفاع نصب و نزدیک شدن به بستر، فضای لازم برای تشکیل این گردابه‌ها که عامل اصلی آبخستگی به حساب می‌آیند، محدودتر نیز می‌گردد. همچنین افزایش اندازه طوق از گستردگی و توسعه این گردابه‌ها جلوگیری می‌کند و باعث



شکل ۱۳. نمودار توسعه زمانی آبشستگی جریان ماندگار برای سه اندازه مختلف طوق و الف) ارتفاع نصب D2، ب) ارتفاع نصب D1 در مقایسه با آزمایش شاهد

Fig. 13. Temporal development scour diagram of steady flow for three different collar sizes; a) H=2D, b) H=1D Compared to the reference experiment

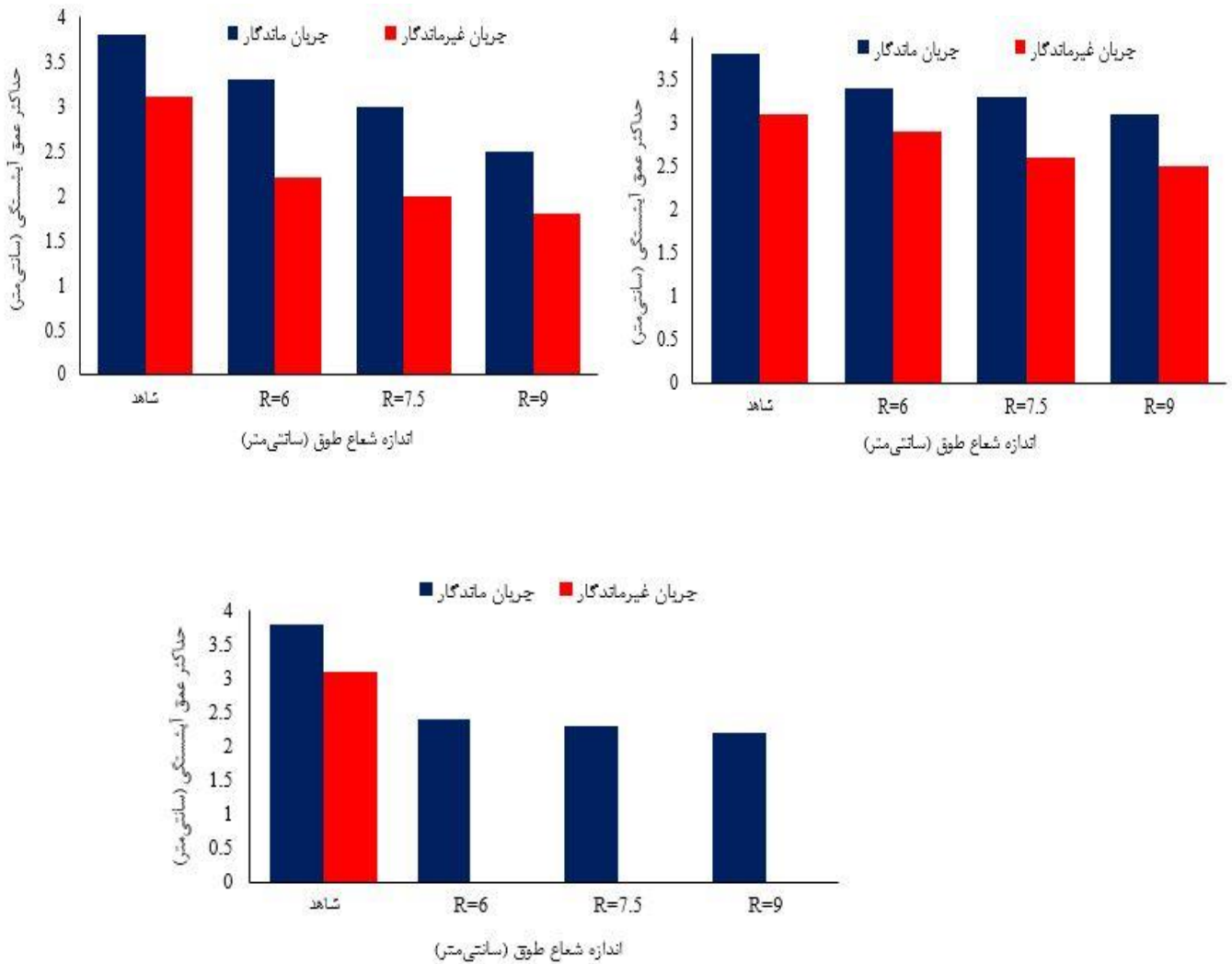


شکل ۱۴. نمودار توسعه زمانی آبشستگی جریان غیرماندگار برای سه اندازه مختلف طوق و الف) ارتفاع نصب D2، ب) ارتفاع نصب D1 در مقایسه با آزمایش شاهد

