

بررسی اثر تعداد، موقعیت و زاویه صفحات مستغرق در محل تکیه‌گاه پل بر عمق آبشستگی

خیرالله خادمی^۱ و محمود شفاعی بجستان^{۲*}

چکیده

از مهم‌ترین عامل‌های تخریب پل‌ها، آبشستگی بستر رودخانه در محدوده پل است که شامل آبشستگی به دلیل تنگ‌شدگی، آبشستگی پایه پل و آبشستگی اطراف تکیه‌گاه است. آبشستگی اطراف تکیه‌گاه یکی از دلایل‌های تخریب بسیاری از پل‌ها گزارش شده است. از این‌رو تلاش برای معرفی روش‌های اجرایی و اقتصادی برای کاهش عمق آبشستگی در پل‌های موجود ادامه دارد. در این پژوهش گزینه‌های مختلفی شامل تعداد، موقعیت قرارگیری و زاویه نصب صفحه در محل تکیه‌گاه پل و تأثیر آن بر آبشستگی بستر رودخانه مطالعه شد. این گزینه‌ها در شرایط هیدرولیکی یکسان و بدون صفحه نیز بررسی و از مقایسه آن‌ها بهترین گزینه انتخاب و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که صفحه مستغرق باعث کاهش عمق آبشستگی در محل تکیه‌گاه تا ۸۹ درصد می‌شود. همچنین مشخص شد که صفحه متصل به گوشه بالادست تکیه‌گاه با زاویه ۴۰ درجه بیشترین تأثیر را دارد. نتایج نشان داد که نصب صفحه به طور مؤثری سبب دور شدن حفره آبشستگی از پای تکیه‌گاه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، پل، تکیه‌گاه، رودخانه، صفحه مستغرق.

ارجاع: خادمی خ. و شفاعی بجستان م. ۱۳۹۳. بررسی اثر تعداد، موقعیت و زاویه صفحات مستغرق در محل تکیه‌گاه پل بر عمق آبشستگی. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵):۱۴۵-۱۵۳.

۱- دانشجوی سابق دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهیدچمران اهواز.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهیدچمران اهواز.

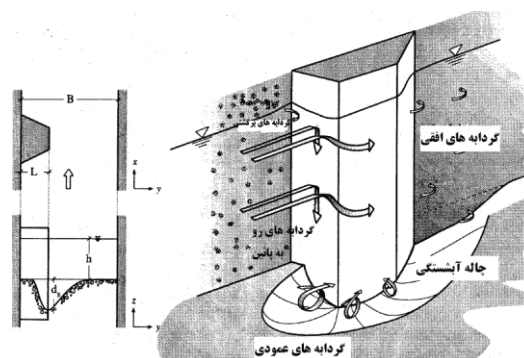
* نویسنده مسئول: m_shafaai@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۲۳

مقدمه

تکیه‌گاه پل‌ها یک پیشروی در عرض رودخانه است و باعث می‌شود تا خطوط جریان به محض برخورد با این مانع از مرزهای خود جدا شده و گردابه‌های افقی و عمودی تشکیل شوند. شکل ۱ این وضعیت را در شرایطی که تکیه‌گاه کوتاه در کناره اصلی رودخانه قرار دارد نشان می‌دهند.



شکل ۱- الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه باله‌ای شکل کوتاه واقع در کناره کانال اصلی (ملویل و همکاران، ۲۰۰۶)

همان‌گونه که از شکل ۱ پیداست، خطوط جریان که به طور تقریبی موازی در حرکت بودند با تکیه‌گاه تغییر مسیر داده و باعث پیدایش گردابه‌های زیادی می‌شوند که می‌توان به دو دسته کلی گردابه‌های افقی و عمودی تقسیم کرد. گردابه‌های افقی در بالادست و پایین‌دست و نیز گردابه‌های عمودی در اطراف و به خصوص نوک دماغه تکیه‌گاه به وجود می‌آیند. گردابه‌های عمودی رو به پایین حرکت کرده و با رسیدن به بستر رودخانه به سمت بالا منعکس می‌شود و با برخورد به سرعت طولی جریان به پایین‌دست در جهت جریان منحرف می‌شوند. این گردابه‌ها در صورت داشتن انرژی جنبشی کافی می‌توانند ذرات رسوبی بستر را از جا کنده و با جریان اصلی رودخانه به جلو برانند. این ذرات ممکن است در فاصله اندکی پایین‌دست تکیه‌گاه، جایی که نیروهای هیدرودینامیکی برای حرکت ذره غالب نیستند، نهشته شوند و تشکیل تپه رسوبی یا پشته رسوبی را دهند. تداوم این شرایط منجر به پیدایش حفره یا چاله یا گودالی درست در اطراف دماغه تکیه‌گاه می‌شود که می‌تواند در نهایت باعث تخریب تکیه‌گاه و پل شود. از آنجا که به طور معمول نرخ آبستگ زیاد است، عمق چاله فرسایشی ممکن است در زمان عبور یک سیلاب به چندین متر هم برسد. این نرخ

