

بررسی آزمایشگاهی پروفیل طولی و عرضی آبشستگی و پروفیل سرعت جریان پیرامون مقاطع مختلف تکیه‌گاه پل

الهه علیزاده^۱، کورش قادری^{۲*}، محمد مهدی احمدی^۳، فاطمه گیشین‌زاده^۴ و محمدرضا مددی^۵

چکیده

وقوع آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده پایداری این سازه محسوب می‌شود که به‌منظور کاهش اثرات مخرب این پدیده، روش‌های متعددی ارائه شده است. در پژوهش حاضر تأثیر دو پارامتر شکل هندسی تکیه‌گاه پل و همچنین حضور صفحات مستغرق با آرایش‌های منتخب، بر میزان آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل بررسی شد. بدین‌منظور، مدل فیزیکی در چهار شکل مختلف شامل تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه، مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه و مستطیلی با باله‌های دایروی طراحی و ساخته شد. همچنین صفحات مستغرق در چهار آرایش متفاوت دوردیفه موازی، دوردیفه زیگزاگی، دوردیفه زیگزاگی مورب و کاجی، در دو نسبت استغراق ۲ و ۳ و تحت زاویه ۲۰ درجه نسبت به جریان بر هریک از چهار تکیه‌گاه، در دبی ثابت آزمایش شدند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد بیشترین و کمترین عمق آبشستگی به‌ترتیب در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه و تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی به وقوع پیوست. در آزمایش‌های صفحات مستغرق، آرایش کاجی در نسبت استغراق ۳، با کاهش ۴۱ درصدی آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، ۲۰ درصدی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه و ۱۸ درصدی در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی نسبت به آزمایش شاهد متناظر با هریک از تکیه‌گاه‌ها، بهترین عملکرد را در کاهش آبشستگی از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آرایش کاجی، شکل هندسی تکیه‌گاه، صفحات مستغرق، عمق آبشستگی، نسبت استغراق.

ارجاع: علیزاده ا.، قادری ک.، احمدی م.، گیشین‌زاده ف. و مددی م.، ر. ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی پروفیل طولی و عرضی آبشستگی و پروفیل سرعت جریان پیرامون مقاطع مختلف تکیه‌گاه پل. مجله پژوهش آب ایران. ۵۵: ۶۷-۷۸. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14692.2586>

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲- دانشیار سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳- دانشیار سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۴- دانش‌آموخته کارشناس ارشد منابع آب، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۵- استادیار سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه جیرفت.

* نویسنده مسئول: Kouroshqaderi@uk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

مقدمه

آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان، مانند ساخت سازه‌هایی در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. تحقیقات بسیاری پیرامون آبشستگی تکیه‌گاه پل انجام شده است که نشان می‌دهد مکانیسم آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل بسیار شبیه به مکانیسم آبشستگی در اطراف پایه پل است، با این تفاوت که لایه مرزی، جریان پیچیده‌تری نسبت به پایه‌های پل در اطراف تکیه‌گاه ایجاد می‌کند (Melville, 1997).

(Hashemi et al., 2023) با بررسی اثر هیدروگراف دارای چولگی و زمان تداوم متفاوت، بر میزان آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان تداوم هیدروگراف، حداکثر عمق آبشستگی افزایش یافته و شیب تغییرات زمانی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

(Nekoufar and Haljian, 2023) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی و مدل‌های SSIM سعی کردند یک راهکار مناسب برای مقابله با پدیده آبشستگی ارائه دهند. با توجه به نتایج حاصل، استفاده از صفحات مستغرق را روشی مناسب برای کنترل و کاهش پدیده آبشستگی دانستند و بیان کردند در حضور صفحات مستغرق آبشستگی اطراف پایه پل، در بهترین حالت ۱۱ درصد کاهش یافته است.

(Dey and Barbhuiya, 2004) در تحقیقی فرایند آبشستگی را برای تکیه‌گاه‌هایی با مقاطع مستطیل، دوزنقه (۴۵ درجه) و نیم‌دایره بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که گرداب‌های اولیه در بالادست جریان آب در نزدیکی تکیه‌گاه از شدت بیشتری برخوردار است. همچنین گزارش کردند که در جریان‌های با دبی پایین، عمق معادل آبشستگی مشخصاً با افزایش عمق جریان افزایش می‌یابد.

(Nazeri and Emamgholizadeh, 2021) تأثیر آبشکن بر میزان آبشستگی اطراف تکیه‌گاه را بررسی و بیان کردند در شرایط مختلف جریان، وجود آبشکن سرسپری یا آبشکن T شکل^۱ در بالادست تکیه‌گاه به‌طور متوسط ۷۵ درصد آبشستگی را کاهش می‌دهد. (Gharibzadeh, 2012) با کارگذاری دو تکیه‌گاه در حالت شکل‌های

نیم‌دایره و نیم‌بیضی در چهار قطر مختلف به این نتیجه رسید که با افزایش قطر تکیه‌گاه، عمق و حجم حفرة آبشستگی افزایش می‌یابد. در ادامه در بخش دیگر تحقیق بیان کرد که تأثیر عرض تکیه‌گاه بر عمق و حجم حفرة آبشستگی بیشتر از طول آن است. (Karimi, 2012) اظهار کرد بیشترین میزان فرسایش و حداکثر عمق آبشستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل ایجاد می‌شود. همچنین در ادامه بیان کرد به‌دلیل ایجاد و تشکیل گرداب‌های افقی و جداسدگی جریان در پایین‌دست تکیه‌گاه، رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد که با افزایش دبی، محل رسوب‌گذاری مرتباً به سمت پایین‌دست جابه‌جا می‌شود. (Emamifar et al., 2016) اثر شکل هندسی تکیه‌گاه پل بر عمق آبشستگی در قوس ۱۸۰ درجه را در چهار دبی و چهار شکل هندسی تکیه‌گاه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، حداکثر عمق آبشستگی در همه تکیه‌گاه‌ها در بالادست تکیه‌گاه و در نزدیکی دماغه تکیه‌گاه مشاهده می‌شود. (Osroush et al., 2020) در تحقیقی از دو ابزار طوقه و شکاف برای کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه بهره بردند. نتایج این محققان نشان داد که مؤثرترین مدل شکاف می‌تواند ابعاد و عمق چاله آبشستگی را تا ۶۱ درصد کاهش دهد و همچنین مؤثرترین مدل طوقه در این تحقیق ماکزیمم چاله آبشستگی را به نقطه دورتری از تکیه‌گاه منتقل کرده و آبشستگی را تا ۹۶ درصد کاهش می‌دهد.

