

کاربرد پره‌های مستغرق در کاهش آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل با دماغه گرد

صمد امامقلی‌زاده و ابراهیم نوحانی**

* نگارنده مسئول: استادیار گروه عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران. تلفن:

۰۶۱)۴۲۴۲۰۶۰۱، پیام‌نگار: nohani_e@yahoo.com

** به‌ترتیب: دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود؛ و استادیار گروه عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه

آزاد اسلامی واحد دزفول

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۹

چکیده

اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا در بررسی آمار شکست پل‌ها به این نتیجه رسیده است که دلیل اصلی شکست آنها آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌های جانبی، در مقایسه با آبشستگی پایه‌های پل، است. روش‌هایی مختلف برای کاهش آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های جانبی پل پیشنهاد شده که یکی از آنها استفاده از پره‌های مستغرق است. در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد استقرار پره‌های مستغرق در کاهش آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل با دماغه گرد به صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم با مقطع مرکب و با استفاده از رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط ۱ میلی‌متر و در دو مرحله اجرا شدند: بدون حضور پره‌های مستغرق و با حضور پره‌های مستغرق. پره‌ها با طول ۱۰ و ارتفاع ۳/۳۳ سانتی‌متر ($L/H=3$)، در پنج نوع آرایش دو ردیفه و با زاویه ۲۰ درجه نسبت به جریان در جلو تکیه‌گاه پل مستقر شدند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عملکرد پره‌های مستغرق در کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه قابل توجه و موجب حرکت حفرة آبشستگی و دور کردن آن از دماغه تکیه‌گاه به سمت مرکز کانال شده است. همچنین، استفاده از پره‌های مستغرق با پنج نوع آرایش مختلف نشان می‌دهد که به‌طور متوسط این سازه می‌تواند ۶۰/۱ درصد عمق آبشستگی را در اطراف تکیه‌گاه پل کاهش دهد. نتایج به‌دست آمده همچنین نشان می‌دهد که بهترین عملکرد را آرایش دو ردیفه موازی دارد که در آن پره‌های ردیف اول با فاصله ۵ سانتی‌متر و ردیف دوم با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از تکیه‌گاه قرار می‌گیرند و موجب کاهش ۷۱/۷۴ درصد از حداکثر عمق آبشستگی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

آبشستگی موضعی، پره مستغرق، تکیه‌گاه پل، کانال مرکب

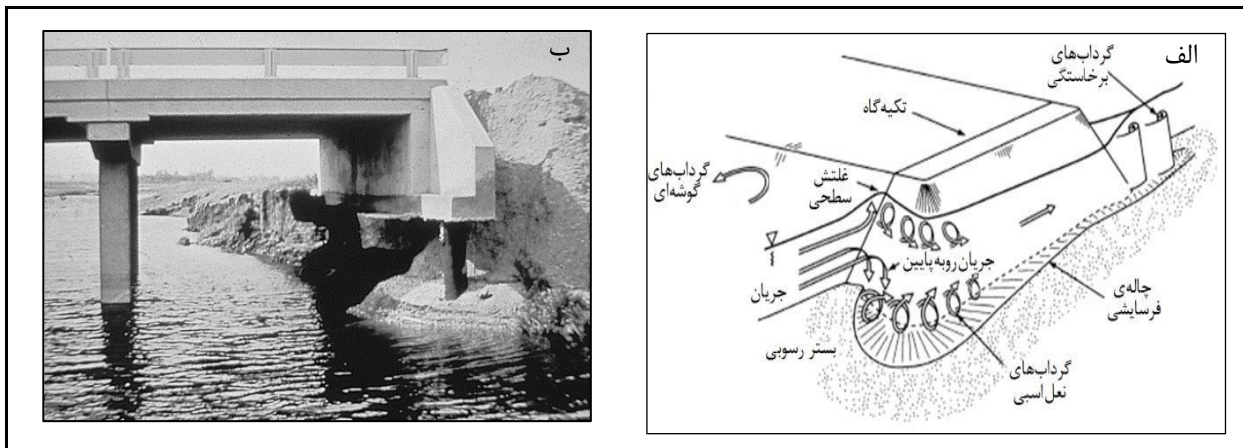
مقدمه

رودخانه است. آبشستگی به فرسایش خاک در اطراف پایه‌های پل و تکیه‌گاه‌های پل با آب اطلاق می‌شود (Shojaei et al., 2011; Emamgholizadeh, 2015). رادکیوی و اتما (Raudkivi & Ettema, 1983) می‌گویند زمانی که برآیند نیروهای وارد به ذرات از نیروی مقاوم بیشتر شد، ذرات شروع به حرکت می‌کنند. این حرکت ذرات، اول در سطح و با گذشت زمان در عمق نیز مشاهده می‌شود.

پل‌هایی که روی رودخانه‌ها و کانال‌ها ساخته می‌شوند یکی از مسائل چالش برانگیز هیدرولیکی هستند. پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل موجب انقباض جریان می‌شوند که افزایش افت انرژی ناشی از تنگ‌شدگی خطوط جریان را در بالادست و بازشدگی خطوط جریان را در پایین دست پل به دنبال دارد. مسئله مهم در مهندسی هیدرولیک پل‌ها آبشستگی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های جانبی پل در عرض

بستر از اطراف پایه ستون حذف شوند و یک گودال موضعی در اطراف پایه‌ها ایجاد شود. قدرت گرداب نعل اسبی با افزایش عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. برای آبشستگی بستر زنده، تعادل وقتی ایجاد می‌شود که مقدار مواد بستر از بالادست رودخانه با مقدار مواد بستر رودخانه انتقال یافته برابر باشد. برای آبشستگی آب زلال تعادل وقتی ایجاد می‌شود که تنش برشی ایجاد شده بر اثر گرداب برابر با تنش برشی بحرانی شود. محققانی مانند چانگ (Chang, 1973)، بریس و بلودگت (Brice & Blodgett, 1978)، و دیویس (Davis, 1984) می‌گویند یکی از علل اصلی شکست پل‌ها آبشستگی مواد بستر اطراف فونداسیون آنها به‌هنگام سیلابی بودن رودخانه است.

بر اساس مطالعات بروزرس و همکاران (Breusers et al., 1977)، رادکیوی (Raudkivi, 1983) و آکان (Akan, 2011) آبشستگی موضعی پایه‌های پل در اثر تشکیل گرداب‌های نعل اسبی^۱ در اطراف پایه‌های ستون به‌وجود می‌آید. انسداد جریان بر اثر پایه‌ها موجب ساکن شدن جریان^۲ در جلو آن می‌شود. یک گرادیان هیدرولیکی رو به پایین در جلو پایه‌ها توسعه می‌یابد که باعث می‌شود جریان رو به پایین به سمت بستر رودخانه هدایت شود (شکل ۱). همچنین، جریان جدا شده عبوری از روی جسم یک گرداب چرخشی شکل^۳ در منطقه جدایی ایجاد می‌کند و با جریان رو به پایین ترکیب و موجب ایجاد گرداب نعل اسبی در اطراف پایه ستون می‌شود. این سیستم گرداب‌ها موجب خواهد شد تا مواد



شکل ۱- الف) جریان رو به پایین، گرداب‌های نوع نعل اسبی، و گرداب‌های برخاستگی در اطراف تکیه‌گاه و ب) آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل

پل به‌روش‌هایی مختلف اشاره می‌کنند. بیشتر این روش‌ها شامل تغییر الگوی جریان و افزایش مقاومت ذرات بستر است. در روش‌های تغییر الگوی جریان سعی بر این است که قدرت جریان پایین رونده و گرداب نعل اسبی که علت اصلی آبشستگی در پایه و تکیه‌گاه‌های پل است، کاهش یابد. در روش‌های مقاوم سازی ذرات، با مسلح کردن بستر مانند استفاده از سنگچین، قطعات بتنی

مطالعات ملویل و کولمن (Melville & Coleman, 2000) در ایالات متحده نشان می‌دهد که ۲۵ درصد تخریب پل‌ها به پایه و ۷۲ درصد دیگر به تکیه‌گاه پل ارتباط دارد. در نیوزیلند نیز ۷۰ درصد تخریب پل‌ها مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل شناخته شده است. شریعتی و خداشناس (Shariati & Khodashenas, 2015) برای کنترل و کاهش آبشستگی در پایه و تکیه‌گاه‌های

1- Horseshoe Vortices
3- Wake Vortices

2- Stagnation

روش قدیمی پانل‌های عمقی است برای اولین بار ادگارد و کندی (Odgaard, & Kennedy, 1983) برای جلوگیری از فرسایش ساحل قوس خارجی رودخانه طراحی کردند تا جریان ثانویه حاصل از نیروی گریز از مرکز را دفع کنند که عامل اصلی تخریب ساحل آن است.

