

## بررسی عمق آبشستگی نهایی اطراف پایه ی پل با استفاده از ترکیب طوقه و شکاف و طناب سیمی

میلاذ مرتاض<sup>۱</sup>، سید امین اصغری پری<sup>۲</sup>، محمود شفاعی بجزستان<sup>۳</sup>

### چکیده

از عوامل عمده ی تخریب پل ها می توان به آبشستگی موضعی اطراف پایه های آن ها اشاره کرد. لذا برای مهار کردن این پدیده مطالعاتی صورت گرفته، و روش هایی برای محافظت پایه ها ابداع گردیده؛ از جمله روش های موثر می توان به استفاده از نصب طوقه، طناب سیمی و ایجاد شکاف در پایه اشاره نمود. از آن جا که ایجاد شکاف در پایه ی پل هم از لحاظ اجرایی و هم از نظر بهره برداری مشکلاتی را ایجاد می کنند، و نیز اثر طناب سیمی پیچی دور پایه ها نیز اثر نسبتاً کمی را در کاهش آبشستگی دارد، لذا در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر روکش های شکاف دار و مارپیچ، که از ترکیب طوقه، طناب سیمی و شکاف ایجاد شده در طوقه به وجود آمده اند، و همچنین طوقه های دنداندار، بر میزان عمق آبشستگی پایه های پل پرداخته شده است. در بهترین حالت، طوقه های دنداندار توانستند ۸۳ درصد حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه را کاهش دهند.

**واژه های کلیدی:** آبشستگی، پایه پل، طوقه، شکاف، طناب سیمی

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان،

تلفن: ۰۳۵۰۰۰۹۱۶۶۰۰۰۰ Email: asghari\_amin56@bkatu.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد دانشگاه شهید چمران اهواز

## مقدمه

نیروهای موثر در طراحی ایفا می‌کند. با به دست آوردن یک الگوی مناسب جهت شکل هندسی پایه‌ی پل در شرایط مختلف بارگذاری، می‌توان صدمات ناشی از تخریب پایه پل‌ها را به طرز چشمگیری کاهش داد. همچنین، از آن رو بر اثر آبشستگی تاکید گردیده است که در غالب موارد بر اثر بی توجهی به این پدیده، سازه‌ی پل سال‌ها قبل از به سر آمدن عمر مفید آن، کارایی خود را از دست داده و تخریب می‌شود، این مساله زمانی بحرانی تر می‌شود که بدانیم پل‌ها درست در زمانی تخریب می‌شوند (مثلاً در زمان وقوع سیلاب) که بیشترین احتیاج را به راه‌های دسترسی جهت کمک به آسیب دیدگان از بلایای طبیعی داریم. به فرسایش بستر و کناره‌ی آبراهه بر اثر جریان آب، و به فرسایش بستر در پایاب سازه به علت شدت جریان زیاد، و یا فرسایش بستر بر اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم راه، آبشستگی موضعی گویند. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه عمق آبشستگی نام دارد. شکل‌های مختلف آبشستگی در محدوده‌ی پایه پل عبارتند از:

سامانه گردابی رو به پایین

پس از برخورد جریان به دماغه‌ی پل، بر روی پایه با توجه به این که شیب سرعت عمقی بیش تر می‌شود، فشار بیش تری نیز در ترازهای بالاتر بر روی پایه ایجاد می‌گردد؛ به این ترتیب شیب فشاری روی پایه از بالا به پایین به وجود می‌آید، که خود باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه می‌شود. جریان رو به پایین، همانند یک فشانه عمودی عمل کرده، و پس از برخورد به بستر، ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. مقداری از این جریان که به سمت بالا بازگشت می‌کند. در برخورد به جریان عمومی، مجبور به حرکت در جهت جریان شده و مجدداً به پایه برخورد می‌کند. این چرخش جریان و بازگشت آن در داخل حفره کنده شده، گردابی را تشکیل می‌دهد که به تدریج در دو طرف پایه، امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب را پدید می‌آورد، که به آن گرداب نعل اسبی گویند. تشکیل گرداب نعل اسبی در داخل حفره‌ی آبشستگی، باعث تسریع در حفر آن شده و ذرات جدا گردیده از بستر، به وسیله جریان حلزونی شکل نعل اسبی به پایاب حمل می‌شوند. بر اثر جدایی جریان در کناره‌های پایه نیز گرداب‌هایی تشکیل می‌شوند که محور آن‌ها عمود بر بستر رودخانه می‌باشد که به آن‌ها گرداب برخاستگی می‌گویند. این گرداب؛ همانند گرداب ذرات بستر را جدا کرده و در معرض جریان قرار

پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌هایی هستند که از دیر باز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در اغلب موارد سازه پل بر روی رودخانه احداث می‌گردد که در این صورت، پایه‌های آن در تماس با جریان آب خواهند بود. تجربه‌ی طولانی مدت احداث پل بر روی رودخانه‌ها مهندسان را در دهه‌های گذشته به این نتیجه رسانده است که در طراحی آن‌ها فقط در نظر داشتن مسائل سازه‌ای، زمین‌شناسی، موقعیت راه و توان عبور مرور کافی نبوده، بلکه باید اثرگذاری جریان آب را نیز مورد توجه قرار داد. تخریب و آسیب دیدگی صدها پل بزرگ و کوچک در نقاط مختلف کشورمان در چند سال اخیر به علت وقوع سیلاب‌های مکرر، خود گویای این مطلب است که به رغم برخورداری از دانش فنی مناسب جامعه مهندسی کشور، در طراحی سازه‌های پل‌ها، جنبه‌های هیدرولیکی آن چنان که باید مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این میان، شکل هندسی پایه‌ی پل نقش بسیار مهمی را در ارتباط با الف- آبشستگی موضعی و ب- آبشستگی عمومی.