Fig. 14. Temporal development scour diagram of unsteady flow for three different collar sizes; a) H=2D, b) H=1D Compared to the reference experiment

۳۹/۴۷ درصد در جریان ماندگار و کاهش آبشستگی ۱۰۰ درصد در جریان غیرماندگار نسبت به سایر متغیرها تأثیر بیشتری در کاهش عمق آبشستگی دارد و بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. همچنین متغیر اندازه طوق با نسبت بی‌بعد $W/D=3$ در جریان غیرماندگار نیز درصد کاهش آبشستگی مناسبی را به خود اختصاص داده است. این نکته قابل مشاهده است که درصد کاهش آبشستگی جریان غیرماندگار تقریباً در همه متغیرها نسبت به جریان ماندگار بیشتر

شرایط این تحقیق در مجموع دبی کمتری نسبت به حالت ماندگار دارد (دبی پیک برابر با دبی جریان ماندگار است) به همین دلیل کاهش آبشستگی در این حالت بسیار بیشتر است. برای بررسی و مقایسه دو متغیر اندازه و ارتفاع نصب طوق، با میانگین‌گیری از عمق‌های آبشستگی هر متغیر (ds_{avg}) برای هر دو جریان ماندگار و غیرماندگار مطابق جدول ۸ مشخص شد که متغیر ارتفاع نصب طوق با نسبت بی‌بعد $H/D=0.5$ با کاهش آبشستگی



شکل ۱۵. حداکثر عمق آبشستگی در اندازه‌های مختلف طوق و الف) ارتفاع نصب D2، ب) ارتفاع نصب D1، ج) ارتفاع نصب D5/0 در مقایسه با آزمایش شاهد در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار

Fig. 15. Maximum depth of scour in different sizes of collar; a) H=2D, b) H=1D, c) H=0.5D Compared to the reference experiment in steady and unsteady flow

که به دلیل کاهش ۱۰۰ درصدی آبشستگی در ارتفاع نصب $D5/0$ در حالت جریان غیرماندگار و به عبارتی عدم وجود نمودار توسعه زمانی در این شرایط، از حالت مذکور در مقایسه نمودارها صرف نظر شد تا مقایسه‌ی بهتری برای روند توسعه آبشستگی حالت‌های مختلف در طی مدت زمان مشخص صورت گیرد. با بررسی توسعه زمانی آبشستگی مطابق شکل ۱۳ و ۱۴ مشخص شد که در هر دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار در صورت استفاده از طوق آبشستگی نسبت به حالت شاهد دیرتر اتفاق می‌افتد و در طوق با اندازه $D3$ در هر دو ارتفاع نصب مورد آزمایش این اتفاق نسبت به بقیه اندازه

است. همچنین مشخص است که با افزایش اندازه طوق‌ها، درصد کاهش عمق آبشستگی به تدریج و با حالتی منظم افزایش می‌یابد؛ اما کاهش ارتفاع نصب طوق‌ها، درصد کاهش آبشستگی را با اختلاف بسیار بیشتری نسبت به حالت ارتفاع بالاتر خود افزایش می‌دهد که این تفاوت، تأثیر چشمگیر متغیر ارتفاع نصب طوق در تضعیف گردابه‌ها و به تبع آن کاهش آبشستگی، در این نوع اقدامات حفاظتی را نشان می‌دهد. برای درک بهتر نتایج شکل ۱۲ ترسیم گردید.

همچنین توسعه زمانی آبشستگی برای آزمایش‌ها با اندازه‌های مختلف طوق و در ارتفاع نصب گوناگون بررسی شد. لازم به ذکر است

جدول ۷. فهرست آزمایش‌های تحقیق حاضر
Table 7. List of present research experiments

نام محقق	W/D	H/D	درصد کاهش آبشستگی
تحقیق حاضر	۳	۰/۵	۴۲/۱۰
شریعتی (۱۳۸۸)	۲/۵	-۰/۴	۵۵
امینی (۱۳۹۵)	۲	۰	۲۸/۵۷
عقلی و زمردیان (۱۳۹۳)	۳	-۰/۱	۵۵