جانسون و همکاران (Johnson *et al.*, 2001) استفاده از پره‌های مستغرق را در کاهش آبشستگی برای تکیه‌گاه پل با دیواره قائم بررسی کردند. این محققان پره‌های سنگی^۲ با آرایش یک ردیفه را بررسی کردند که در بالادست تکیه‌گاه پل قرار داده شده بود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از پره‌ها موجب کاهش ۹۶/۵ درصد آبشستگی‌ها در اطراف تکیه‌گاه شده است. قربانی و کلز (Ghorbani & Kells, 2008) با آزمایش‌هایی روی پره منفرد و دوگانه در زاویه‌های حمله متفاوت نسبت به پایه پل، ارتفاعات متفاوت پره و شرایط مختلف جریان، کاهش ۱۷ و ۸۳ درصد آبشستگی را به ترتیب برای پره منفرد و پره دوگانه گزارش کرده‌اند. صمیمی بهبهان و همکاران (Samimiy-Behbahan *et al.*, 2006) نیز اثر شکل‌های متفاوت پره‌ها روی آبشستگی پل‌ها و عملکرد پره‌های مستغرق را در کاهش آبشستگی پایه پل که نیمه اول و نیمه دوم آنها به ترتیب زاویه ۱۰ و ۳۰ درجه نسبت به جریان آب می‌سازد بررسی کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از پره‌های مستغرق با آرایش مختلف در حالت چسبیده به پایه بهترین عملکرد را دارد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون در زمینه مقایسه تأثیر آرایش‌های مختلف پره‌های مستغرق به صورت دو ردیفه در آرایش‌های مختلف به منظور کاهش آبشستگی تکیه‌گاه پل با دماغه نیم دایره در مقطع مرکب تحقیق نشده است. در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی عملکرد پره‌های مستغرق در آرایش مختلف دو ردیفه در کاهش آبشستگی پرداخته شده است.

پیش ساخته، کیسه‌های پر شده از دوغاب سیمان، لایه محافظتی بتنی، و گابیون‌های توری سنگی با ایجاد یک مانع فیزیکی مقاومت ذرات بستر را افزایش می‌دهند تا بستر به آسانی بر اثر جریان آب شسته نشود و فرسایش نیابد. بررسی منابع نشان می‌دهد که در خصوص استفاده از این روش‌ها تحقیقاتی شده است که برای مثال می‌توان به استفاده از سنگ‌چین حفاظتی (Zarrati *et al.*, 2010) و (Chiew, 2004)، وجود آبشکن در بالادست سازه (Dehghani *et al.*, 2013)، صفحه مستغرق متصل به تکیه‌گاه پل یا طوقه (Heidarpour *et al.*, 2010;) (Aleml *et al.*, 2012; Khademi *et al.*, 2014) و پره‌های مستغرق (Johnson *et al.*, 2001) اشاره کرد.

یکی از روش‌های کنترل رسوب و آبشستگی با قابلیت بالا، استفاده از پره‌های مستغرق است که هنوز به طور کامل بررسی نشده است. پره‌های مستغرق پره‌هایی کوچک هستند که برای اصلاح الگوی جریان نزدیک بستر و انتقال رسوب در جهت عرضی کانال طراحی می‌شوند. یکی از کاربردهای پره‌های مستغرق، کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل و تکیه‌گاه پل است. شجاعی و همکاران (Shojaei *et al.*, 2011) می‌گویند عملکرد پره‌های مستغرق برای کاهش آبشستگی پایه پل و حرکت رسوب از اطراف پره‌ها به علت ایجاد جریان رو به پایین در جلو آنها تحت تأثیر نحوه قرارگیری پره‌هاست. پره‌های مستغرق اولین بار در اوایل سال ۱۹۳۰ در هند و پاکستان به نام پره‌های کینگ^۱ به کار گرفته شدند. محققان در سال ۱۹۷۵ به بررسی عملکرد پره‌های مستغرق و غیر مستغرق پرداختند.

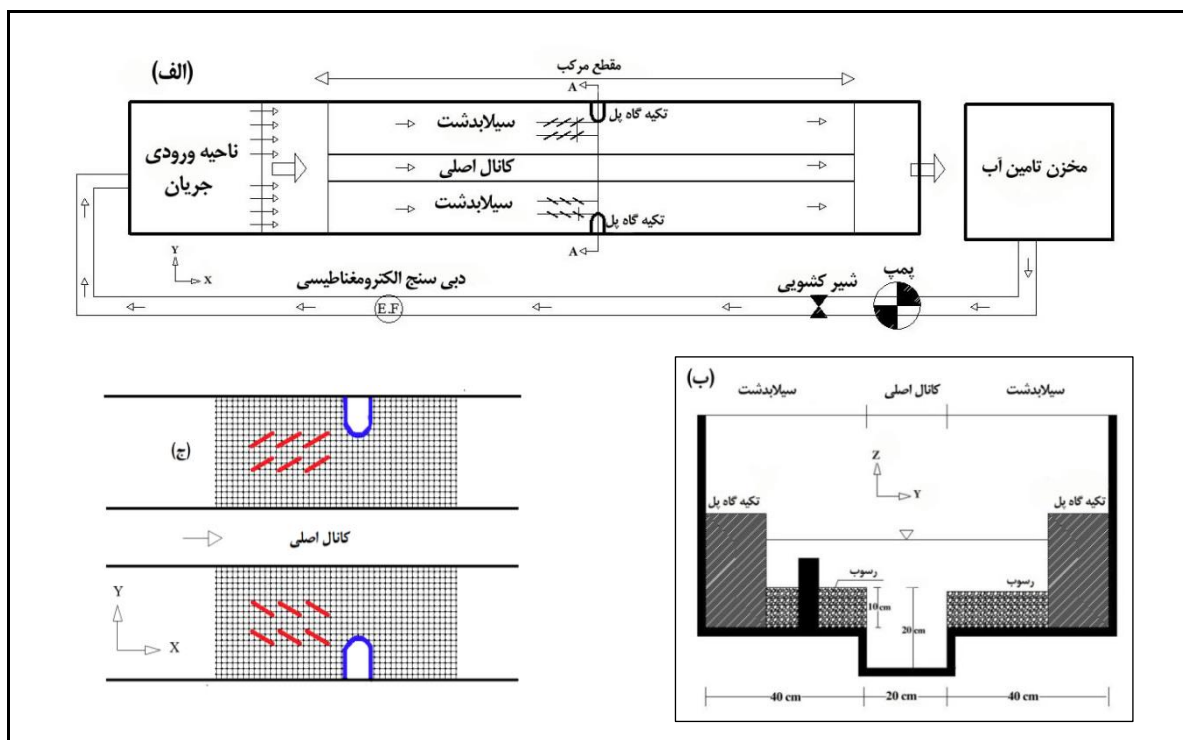
نتایج آزمایش‌های لاوچلان (Lauchlan, 1999) نشان می‌دهد که استفاده از پره‌های مستغرق در مقایسه با پره‌های غیر مستغرق در کاهش آبشستگی مؤثرتر است. تکنیک استفاده از پره مستغرق را که طرح توسعه یافته

مواد و روش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی شاهرود در سال ۱۳۹۴ طراحی و ساخته شد. دیواره‌های فلوم از جنس شیشه انتخاب شد تا امکان مشاهده بهتر جریان را فراهم آورد. برای ساخت کف کانال نیز از ورق فلزی به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. به منظور آرام کردن جریان ورودی به کانال، یک صفحه مشبک فلزی در فاصله یک متری از ابتدای فلوم به صورت عمودی نصب گردید. آب موجود در استخر با یک لوله ۵ اینچی و با استفاده از یک دستگاه پمپ سانتریفیوژ با الکتروموتوری به قدرت ۲۰ کیلووات به مخزن بالادست فلوم آزمایشگاهی منتقل شد.