رشد آبستگی در پل‌هایی که تکیه‌گاه بیش‌از حد به درون رودخانه پیشروی دارند بیشتر شده و ممکن است با آبستگی ناشی از تنگ‌شدگی عرض رودخانه، شدید شود. روش‌های زیادی تاکنون برای کاهش و یا حذف چاله فرسایشی در پل‌های موجود در آزمایشگاه و در عمل مطالعه شده‌اند (لاگاس و همکاران، ۲۰۰۱ و لوچلان، ۱۹۹۹). این روش‌ها را به طور کلی به دو دسته پوششی و غیرپوششی دسته‌بندی می‌کنند. در روش‌های پوششی ممکن است از مصالح رسوبی درشت دانه و یا ریپرپ (ملویل و همکاران، ۲۰۰۶؛ مورالس و همکاران، ۲۰۰۸ و منصوری و شفاعی بجستان، ۱۳۹۰)، کیسه حاوی ماسه یا ژئوبگ (کرکوت و همکاران، ۲۰۰۶)، بلوک بتنی به هم بافته شده (پرزوفسکی، ۱۹۹۵) استفاده شود. در روش‌های دوم با تغییراتی در الگوی جریان سعی می‌شود تا از میزان قدرت گردابه‌های عمودی کم و یا آن‌ها را از محدوده اطراف تکیه‌گاه دور کرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از دیوار موازی (لی و همکاران، ۲۰۰۶)، سرریز مستغرق (دریک، ۱۹۹۶) و صفحه‌ی مستغرق برای کاهش عمق آبستگی اطراف پایه پل (قربانی و کلز، ۲۰۰۸) اشاره کرد. در خصوص کاربرد صفحه (غیرمستغرق) برای تکیه‌گاه پل می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی جانسون و همکاران (۲۰۰۱) اشاره کرد. در این مطالعه تکیه‌گاه عمودی در منطقه سیلاب‌دشت رودخانه قرار داشت و بستر سیلاب‌دشت نیز صلب اختیار شده بود. آن‌ها گزینه‌های مختلفی از قرارگیری صفحات درون کانال اصلی را بررسی کردند (شکل ۲). آزمایش‌ها تحت موقعیت‌های مختلف صفحات، تعداد صفحات و ارتفاع صفحات انجام شد. در مجموع، تعداد ۳۷ آزمایش در دبی لبریز کانال اصلی با تعداد صفحات مختلف، فاصله قرارگیری صفحات و زاویه صفحات انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان کاهش عمق آبستگی برای زوایای ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه به‌میزان ۶۲، ۵۸ و ۹۰ درصد نسبت به حالت بدون صفحات است. آن‌ها زاویه بهینه بین ۲۵ تا ۳۰ درجه را پیشنهاد دادند. بارکدل (۲۰۰۳) در شرحی بر مقاله جانسون و همکاران (۲۰۰۱) با بررسی داده‌های جانسون و همکاران (۲۰۰۱) نتیجه گرفت که چاله آبستگی هرچند که جابجا می‌شود ولی عمق آن افزایش زیادی، از ۰/۵ سانتی‌متر در حالت بدون صفحه به ۱/۵ سانتی‌متر با وجود صفحه، داشته است. با توجه به مطالب فوق، هدف