(Zolghadr and Shafaei Bajestan, 2017) کاربرد واحدهای بتنی شش پایه را در ارتباط با آبشستگی تکیه‌گاه پل بررسی کردند. نتایج این آزمایش‌ها نشان از تأثیر قابل‌توجه این المان در مهار آبشستگی تکیه‌گاه در شرایط مختلف داشت؛ به‌طوری‌که می‌تواند تا ۱۰۰ درصد عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه را کاهش دهند. (Alkhouly et al., 2019) آزمایش‌هایی را برای ارزیابی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف شکل‌های مختلف تکیه‌گاه انجام دادند. در این تحقیق مقایسه‌ای بین شکل‌های مختلف تکیه‌گاه به‌عنوان تکیه‌گاه عمودی، تکیه‌گاه نیمه‌دایره، تکیه‌گاه به‌صورت شیب‌دار عمودی و تکیه‌گاه باله‌دار انجام شد. برای تکیه‌گاه عمودی، مشاهده شد که تغییر عرض، بر عمق آبشستگی تأثیر می‌گذارد. برای تکیه‌گاه نیمه‌دایره‌ای، افزایش شعاع انحنا منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شود، عمده روش‌هایی که

1- T-shaped spur dyke

دادند. آزمایش‌ها برای سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه نسبت به جهت جریان انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان آبشستگی با عدد فرود و تنش برشی رابطه مستقیم دارد، اما با نسبت تنگ‌شدگی رابطه عکس دارد. بهترین عملکرد صفحات در همه آزمایش‌ها زمانی بود که صفحات مستغرق تحت زاویه ۲۰ درجه نسبت به جریان بودند. (Karimi et al. (2021 تأثیر صفحات مستغرق تحت، تحت نسبت استغراق ۳، زاویه برخورد ۲۰ درجه با جریان، در سه آرایش تک‌ردیفه، دو ردیفه موازی و دو ردیفه زیگزاگی در جلوی سازه تکیه‌گاه و گروه پایه ۲×۲ در حضور اجسام شناور مستطیلی روی پایه‌های جلویی بررسی کردند. نتایج عملکرد صفحات مستغرق تحت در آرایش‌های مختلف قرارگیری، نشان از کاهش آبشستگی داشت، اما عملکرد مثبت در همه حالت‌ها یکسان نبود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که آرایش صفحات مستغرق در حالت آرایش دو ردیفه زیگزاگی، بیشترین کارایی را در حفاظت از پایه‌ها و تکیه‌گاه پل داشته است. Montaseri et al. (2021 در تحقیقی به تعیین مشخصات طراحی صفحات مستغرق با آرایش دو ردیفه در یک کانال قوسی ۱۸۰ درجه پرداختند. مطابق با نتایج آزمایش‌ها، بهترین ارتفاع برای صفحات مستغرق، ۰/۳۳ عمق جریان، زاویه مناسب صفحات نسبت به شعاع قوس ۲۰ درجه، مقدار مناسب برای فاصله اولین ردیف صفحات از دیواره خارجی قوس ۲ برابر ارتفاع صفحات و مقدار مناسب برای فاصله عرضی صفحات، ۱/۵ برابر ارتفاع صفحات به دست آمد. نتایج نشان داد با زیگزاگ کردن آرایش دوردیفه، پیوستگی طولی بین صفحات از بین می‌رود و مقدار رسوب ورودی به آنگیر افزایش می‌یابد. در برخی از تحقیقات گذشته اثر شکل تکیه‌گاه بر میزان آبشستگی اطراف آن بررسی شده و محققان تلاش کردند تا شکلی بهینه و مناسب برای تکیه‌گاه پیدا کنند که آبشستگی کمتری داشته باشد و در برخی دیگر، محققان با استفاده از اقدام و ابزار حفاظتی صفحات مستغرق سعی کردند آبشستگی را کنترل و کاهش دهند. در تحقیقات گذشته حول مبحث آبشستگی تکیه‌گاه پل، هرکدام از این اقدامات حفاظتی به‌طور جداگانه بررسی شده‌اند، اما در این پژوهش، سعی شده تأثیر شکل تکیه‌گاه، همزمان با حضور صفحات مستغرق به‌منظور کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شود؛ بنابراین

به‌منظور کنترل و کاهش آبشستگی استفاده می‌شود، به دو دسته روش‌های تغییر الگوی جریان و روش‌های افزایش مقاومت بستر تقسیم می‌شوند. یکی از روش‌های اصلاح الگوی جریان، استفاده از صفحات مستغرق است. صفحات مستغرق سازه‌های هدایت جریان با نسبت طول به ارتفاع کمی هستند که به‌صورت گروهی و عمودی با زاویه‌ای مناسب نسبت به جهت جریان در بستر نصب می‌شوند. این صفحات با ایجاد جریان گردابه‌ای باعث تغییر در رژیم حرکت بار بستر و درنهایت تغییر محل رسوب‌گذاری و فرسایش می‌شوند. به موجب اختلاف فشار در دو طرف صفحه، جریان از سمت پرفشار به طرف بالای آن و از سمت کم‌فشار به طرف پایین آن حرکت می‌کند و در نتیجه گرداب و چرخش القایی در اطراف صفحه به‌وجود می‌آید. در نتیجه این گرداب، رسوبات از قسمت مکشی صفحه برداشته شده و در قسمت فشاری صفحه ته‌نشین می‌شوند؛ بنابراین با نصب ردیف صفحات در بستر رودخانه می‌توان رسوبات را بر سطح بزرگ‌تری از بستر توزیع کرد. (Khademi et al. (2012 به بررسی اثر صفحات در کاهش عمق چاله آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پرداختند. آن‌ها درنهایت نتیجه گرفتند تک صفحه چسبیده به تکیه‌گاه با زاویه نصب ۴۰ درجه نسبت به محور جریان بهترین عملکرد را داشته و این آرایش می‌تواند ۸۹ درصد آبشستگی را نسبت به آرایش بدون صفحه، کاهش دهد. Khademi and Shafaei (2015) در تحقیقی دیگر، اثر تعداد، موقعیت و زاویه صفحات مستغرق در محل تکیه‌گاه پل را بر عمق آبشستگی بررسی کردند. آن‌ها اعلام کردند تعداد صفحات و قرارگیری آن‌ها در بالادست پل تأثیر بسیار کمی در کاهش عمق آبشستگی دارد. براساس گزارش آن‌ها، بهترین موقعیت نصب صفحه، اتصال به گوشه بالادست تکیه‌گاه است. بررسی تأثیر زوایای مختلف نشان داد که زاویه ۴۰ درجه نسبت به دیگر زوایا عملکرد بهتری دارد. به‌طورکلی با نصب صفحه مستغرق الگوی جریان نزدیک‌شونده به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که منطقه تمرکز سرعت از نزدیک تکیه‌گاه دور می‌شود و باعث کاهش عمق آبشستگی در محل تکیه‌گاه تا ۸۹ درصد می‌شود. (Ghorbani and Parsmehr (2015 آزمایش‌هایی را با هدف بررسی اثر تنگ‌شدگی بر آبشستگی تکیه‌گاه پل و کاربرد صفحات مستغرق برای کاهش و کنترل آن انجام

مستطیلی با باله‌های دایره‌ای) در شرایط آب زلال با رسوبات غیرچسبنده بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش از فلوم آزمایشگاهی با کف گالوانیزه و دیواره‌های شیشه‌ای، واقع در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. کانال اصلی دارای مقطع مستطیلی‌شکل با عرض داخلی ۸۰ سانتی‌متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر، طول ۸ متر و شیب کف ثابت و برابر با ۰/۰۲۲ بود.