برای قرائت دبی، یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیسی مدل PMAG ساخت شرکت

اس‌جی‌ام لکترا^۱ ایتالیا، روی لوله رانش نصب شد (شکل ۲). طول مقطع مرکب ۵ متر است که در فاصله ۴ تا ۹ متری از ابتدای کانال نصب گردیده است. کانال اصلی مقطع مرکب از جنس شیشه و به عرض ۲۰ سانتی‌متر و قسمت کناره آن دارای عرض ۴۰ سانتی‌متر است. تکیه‌گاه به کار رفته در آزمایش‌ها از جنس ورق گالوانیزه به شکل دماغه نیم‌دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده است. طول تکیه‌گاه ۱۰ و فاصله کف کانال اصلی تا بالای دیواره آن ۲۰ سانتی‌متر است (شکل ۲). دو طرف کانال اصلی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از رسوبات غیرچسبنده یکنواخت با قطر متوسط $D_{50} = 1 \text{ mm}$ ، چگالی $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ و با ضریب یکنواختی $\sigma_g = \sqrt{D_{85}/D_{15}} = 1.27$ پوشیده شد. در صورتی که ضریب یکنواختی رسوبات از ۱/۳ کوچک‌تر باشد می‌توان رسوبات را یکنواخت در نظر گرفت (Shafaie-Bejestan, 2008).



شکل ۲- اجزای مختلف مدل آزمایشگاهی

(الف) پلان، (ب) مقطع عرضی کانال و (ج) نحوه برداشت نقاط بستر کانال با ارتفاع سنج نقطه‌ای

نحوه اجرای آزمایش‌ها

پیش از شروع هر آزمایش رسوبات در قسمت سیلابدشت ریخته و سطح آن پهن و تسطیح می‌شد. پس از آن، پمپ روشن و شیر فلکه به اندازه‌ای باز نگه داشته می‌شد که آب با دبی کم وارد کانال شود و سطح آب تا اندازه‌ای بالا آید که از حرکت رسوبات قبل از تنظیم دبی جلوگیری گردد. بعد از آنکه با شیرفلکه دبی مورد نظر تنظیم شد، با پایین آوردن دریچه پایین دست و با رسیدن ذرات به آستانه حرکت، پایین آوردن دریچه متوقف و بدین گونه ارتفاع دریچه تنظیم می‌شد. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و شرایط ثابت هیدرولیکی اجرا شده است. انتخاب شرایط آب زلال به این دلیل است که اصولاً حداکثر عمق آبخستگی در شرایط آب زلال بیشتر از شرایط بستر متحرک خواهد بود. از این رو در جهت ضریب اطمینان و به دلیل سهولت بیشتر، اکثر مطالعات آزمایشگاهی در خصوص آبخستگی در شرایط آب زلال دنبال می‌شوند (Richardson & Davis, 2001).

بررسی منابع نشان می‌دهد که در ارتباط با عمق تعادل آبخستگی تعریف‌هایی متفاوت ارائه شده است. برای مثال، ملویل و چيو (Melville & Chiew, 1999) می‌گویند زمانی که عمق آبخستگی بیشتر از ۵ درصد قطر پایه پل در ۲۴ ساعت تغییر نکند، تعادل آبخستگی حاصل آمده است. میا و ناگو (Mia & Nago, 2003) اظهار داشته‌اند زمانی که در یک ساعت عمق آبخستگی بیشتر از ۱ میلی‌متر تغییر نکند آزمایش‌ها باید متوقف شود. کومار و همکاران (Kummar *et al.*, 1999) گفته‌اند اگر عمق آبخستگی طی ۳ ساعت بیشتر از ۱ میلی‌متر تغییر نکند آزمایش‌ها باید متوقف شود.

در این تحقیق قبل از آغاز آزمایش‌های اصلی، یک آزمایش به مدت ۱۲ ساعت اجرا و با اندازه‌گیری عمق آبخستگی نشان داده شد که با گذشت ۱۲۰ دقیقه، آبخستگی به ۸۵ درصد حداکثر عمق آبخستگی می‌رسد.

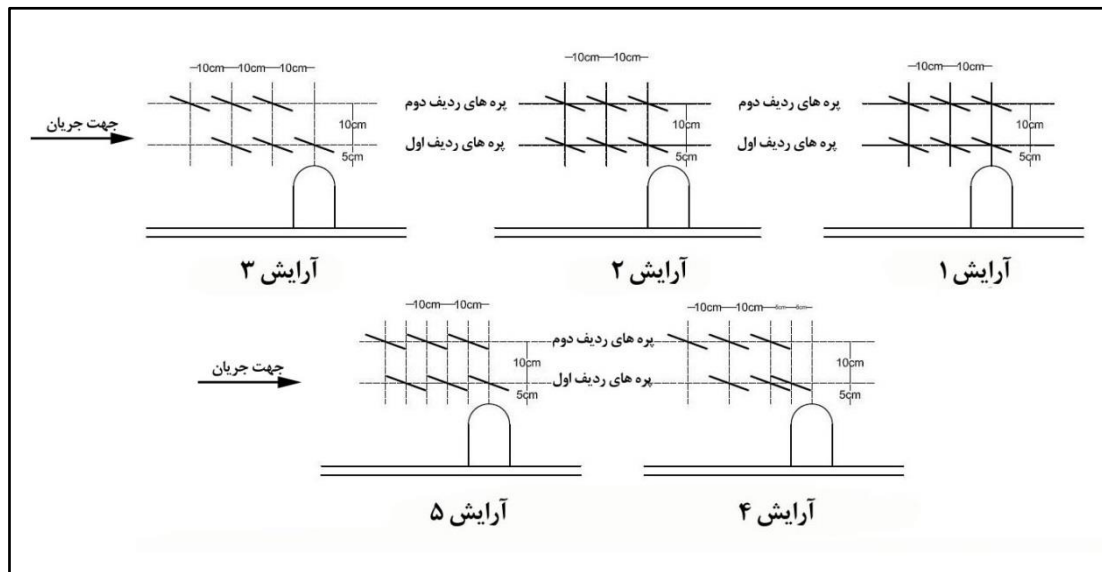
بنابراین، برای سهولت در انجام دادن آزمایش‌ها زمان اجرای آنها ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از گذشت این مدت‌زمان، پمپ خاموش و آب کانال به‌طور کامل تخلیه شد و با زهکشی کامل در پایان هر آزمایش، با استفاده از دستگاه ارتفاع‌سنج نقطه‌ای^۱، نقاط در اطراف بالادست، و پایین دست تکیه‌گاه برداشت شد. همچنین، در ادامه آزمایش‌ها به منظور بررسی تأثیر استفاده از پره‌های مستغرق در کاهش آبخستگی آرایش‌های مختلفی از پره‌های مستغرق به کار گرفته شد.

به منظور بررسی تأثیر پره‌های مستغرق بر کاهش آبخستگی اطراف تکیه‌گاه پل، در حالت کلی از پنج نوع آرایش استفاده گردید. پره‌های مورد استفاده نفوذناپذیرند و از جنس شیشه با ضخامت ۳ میلی‌متر به ارتفاع ۳/۳ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. مطابق نتایج بررسی‌های ادگار و وانگ (Odgaard & Wang, 1991)، حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2011) و شجاعی و همکاران (Shojaei *et al.*, 2011)، نسبت طول به ارتفاع پره (L/H) برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. پره‌های مستغرق به دو صورت دو ردیفه موازی و زیگزاکمی به کار رفتند. برابر اظهارات روسگن (Rosgen, 1996)، ادگار و وانگ (Odgaard & Wang, 1991) و جانسون و همکاران (Johnson *et al.*, 2001)، زاویه ۲۰ درجه نسبت به جریان برای پره‌ها انتخاب شد. آرایش دو ردیفه را سایر محققان مانند شجاعی و همکاران (Shojaei *et al.*, 2011) و قربانی و کلس (Ghorbani & Kells, 2008) مورد تأکید قرار داده‌اند. آزمایش‌ها با تغییر آرایش پره‌ها به صورت شکل ۳ اجرا شد.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است در آرایش ۱، پره‌ها در دو ردیف با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر در جلوی تکیه‌گاه پل قرار داده شدند. همچنین در هر ردیف ۳ پره، که فاصله بین پره‌ها برابر با ۱۰ سانتی‌متر

چهارم نسبت به آرایش سوم، پره‌های ردیف دوم ثابت باقی ماندند ولی در ردیف اول، فقط پره اول به اندازه ۵ سانتی-متر به سمت بالادست جابه‌جا شد. در نهایت در آرایش نوع ۵ نسبت به آرایش اول، پره‌های ردیف دوم به اندازه ۵ سانتی‌متر به سمت بالادست جابه‌جا شدند.