آبشستگی عمومی، فرسایشی است که به واسطه‌ی افزایش بده، سرعت، و در نتیجه افزایش عمق، به وجود آمده و باعث می‌شود که بستر عادی رودخانه عمیق تر گردد. بدیهی است که عوامل موثر در آبشستگی عمومی مربوط به ریخت-شناسی رودخانه بوده و شکل هندسی پایه‌ی پل هیچ نقشی را در این زمینه ندارد. در ارتباط با آبشستگی موضعی باید گفت که به علت به وجود آمدن جریان‌های چرخشی، فرسایش‌هایی به صورت موضعی ناشی از سامانه‌های گردابی مختلف در اطراف پایه‌ی پل به وجود می‌آیند. ذکر این نکته ضروری است که منظور از عمق آبشستگی موضعی، آن عمقی است که از بستر فرسایش یافته عمومی اندازه‌گیری می‌شود. تعیین عمق آبشستگی از این جهت دارای اهمیت می‌باشد، که اولاً بیانگر میزان تخریب در اطراف پایه بوده، و ثانیاً در طراحی شالوده پایه‌ها، که در مسیر جریان آب قرار دارند، نقش بسیار با اهمیتی را ایفا می‌کند. بسته به نوع پایه‌ی پل و شرایط جریان، سامانه گردابی ممکن است ترکیبی از یک یا چند نوع از سامانه‌های زیر باشد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷):

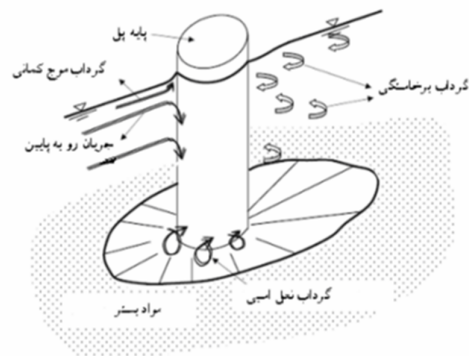
سامانه گردابی نعل اسبی

سامانه گردابی برخاسته

سامانه گردابی دنباله‌دار (موج کماتی)

چهارم قطر پایه داشت، و نیز طول آن معادل عمق آب به علاوه ی بستر متحرک بود، که به میزان ۳۵ درصد آبشستگی را کاهش داد. هیو لی و همکاران (۲۰۰۶) مطالعاتی را در زمینه ی تأثیر طوقه در کاهش آبشستگی اطراف تکیه گاه دیوار باله ای در حالت آب زلال انجام داده اند. طوقه توانایی محافظت از تکیه گاه پل را با مجزا کردن جریان بازگشتی و گرداب ثانویه در اطراف بستر دارد. مشاهیر و همکاران (۲۰۰۴) به این نتیجه رسیدند که طوقه با ابعاد سه برابر پایه ی مستطیلی بر روی بستر بهترین کارایی را دارد. حیدر پور (۲۰۰۲) شکاف هایی را با دو طول مختلف در پایه های دایره ای، و نیز پایه های نوک گرد مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده برای شکاف هایی که در نزدیک بستر قرار داشتند کاهش بیشتری را در عمق حفره آبشستگی سبب گردیدند. علاوه بر آن، استفاده از پایه های نوک گرد نسبت به دایره ای منجر به نتایج قابل قبول تری گردید. چیو (۱۹۹۲) تأثیر طوقه های محافظ را در کاهش آبشستگی پایه ی پل مورد آزمایش قرار داد، و با استفاده از طوقه به اندازه ی دو برابر قطر پایه، عمق آبشستگی به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین، او اظهار داشت که طراحی و کاربرد درست طوقه می تواند جایگزین مناسبی برای سنگ چین در حل مشکلات آبشستگی موضعی پایه های پل باشد. همچنین، تأثیر شکاف پایه را در کاهش عمق آبشستگی موضعی اطراف یک پایه ی دایره ای مورد بررسی قرار داد. وی آزمایش های خود را با شکاف هایی با مقطع مستطیلی، و با اندازه ی باز-شدگی و طول های متفاوت، که در دو موقعیت متفاوت نزدیک سطح آب و نزدیک بستر نهر در پایه ها ایجاد گردیده بودند، به انجام رساند. نتایج وی نشان دادند که با افزایش طول و عرض ایجاد شده در پایه، از میزان آبشستگی کاسته خواهد شد. عقلی و زمردیان (۲۰۱۳) در مورد تأثیر توأم طوقه و کابل بر عمق آبشستگی اطراف پایه ی پل در قوس رودخانه ها تحقیق کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش قطر طناب سیمی، و کمتر شدن فاصله ی میان گام ها، آبشستگی بیش تر کاهش می یابد، و حداکثر مقدار در کاهش آبشستگی ۵۹ درصد می باشد. همچنین، طوقه در بهترین حالت ۵۵ درصد و طوقه و طناب سیمی توأم حداکثر ۶۹/۷ درصد، عمق آبشستگی را کاهش می دهند. چناری و ملکی (۲۰۱۲)، به صورت عددی تأثیر پایه شکاف دار و بدون شکاف را بر تنش برشی کف مورد بررسی قرار

داده و به انتقال ذرات از جلو و اطراف پایه به سمت پایاب کمک می کنند. حفر گودال آبشستگی به وسیله گرداب نعل اسبی آن قدر ادامه می یابد تا حجم آب درون حفره آبشستگی زیاد شده و کارمایه گرداب را مستهلک کند. در این حالت عمق آبشستگی به حالت تعادل می رسد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). (شکل ۱)



شکل ۱- جریان و الگوی آبشستگی در اطراف پایه استوانه ای شکل (جلیلی، ۱۳۹۲).

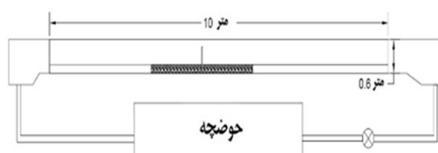
مهم ترین فراسنج های تأثیرگذار بر عمق آبشستگی در اطراف پایه های پل عبارتند از:  
 لزجت جنبشی سیال (ν)، چگالی سیال (ρ)، چگالی رسوب - های بستر (Gs)، قطر رسوب های بستر (D<sub>50</sub>)، عمق جریان (y)، سرعت جریان (V) و قطر پایه (D).  
 راهکارهای کاهش آبشستگی در پایه ی پل ها را می توان به دو دسته ی کلی روش های پوششی همراه با مقاوم سازی بستر، و یا روش های اصلاح الگوی جریان دسته بندی نمود.