در تحقیق حاضر تأثیر قرارگیری چهار آرایش مختلف صفحات مستغرق (آرایش دو ردیفه موازی، دو ردیفه زیگزاگی، دو ردیفه زیگزاگی مورب و آرایش کاجی) با زاویه قرارگیری ۲۰ درجه نسبت به جریان، در نسبت‌های استغراق ۲ و ۳ و در دبی ثابت ۳۴ لیتر بر ثانیه، بر عمق چاله آبشستگی پیرامون چهار حالت مختلف از تکیه‌گاه مستطیلی (تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه، تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه، تکیه‌گاه



شکل ۱- نمایی از فلوم مورد استفاده

باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه (زاویه باله تکیه‌گاه نسبت به جریان برابر با ۴۵ درجه است)، تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایره‌ای در شکل ۲ نمای شماتیک انواع حالت‌های مختلف تکیه‌گاه‌های مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

در شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است. مدل‌های تکیه‌گاه‌های به‌کاررفته در این پژوهش، عبارت‌اند از: تکیه‌گاه مستطیلی ساده، تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه (زاویه باله تکیه‌گاه نسبت به جریان برابر با ۶۰ درجه است)، تکیه‌گاه مستطیلی دیواره



تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه



تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه



تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایره‌ای



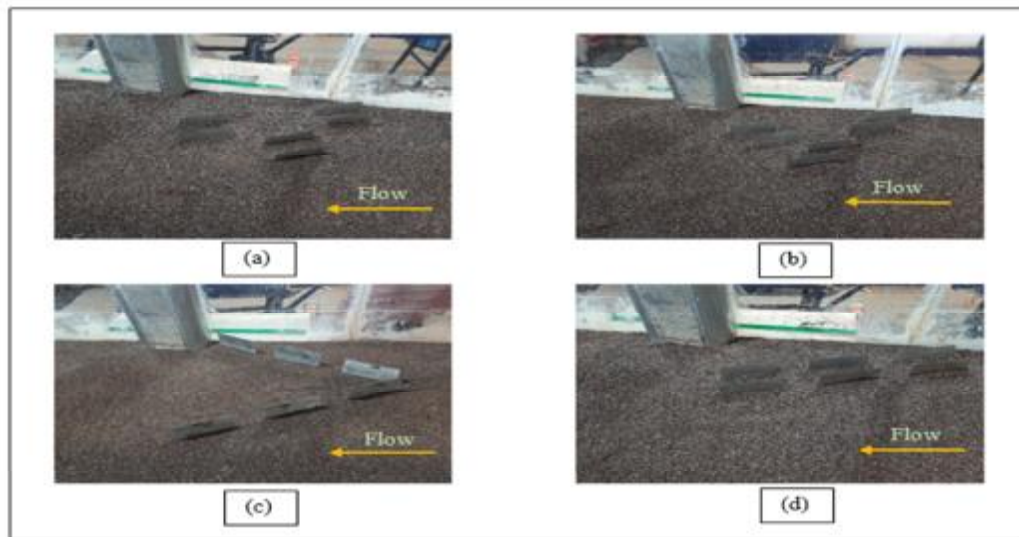
تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه

شکل ۲- انواع تکیه‌گاه‌های استفاده‌شده

زمان برای هر چهار نوع تکیه‌گاه برابر با ۵ ساعت برآورد شد.

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در شرایط آب زلال انجام شده است. برای بررسی روند عمق آبشستگی در حضور اقدامات حفاظتی، نیاز به انجام یک سری آزمایش‌ها بدون اقدام حفاظتی است. در این راستا چهار آزمایش شاهد انجام شد که در هر آزمایش آبشستگی هریک از حالت‌های تکیه‌گاه مستطیلی به‌صورت مجزا بررسی و پس از آن، سری آزمایش‌های حفاظتی انجام شدند. در آزمایش‌ها با اقدام حفاظتی صفحات مستغرق، از چهار آرایش صفحات مستغرق استفاده شد. بنابر تحقیقات انجام‌شده توسط Johnson et al. (2001) مناسب‌ترین زاویه برای نصب صفحات مستغرق زاویه ۲۰ درجه نسبت به جریان تشخیص داده شد. صفحات مستغرق در دو نسبت استغراق (نسبت طول به ارتفاع پره ۲ (L/H) و ۳ و تحت چهار آرایش مختلف به‌کار گرفته شدند. شکل ۳ نمایی از حضور صفحات مستغرق در چهار آرایش به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

صفحات مستغرق از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت یک میلی‌متر و مستطیلی شکل ساخته شده و در دو نسبت طول به ارتفاع برابر دو و سه، تحت زاویه ۲۰ درجه و در چهار آرایش دو ردیفه موازی، دو ردیفه زیگزاگی، دو ردیفه زیگزاگی مورب و آرایش کاجی در اطراف چهار حالت مختلف تکیه‌گاه کار گذاشته شدند. در این پژوهش از رسوبات با قطر متوسط (d_{50}) برابر با ۰/۹۱ میلی‌متر استفاده شد. بنابر توصیه (Shafaei Bajestan (2016) برای حذف اثر یکنواختی ذرات بر آبشستگی موضعی، باید انحراف معیار نسبی ذرات کوچک‌تر از ۱/۳ باشد؛ بنابراین انحراف معیار ذرات رسوبی (σ_g) برابر با ۱/۲۹ و ضریب یکنواختی رسوب (C_u) برابر با ۱/۴ محاسبه شد. آزمایش‌ها در دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه و عمق آب ۱۲ سانتی‌متر انجام شد. معیار زمان تعادل در این آزمایش‌ها همان معیاری است که Kumar et al. (1999) در تحقیقات خود در نظر گرفتند و برابر مدت زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد؛ بنابراین در تحقیق حاضر با انجام آزمایش ۱۲ ساعته برای هریک از حالت‌های تکیه‌گاه، این مدت