تحقیقات دیگر (برای جریان ماندگار، پایه استوانه‌ای و طوق دایره‌ای) مطابق جدول ۹ مقایسه شد. طبق این مقایسه مشخص است که به دلیل شرایط متفاوت آزمایش‌ها در تحقیق حاضر و تحقیقات دیگر و همچنین ابعاد و ارتفاع نصب متفاوت طوق در این تحقیقات، درصد کاهش آبشستگی تفاوت دارد. نتیجه‌ای که در مقایسه با تحقیقات دیگر نیز بدست می‌آید حاکی از این است که با افزایش اندازه طوق و کاهش ارتفاع نصب طوق نسبت به سطح بستر می‌توان درصد کاهش آبشستگی را تا حد مطلوب و مناسبی افزایش داد و بیشترین کارایی از این سازه حفاظتی را بهره برد.

۴- نتیجه‌گیری

آبشستگی پایه پل یکی از مشکلات اساسی تخریب پل‌ها می‌باشد و استفاده از سازه‌ی حفاظتی طوق با مشخصات گوناگون یکی از راهکارهای مفید در راستای کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل می‌باشد. در تحقیق حاضر عملکرد طوق دایره‌ای در اندازه‌های مختلف و ارتفاعات نصب متفاوت نسبت به سطح بستر در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق در حالات مختلف درصد کاهش آبشستگی، نمودار توسعه زمانی و حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده مقایسه شدند. نتایج حاکی از آن بود که طوق به طور کلی باعث کاهش عمق آبشستگی اطراف پایه پل می‌شود و یک سازه حفاظتی مناسب است و همچنین هرچه اندازه طوق بزرگتر و ارتفاع نصب طوق به سطح بستر نزدیکتر باشد، عمق آبشستگی پایه پل و همچنین ابعاد حفره آبشستگی را نسبت به حالت بدون طوق بیشتر کاهش می‌دهد که در این تحقیق طوق با اندازه D^3 و ارتفاع نصب

طوق‌ها مشهودتر است. همچنین مشاهده می‌شود که برای یک اندازه ثابت طوق و با مقایسه‌ی هر دو ارتفاع نصب مورد آزمایش، در ارتفاع D^1 بالای سطح بستر توسعه آبشستگی دیرتر اتفاق افتاده و نسبت به نمودار دیگر ارتفاع نصب طوق، پایین‌تر است؛ به همین دلیل توسعه آبشستگی به مدت زمان تعادل آبشستگی در طوق با اندازه D^3 و ارتفاع نصب D^1 در هر دو جریان ماندگار و غیرماندگار کمتر از بقیه حالات است که عملکرد بهینه این متغیرها در این ابعاد و موقعیت را نشان می‌دهد. همچنین مشخص است که شروع فرآیند آبشستگی در جریان غیرماندگار دیرتر اتفاق می‌افتد و بیشترین کاهش آبشستگی در محدوده اولین توالی هیدروگراف مشاهده می‌شود. با مقایسه دو شکل ۱۳ و ۱۴ می‌توان دریافت که طوق در جریان غیرماندگار اثر بیشتری بر کاهش آبشستگی نسبت به حالت شاهد دارد و حداکثر تغییرات و درصد بیشتری از آبشستگی در زمانی کمتر از جریان ماندگار رخ می‌دهد.

عملکرد طوق در اندازه‌های مختلف و ارتفاعات نصب متفاوت در شکل ۱۵ ارائه شده است که نتایج حاکی از آن است که بهترین عملکرد در کاهش عمق حفره آبشستگی در جریان ماندگار با اندازه طوق D^3 و ارتفاع نصب $0/D^5$ با حداکثر عمق آبشستگی $2/2$ سانتی‌متر و در جریان غیرماندگار، طوق با همه اندازه‌ها و در ارتفاع نصب $0/D^5$ ، بدون هیچ‌گونه آبشستگی بهترین حالات حفاظت در مقابل آبشستگی با استفاده از این سازه حفاظتی هستند. بنابراین در این تحقیق و با این تعداد آزمایشات صورت گرفته، افزایش اندازه طوق و کاهش ارتفاع نصب طوق نسبت به سطح بستر، کاهش بیشتر آبشستگی اطراف پایه پل در هر دو حالت جریان را در پی دارد.