می‌باشد، استفاده شد. در آرایش دوم نسبت به آرایش اول، همه پره‌ها به اندازه ۵ سانتی‌متر به سمت بالادست جابه‌جا شدند. در آرایش سوم نسبت به آرایش اول، پره‌های ردیف اول ثابت باقی ماندند ولی پره‌های ردیف دوم به اندازه ۱۰ سانتی‌متر به سمت بالادست جابه‌جا شدند. در آرایش



شکل ۳- آرایش‌های مختلف پره‌های مستغرق

این مشاهدات و شکل کلی حفره آبستگي در اطراف تکیه‌گاه با نتایج تحقیقات سایر محققان مانند حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2011) و شجاعی و همکاران (Shojaei et al., 2011)، رادکیوی (Raudkivi, 1998) و جانسون و همکاران (Johnson et al., 2001) همخوانی دارد که می‌گویند همزمان با جابه‌جایی رسوبات در منطقه جلو پایه، در بخش انتهایی پایه نیز گرداب‌های برخاستگی شروع به فعالیت می‌کنند که سبب کنده شدن رسوبات از این قسمت و جابه‌جایی آنها به سمت پایین دست می‌شود. همچنین، درباره الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری و توسعه آن نشان داده شده است که با گذشت زمان ناحیه شسته شده در قسمت جلو پایه توسعه می‌یابد و شکل یک نیم‌دایره به خود می‌گیرد. رسوبات جابه‌جا شده از این منطقه به طرف پایین دست در جهت طولی حرکت

نتایج و بحث

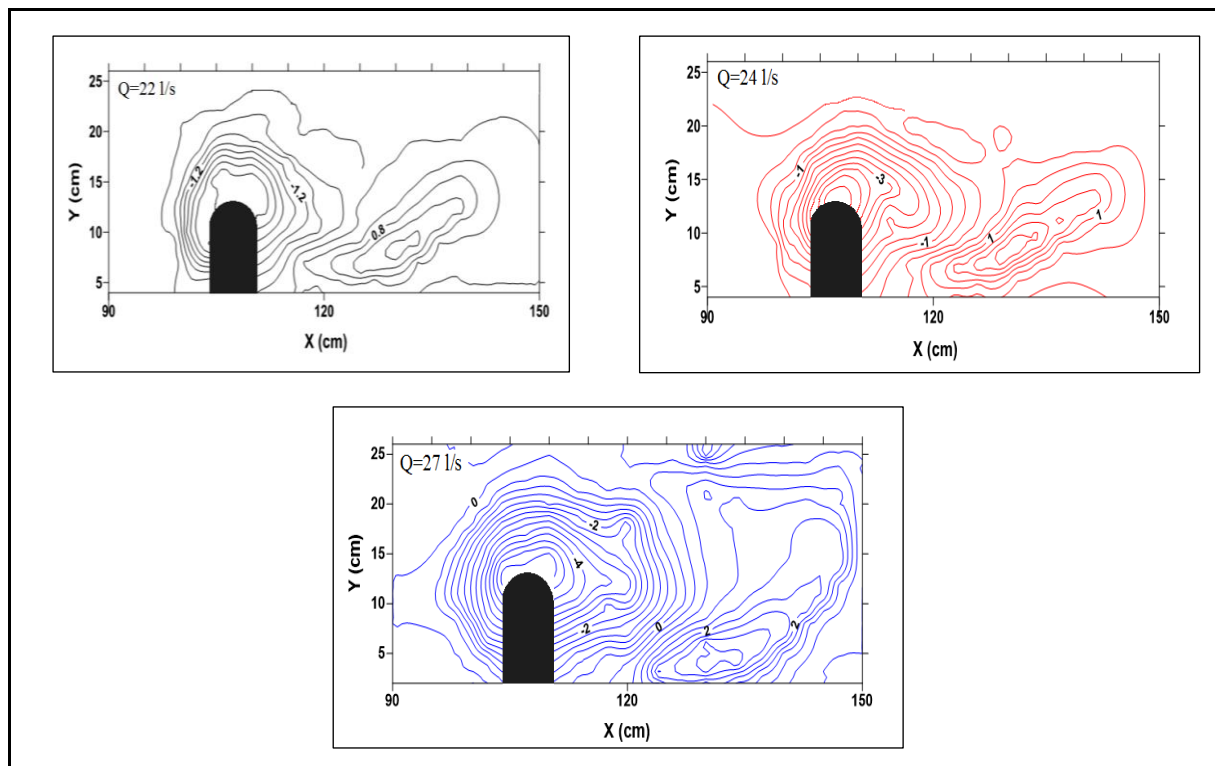
مشاهدات

در این پژوهش آزمایش‌ها به دو صورت اجرا شد: بدون حضور پره‌های مستغرق (آزمایش شاهد) و با حضور پره‌های مستغرق به صورت آرایش دو ردیفه. مشاهدات نشان می‌دهد که در سه دبی مورد آزمایش (۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه)، در اثر برخورد جریان آب به تکیه‌گاه پل و تشکیل گرداب، رسوبات در اطراف سازه حرکت کرده‌اند و حفره آبستگي در اطراف آن تشکیل شده است و با دور شدن از تکیه‌گاه به سمت پایین دست، رسوبات فرسایش یافته به پایین دست منتقل و به صورت تپه‌ای در پشت آن انباشته شده‌اند. همچنین مشاهده شد که عمق آبستگي در فاصله‌ای کم از تکیه‌گاه به حداکثر مقدار خود رسیده و با دور شدن از تکیه‌گاه مقدار آن کاهش یافته است.

کاربرد پره‌های مستغرق در کاهش آبخستگی...

پیدا کرده است. در شکل ۴ رقوم مثبت بیانگر تجمع رسوبات (تپه) و رقوم منفی (حفره) بیانگر آبخستگی ایجاد شده است. ادامه این فرآیند منجر به افزایش ارتفاع رسوبات در طرفین پایه و بخش پشت پایه می‌شود و سبب خواهد شد تا سطح رسوبات بالاتر از تراز بستر قرار گیرد.

می‌کنند، در آنجا جمع می‌شوند، و تپه‌ای کوچک را در این منطقه تشکیل می‌دهند (شکل ۴). در این شکل به روشنی مشخص است که رسوبات در اطراف تکیه‌گاه شسته شده‌اند و یک حفره آبخستگی در اطراف تکیه‌گاه تشکیل شده است، ولی در پایین دست آن رسوبات تجمع