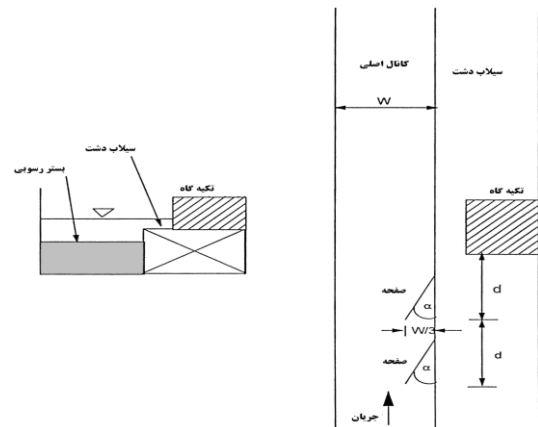
اندازه متوسط ۰/۵ میلی متر طوری انتخاب شدند که در شرایط دبی و عمق جریان مورد نظر در آستانه حرکت قرار نگیرند. به عبارتی تمام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال ($V/V_c \leq 0.95$) که V سرعت متوسط جریان و V_c سرعت در آستانه حرکت ذرات رسوبی بستر است. جدول ۱ متغیرهای استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود در تمام آزمایش‌ها مقدار عدد رینولدز در محدوده‌ی ۲۲۰۰ تا ۳۲۰۰ بوده نشان می‌دهد که شرایط متلاطم در آزمایش‌ها حاکم بوده‌است و مقدار عدد رینولدز برشی در محدوده بستر بینابین قرار دارد. دلیل انجام آزمایش ۲ ساعته به خاطر این بود که هدف اصلی این مطالعه مقایسه‌ی عملکرد صفحه در کاهش عمق آبشستگی است و نه استخراج رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمق آبشستگی. البته در انتها و پس از مشخص شدن وضعیت بهینه قرارگیری صفحه، آزمایش‌های طولانی مدت با شرایط بهینه نیز انجام شده‌است تا نحوه‌ی عملکرد آن مشخص شود. در طول آزمایش‌های شاهد عمق آبشستگی از طریق عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد و با استفاده از داده‌های حاصل نمودار تغییرات زمانی عمق آبشستگی در مقابل زمان ترسیم شد.

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای این پژوهش

دبی جریان (lit/sec)	عدد فرود	عدد رینولدز	عدد رینولدز برشی
۲۸	۰/۱۵	۲۲۰۰	۴۶
۳۲	۰/۱۸	۲۴۵۰	۴۶
۳۶	۰/۲۰	۲۸۰۰	۴۶
۴۰	۰/۲۲	۳۲۰۰	۴۶

برنامه‌ی آزمایش‌های این پژوهش با دو سری آزمایش‌های شاهد با زمان هر آزمایش ۱۳ و ۲ ساعت و بدون استفاده از صفحه متصل به تکیه‌گاه برای چهار شرایط مختلف آزمایش‌های اصلی با نصب صفحه در موقعیت‌های مختلف (آزمایش‌های سری A نشان داده شده در شکل ۵)، تعداد ۴ آزمایش با تعداد صفحات مختلف (آزمایش‌های سری B نشان داده شده در شکل ۶) و زوایای مختلف (آزمایش‌های سری C نشان داده شده در شکل ۷) انجام شد. روش کار به این صورت بود که با توجه به توصیه‌های ادگار (۲۰۱۰) صفحه‌های مستطیلی ساده از جنس ورق

اصلی این پژوهش بررسی میزان تأثیر صفحات مستغرق و استخراج معیارهای لازم برای طراحی آن‌ها در محل تکیه‌گاه کوتاه مستطیل شکل پل برای کاهش عمق چاله فرسایشی اطراف آن است.



شکل ۲- نحوه قرارگیری صفحات (غیرمستغرق) در کانال اصلی در مطالعات جانسون و همکاران (۲۰۰۱)

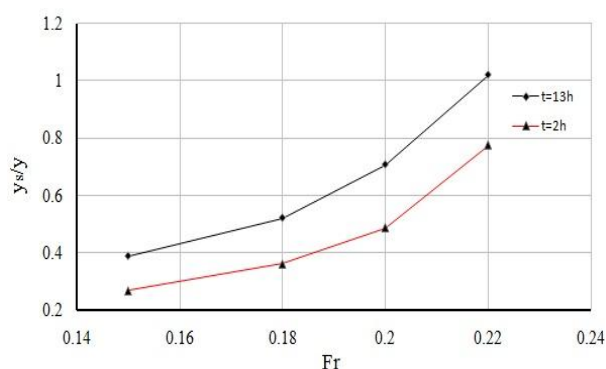
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در فلومی به ابعاد طولی ۸ متر، عرض یک متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر با شیب طولی حدود ۰/۰۰۵ و در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (شکل ۳). در ابتدای فلوم حوضچه برای آرام کردن جریان قرار دارد و جریان آب پس از خروج از فلوم به حوضچه‌ی بتنی که در انتهای آن سرریز مثلثی ۵۳ درجه برای اندازه‌گیری دبی نصب شده‌است وارد می‌شود.