همچنین بیشترین درصد کاهش آبشستگی در این تحقیق با برخی

تعداد هیدروگراف‌های متوالی	N
شکل منحنی هیدروگراف	$Shape_{hyd}$
زمان تداوم هیدروگراف، s	t_d
زمان تعادل آبشستگی، s	t_e
زمان رسیدن به پیک هیدروگراف در جریان غیرماندگار، s	t_p
سرعت متوسط جریان ماندگار، m/s	U
سرعت بحرانی جریان ماندگار، m/s	U_c
سرعت متوسط جریان غیرماندگار در پیک هیدروگراف، m/s	U_p
سرعت بحرانی جریان غیرماندگار در پیک هیدروگراف، m/s	U_{cp}
حجم زیر هیدروگراف، m^3	V_{hyd}
قطر طوق در آزمایش‌های جریان ماندگار، m	W
قطر طوق در آزمایش‌های جریان غیرماندگار، m	W_{NS}
عمق جریان ماندگار، m	y
عمق جریان غیرماندگار در پیک هیدروگراف، m	y_p
علائم یونانی	
جرم مخصوص ذرات جامد، kg/m^3	ρ_s
جرم مخصوص آب، kg/m^3	ρ_w
لزجت سینماتیکی جریان، m^2/s	ν

مراجع

- [1] M. Shafaei bajestan, Hydraulic of sediment transport, 4nd Ed, Shahid Chamran University of Ahvaz Publications, 2016. (in Persian)
- [2] M. Javanmard, M. Heydarpour, The effect of cable in controlling and reduction around the bridge pier local scour, International Conference on Agriculture, Environment and Natural Resources in the Third Millennium, 22 May 2017, Rasht, Iran. (in Persian)
- [3] Y.-M. Chiew, Scour protection at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering, 118(9) (1992) 1260-1269.
- [4] M. Heidarpour, H. Afzalimehr, E. Izadinia, Reduction of local scour around bridge pier groups using collars, International Journal of Sediment Research, 25(4) (2010) 411-422.
- [5] A.R. Zarrati, M.R. Chamani, A. Shafaie, M. Latifi, Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap, International Journal of

$D5$ بهترین عملکرد در حفاظت پایه پل در مقابل آبشستگی را در هر دو جریان ماندگار و غیرماندگار داشت. با مقایسه درصد آبشستگی در تحقیق حاضر (حالت جریان ماندگار) با تحقیقات گذشته مشاهده شد که بدلیل کمتر بودن نسبت H/D در تحقیقات دیگر نسبت به این تحقیق، درصد کاهش آبشستگی در تحقیق حاضر کمتر از دیگر تحقیقات بود که بیانگر تأثیر بهتر طوق در ارتفاعات نزدیک به سطح بستر است. همچنین در تحقیق حاضر دو متغیر اندازه طوق و ارتفاع نصب طوق در تعیین بیشترین تأثیر در کاهش آبشستگی و بهترین عملکرد مقایسه شدند که مشخص شد متغیر ارتفاع نصب طوق با نسبت بی بعد $H/D=0.5$ در هر دو جریان ماندگار و غیرماندگار نسبت به سایر نسبت‌های بی بعد متغیرها بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی پایه پل داشته است. لازم به ذکر است که در یک مدت زمان مشخص، در صورتی که دبی پیک جریان غیرماندگار برابر با دبی جریان ماندگار باشد، عمق آبشستگی ایجاد شده توسط جریان غیرماندگار کمتر از حالت جریان ماندگار است که در آزمایش‌های با ارتفاع نصب $D5$ و در همه اندازه‌های طوق برای جریان غیرماندگار که کاهش ۱۰۰ درصدی عمق آبشستگی را به همراه داشت، بسیار مشهود بود. همچنین خاصیت توالی هیدروگراف در جریان غیرماندگار نشان داد که بیشترین تأثیر بر آبشستگی اطراف پایه پل در توالی اول اتفاق می‌افتد. پیشنهاد می‌شود برای توسعه این تحقیق، اندازه‌ها و ارتفاعات نصب مختلف و متفاوت با تحقیق حاضر بررسی گردند و از انواع هیدروگراف‌ها با شدت پیک، زمان پایه و پارامترهای دیگر مربوط به هیدروگراف جریان غیرماندگار استفاده شود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

B	عرض فلوم، m
D	قطر پایه، m
D_{50}	میانگین قطر ذرات، m
d_s	عمق آبشستگی، m
ds_{avg}	میانگین عمق‌های آبشستگی متغیر، m
g	شتاب ثقل، m/s^2
H	ارتفاع نصب طوق در آزمایش‌ها یجریان ماندگار، m
H_{NS}	ارتفاع نصب طوق در آزمایش‌های جریان غیرماندگار، m