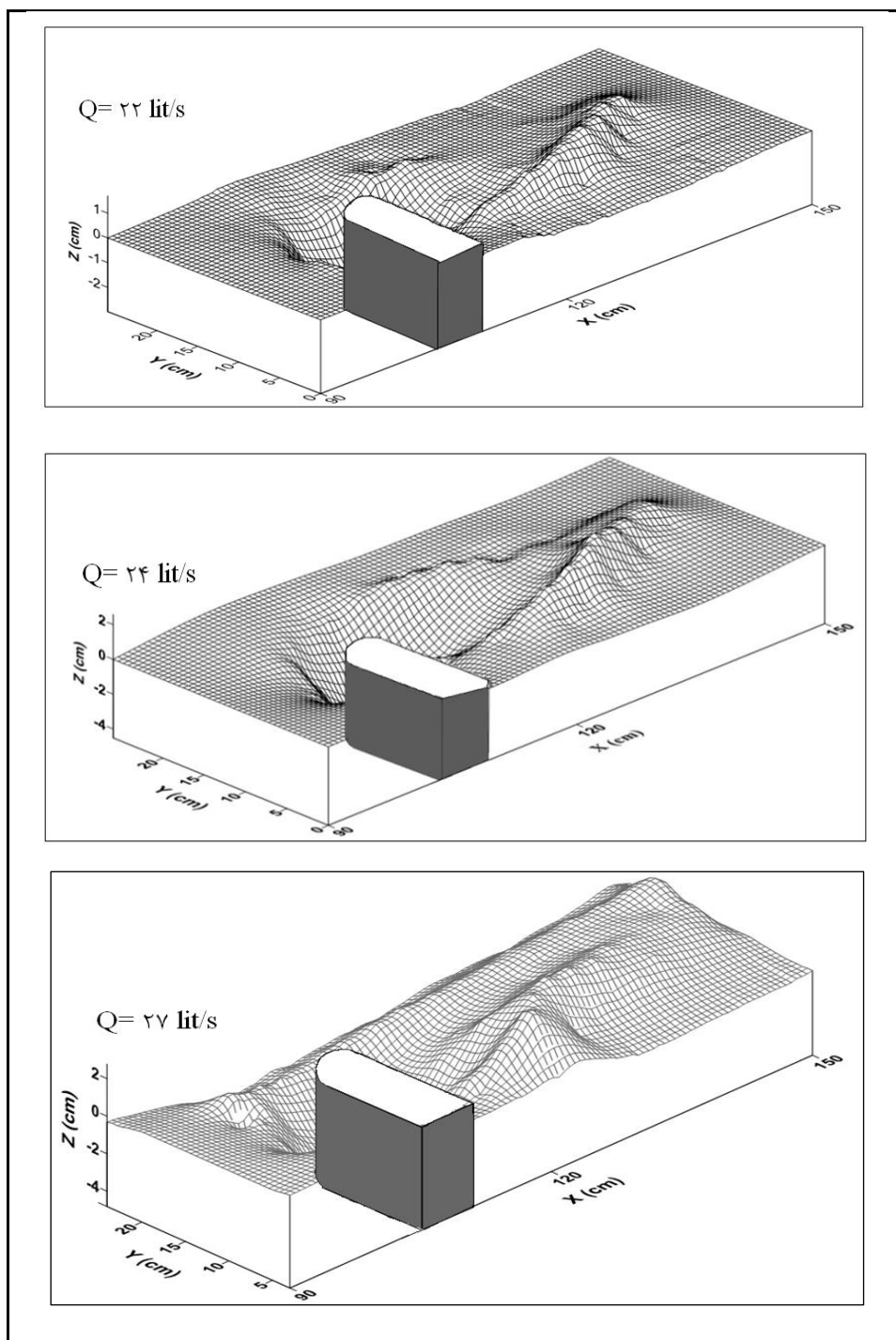


شکل ۴- توپوگرافی بستر رسوبات بعد از اجرای آزمایش‌های شاهد با دبی ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه

این تفاوت که عمق آبخستگی در دبی بالاتر، افزایش یافته است (شکل ۴). به عبارت دیگر، همان‌طور که انتظار می‌رفت افزایش دبی جریان (افزایش عدد فرود جریان) باعث افزایش قدرت جریان و موجب افزایش عمق آبخستگی شده است به طوری که تغییر دبی از ۲۲ به ۲۴ لیتر بر ثانیه (۹/۱ درصد افزایش) و تغییر دبی از ۲۴ به ۲۷ لیتر بر ثانیه (۱۲/۵ درصد افزایش) به ترتیب موجب افزایش ۴۲/۷ و ۶۴ درصدی عمق آبخستگی شده است. شکل ۵ نمای سه‌بعدی از حفره آبخستگی و همچنین رسوبات تجمع‌یافته در پایین دست تکیه‌گاه را در دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.

آزمایش‌های شاهد

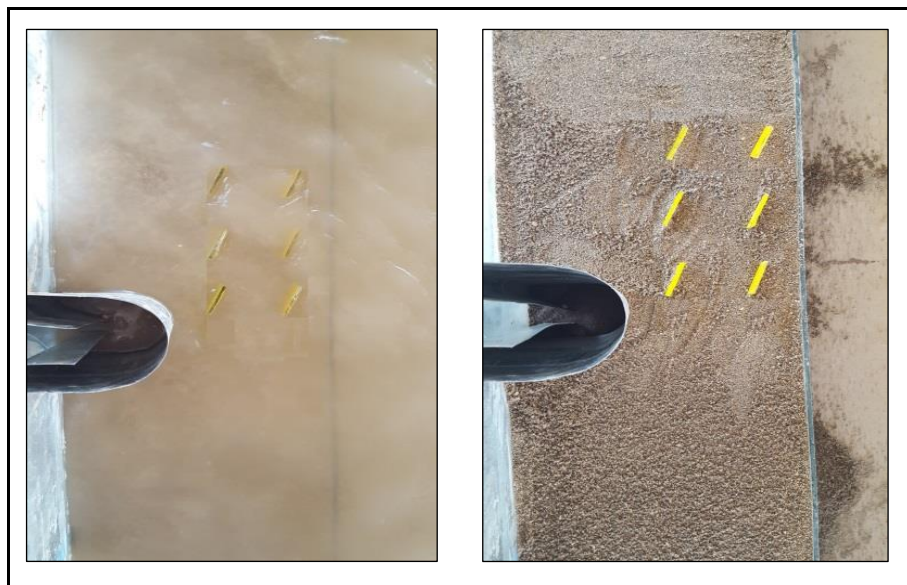
پیشتر گفته شد که عواملی چند در ایجاد آبخستگی در اطراف تکیه‌گاه پل تأثیر دارند که از آن جمله تأثیر هیدرولیک جریان است. خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با سه دبی ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه در جدول ۱ آمده است. در این جدول دیده می‌شود که حداکثر عمق آبخستگی برای سه دبی ۲۲، ۲۴، ۲۷ لیتر بر ثانیه برای آزمایش شاهد به ترتیب ۳، ۴/۵ و ۶/۲ و عدد فرود برای سه دبی مذکور ۰/۳۱، ۰/۳۵ و ۰/۳۸ است. همچنین، الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری و توسعه آنها، که به تفصیل در بخش مشاهدات آمده است، شبیه به هم‌اند با



شکل ۵- نمای سه‌بعدی از حفرة آبستگى برای دبی‌های ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه

کاهش آبستگى، از پنج نوع آرایش دو ردیفه استفاده شد که نمونه‌ای از این آرایش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

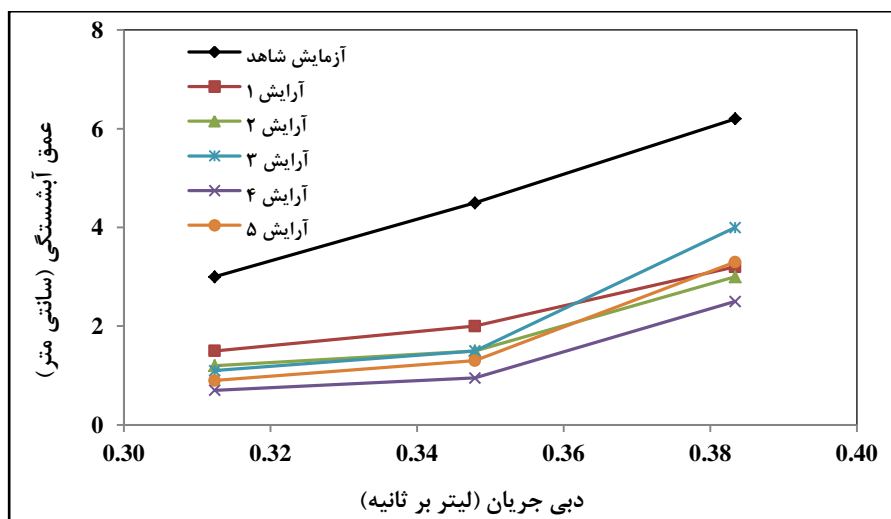
بررسی تأثیر آرایش پره‌های مستغرق در کاهش آبستگى
برای بررسی تأثیر استفاده از پره‌های مستغرق در



شکل ۶- دو نما از بالا که شیوه قرارگیری پره‌های مستغرق را نشان می‌دهد (آرایش نوع دوم)

مستغرق) با افزایش عدد فرود جریان، عمق آبشستگی ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه پل روند افزایشی دارد. همچنین، استفاده از آرایش‌های مختلف از پره‌های مستغرق تأثیری قابل توجه در کاهش آبشستگی دارد که در شکل ۷ به روشنی نشان داده شده است.