شکل ۳- تصویری از فلوم مورد استفاده در این پژوهش

در این پژوهش از یک پایه کوتاه مستطیل شکل (عمودی) که در فاصله ۴ متری از ابتدای فلوم در کناره‌ی سمت چپ فلوم نصب شده بود استفاده شد. طول تکیه‌گاه بیست سانتی‌متر بود که با توجه به نسبت عرض به طول برابر ۰/۶، "تکیه‌گاه کوتاه" محسوب می‌شود. رسوبات بستر از ماسه طبیعی دارای دانه بندی یکنواخت ($\sigma_g = 1/2$) با



شکل ۴- عمق آبشستگی در نقطه‌ی مبنا در مقابل عدد فرود در دو زمان ۲ و ۱۳ ساعت

نتایج آزمایش‌های اصلی

تعیین موقعیت بهینه نصب صفحات

برای تعیین موقعیت بهینه برای نصب صفحات چهار گزینه مختلف، نشان داده شده در شکل ۵، بررسی شد. در این گزینه‌ها نسبت فاصله‌ی صفحه تا دیواره کانال به طول تکیه‌گاه با در نظر گرفتن سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و همچنین نسبت فاصله‌ی اولین صفحه تا تکیه‌گاه به طول تکیه‌گاه نیز با در نظر گرفتن دو مقدار ۲ و ۲/۵ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول y_{sm} عبارت است از حداکثر عمق آبشستگی مشاهده شده در بستر رودخانه که به طور معمول در آزمایش‌های بدون صفحه در محل گوشه بالادست تکیه‌گاه و در آزمایش‌های با صفحه در گوشه صفحه اتفاق می‌افتد و y_{sv} عمق آبشستگی در محل گوشه بالادست تکیه‌گاه است که به‌عنوان نقطه مبنا نام‌گذاری شده است. همچنین P_r عملکرد صفحات را نشان می‌دهد و منظور از عملکرد میزان درصد کاهش عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه (نقطه مبنا) در آزمایش با صفحات نسبت به آزمایش بدون صفحه است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مشخص است که هر چه فاصله‌ی صفحات تا دیواره‌ی کانال کمتر باشد، صفحات در کاهش آبشستگی نقش مؤثرتری را ایفا می‌کنند. در آزمایش A4 این نکته آشکار شد که هرچه فاصله‌ی اولین صفحه تا تکیه‌گاه کمتر باشد، بر عملکرد صفحات افزوده می‌شود.

مشاهده صفحات در هنگام آزمایش این نکته را مشخص کرد که صفحه‌ی سوم یا به عبارتی صفحه‌ی مجاور تکیه‌گاه بیشترین تأثیر را در کاهش عمق آبشستگی (با حداکثر ۴۴ درصد کاهش) ایفا می‌کند. حداکثر عمق چاله

گالوانیزه به ضخامت یک میلی‌متر، به ارتفاع معادل یک سوم عمق آب و با طولی برابر ۲ برابر ارتفاع آن انتخاب شد. سپس صفحه در موقعیت‌های مختلف و زوایای مختلف قرار داده شد و آزمایش مشابه شرایطی که قبلاً توضیح داده شد انجام گرفت. در تمام آزمایش‌ها عمق آب ثابت و برابر ۱۵ سانتی‌متر بوده است. در انتهای هر آزمایش جریان ورودی به فلوم قطع و با باز کردن تدریجی دریچه پایین‌دست اجازه داده شد تا فلوم زهکشی کامل شود و آنگاه با استفاده از متر لیزری با دقت ± 0.01 میلی‌متر رقوم نقاط مختلف بستر در اطراف تکیه‌گاه تا مکانی که بستر فرسایش و یا رسوب‌گذاری شده بود برداشت شد. برای دقت در اندازه‌گیری پستی و بلندی بستر، از شبکه با ابعاد ۳ در ۳ سانتی‌متر و در اطراف تکیه‌گاه با ابعاد کوچک‌تر استفاده شد. نتایج توسط نرم‌افزار Surfer ترسیم و داده‌های مورد نیاز از آن استخراج می‌شوند.