شکل ۳- انواع آرایش صفحات مستغرق

(a) آرایش دوردیفه زیگزاگی، (b) آرایش دوردیفه زیگزاگی مورب، (c) آرایش کاجی و (d) آرایش دوردیفه موازی

زیادی بر آن مؤثر هستند، از طرفی لحاظ کردن تأثیر همه پارامترها بر این پدیده امری مشکل و پیچیده است؛ بنابراین تعدادی از این پارامترها که تأثیر بیشتری بر آبشستگی دارند، در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مؤثر

تحلیل ابعادی

روش‌های متعددی در زمینه تحلیل ابعادی وجود دارد که در این مطالعه از تئوری باکینگهام استفاده شده است. آبشستگی یک پدیده بسیار پیچیده است که پارامترهای

که در آن $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL_a}}$ و $Re = \frac{L_a \rho U}{\mu}$ به ترتیب عدد فرود و عدد رینولدز جریان هستند. نظر به اینکه عدد رینولدز این آزمایش‌ها بیش از ۲۰۰۰ است، جریان در محدوده آشفته بوده و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد. در این پژوهش پارامترهای مربوط به سیال، پارامترهای هیدرولیکی و هندسه فلوم ثابت در نظر گرفته شد. همچنین طول و عرض تکیه‌گاه، شکل صفحات مستغرق، فاصله بین ردیف صفحات مستغرق و فاصله صفحات از تکیه‌گاه در تمامی آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط حاکم بر آزمایش‌های این پژوهش و حذف پارامترهای بی‌تأثیر که تأثیری بر پدیده آبشستگی ندارند، رابطه بالا به شکل معادله زیر ساده می‌شود:

$$\frac{d_s}{L_a} = F\left(\frac{L_s}{H}, \theta, A\right) \quad (۳)$$

نتایج و بحث

آزمایش‌ها در دو دسته آزمایش‌های شاهد و آزمایش‌ها با ابزار حفاظتی صفحات مستغرق انجام شدند که در ادامه نتایج هریک ارائه شد.

آزمایش‌های شاهد

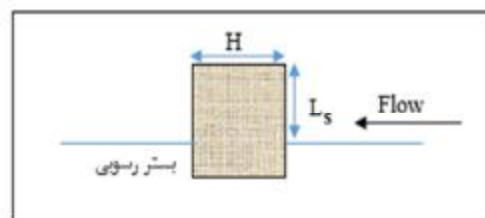
در ابتدای شروع آزمایش‌ها، چهار آزمایش شاهد با حضور تکیه‌گاه در چهار حالت مختلف و بدون وجود صفحات مستغرق صورت گرفت. آزمایش‌های این بخش به منظور مشاهده تأثیر شکل هندسی تکیه‌گاه بر عمق آبشستگی و برداشت عمق چاله آبشستگی، برای هریک از انواع مختلف تکیه‌گاه به کار گرفته شده در پژوهش، همچنین بررسی تأثیر عدم حضور صفحات مستغرق بر میزان آبشستگی موضعی چهار حالت موجود برای تکیه‌گاه پل انجام شد. پس از اتمام آزمایش‌ها حداکثر عمق آبشستگی برای هر تکیه‌گاه بدین شرح به دست آمد: حداکثر عمق آبشستگی نسبی تکیه‌گاه‌های مستطیلی ۹۰ درجه ۱/۰۱، حداکثر عمق آبشستگی تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه ۰/۴۳، تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه ۰/۴۱ و تکیه‌گاه مستطیلی باله‌های دایروی ۰/۳۶ به دست آمد. کلیه عمق‌های به دست آمده، نسبت به طول تکیه‌گاه بی‌تأثیر شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شکل هندسی تکیه‌گاه باعث

در کاهش یا کنترل آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل در حالت حضور صفحات مستغرق در این پژوهش عبارت‌اند از:

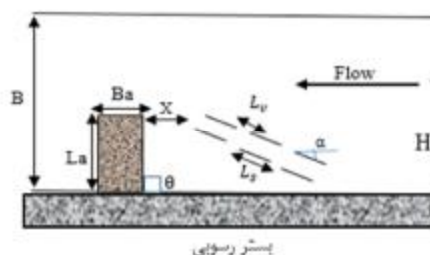
$$d_s = f(h, u, \rho, \mu, d_{50}, \rho_s, L_a, B_a, \theta, L_s, H, L_v, X, \beta, \alpha, A, B) \quad (۱)$$

در این معادله به ترتیب d_s حداکثر عمق آبشستگی، h عمق جریان، U سرعت جریان، ρ دانسیته جریان، μ لزجت دینامیکی سیال، g شتاب گرانش، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی، ρ_s دانسیته رسوبات بستر، L_a طول تکیه‌گاه، B_a عرض تکیه‌گاه، θ زاویه قرارگیری تکیه‌گاه نسبت به جریان، L_s طول صفحات مستغرق، H عرض صفحات مستغرق، L_v فاصله بین ردیف‌های صفحات مستغرق، X فاصله صفحات مستغرق از تکیه‌گاه، β پارامتر شکل صفحات مستغرق، α زاویه برخورد صفحات مستغرق با جریان، A آرایش صفحات مستغرق و B عرض کانال است. در شکل شماتیک ۴، طول و عرض صفحه مستغرق نشان داده شده است.

در شکل ۵ نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی نشان داده شده و به معرفی پارامترهای آزمایش پرداخته شده است.



شکل ۴- جانمایی طول و عرض صفحه مستغرق



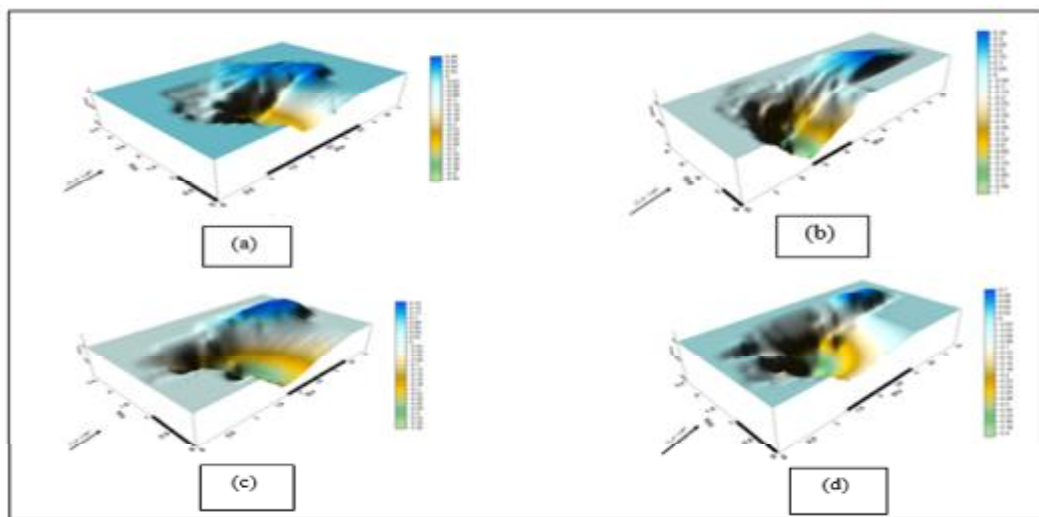
شکل ۵- نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی و معرفی پارامترهای آزمایش