فرج نوروز و همکاران (۲۰۱۲) تحقیقاتی را در جهت ارزیابی تأثیر اصلاح الگوی جریان بر کاهش عمق آبشستگی گزارش داده اند که بسیار جامع بوده، در این تحقیق شش مورد این روش ها از جمله پره ی آب بند، پره ی مستغرق، طوقه، شمع، طناب سیمی و شکاف مورد بررسی قرار گرفته، و حالت بهینه ی عملکرد آن ها را به دست آوردند. آن ها طوقه ای را به قطر ۳ برابر قطر پایه انتخاب کردند، که آبشستگی حول پایه را به میزان ۲۸/۷ درصد کاهش داد. همچنین، آن ها سه لایه ی طناب سیمی پیچی را با زاویه ی ۱۵ درجه و قطر ۰.۱ قطر پایه مورد آزمایش قرار دادند، که آبشستگی حول پایه را به میزان ۸/۷ درصد کاهش داد. آن ها شکافی را نیز در پایه ایجاد کردند که عرضی معادل یک

گیرند که از نظر اجرایی برای پل‌های موجود نیز قابل اجرا باشند. با توجه به تأثیر زیاد طوقه و شکاف در کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل، و همچنین اثر طناب سیمی به‌عنوان یک راهکار کمکی، در این تحقیق با رویکرد عدم ایجاد شکاف در بدنه‌ی پل، پوشش‌هایی با ترکیب طوقه، شکاف و طناب سیمی طراحی و بررسی شده‌اند، لذا، در این مقاله، عملکرد روکش مخروطی و یا استوانه‌ای شکلی که در آن شکاف ایجاد گردیده است به‌عنوان یک روش جدید در آزمایشگاه بررسی شده است. همچنین، تأثیر شکل جدیدی از طوقه به‌صورت طوقه‌ی دنداندار نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه عمران دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء، بهبهان، که مجهز به یک نهر پایه‌دار به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی-متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بود، انجام پذیرفت. بده مورد نظر به‌وسیله تلمبه‌ی متصل به سراب نهر پایه‌دار تأمین شده، بده به‌وسیله بده‌سنج شماره‌ای اندازه‌گیری گردید؛ عمق جریان به‌وسیله دریچه‌ای در پایاب تنظیم شد. در نهر پایه‌دار، ۴ متر ابتدایی و ۳ متر انتهایی به‌عنوان منطقه‌ی توسعه‌یافتگی جریان به‌مقدار ۱۵ سانتی‌متر از کف به-وسیله ورق‌های گالوانیزه به قطر ۰/۸ سانتی‌متر مرتفع گردید. ناحیه‌ی بین این دو سکو منطقه‌ی مورد آزمایش در نظر گرفته شد، این ناحیه به طول ۳ متر و عمق ۱۵ به‌وسیله رسوب‌های غیرچسبیده به قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر پر شده و پایه‌ی استوانه‌ای شکل به قطر ۲/۵ سانتی‌متر در وسط این ناحیه قرار داده شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمای شماتیک از نهر پایه‌دار آزمایشگاهی.

با توجه به پیشنهاد تفرج نورو و همکاران (۲۰۱۰)، چنان‌چه نسبت عرض پایه به قطر متوسط ذرات ( $b/d_{50}$ ) در محدوده‌ی ۲۵ تا ۱۳۰ باشد، عمق آبشستگی متعادل تحت تأثیر اندازه ذرات رسوبی قرار نمی‌گیرد. لذا با توجه به قطر انتخاب شده برای پایه (۲/۵۴ سانتی‌متر)، و نیز

دادند نتایج آن‌ها نشان دادند که با افزایش طول شکاف، و قرارگیری شکاف در نزدیک بستر، اثر شکاف در کاهش آبشستگی افزایش می‌یابد. خدابخشی و همکاران (۲۰۱۲) نیز تأثیر ارتفاع شکاف را از سطح بستر مورد بررسی قرار دادند.

خزیمه‌نژاد و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر طوقه‌های مستطیلی متقارن و غیرمتقارن را بر آبشستگی تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دادند که طوقه‌ی غیر متقارن با عرض بزرگ در سراب و عرض کوچک در پایاب، نسبت به طوقه‌ی هم مساحت متقارن عملکرد بهتری را در جهت کاهش آبشستگی دارد. همچنین، با افزایش ابعاد طوقه و قرارگیری آن در زیر تراز بستر نیز عملکرد طوقه افزایش می‌یابد. جلیلی (۲۰۱۳) تأثیر طوقه‌ی مشبک و ساده را بر کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل مکعبی بررسی نمود، با توجه به نتایج، طوقه‌ی ساده عملکرد بهتری نسبت به طوقه‌ی مشبک دارد. حضرتی و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر طوقه‌ی نیم‌دایره با دنباله‌ی مستطیلی را در کاهش آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دنباله‌ی مستطیلی اثر طوقه در کاهش آبشستگی افزایش یافته است. رستمی (۲۰۱۵)، به‌صورت عددی، تأثیر طوقه مربعی و دایره‌ای را بررسی نمود، که با توجه به نتایج نرم‌افزار FLOW-3D، اثر طوقه‌ی مربعی بیش‌تر از دایره‌ای بوده است. کیانپور و عباسی (۲۰۱۵) تأثیر شکل خروجی شکاف را در پایه‌ی پل به‌صورت عددی بررسی نمودند؛ خروجی شکاف در تحقیق آن‌ها به‌صورت تی شکل، وای شکل و سیگما بوده است، نتایج نشان دادند که هر چند اثر خروجی وای شکل از دو نوع خروجی دیگر بیش‌تر بوده است، اما با افزایش زمان آزمایش، تأثیر شکل خروجی شکاف کم بوده است.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که روش‌های اصلاح الگوی جریان توانایی خوبی را برای کاهش آبشستگی بستر را دارا می‌باشند. روش‌هایی همچون ایجاد شکاف از نظر اجرایی و سازه‌ای باعث مشکلاتی خواهد شد. علاوه بر این، تعداد زیادی پل در ایران و دنیا در سال‌های قبل ساخته شده‌اند که در معرض خطرات ناشی از عمق آبشستگی می‌باشند و روش‌های پوششی نیز برای رودخانه‌های دائمی بسیار سخت، و برای سایر رودخانه‌ها هزینه‌ی زیادی دارد؛ از این‌رو، ضروری است تا روش‌های جدید مورد مطالعه قرار