در شکل ۷ تغییرات عمق آبشستگی نسبت به عدد فرود جریان نشان داده شده است. با توجه به عدد فرود محاسبه شده، نوع جریان از نوع زیربحرانی است. همان‌طور که نتایج اندازه‌گیری در این شکل نشان می‌دهد، در تمامی آزمایش‌ها (آزمایش‌های شاهد و آزمایش‌های با حضور پره



شکل ۷- تغییرات عمق آبشستگی نسبت به عدد فرود جریان

مستغرق با آرایش‌های متفاوت نسبت به آزمایش‌های شاهد و همچنین درصد کاهش آبشستگی نسبت به آزمایش‌های شاهد در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای مقایسه و بررسی استفاده از آرایش‌های متفاوت در کاهش آبشستگی، تأثیر هر آرایش به صورت دقیق‌تر بررسی شد. بدین منظور نتایج آزمایش‌ها با حضور پره

جدول ۱- نتایج اندازه‌گیری‌های عمق آبشستگی در آزمایش‌های شاهد و در آرایش‌های مختلف پره مستغرق دو ردیفه

دبی (لیتر بر ثانیه)	سرعت متوسط جریان (سانتی‌متر بر ثانیه)	عدد فرود جریان	حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده (سانتی‌متر)	
۲۲	۲۳/۶۸	۰/۳۱	۳	آزمایش شاهد
۲۴	۲۶/۳۷	۰/۳۵	۴/۵	
۲۷	۲۹/۰۶	۰/۳۸	۶/۲	
۲۲	۲۳/۶۸	۰/۳۱	۱/۵	آرایش ۱
۲۴	۲۶/۳۷	۰/۳۵	۲	
۲۷	۲۹/۰۶	۰/۳۸	۳/۲	
۲۲	۲۳/۶۸	۰/۳۱	۱/۲	آرایش ۲
۲۴	۲۶/۳۷	۰/۳۵	۱/۵	
۲۷	۲۹/۰۶	۰/۳۸	۳	
۲۲	۲۳/۶۸	۰/۳۱	۱/۱	آرایش ۳
۲۴	۲۶/۳۷	۰/۳۵	۱/۵	
۲۷	۲۹/۰۶	۰/۳۸	۴	
۲۲	۲۳/۶۸	۰/۳۱	۰/۷	آرایش ۴
۲۴	۲۶/۳۷	۰/۳۵	۰/۹۵	
۲۷	۲۹/۰۶	۰/۳۸	۲/۵	
۲۲	۲۳/۶۸	۰/۳۱	۰/۹	آرایش ۵
۲۴	۲۶/۳۷	۰/۳۵	۱/۳	
۲۷	۲۹/۰۶	۰/۳۸	۱/۳	

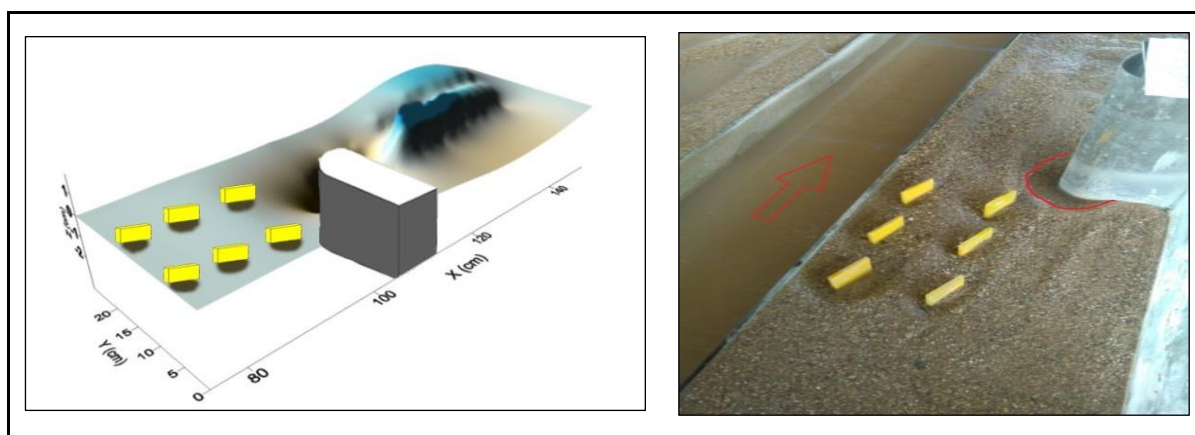
جریان است، بر اثر پره‌های مستغرق به سمت تکیه‌گاه هدایت و سرانجام در حفرة ایجاد شده جمع می‌شود. نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ نشان می‌دهد که تأثیر آرایش‌های متفاوت پره‌های مستغرق متفاوت است. برای مثال، زمانی که پره‌ها به صورت آرایش ۱ (شکل ۳) به کار روند، عمق آبشستگی در دبی‌های ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۱/۵، ۲ و ۳/۲ سانتی‌متر است که در مقایسه با آزمایش‌های شاهد به‌طور متوسط ۵۱/۳ درصد کاهش داده یافته است. به عبارتی، همان‌طور که انتظار می‌رفت وجود پره مستغرق در جلو پایه باعث گسیخته شدن جریان نزدیک شونده و در نتیجه کاهش قدرت جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی جلو تکیه‌گاه

با استقرار پره‌های مستغرق با زاویه ۲۰ درجه نسبت به جهت جریان، در بالادست تکیه‌گاه پل نشان داده شد که در اطراف این سازه آبشستگی ایجاد می‌شود، این رسوبات از اطراف آن در اثر جریان آب حمل و به طرف حفرة آبشستگی جلو تکیه‌گاه پل منتقل و در آنجا ته‌نشین شده است. علت این پدیده همان‌طور که سایر محققان نیز گفته‌اند، ایجاد چرخش ثانویه بر اثر پره‌های مستغرق و در نتیجه وجود ناحیه پرفشار و کم فشار در دو طرف این سازه است که در اثر آن رسوبات در جهت عرضی جابه‌جا و درون حفرة آبشستگی جلو تکیه‌گاه ته‌نشین می‌شوند. علاوه بر آن، قسمتی از رسوبات شسته شده از قسمت بالادست تکیه‌گاه که به سمت پایین دست در

شدند (شکل ۳). در اثر این جابه‌جایی، عمق آبشستگی برای سه دبی ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه برابر با ۱/۲، ۱/۵ و ۳ به‌دست آمد که در مقایسه با آزمایش شاهد و همچنین آرایش ۱، عملکرد این آرایش بهبود یافته است. به‌عبارتی جابه‌جایی ۵ سانتی‌متری پره‌های ردیف اول و دوم به سمت بالادست نسبت به آرایش اول به‌طور متوسط باعث کاهش ۸ درصدی آبشستگی شده است. همچنین درمقایسه با آزمایش شاهد، این آرایش باعث کاهش ۵۹/۳ درصدی آبشستگی شده است.

پل شده است. در نتیجه پره‌های مستغرق با کاهش سرعت جریان در اطراف تکیه‌گاه موجب کاهش آبشستگی اطراف آن شده‌اند که در مقایسه با حالت بدون استفاده از پره‌های مستغرق نتایج رضایت‌بخش است.