با در نظر گرفتن (L_a, ρ, U) به عنوان متغیر تکراری داریم:

$$\frac{d_s}{L_a} = F\left(\frac{h}{L_a}, \frac{gL_a}{U^2}, \frac{\rho UL_a}{\mu}, \frac{d_{50}}{L_a}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{B_a}{L_a}, \frac{L_s}{L_a}, \frac{H}{L_a}, \theta, \frac{L_d}{L_a}, \frac{X}{L_a}, \frac{B}{L_a}, \beta, \alpha, A\right) \quad (۲)$$

درجه، جداسازی جریان بیشتر از تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایروی است و با تشکیل گرداب‌های ثانویه و جریان‌های چرخشی در پای تکیه‌گاه، آبشستگی بیشتری در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه رخ می‌دهد. در شکل ۶ نمای سه‌بعدی توپوگرافی بستر ایجادشده در اطراف هر چهار حالت مختلف تکیه‌گاه مستطیلی در دبی ثابت ۳۴ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. در همه شکل‌ها، جای‌گذاری تکیه‌گاه بر محورها به وسیله خطوط پرنرنگی تعیین شده تا بتوان تغییرات چاله آبشستگی را به‌وضوح در شکل دید. با توجه به شکل ۶ در ابتدا حفره آبشستگی در جلوی هر تکیه‌گاه تشکیل شده است که با دورشدن از تکیه‌گاه، رسوبات شسته‌شده از قسمت جلوی تکیه‌گاه به‌صورت تپه‌ای در پشت آن و مقداری از رسوبات در جلوی تکیه‌گاه انباشته شده است. همچنین مشاهده شد عمق آبشستگی در فاصله کمی از هر تکیه‌گاه، به حداکثر مقدار خود رسیده و با دورشدن از تکیه‌گاه مقدار آن کاهش پیدا می‌کند.

تغییر در الگوی جریان و کاهش چاله آبشستگی می‌شود. به‌گونه‌ای که با تغییر شکل هندسی تکیه‌گاه از حالت تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه به نیم‌دایره، عمق چاله آبشستگی ۶۴ درصد کاهش پیدا می‌کند و در اطراف تکیه‌گاه با باله‌های دایروی کوچک‌ترین حفره آبشستگی و در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه بزرگترین حفره آبشستگی تشکیل می‌شود. نتایج تحقیقات مشابه مانند Emamifar et al. (2016) نشان می‌دهد که علت اصلی تشکیل حفره آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه، ایجاد جریان‌های ثانویه بوده که در تکیه‌گاه با باله‌های دایروی به‌دلیل همسوس شدن جهت جریان با شکل هندسی آن، قدرت جریان‌های ثانویه نسبت به شکل‌های دیگر تکیه‌گاه ضعیف‌تر و در نتیجه ابعاد چاله آبشستگی این تکیه‌گاه نسبت به سایر تکیه‌گاه‌ها، کوچک‌تر تشکیل شده است. درحالی‌که تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه مانند سدی در برابر جریان عمل کرده و برخورد جریان به تکیه‌گاه موجب تشکیل گرداب و کف کفی در اطراف تکیه‌گاه می‌شود. همچنین در نزدیکی تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰



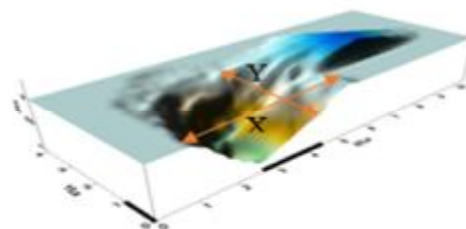
شکل ۶- (a) توپوگرافی بستر رسوبی آزمایش شاهد در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه، (b) تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، (c) تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایروی، (d) تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه

و سپس حاصل، تقسیم بر حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش شاهد و در نهایت ضرب در ۱۰۰ شد تا درصد تغییرات آبشستگی به‌دست آید. در این مرحله، برای هر یک از حالت‌های مختلف تکیه‌گاه اندازه طول و عرض چاله آبشستگی برای چهار آرایش مختلف صفحات مستغرق، در دو نسبت استغراق به‌صورت

آزمایش‌های حضور صفحات مستغرق

در این بخش نتایج و تحلیل‌های مربوط به آزمایش‌های حضور صفحات مستغرق ارائه و پس از آن تحلیل می‌شود. برای محاسبه میزان تغییرات آبشستگی تمامی آزمایش‌ها، حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش شاهد تفریق بر حداکثر عمق آبشستگی در حضور صفحات مستغرق شده

مجزا اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷ پارامترهای طول، عرض و عمق چاله آبشستگی به صورت شماتیک نشان داده شده است. در شکل ۷ حرف X بیانگر طول حفره آبشستگی و Y عرض حفره آبشستگی است.



شکل ۷- جانمایی طول و عرض حفره آبشستگی

تأثیر حضور صفحات بر آبشستگی اطراف تکیه‌گاه

مستطیلی ۹۰ درجه

جدول ۱ نتایج آزمایش‌های مربوط به حضور صفحات مستغرق در دو نسبت استغراق ۲ و ۳ را بیان شده است. همه اعداد نسبت به طول تکیه‌گاه (L_a) بی‌بعد شده‌اند. در آزمایش‌هایی که صفحات مستغرق تحت نسبت استغراق ۲ کار گذاشته شدند، برای تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، هر چهار آرایش، آبشستگی اطراف تکیه‌گاه را

نسبت به آزمایش شاهد کاهش دادند که از بین این چهار آرایش، آرایش کاجی ۳۷/۷ درصد آبشستگی را کاهش و بهترین عملکرد را از خود نشان داده و آرایش زیگزاگی با کاهش ۵ درصدی آبشستگی، ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داده است و در نسبت استغراق ۳ نیز کلیه آرایش‌ها آبشستگی را نسبت به آزمایش شاهد کاهش دادند و آرایش کاجی با ۴۱ درصد کاهش آبشستگی و آرایش دوردیفه موازی با ۱۶/۴ درصد کاهش آبشستگی نسبت به آزمایش شاهد، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر آرایش‌ها داشتند. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که صفحات مستغرق تحت آرایش کاجی، در زاویه ۲۰ درجه نسبت به جریان، در نسبت استغراق ۳ بهترین عملکرد را در کاهش میزان آبشستگی از بین سایر آرایش‌های موجود ارائه کردند. با مقایسه طول و عرض چاله آبشستگی برای هر آرایش، مشخص می‌شود که با افزایش عمق چاله آبشستگی، طول و عرض چاله نیز بزرگ‌تر شده و حفره وسیع‌تر و عمیق‌تری در اطراف تکیه‌گاه شکل می‌گیرد.