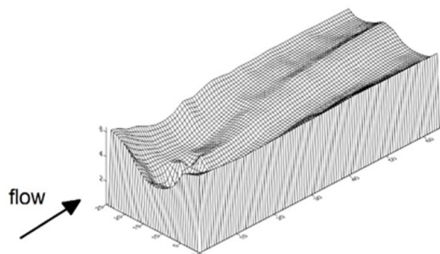
اعمال گردید و روکش‌هایی ساخته شد که روی بدنه این استوانه و مخروط‌ها شکاف‌هایی برای ایجاد جریان فشانه در پایاب طوقه در نظر گرفته شد که این شکاف‌ها به صورت افقی در سراب و پایاب روکش ایجاد گردیدند. در سراب عموماً تعداد شکاف‌ها بیش تر و با گشودگی‌های بزرگ تر نسبت به پایاب به عرض  $D/5$  (D قطر پایه) و طول‌های ۴ و ۳ و ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند، و در پایاب شکاف‌ها با تعداد کم تر و گشودگی کوچک تر با همان عرض و به طول‌های ۲ و  $1/5$  و ۱ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند (روکش‌های H, G, F, E, D). طوقه‌های بعدی نیز با طناب سیمی ترکیب شده و شکل طوقه نیز به صورت مخروط در آمد، که برای ایجاد اثر زبری بیش تر شیارهایی بر بدنه روکش مخروطی با زاویه ی ۱۰ درجه نسبت به افق و با گام  $D/2$  حدیده شد، و این روکش‌ها با ارتفاعات مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند (A, B, C). در نهایت، طوقه‌هایی دنداندار در نظر گرفته شدند که در واقع همان طوقه‌های دایره‌ای ساده هستند که با ایجاد دندان‌های به شکل ۷ و ۸ روی آن‌ها فشانه‌هایی ایجاد شده‌اند (I, J).

آزمایش‌ها به سه دسته کلی تقسیم شده‌اند که دسته ی اول شامل آزمایش‌های شاهد پایه بدون حضور طوقه و نیز در حضور طوقه دایره‌ای ساده (K) بود، دسته ی دوم شامل طوقه‌های مارپیچ‌دار و شکاف‌دار بوده، یعنی روکش‌های A, B, C, D, E, F, G, H را شامل شده است، دسته ی سوم آزمایش‌ها نیز به طوقه‌های دنداندار (I, J) اختصاص یافت. آزمایش شاهد برای پایه ی پل، و بدون حضور طوقه، بوده است که در مدت ۲۴ ساعت انجام گردید؛ بر اساس معیارهای ارائه شده به وسیله تفرج نوروز (۲۰۱۰)، که برای به دست آوردن زمان تعادل شروط لازم ارضا گردید، این شروط مشمول مواردی از جمله زمان ثابت شدن شیب نمودار آبشستگی-زمان بوده، و همچنین، با استفاده از رابطه‌ای که آن‌ها ارائه کردند زمان تعادل زمانی است که میزان آبشستگی کوچک تر مساوی  $b/3 \times 0.5$  می-شود، که در این رابطه b عرض پایه است و در این مطالعه که قطر پایه  $2/5$  سانتی‌متر منظور گردید؛ زمان انجام آزمایش‌ها ۷ ساعت در نظر گرفته شد، و میزان آبشستگی در حین آزمایش شاهد با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای تعیین گردید (شکل ۳).

برای کلیه ی آزمایش‌های این تحقیق زمان آزمایش ۷ ساعت در نظر گرفته شده است؛ مقدار آبشستگی پس

جهت جلوگیری از تشکیل موج کوچک در بستر  $d_{50}$  ذرات رسوبی بایستی از  $0.7$  میلی‌متر بزرگ تر باشند؛ بنابراین  $d_{50}$  ذرات رسوبی برابر  $0.8$  میلی‌متر انتخاب گردیدند تا حداکثر مقدار آبشستگی به دست آید، و هم از ایجاد پشته‌های کوچک جلوگیری شود. انحراف معیار هندسی ذرات نیز برابر با  $1/3$  بود. چگالی نسبی ذرات رسوبی بستر برابر با  $2/64$  بود. انتقال آب از مخزن به نهر به وسیله یک تلمبه با بده ثابت  $10/5$  لیتر بر ثانیه صورت گرفت. بده در نظر گرفته شده در تمامی مراحل آزمایش‌ها با تعیین سرعت بحرانی ( $u_c$ )، که سرعت در آستانه ی حرکت ذرات بوده، سپس تعیین سرعت جریان ( $u$ )، که جهت نزدیک شدن به شرایط تشکیل حداکثر عمق آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال به کار رفته، با در نظر گرفتن عمق جریان برابر با  $11$  سانتی‌متر با استفاده از رابطه ی ارائه شده به وسیله ملویل (۱۹۹۷) با نسبت  $u/uc = 0.92$  حاصل شده است. برای انجام آزمایش‌ها تعیین ابعاد شبیه، و نیز تعیین مقادیر فراسنج‌های مجاز، که بر عمق آبشستگی مؤثرند، اولین گام محسوب می‌شوند، لذا، می‌بایست در طرح ابعاد شبیه به اثر جانبی دیواره‌های کانال بر عمق آبشستگی بایستی توجه شود؛ لذا، طبق معیار رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی اطراف پایه بایستی نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه بزرگ تر از  $6/25$  باشد. تمامی طوقه‌ها نیز بنا به نتایج آزمایش‌های

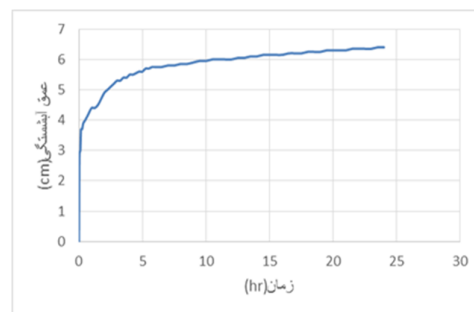
تفرج نوروز (۲۰۱۲) در تراز  $z/D = -0.5$ ، که  $1/2 -$  سانتی‌متر زیر بستر واقع می‌شود، نصب گردیدند. قطر طوقه‌ها نیز، به دلیل عرض کم نهر پایه‌دار آزمایشگاهی طبق پیشنهاد رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) ۲ برابر عرض پایه انتخاب شد. در این تحقیق، هدف بررسی بهترین شکل برای بهینه-سازی یک طوقه جهت کاهش آبشستگی می‌باشد، لذا از ترکیب طوقه و طناب سیمی و شکاف و همچنین تغییر شکل خود طوقه نیز استفاده گردید که شکل‌های آن‌ها به چند دسته تقسیم شد. جدول (۱) مشخصات نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. چون تأثیر تمام شکل‌ها روی کاهش گرداب‌های نعل اسبی و برخاستگی در جلو و پشت پایه پل بود، لذا شکاف‌ها و عملگرهای الگوی بهینه‌سازی بیش تر در ناحیه سراب و پایاب پایه کارگذاری شدند. در این ترکیبات، برای تلفیق طوقه با شکاف به طوقه تغییر شکلی مخروطی یا استوانه‌ای



شکل ۴- پستی و بلندی بستر اطراف پایه پل در آزمایش شاهد بدون حفاظت.