شکل ۸، آبشستگی ایجاد شده در اطراف پره‌های مستغرق (به‌دلیل جریان ثانویه (Hey, 1995) و همچنین در اطراف تکیه‌گاه پل را نشان می‌دهد. در آرایش دوم، پره‌های ردیف اول و ردیف دوم به اندازه ۵ سانتی‌متر نسبت به موقعیت آرایش اول به سمت بالادست جابه‌جا

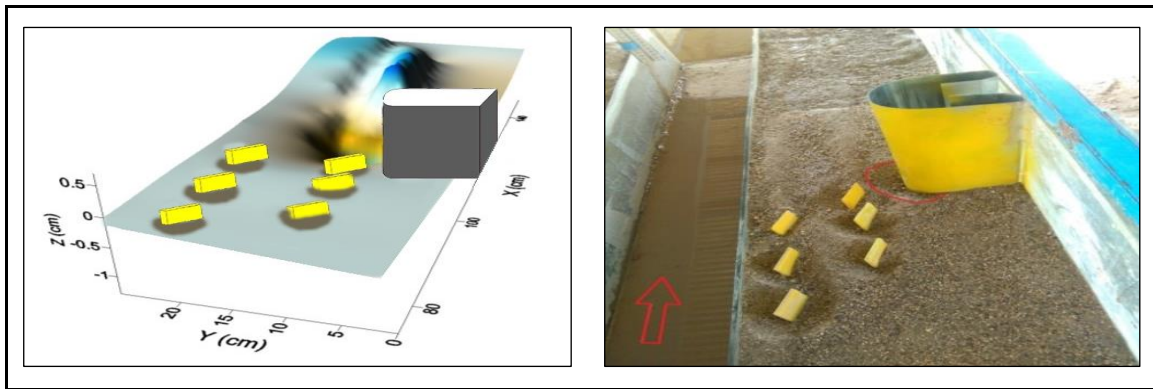


شکل ۸- آبشستگی ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه در آرایش نوع دوم

آزمایش شاهد، ۷۱/۷ درصد کاهش دارد. همچنین این آرایش در مقایسه با سایر آرایش‌ها، عملکرد مناسبی در کاهش عمق آبشستگی داشته است. در آرایش پنجم، پره‌ها به‌صورت زیگزاکی یا متناوب مطابق شکل ۳ قرار داده شدند.

شکل ۹، آبشستگی ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه را در آرایش نوع پنجم نشان می‌دهد. بررسی عملکرد این آرایش نسبت به آزمایش‌های شاهد حاکی از تغییر نوع آرایش پره‌هاست که به کاهش ۶۶/۳ درصد عمق آبشستگی انجامیده است. عملکرد این آرایش نسبت به عملکرد آرایش‌های نوع ۱، ۲ و ۳ بهتر است ولی در مقایسه با آرایش نوع ۴ کاهش یافته است.

در آرایش سوم، پره‌های ردیف دوم به اندازه ۱۰ سانتی‌متر به سمت جلو جابه‌جا شدند ولی پره‌های ردیف اول بدون تغییر باقی ماندند. در این حالت دیده شد که عمق آبشستگی نسبت به آرایش شاهد ۵۵/۱ درصد کمتر شده است؛ عملکرد پره‌ها نسبت به آرایش نوع ۱ بهتر شده است ولی در مقایسه با آرایش نوع ۲ عملکرد آن کاهش یافته است. در آرایش چهارم، پره‌های ردیف دوم همانند آرایش نوع ۳ در موقعیت اولیه بدون تغییر باقی ماندند ولی اولین پره ردیف اول به اندازه ۵ سانتی‌متر به سمت بالادست جابه‌جا شد. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که عمق آبشستگی برای سه دبی ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه برابر با ۰/۷، ۰/۹۵ و ۲/۵ سانتی‌متر است که در مقایسه با



شکل ۹- آبشستگی ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه در آرایش نوع پنجم

رودخانه‌های آبرفتی ساخته شده‌اند آبشستگی پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های آنهاست. بررسی منابع نشان می‌دهد که بیشتر شکست‌ها در این سازه ناشی از آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌هاست. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش از پره‌های مستغرق به صورت آرایش دو ردیفه که مورد تاکید سایر محققان بوده است، برای بررسی کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب استفاده شد. مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که در اثر اختلاف فشار ایجاد شده در دو طرف پره‌های مستغرق، جریان ثانویه‌ای در اطراف آنها ایجاد می‌شود که موجب کاهش قدرت عوامل فرسایش یعنی جریان رو به پایین و گرداب نعل‌اسبی در اطراف تکیه‌گاه پل می‌گردد. همچنین به علت ایجاد چرخش ثانویه، رسوبات در جهت عرضی جابه‌جا و درون حفره آبشستگی جلو تکیه‌گاه ته‌نشین می‌شوند. در مجموع با بهره‌گیری از پره‌های مستغرق با زاویه ۲۰ درجه نسبت به جهت جریان در شرایط آب زلال با نسبت $L/H=3$ ، در سه دبی ۲۲، ۲۴ و ۲۷ لیتر بر ثانیه نتایج زیر استخراج شده است:

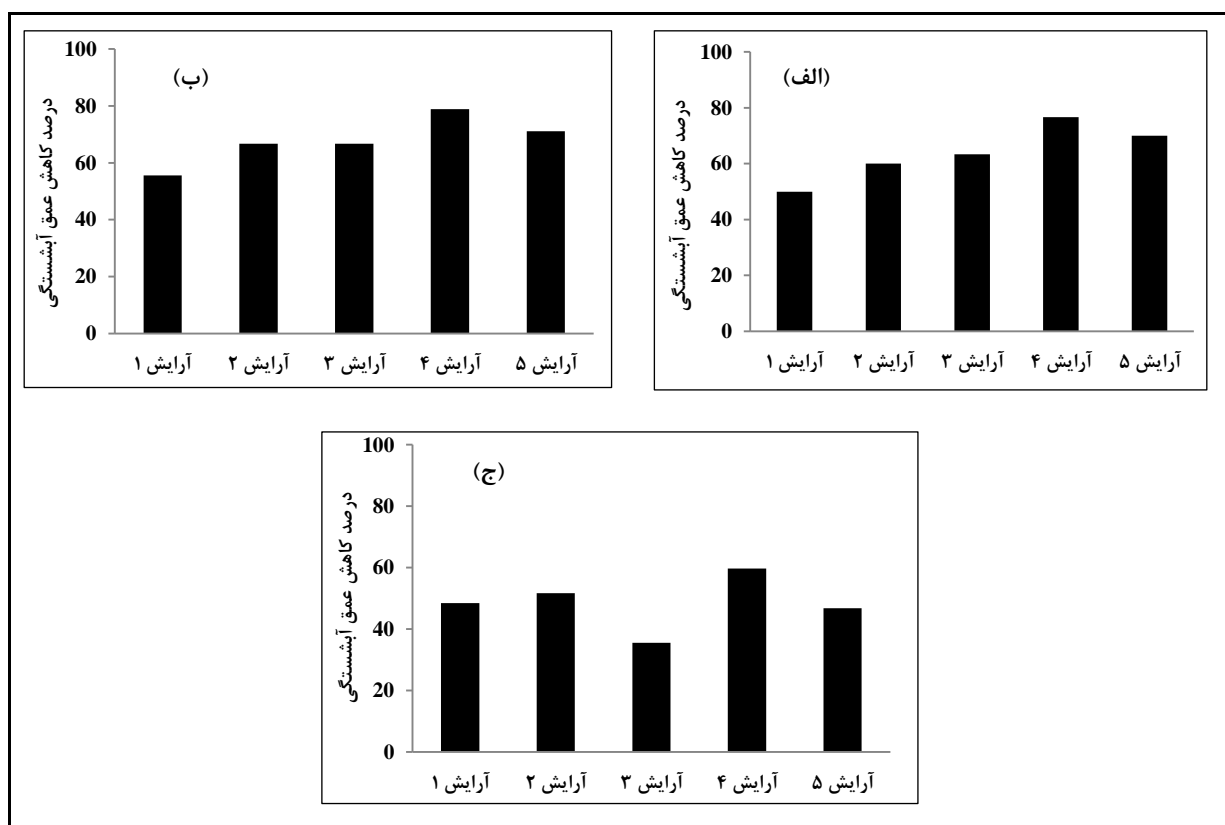
- در آزمایش‌های شاهد، در اطراف تکیه‌گاه آبشستگی ایجاد می‌شود و مقدار آن با افزایش دبی یا عدد فرود جریان افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰، میزان کاهش عمق آبشستگی را در آرایش‌های مختلف ۱ تا ۵ و در سه دبی متفاوت نشان می‌دهد. در مجموع، استفاده از پنج نوع آرایش مختلف پره‌های مستغرق نشان می‌دهد که این سازه عملکردی قابل قبول در کاهش عمق آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل دارد و به طور متوسط می‌تواند ۶۰/۱ درصد عمق آبشستگی را در اطراف تکیه‌گاه پل کاهش دهد. نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که آرایش نوع چهارم (شکل ۳) که در آن اولین پره مستغرق ردیف اول و ردیف دوم به ترتیب با فاصله ۵ و ۱۵ سانتی‌متر از تکیه‌گاه قرار داده شدند، بهترین عملکرد را دارد و موجب کاهش ۷۱/۷۴ درصد از حداکثر عمق آبشستگی شده است. به عبارت بهتر، جابه‌جایی پره در ردیف اول و نزدیک شدن آن به تکیه‌گاه موجب افزایش کارایی این آرایش شده است، زیرا موجب تقویت جریان چرخشی ثانویه پره‌ها و در نتیجه انتقال رسوبات از سمت کانال مرکزی به سمت تکیه‌گاه پل شده است.