جدول ۱- مشخصات حفره آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه

نوع آرایش صفحات	نسبت استغراق	x/L_a	y/L_a	d_s/L_a آزمایش	R (%)
دوردیفه موازی	۲	۳/۳۳	۲/۵	۰/۸۵	۱۶/۴
دوردیفه زیگزاگی	۲	۳/۸۳	۳	۰/۹۶	۵
دوردیفه زیگزاگی مورب	۲	۳/۱۶	۲/۳۳	۰/۹	۱۱/۴۷
کاجی	۲	۲/۳۳	۱/۵	۰/۶۳	۳۷/۷
دوردیفه موازی	۳	۳/۱۶	۲/۳۳	۰/۸۵	۱۶/۴
دوردیفه زیگزاگی	۳	۳	۲	۰/۷۸	۲۲/۹۵
دوردیفه زیگزاگی مورب	۳	۲/۶۶	۱/۸۳	۰/۶۶	۳۴/۴۲
کاجی	۳	۲	۱/۳۳	۰/۶	۴۱

تأثیر حضور صفحات بر آبشستگی اطراف تکیه‌گاه

مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه

در این مرحله از سری آزمایش‌ها پژوهش حاضر، همانند مرحله قبل آزمایش‌ها، تأثیر حضور صفحات مستغرق در ۴ آرایش متفاوت و در دو نسبت استغراق ۲ و ۳، بر میزان آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه بررسی شد. در جدول ۲ نتایج کمی آزمایش‌های مربوط به ابعاد حفره آبشستگی اطراف

تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه در نسبت استغراق ۲ و ۳ بیان شده است. پس از اتمام آزمایش‌های این مرحله مشاهده شد در صورت استفاده از تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه، هر چهار آرایش مورد استفاده در اطراف این تکیه‌گاه، آبشستگی را تا حد زیادی نسبت به آزمایش شاهد افزایش دادند. در این مجموعه آزمایش‌ها، آرایش کاجی در نسبت

استغراق ۳ در مقایسه با سایر آزمایش‌های انجام‌شده بر این نوع تکیه‌گاه، عمق آبشستگی کمتری داشته و ۳/۸۴ درصد آبشستگی را نسبت به آزمایش شاهد افزایش داده است. در پایان آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت، آزمایش شاهد و عدم استفاده از ابزار حفاظتی صفحات مستغرق در آرایش‌های ارائه‌شده، حفره آبشستگی کوچک‌تری را در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۶۰ درجه تشکیل می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات حفره آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۶۰ درجه

نوع آرایش صفحات	نسبت استغراق	x/L_a	Y/L_a	آزمایش d_s/L_a	R(%)
دورديفه موازی	۲	۲/۵	۱/۶۸	۰/۶۸	-۵۷/۶۹
دورديفه زیگزآگی	۲	۳	۲	۰/۷۳	-۶۹/۲۳
دورديفه زیگزآگی مورب	۲	۲/۱۶	۱/۶۶	۰/۵۳	-۲۳/۰۷
کاجی	۲	۲/۳۳	۱/۶۷	۰/۶۳	-۴۶/۱۵
دورديفه موازی	۳	۲/۸۳	۲	۰/۷۱	-۶۵/۳۸
دورديفه زیگزآگی	۳	۲/۱۶	۱/۵	۰/۵۱	-۱۹/۲۳
دورديفه زیگزآگی مورب	۳	۲/۳۳	۱/۶۶	۰/۶۳	-۴۶/۱۵
کاجی	۳	۲	۱/۳۳	۰/۴۵	-۳/۸۴

تأثیر حضور صفحات بر آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۴۵ درجه

مشخصات حفره آبشستگی ایجادشده در اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای ۴۵ درجه، در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به داده‌های جدول ۳، برای تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۴۵ درجه، تنها، آرایش کاجی توانست آبشستگی را ۸ درصد نسبت به آزمایش شاهد تحت نسبت استغراق ۲ کاهش دهد و مابقی آرایش‌های موجود آبشستگی بیشتری نسبت به آزمایش شاهد در اطراف این تکیه‌گاه ایجاد کردند. تحت نسبت استغراق ۳، برای تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۴۵

درجه، تمام آرایش‌های به‌کار گرفته‌شده عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی در مقایسه با نسبت استغراق ۲ از خود نشان دادند، اما باز هم به‌جز آرایش کاجی، سایر آرایش‌ها نتوانستند عملکردی بهتر از آزمایش شاهد در کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه از خود نشان دهند و تنها آرایش کاجی توانست آبشستگی را در اطراف این تکیه‌گاه ۲۰ درصد نسبت به آزمایش شاهد کاهش دهد؛ بنابراین آرایش کاجی تحت نسبت استغراق ۳، مناسب‌ترین حالت از بین حالت‌های موجود برای کاهش آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۴۵ درجه تشخیص داده شد.

جدول ۳- مشخصات حفره آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریان ۴۵ درجه

نوع آرایش صفحات	نسبت استغراق	x/L_a	Y/L_a	آزمایش d_s/L_a	R (%)
دورديفه موازی	۲	۲/۳۳	۱/۶۶	۰/۵۸	-۴۰
دورديفه زیگزآگی	۲	۲/۳۳	۱/۵	۰/۵۵	-۳۲
دورديفه زیگزآگی مورب	۲	۲/۶۶	۲	۰/۶۵	-۵۶
کاجی	۲	۲	۱/۶۶	۰/۳۸	۸
دورديفه موازی	۳	۱/۸۳	۱/۵	۰/۴۳	-۴
دورديفه زیگزآگی	۳	۲	۱/۸۳	۰/۴۵	-۸
دورديفه زیگزآگی مورب	۳	۲	۱/۸۳	۰/۴۵	-۸
کاجی	۳	۱/۳۳	۱	۰/۳۳	۲۰

تأثیر حضور صفحات بر آبخستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایروی

در آخرین بخش از سری آزمایش‌های بررسی اثر صفحات مستغرق بر میزان آبخستگی اطراف حالت‌های مختلف تکیه‌گاه مستطیلی، تأثیر آرایش صفحات مستغرق بر میزان آبخستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی بررسی شد. جدول ۴ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به داده‌های جدول ۴، برای تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایروی همانند تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه، همه آرایش‌ها در نسبت استغراق ۲، آبخستگی را نسبت به آزمایش شاهد افزایش دادند و

آزمایش شاهد، عملکرد بهتری نسبت به صفحات مستغرق تحت نسبت استغراق ۲، در کاهش آبخستگی اطراف این تکیه‌گاه از خود نشان داد. در نسبت استغراق ۳ برای تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایروی، همه آرایش‌ها عملکرد بهتری در قیاس با نسبت استغراق ۲ داشتند، اما باز هم به‌جز آرایش کاجی، هیچ آرایشی نتوانست آبخستگی را نسبت به آزمایش شاهد کمتر کند و تنها، آرایش کاجی نتوانست آبخستگی را در اطراف این تکیه‌گاه نسبت به آزمایش شاهد ۱۸/۱۸ درصد کاهش دهد؛ بنابراین برای تکیه‌گاه مستطیلی با باله‌های دایروی آرایش کاجی با نسبت استغراق ۳، مناسب‌ترین آرایش از بین حالت‌های موجود تشخیص داده شد.

جدول ۴- مشخصات حفرة آبخستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی

نوع آرایش صفحات	نسبت استغراق	x/L_a	y/L_a	آزمایش d_s/L_a	R (%)
دورديفه موازی	۲	۲/۳۳	۱/۸۳	۰/۵۵	-۵۰
دورديفه زیگزآگی	۲	۲/۶۶	۲	۰/۶۳	-۷۲/۷۲
دورديفه زیگزآگی مورب	۲	۲	۱/۶۶	۰/۵	-۳۶/۳۶
کاجی	۲	۲/۱۶	۱/۶۶	۰/۳۳	-۴۵/۴۳
دورديفه موازی	۳	۲	۱/۶۶	۰/۵	-۳۶/۳۶
دورديفه زیگزآگی	۳	۱/۸۳	۱/۶۶	۰/۴۵	-۲۲/۷۲
دورديفه زیگزآگی مورب	۳	۱/۸۳	۱/۶۶	۰/۴۵	-۲۲/۷۲
کاجی	۳	۱/۵	۱	۰/۳	۱۸/۱۸

با توجه به داده‌های این سری از آزمایش‌ها، نسبت استغراق ۳ ($L/H=3$) در تمام حالات صفحات مستغرق و همچنین برای همه تکیه‌گاه‌ها عملکرد بهتری در مقایسه با نسبت استغراق ۲ ($L/H=2$) در کاهش آبخستگی اطراف تکیه‌گاه ارائه کرد. نصب صفحات مستغرق در جلوی تکیه‌گاه باعث گسیخته شدن جریان نزدیک‌شونده و در نتیجه کاهش قدرت جریان روبه پایین و گرداب نعل‌اسبی جلوی تکیه‌گاه می‌شود. در صورتی که نسبت ارتفاع روی بستر صفحه مستغرق نسبت به طول آن زیاد باشد، صفحات دارای ارتفاع کافی برای گسسته کردن جریان نزدیک‌شونده هستند (Lauchlan, 1991). با افزایش ارتفاع روی بستر صفحات مستغرق عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبخستگی در جلوی تکیه‌گاه افزایش می‌یابد. درباره آرایش قرارگیری صفحات نیز همان‌طور که بیان شد برای تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه هر چهار آرایش آبخستگی را نسبت به آزمایش شاهد کاهش دادند

و آرایش کاجی از بین آرایش‌های موجود بهترین عملکرد را از خود نشان داد. برای تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه و تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی نیز تنها آرایشی که نتوانست آبخستگی را نسبت به آزمایش شاهد کاهش دهد، آرایش کاجی بود. به دلیل نحوه قرارگرفتن صفحات در این آرایش، این مدل درواقع نوعی دیوار هدایت‌کننده به شمار می‌آید. این آرایش با انحراف خطوط جریان از جلوی تکیه‌گاه و ایجاد خطوط جریان ملایم و کاهش تلاطم جریان، باعث کاهش آبخستگی می‌شود؛ بنابراین آرایش کاجی بهترین آرایش برای کاهش آبخستگی اطراف سه حالت مختلف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، برای تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه و تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی تشخیص داده شد. همچنین با مقایسه طول و عرض چاله آبخستگی برای هر تکیه‌گاه، مشخص شد تنها عمق چاله آبخستگی کاهش پیدا نمی‌کند و با

اطراف همه تکیه‌گاه‌ها به جز تکیه‌گاه مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۶۰ درجه نسبت به جریان را در مقایسه با آزمایش شاهد هر تکیه‌گاه کاهش داد. به‌طور کلی تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد در اثر اختلاف فشار ایجاد شده در دو طرف صفحات مستغرق، جریان ثانویه‌ای در اطراف آن‌ها تشکیل می‌شود که این امر موجب کاهش قدرت عوامل فرسایشی یعنی جریان روبه پایین و گرداب نعل‌اسبی اطراف تکیه‌گاه پل می‌شود. همچنین به دلیل ایجاد فشار ثانویه، رسوبات در جهت عرضی جابه‌جا شده و در درون حفرة آبستنگی جلوی تکیه‌گاه ته‌نشین می‌شوند. مقایسه‌هایی که در این تحقیق انجام شد، نشانگر تأثیر شکل تکیه‌گاه بود؛ به گونه‌ای که با تغییر شکل تکیه‌گاه از مستطیلی ۹۰ درجه به مستطیلی با باله‌های دایروی آبستنگی ۶۴ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین با حضور ابزار حفاظتی صفحات مستغرق تحت آرایش کاجی در نسبت استغراق ۳، آبستنگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه ۴۱ درصد، مستطیلی دیواره باله‌ای خط جریانی ۴۵ درجه ۲۰ درصد و مستطیلی با باله‌های دایروی ۱۸/۱۸ درصد نسبت به آزمایش شاهد هر تکیه‌گاه کاهش پیدا کرد.