در کلیه آزمایش‌های این تحقیق روکش‌ها، اعم از مخروطی یا استوانه‌ای، قطر کف ۵ سانتی‌متر برابر 2D را داشتند و قطر سر مخروطها ۲/۵ سانتی‌متر برابر 1D (به اندازه قطر پایه) بود، و تراز نصب آنها نیز بنا به توصیه تفرج نوروز (۲۰۱۲)، معادل ۱/۲- سانتی‌متر (-0.5D) زیر تراز بستر بود.

از اتمام آزمایش با استفاده از متر لیزری در اطراف پایه و برای اساس الگویی شبکه‌بندی شده روی یک صفحه‌ی راهنما انجام گردید. حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش شاهد در نقطه‌ی مبنا ۶/۴ سانتی‌متر بوده است (شکل ۴).

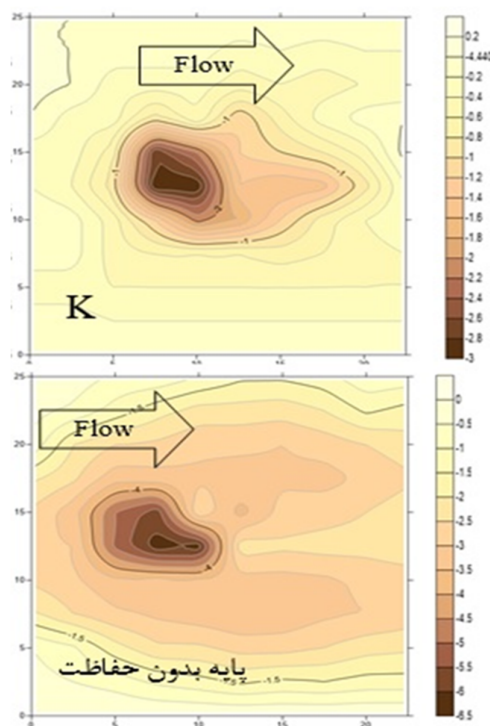


شکل ۳ نمودار توسعه زمانی آبشستگی در آزمایش بدون حفاظت (آزمایش شاهد).

جدول ۱- نامگذاری و مشخصات شبیه‌ها.

مشخصات	شکل	شبهه	مشخصات	شکل	شبهه
روکش مخروطی شکاف‌دار با قطر کف 2D و ارتفاع D دو شکاف در ارتفاع در سراب و پایاب		D	روکش مارپیچی با قطر کف 2D و ارتفاع 2D		A
روکش مخروطی شکاف‌دار با قطر کف 2D و ارتفاع 0.6D یک شکاف در سراب و پایاب		E	روکش مارپیچی با قطر کف 2D و ارتفاع D		B
روکش مخروطی شکاف‌دار با قطر کف 2D و ارتفاع 0.6D با یک شکاف در سراب و دو شکاف هم تراز در پایاب		F	روکش مارپیچی با قطر کف 2D و ارتفاع 0.6D		C
روکش استوانه‌ای شکاف‌دار با قطر کف 2D و ارتفاع 0.6D با یک شکاف در سراب و یک شکاف در پایاب		H	روکش استوانه‌ای شکاف‌دار با قطر کف 2D و ارتفاع D دو شکاف در ارتفاع در سراب و پایاب		G
طوقه نیمه دندانه‌دار (فشانه طوقه) با قطر 2D و دندانه در ناحیه پایاب		J	طوقه دندانه‌دار (فشانه کامل) با قطر 2D و دندانه دور تا دور		I
			طوقه ساده دایره‌ای به قطر 2D		K

پایه در لایه‌ی مرزی تشدید می‌گردند که وجود شکاف در پایاب این روکش‌ها، تغییر شکلی اساسی در پایه ایجاد کرده، و نیز جریان فشانه خروجی از این شکاف اثرات جدانشدگی را کاهش می‌دهد. پستی و بلندی گودال آبستگی این روکش‌ها در شکل (۷) آمده است و نتایج کلی نیز در جدول (۲) قابل مشاهده‌اند.

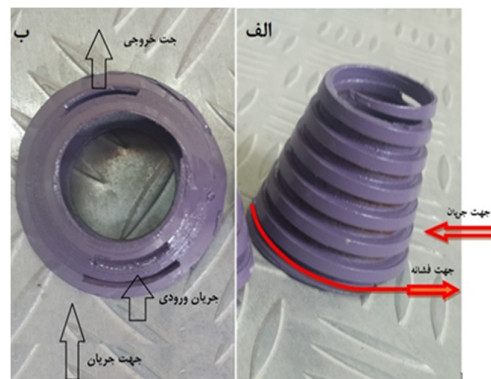


شکل ۶ - پستی و بلندی گودال آبستگی برای طوقه K و حالت پایه بدون حفاظت.

روکش‌های مارپیچ (A,B,C) به شکل یک مخروط ناقص بودند که روی بدنه شیب‌دار آن‌ها شکافی حدیده شده بود، درست مانند یک پیچ که آب درون شیارهای آن‌ها قرار می‌گرفت، و نیروی رو به پایین شیب سرعت به‌دلیل شیب‌دار بودن بدنه روی آب درون این شکاف‌ها تأثیر گذاشته به این جریان شتاب می‌بخشید.