- Journal of Hydraulic Research, 25(1) (1987) 15-26.
- [19] S. Franzetti, S. Malavasi, C. Piccinin, Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare, in: XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 1994, pp. 1-13.
- [20] Bagherian, H. Experimental study on the effect of circular pier tilt on scouring depth in non-steady flow conditions, MS Thesis, Tarbiat modares university, Tehran, Iran, 2018. (Persian)
- [21] Shariati, H. Investigation of collar and slot performance in scour reduction of bridge pier, MS Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 2009. (in Persian)
- [22] Ghasemi Gavarti, Z. Effect of sacrificial pile with slot and collar on reduction of local scour around bridge pier, MS Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 2015. (in Persian)
- [23] Amini, M.M, Investigation on simultaneous effect of collar and slot in Reduction local scour of cylindrical pier groups, MS Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 2016. (in Persian).
- [24] A. Zarrati, S.M. Azizi, Control of scouring in the around bridge pier, Journal of Technical College University of Tehran, 35(1) (2001) 21-33. (in Persian)
- [25] M. Gholamzadeh Mahmoudi, M. Shafaei Bajestan, Influence of collar placement on local scour around the cylinder bridge piers in meandering river, 8th International River Engineering Conference, 26 and 28 January 2010, Ahvaz, Iran. (In Persian).
- [26] A. Masjedi, M.S. Bejestan, A. Esfandi, Experimental study on local scour around single oblong pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend, International Journal of Sediment Research, 25(3) (2010) 304-312.
- [27] H. Sanikhani, A. Hosseinzadeh Dalir, D. Farsadizadeh, A. Fakherifard, A. Nazemi, F. Salmasi, Application of rectangular and circular collars in reducing of bridge piers scour, Journal of Agricultural Science, 18(4) (2008) 1-16. (in Persian)
- [28] M. Aghli, S.M. Zomorodian, Effect of cable and collar on scouring depth around cylindrical bridge pier in meandering river, Journal of Irrigation Science and Engineering, 36(3) (2013) 31-40. (in Persian)
- Sediment Research, 25(3) (2010) 313-322.
- [6] N. Hasanpour, A. Hosseinzadeh Dalir, H. Arounaghi, Investigation of local scour around airfoil shaped pier with collar, Journal of water and soil science, 23(3) (2013) 221-234. (in Persian)
- [7] A.R. Zarrati, H. Gholami, M. Mashahir, Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers, Journal of Hydraulic Research, 42(1) (2004) 97-103.
- [8] C. Singh, B. Setia, D. Verma, Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier, in: Proceedings of the congress-international association for hydraulic research, 2001, pp. 202-209.
- [9] A.M. Negm, G.M. Moustafa, Y.M. Abdalla, A.A. Fathy, Optimal shape of collar to minimize local scour around bridge piers, Proc. of IWTC13, (2009) 12-15.
- [10] S.Y. Kumcu, M.A. Kokpinar, M. Gogus, Scour protection around vertical-wall bridge abutments with collars, KSCE Journal of Civil Engineering, 18(6) (2014) 1884-1895.
- [11] M. Karimi, K. Qaderi, M. Rahimpour, M.M. Ahmadi, Determine the most suitable collar submergence ratio at abutment scour, The 2nd International and 3rd National Conference on Agriculture, Environment and Food Security, 6 March 2019, Jiroft, Iran. (in Persian)
- [12] J.-S. Lai, W.-Y. Chang, C.-L. Yen, Maximum local scour depth at bridge piers under unsteady flow, Journal of Hydraulic Engineering, 135(7) (2009) 609-614.
- [13] M.K. Tabarestani, A.R. Zarrati, Local scour calculation around bridge pier during flood event, KSCE Journal of Civil Engineering, 21(4) (2017) 1462-1472.
- [14] A.J. Raudkivi, Loose boundary hydraulics, CRC Press, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1998.
- [15] R. Ettema, Scour at bridge piers, Report No. 216, Department of Civil Engineering, University of Auckland, 1980.
- [16] V. Kumar, K.G.R. Raju, N. Vittal, Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars, Journal of Hydraulic Engineering, 125(12) (1999) 1302-1305.
- [17] A.J. Raudkivi, R. Ettema, Clear-water scour at cylindrical piers, Journal of Hydraulic Engineering, 109(3) (1983) 338-350.
- [18] Y. Chiew, B. Melville, Local scour around bridge piers,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Rajabizadeh, S. A. Ayyoubzadeh, K. Qaderi, (2021). *Experimental Study on the Effect of Circular Collar on Cylindrical Bridge Pier Scour in Unsteady Flow*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1721-1742

DOI: [10.22060/ceej.2019.17078.6460](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.17078.6460)