منابع

1. Alkhouly M. Shamaa M. Sarhan T. & Ezzeldin R. 2019. Local scour around bridge abutment, International Journal of Scientific and Engineering Research, 8(1): 1-10.
2. Dey S. & Barbhuiya, K. 2004. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds. Journal of Hydraulic ASCE, 130: 622-634.
3. Emamifar F. Masjedi A. & Heidarnajad M. 2016. Investigation of the effect of the geometric shape of the bridge abutment on the local scour around it in the river arch. journal of water science and engineering, 613. (In Persian).
4. Gharibzadeh A. 2012. Investigation of flow structure effect on local scour at bridge abutments, Master Thesis, Isfahan University of Technology, Department of Water Engineering, 96. (In Persian).
5. Ghorbani B. & Parsmehr M. 2015. The effect of narrowing on scouring of the bridge abutment and the use of submerged vanes to prevent and control it. Journal of Hydraulic Engineering, 10(4): 65-72. (In Persian).
6. Hashemi L. Kashefipour S. M. Ghomeshi

کاهش آن، طول و عرض حفرة نیز کمتر شده و چاله آبستنگی کوچک‌تری تشکیل می‌شود.

در پایان، نتایج پژوهش حاضر با نتایج کار سایر محققان مقایسه شد. Emamifar *et al.* (2016) آزمایش‌هایی برای تعیین تأثیر شکل هندسی تکیه‌گاه پل بر عمق آبستنگی در قوس ۱۸۰ درجه را در چهار دبی و چهار شکل تکیه‌گاه انجام دادند. این چهار تکیه‌گاه عبارت بودند از: تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه، تکیه‌گاه با دیواره عمودی بال‌دار با زاویه ۶۰ درجه، نیم‌دایره و مستطیلی لبه‌گرد. آن‌ها مشاهده کردند، حداکثر عمق آبستنگی در تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه اتفاق افتاد که این نتایج با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشته و در این تحقیق نیز تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه بیشترین عمق آبستنگی را دارا بود. Parchami *et al.* (2015) تحقیقی را با هدف بررسی تأثیر صفحات مستغرق بر کاهش آبستنگی اطراف پایه پل انجام دادند. ایشان آرایشی با عنوان آرایش نوک‌تیز و شبیه به آرایش کاجی در تحقیق خود ابداع و در پایان آزمایش‌ها مشاهده کردند، کمترین عمق آبستنگی مربوط به حالت صفحات مستغرق تخت با آرایش نوک‌تیز که شبیه به آرایش کاجی ارائه شده در این پژوهش است، بود. مقایسه سایر نتایج به دلیل تفاوت در پارامترهای متغیر شکل تکیه‌گاه، آرایش قرارگیری صفحات مستغرق، دبی و نیز زمان تعادل آزمایش‌های انجام شده امکان‌پذیر نیست.

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، ارائه راهکار به منظور کاهش آبستنگی اطراف تکیه‌گاه در دبی ثابت ۳۴ لیتر بر ثانیه است؛ برای رسیدن به این هدف آزمایش‌ها در دو مرحله انجام شدند که در مرحله اول تأثیر شکل تکیه‌گاه و در مرحله دوم تأثیر صفحات مستغرق به عنوان یک اقدام حفاظتی بررسی شد. در سری اول آزمایش‌ها چهار حالت مختلف تکیه‌گاه مستطیلی بررسی شد که از بین این حالات، تکیه‌گاه مستطیلی ۹۰ درجه بیشترین مقدار آبستنگی و تکیه‌گاه مستطیلی با دیواره‌های دایروی کمترین عمق چاله آبستنگی را داشتند. در آزمایش‌های صفحات مستغرق، از دو نسبت استغراق ۲ و ۳ و چهار آرایش متفاوت صفحات مستغرق استفاده شد و مشاهده شد آرایش کاجی تحت نسبت استغراق ۳، آبستنگی

18. Osroush M. Hosseini S.A. and Kamanbedast A.A. (2020). Evaluation and Comparison of the Slots and Collars Performance in Reducing Scouring around Bridge Abutments, Amirkabir. Journal of Civil Engineering, 52(7): 1637-1650.
19. Parchami L. Asghari Pari S. A. and Shafaei Bajestan M. 2015. Experimental investigation of submerged vanes shape effect on bridge pier scouring, Journal of water and soil Science, 27(1): 30-41. (In Persian).
20. Shafaei Bajestan M. 2016. Hydraulic of sediment transport, 4nd ed, Shahid Chamran University of Ahvaz Publication. (In Persian).
21. Zolghadr M & Shafaei Bajestan M. 2017. Effect of six-legged elements installation arrangement on bed topography around wing-wall abutments, Journal of Water Resources Engineering, 11(36): 47-58. (In Persian).
- M. & Bahrami Yarahmadi M. 2023. 'Experimental investigation of the effect of hydrographs with different skewness and duration time on temporal variations of scour around a single cylindrical pier', Journal of Hydraulics.
7. Johnson P. A. Hey R. D. Tessier M. & Rosgen D. L. 2001. Use of vane for control of scour at vertical wall abutments. Journal of Hydraulic Engineering, 127(9): 772-778.
8. Karimi M. 2012. Use of effect of parallel walls to reduce scour of abutment in compound channels, Master Thesis, Shahid chamran University, 117 p (In Persian).
9. Karimi M. Qaderi K. Rahim Pour M. & Ahmadi M. M. 2021. Laboratory investigation of effect of flat submerged vanes on scour at bridge piers group and abutment. Journal of Civil Engineering Amirkabir, 53(7): 25-46. (In Persian).
10. Khademi K. & Shafaei Bajestan M. 2015. Experimental investigation of flow pattern and scour around the bridge abutment in the presence of submerged vanes connected to it, Journal of Irrigation and water engineering, 5(17): 56-66 (In Persian).
11. Khademi K. Shafaei Bajestan M & Ghamshi M. 2012. Investigation of the Effect of longitudinal and lateral space of submerged vanes on local scour in abutment of bridge, PHD Thesis, Shahid chamran University, (In Persian).
12. Kumar V. Ranga Raju K. G. & Vittal N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. Journal of Hydraulic Engineering, 125(12): 1302-1305.
13. Lauchlan C. S. 1991. Pier scour countermeasures, PhD.Thesis, University of Auckland, New Zealand, 299-316.
14. Melville B. W. 1997. Pier and abutment scour. Journal Hydraulic Engineering ASCE, 132(2): 125-136.
15. Montaseri H. Godsian M & Salehi Neyshabour A. 2021. Experimental study on design parameters of submerged vanes for sediment control at lateral intake in a 180-degree bend. Journal of Modares Civil Engineering, 20(1): 161-176. (In Persian).
16. Nazeri A. & Emamgholizadeh S. 2021. 'Experimental Investigation of the Effect of Symmetric T-shaped Spur dyke on Bridge Abutment Scour in Compound Channel', Iranian Water Researches Journal, 15(2): 21-29.
17. Nekoufar K. & Haljian A. 2023. The Effect of Submerged Plates on the Square Bridge Pier scours Using Software SSIIM. Journal of Water Engineering, 10(2).