لذا، هم نیروی رو به پایین ناشی از شیب سرعت جریان مستهلک می‌شد و هم شتاب بیشتری به آب در حال پیچش در این مارپیچ می‌بخشید، که باعث می‌گردید آب از نقطه‌ی خروجی این مارپیچ، که در کف مخروط قرار داشت (شکل الف در شکل ۵)، با سرعت بیشتری خارج گشته و فشار فشانه بیشتر باشد. این روکش‌های مارپیچ طوری نصب شدند که فشانه آن‌ها به سمت سراب بود. در

فشانه ایجاد شده به‌دلیل عبور جریان بر روی روکش‌ها، برای روکش‌های مارپیچ به‌سمت سراب (عکس جهت جریان)، و فشانه ایجاد شده در روکش‌های شکاف‌دار و طوقه‌های دندان‌دار در جهت جریان (به‌سمت پایاب) بوده که در (شکل ۵) نشان داده شده است.



شکل ۵ - جهت فشانه خروجی از مارپیچ (الف) و شکاف (ب).

## بحث و نتایج

آزمایش‌ها به سه دسته کلی تقسیم شده‌اند که دسته‌ی اول شامل آزمایش‌های شاهد پایه بدون حضور طوقه و نیز در حضور طوقه دایره‌ای ساده (K) بود؛ دسته‌ی دوم شامل روکش‌های مارپیچ‌دار و شکاف‌دار بوده یعنی روکش‌های A,B,C,D,E,F,G,H را شامل شده است؛ و دسته‌ی سوم آزمایش‌ها نیز به طوقه‌های دندان‌دار (I,J) اختصاص یافت.

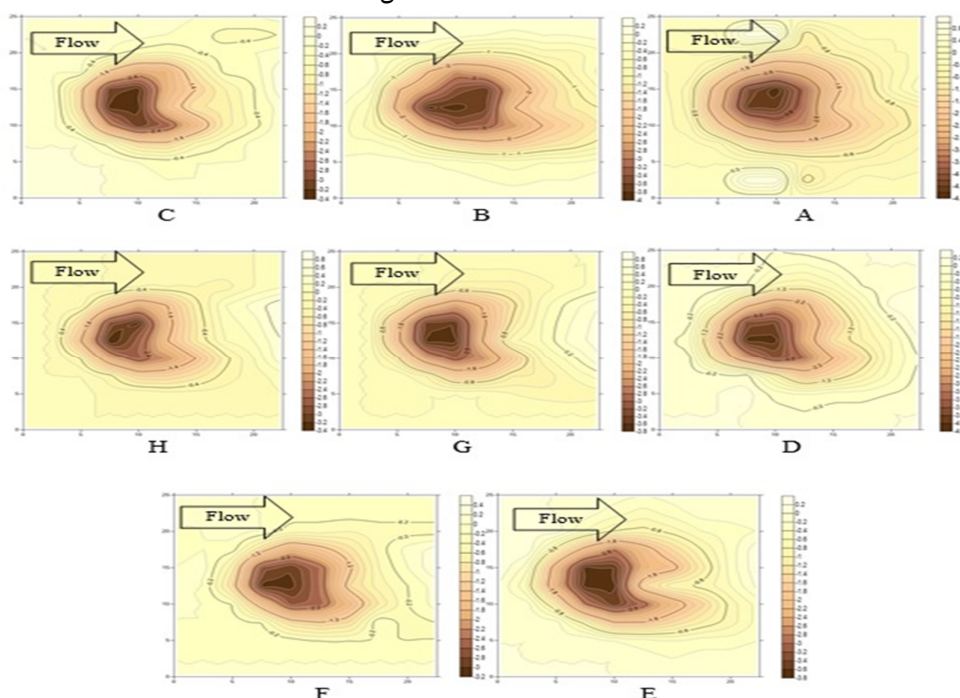
آزمایش‌های گروه اول به‌عنوان آزمایش شاهد و برای مقایسه با سایر آزمایش‌ها انجام شد که در آزمایش اول پایه بدون حضور طوقه و با شرایط ذکر شده در بالا مورد آزمایش قرار گرفت؛ حداکثر عمق آبستگی در این آزمایش برابر با ۶/۴ سانتی‌متر به‌دست آمد. آزمایش بعد در شرایط یکسان ولی با حضور طوقه‌ی نوع K انجام پذیرفت؛ پستی و بلندی گودال آبستگی در (شکل ۶)، و نتایج کلی آن در جدول (۲) قابل مشاهده است.

در آزمایش‌های گروه دوم در روکش‌های شکاف‌دار، به‌دلیل وجود شیب در بدنه روکش‌های مخروطی (D,E,F)، و شکاف در بدنه آن‌ها، و نیز ورود جریان رو به پایین به داخل شکاف‌های سراب باعث کاهش فشار جریان رو به پایین ناشی از شیب سرعت می‌شود که اثر مستقیمی بر کاهش گردابه‌های برخاستگی اطراف پایه دارد. همچنین، اثر گردابه‌های برخاستگی با وقوع پدیده‌ی جدانشدگی پشت

جدول ۲- درصد آبستگي در آزمایش‌های مختلف.					
% کاهش آبستگي	مشخصات روکش			نام روکش	آزمایش
	نوع روکش	ارتفاع (cm)	قطر کف (cm)		
25	مارپیچ ایجاد کننده فشانه به سمت سراب	5	5	A	1
39.06	مارپیچ ایجاد کننده فشانه به سمت سراب	2.5	5	B	2
51.56	مارپیچ ایجاد کننده فشانه به سمت سراب	1.5	5	C	3
45.31	مخروطی شکافدار با ۱ فشانه به سمت پایاب	2.5	5	D	4
51.56	مخروطی شکافدار با ۱ فشانه به سمت پایاب	1.5	5	E	5
42.18	مخروطی شکافدار با ۲ فشانه جانبی به سمت پایاب	1.5	5	F	6
42.18	استوانه‌ای شکافدار با ۱ فشانه به سمت پایاب	2.5	5	G	7
35.93	استوانه‌ای شکافدار با ۱ فشانه به سمت پایاب	1.5	5	H	8
56.25	طوقه دنداندار با فشانه به سمت پایاب و سراب	0.1	5	I	9
82.81	طوقه دنداندار با فشانه به سمت سراب	0.1	5	J	10
53.12	طوقه ساده	0.1	5	K	11