نتیجه‌گیری

پل، سازه‌ای مهم برای عبور از موانع فیزیکی از جمله رودخانه‌ها و دره‌هاست اما یکی مشکلات جدی در خصوص پل‌هایی که روی رودخانه‌ها و به خصوص روی

- استفاده از پره‌های مستغرق در پنج نوع آرایش دو ردیفه، میزان آبشستگی را در اطراف تکیه‌گاه در مقایسه با شاهد، کاهش می‌دهد.
- عملکرد پره‌های مستغرق در عدد فرود جریان کمتر، بهتر از عملکرد آنها در عدد فرود بالاتر است.
- آرایش‌های مختلف مورد استفاده از پره‌های مستغرق نشان می‌دهد که آرایش نوع چهارم به‌طور متوسط عمق آبشستگی را $71/74$ درصد نسبت به آزمایش‌های شاهد کاهش می‌دهد و این آرایش
- بیشترین تأثیر را در کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه داشته است.
- محل استقرار پره اول که در نزدیکی تکیه‌گاه پل قرار می‌گیرد، نقش مهمی در کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه دارد.
- در مجموع، استفاده از پره‌های مستغرق با پنج نوع آرایش مختلف نشان می‌دهد که این سازه می‌تواند به‌طور متوسط $60/1$ درصد عمق آبشستگی را در اطراف تکیه‌گاه پل کاهش دهد.



شکل ۱۰- درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد در سه دبی:

الف) ۲۲ لیتر بر ثانیه، ب) ۲۴ لیتر بر ثانیه و ج) دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه

مراجع

- Akan, A. O. 2011. Open Channel Hydraulics. Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Alemi, Z., Ghomeshi, M. and Mohammadi, S. 2012. The application of collar on the scour reduction at bridge rectangular abutment in composit channel. J. Irrig. Water Eng. 3(10): 29-41. (in Persian)
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen, H. W. 1977. Local scour around cylindrical piers. J. Hydraul. Res. 153, 211-252.

- Brice, J. C. and Blodgett, J. C. 1978. Countermeasures for Hydraulic Problems at Bridges: Analysis and assessment (Vol. 1). Office of Research and Development. Federal Highway Administration.
- Chang, F. F. 1973. A statistical summary of the cause and cost of bridge failures. Final Report. No. FHWA-RD-75-87
- Chiew, Y. M. 2004. Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel. *J. Hydraul. Eng.* 130(3): 218-226.
- Dehghani, A. A., Azamathulla, H. M., Hashemi-Najafi, S. A. and Ayyoubzadeh, S. A. 2013. Local scouring around L-head groynes. *J. Hydrol.* 504, 125-131.
- Davis, S. R. 1984. Case histories of scour problems at bridges. Transportation Research Record.
- Emamgholizadeh, S. 2015. Open Channel Hydraulics. Shahrood University of Technology Press. (in Persian)
- Ghorbani, B. and Kells, J. A. 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *J. Hydraul. Res.* 46(1): 610-619.
- Heidarpour, M., Afzalimehr, H. and Izadinia, E. 2010. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *Int. J. Sediment. Res.* 25: 411-422.
- Hey, R. D. 1995. Environmentally Sensitive River Engineering. In: Calow, P. and Petts, G. E. (Eds.) *The Rivers Handbook: Vol. 2.* Blackwell Scientific Pub. Oxford. U. K.
- Hosseini, H., Husseinzadeh-Dalir, A., Farsadizadeh, D., Arvanaghi, H. and Ghorbani, M. A. 2011. Simultaneous effects of submerged vanes and collar on scour reduction around rectangular piers with rounded nose. *Water Soil Sci.* 22(3): 87-101. (in Persian)
- Kummar, V., Ranga Raju, K. G. and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar. *J. Hydraul. Eng.* 125(12): 1302-1305.
- Khademi, K., Shafaie, M. and Khozeimehnejad, H. 2014. Experimental investigation of flow and scour around bridge abutments with attached submerged vane. *J. Irrig. Water Eng.* 5 (17): 56-66. (in Persian)
- Lauchlan, C. S. 1999. Pier scour countermeasures. Ph. D. Thesis. University of Auckland. Auckland. New Zealand.
- Melville, B. W. and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.* 125(1): 59-65.
- Melville, B. W. and Coleman, S. E. 2000. Bridge Scour. Water Resources Pub. LLC. Clorado. U. S. A.
- Mia, M. F. and Nago, H. 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. *J. Hydraul. Eng.* 129(6): 420-427.
- Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M. and Rosgen, D. L. 2001. Use of vane for control of scour at vertical wall abutments. *J. Hydraul. Eng.* 127(9): 772-778.
- Odgaard, A. J. and Kennedy, J. F. 1983. River-bend bank protection by submerged vanes. *J. Hydraul. Eng.* 109(8): 1161-1173.
- Odgaard, A. J. and Wang, Y. 1991. Sediment management with submerged vanes. I: Theory. *J. Hydraul. Eng.* 117(3): 267-283.
- Raudkivi, A. J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. CRC Press.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical Piers. *J. Hydraul. Eng.* 109, 338-350.
- Richardson, E. V. and Davis, S. R. 2001. Evaluating Scour at Bridges. 4th Ed. Hydraulic Engineering Circular No. 18. Federal Highway Administration. Washington, D. C. USA.

- Rosgen, D. L. 1996. Applied river Morphology. Wildland Hydrology. Pagosa Spring, Co.
- Samimiy-Behbahan, T., Barani, G. H., Khanli, M. and Khanjani, M. 2006. Experimental investigation of submerged vanes effect on scouring of bridge piers. National Congress of Irrigation and Drainage Networks Management. Faculty of Water Sciences Engineering. Shahid Chamran University. Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Shojaei, P., Farsadizadeh, D. and Hosseinzadeh-Dalir, A. 2011. Effects of combined submerged vanes and collar in reducing scour of base cylindrical bridges. J. Sci. Tech. Agric. Nat. Resour. (Soil Water Sci.) 15(57): 33-23. (in Persian)
- Shafaie-Bejestan, M. 2008. Hydraulic Transport. Shahid Chamran University Press. (in Persian)
- Shariati, H. and Khodashenas, S. R. 2015. Investigation of control methods on local scouring around the bridge piers. J. Water Sustain. Dev. 1(3): 43-52. (in Persian)
- Zarrati, A. R., Chamani, M. R. Shafaie-Bejestan, M. and Latifi, M. 2010. Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar & riprap. Int. J. Sediment Res. 25, 313-322.

Application of the Submerged Vanes on Reduction of Local Scour around the Bridge Abutment with Rounded Nose

S. Emamgholizadeh and E. Nohani*

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. Email: nohani_e@yahoo.com

Received: 19 August 2016, Accepted: 18 April 2017

The statistics of bridge failures by US Federal Highway Administration show that the local scour around the bridge abutment is main reason compared to the local scour of piers. Various methods have been suggested for the control and reduction of local scour around the bridge piers and abutment. Using submerged vanes is one of these methods. In this study, the effect of submerged vanes to reduce the local scour around the bridge abutments with rounded nose was studied. Experiments conducted in a compound channel with non-cohesive sediments with diameter (d_{50}) of 1 mm. Experiments carried out in two stages: in first stage without using submerged vanes and at the second stage with the presence of submerged vanes. Two rows of submerged vanes with length of 10 cm, height of 3.33 cm ($L/H = 3$) and with angle of 20° was used. The results showed that the geometric properties of the scour hole in the nose of abutment was similar to the results obtained by other researchers. Results also showed that at all flow conditions submerged vanes reduced the scour hole around the bridge abutment and they moved the scour hole from the near of the abutment to the center of channel. Also the results showed that using submerged vanes averagely reduced 60.1% of the maximum scour depth. Finally the best layout of submerge vanes which had a distance of 5 and 15 cm between first and second rows with abutment, reduced the maximum scour depth by 71.74 percent.

Keywords: Abutment, Compound Channel, Local Scour, Submerged Vanes