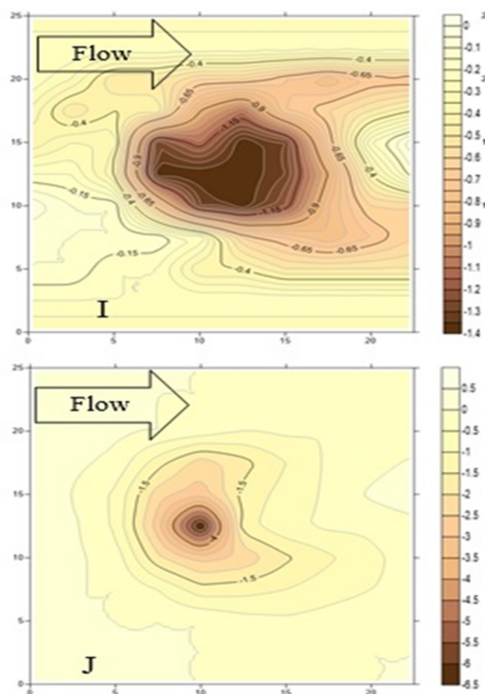
در آزمایش‌های گروه سوم در طوقه‌ی دنداندار نیز، به دلیل شیب‌دار بودن کنگره‌های ۷ و ۸ دندانها، جریان رو به پایین ناشی از شیب سرعت در برخورد با دندانها به صورت اوریب به بالا هدایت می‌شد، و این نیرو که در جهت افق تأثیرگذار است، در مقابل نیروی جریان رو به پایین که به صورت قائم تأثیر می‌گذارد مقاومت می‌نماید، و اثر مطلوبی را در کاهش گردابه‌ها اطراف پایه ایفا می‌کند (شکل ۸).

مورد روکش‌های شکافدار بدنه به صورت مخروط ناقص (D,E,F) یا استوانه (G,H) بود که در قسمت سراب بدنه تعداد شکاف‌های بیشتری با ابعاد بزرگ‌تر ایجاد شده بودند، و در قسمت پایاب شکاف‌هایی با تعداد کم‌تر و باز-شدگی با ابعاد کوچک‌تر تعبیه شده بودند تا سرعت جریان خروجی بیشتر گردد، که این پدیده مشابه یک فشانه جریان عمل می‌نماید (شکل ب از شکل ۵).



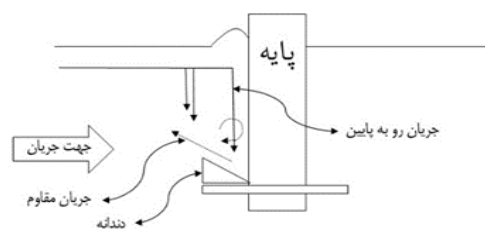
شکل ۷- پستی و بلندی گودال آبستگي برای روکش‌های A,B,C,D,E,F,G,H.



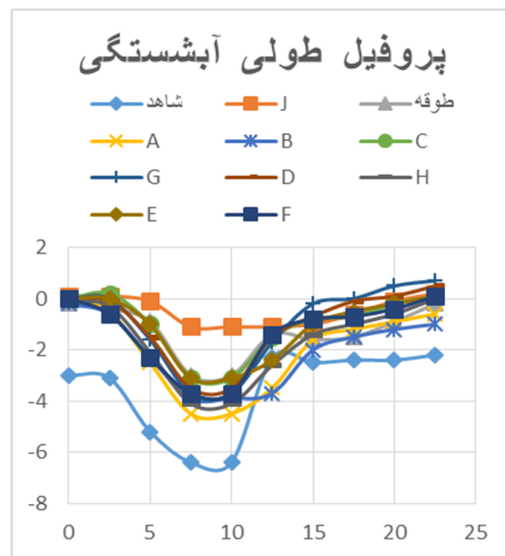


شکل ۹ - پستی و بلندی گودال آبشستگی برای طوقه‌های I, J.

ی استوانه‌ای و مخروطی شکل بودند به دلیل ایجاد تنگ-شدگی در مقطع جریان اثرات کم‌تری را نسبت به طوقه‌ی ساده در کاهش عمق آبشستگی در سراب پایه پل داشتند، ولی با مقایسه‌ی پستی و بلندی بستر آن‌ها، می‌توان مشاهده کرد که در تمامی روکش‌ها، به غیر از روکش B، بستر در پشت پایه (پایاب) نسبت به طوقه‌ی ساده دچار آبشستگی کم‌تری شده، و اثر آن‌ها در این ناحیه بیش از یک طوقه ساده بوده است. با مقایسه‌ی فشانه جریان ناشی از شکاف در این موانع می‌توان دریافت که در روکش‌های مخروطی، با کاهش ارتفاع روکش عملکرد آن در کاهش آبشستگی بهبود می‌یابد، اما در روکش‌های استوانه‌ای، با افزایش ارتفاع روکش، به نظر می‌رسد به دلیل این‌که ارتفاع روی شکاف بیش‌تر شده، سرعت فشانه خروجی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، این نیرو در مقابل نیروی رو به پایین شیب سرعت و گردابه‌های پشت پایه، مقاومت بیش‌تری را داشته، لذا بهتر است تا از فشانه‌های با کارایی بیش‌تر استفاده کرد. اما دسته‌ی دوم که طوقه‌های دنداندار بودند، به‌صورت چشمگیری اثرهای طوقه را در کاهش عمق آبشستگی بهینه ساختند، که پستی و بلندی گودال آبشستگی آن‌ها در مقایسه با طوقه‌ی ساده شباهت‌هایی دارد، اما ابعاد آن کاهش یافته است.



شکل ۸ - عملکرد طوقه دنداندار.



شکل ۱۰ - پروفیل طولی آبشستگی روکش‌ها و طوقه.

وجود شکاف و مارپیچ و دندان باعث به‌وجود آمدن یک فشانه مستغرق می‌شود که در مقابل آبشستگی مقاومت می‌کنند. مارپیچ مانند یک طناب سیمی به‌وجود آورنده‌ی زبری عمل نموده، و نقش مستهلک‌کننده‌ی جریان را ایفا می‌کند. شیب بدنه‌ی روکش‌های مخروطی نیز نقش مستهلک‌کنندگی جریان را داشت. تأثیر ترکیب طوقه و شکاف و مارپیچ در شکل (۸) نشان داده شده است. پستی و بلندی گودال آبشستگی این طوقه‌ها در شکل (۹) آمده است و نتایج کلی نیز در جدول (۲) قابل مشاهده است.

با مشاهده شکل‌های پستی و بلندی بستر (شکل‌های ۷ و ۹) و با توجه به شکل پروفیل طولی آبشستگی روکش‌ها و طوقه ساده که در شکل (۱۰) آورده شده، می‌توان کارایی روکش‌های A تا H (شکل مخروطی و استوانه‌ای) را نسبت به طوقه‌ی K سنجید (طوقه‌ی ساده) و نیز طوقه‌های I و J را نیز با طوقه‌ی ساده مقایسه کرد و آن‌ها را به دو دسته کلی تقسیم نمود. دسته‌ی اول، که روکش‌ها

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، جهت کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ی پل و با تلفیق نظریه‌ی ایجاد شکاف در پایه پل، استفاده از طناب سیمی و طوقه، بدون ایجاد شکاف در پایه‌ی پل، طوقه‌های دنداندار و روکش‌های مارپیچی و شکافدار در دو شکل استوانه و مخروط ناقص مورد آزمایش قرار گرفتند، نتایج نشان دادند که:

- در روکش‌های مخروطی، با کاهش ارتفاع روکش، عملکرد آن در کاهش آبشستگی بهبود می‌یابد.
- در روکش‌های استوانه‌ای، با افزایش ارتفاع استوانه، عملکرد آن در کاهش آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین، از مقایسه‌ی موانع مخروطی و استوانه‌ای در می‌یابیم که عملکرد موانع مخروطی بهتر بوده است.
- مقایسه‌ی روکش‌های E و F نشان می‌دهد که یک فشانه‌ی خروجی در پایاب، عملکرد بهتری را نسبت به دو فشانه کناری دارد؛ لذا، بهتر است که فشانه‌ی خروجی موازی با جریان ایجاد شود تا بیش‌ترین تأثیر را از آن شاهد باشیم.
- در مجموع، روکش‌های کم ارتفاع مارپیچ و شکافدار C, E بیش‌ترین کارایی را داشته‌اند و توانسته‌اند آبشستگی را تا ۵۱/۵۶ درصد کاهش دهند.
- مقایسه‌ی کلیه‌ی روکش‌های مخروطی و استوانه‌ای با طوقه‌ی ساده نشان دهنده این است که ایجاد تنگ‌شدگی در مقطع جریان اثرات مخرب بیش‌تری را دارد، و یک طوقه‌ی ساده می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به آن‌ها داشته باشد.
- در آزمایش‌های فوق، ایجاد دندان باعث افزایش عملکرد طوقه شده است؛ و نیم‌طوقه‌ی دنداندار توانسته است که به مقدار ۸۲/۸۱٪ آبشستگی پایه را نسبت به حالت بدون حفاظ کاهش داده، و همچنین عملکردی بیش از ۱/۵ برابر در عملکرد طوقه‌ی ساده به‌وجود بیاورد.

## منابع

- 1) Abbas chenari, S. and Maleki, H. 2012, Numerical study of the effect of slitted and non-split bridge foundation on the shear stress and flow rate distribution, 11th Iranian Hydraulic Conference, Urmia University. (In Persian)
- 2) Aghli, M. and Zomorodian, S.M.A. 2013, Effect of cable and collar on scouring depth around cylindrical bridge pier in meandering river. Journal of Irrigation Science and Engineering of Shahid Chamran University of Ahwaz. 36(3):31-40. (In Persian)
- 3) Chiew, Y. M. 1992, Scour protection at bridge piers. J. Hyd. Eng. ASCE. 118(11): 1260-1269.
- 4) Ettem, R. 1980. Scour at bridge piers, Report No.216, University of Auckland, School Of Engineering, New Zealand.
- 5) Hazrati, F., Hoseinpour, N., and Hoseinzadeh Dalir, A. 2016. Investigating the effect of semi-circular collar with rectangular sequence on reducing scouring of cylindrical pylons. 10th International Conference on River Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz. (In Persian)
- 6) Heidarpour, M. 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot. Proc. River Flow 2002, Louvain-la-Neuve, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 2: 1069–1072.
- 7) Hua, L., Roger, A., Kuhnle, B., and Barkdoll, D. 2006, Countermeasures against scour at abutment Report No. 49 Oxford, Mississippi.
- 8) Jalili, A. 2013. Laboratory study of the effect of simple lattice and simple crown on cubical bridge base scouring, 12th Iranian Hydraulic Conference, Tehran University of Agriculture and Natural Resources Campus. (In Persian)
- 9) Khodabakhshi, A., Sanei, M. and Abde kolahchi, A. 2012, Laboratory study of the effect of slope height on the surface of the river bed on the local scouring of the bridge foundation, 11th Iranian Hydraulic Conference, Urmia University. (In Persian)
- 10) Khozaymehzhad, H., Ghomeshi, M. and Shafaeibajestan, M. 2014, Comparison of symmetrical and unsymmetrical rectangular collars on reduction of local scour at bridge abutment. 37(2):1-12. (In Persian)
- 11) Kianpour, E. and Abbasi, S. 2016, Investigating the effect of slit on reducing scouring around bridges with FLOW-3D. 10th International Conference on River Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz. (In Persian)
- 12) Melville BW, 1997. Pier and abutment scour-an integrated approach. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 123(2): 125-136.
- 13) 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.
- 14) Raudkivi, A.J., and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. Hyd. Eng., ASCE 109(3):338-350.
- 15) Rostami, M. 2016. Numerical simulation of the effect of collar performance on the local scouring of bridges. 10th International Conference on River Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz. (In Persian)
- 16) Sani khani, H., Hoseinzadeh Dalir, A. and Farsadzadeh, D. 2008, Effect of square strips in reducing scouring around the Pillars, 4th National

Congress on Civil Engineering, University of Tehran. (In Persian)

17) Shafaei bajestan, M. 2008, Theoretical and practical bases for hydraulic sediment transport. First Printing, pp. 478-479, Shahid Chamran University Press, Ahwaz. (In Persian)

18) Tafarajnoruz A., Gaudio R., Grimaldi C., and Calomino, F. 2010, required conditions to achieve the maximum local scour depth at a circular pier, Int Conf of Hyd -2-9

19) Tafarajnoruz A, Roberto G. and Francesco C. 2012. Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour-American Society of Civil Engineers. USA 3-7