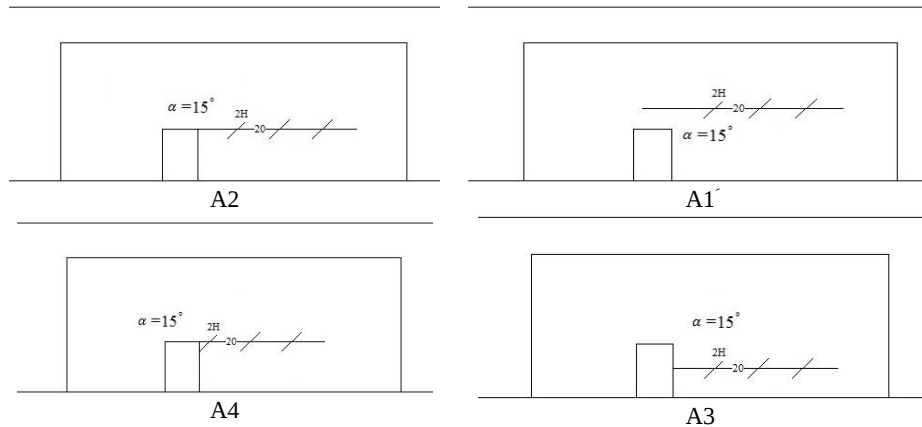
نتایج و بحث

آزمایش‌های شاهد

با استفاده از نتایج آزمایش‌های شاهد مشخص شد که بیشترین عمق آبشستگی در عدد فرود ۰/۲۲ اتفاق می‌افتد از این رو آزمایش‌های اصلی با عدد فرود ۰/۲۲ انجام شد. همچنین رقوم بستر در انتهای هر آزمایش برداشت و توپوگرافی^۱ بستر ترسیم شد و ملاحظه شد که الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری و توسعه آن شبیه به هم بوده با این تفاوت که عمق آبشستگی در زمان ۲ ساعت کمتر است. برای این که از میزان کاهش آن اطلاع حاصل شود شکل ۴ که تغییرات عمق آبشستگی بی بعد را در مقابل عدد فرود در آزمایش‌های ۲ و ۱۳ ساعته نشان می‌دهد ترسیم شد. این شکل نشان می‌دهد که عمق آبشستگی بی‌بعد در آزمایش‌های ۲ ساعته ۰/۱۸ تا ۰/۲۲ و به طور متوسط ۰/۲۰ کمتر است. یا به عبارتی عمق آبشستگی زمان ۲ ساعته ۸۰ درصد عمق آبشستگی زمان ۱۳ ساعته است.

مشابهی پیروی می‌کردند. در ابتدای این صفحات چاله‌ای با ابعاد کم تشکیل شده و رسوبات چاله‌ی شکل گرفته به انتهای همان صفحه منتقل می‌شدند.

بجز آزمایش A4 که به پای صفحه منتقل شده بود، در گوشه بالادست تکیه‌گاه تشکیل شده است. پس از اتمام زمان آزمایش چاله‌ی آبشستگی صفحه‌ی مجاور تکیه‌گاه را نیز در برگرفته بود. صفحات اول و دوم از ساز و کار



شکل ۵- گزینه‌های بررسی شده مربوط به تعیین موقعیت بهینه نصب صفحات

نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به تکیه‌گاه قرار گرفت و میزان کاهش عمق آبشستگی به ۴۶ درصد رسید. در سه آزمایش B1 تا B3، الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری مانند آزمایش‌های A1 تا A3 بود و حداکثر عمق آبشستگی در پای تکیه‌گاه اتفاق افتاد. اما در آزمایش B4 وضعیت مانند آزمایش A4 تغییر کرده و صفحات نقش دورکننده حداکثر عمق چاله‌ی آبشستگی را از محل تکیه‌گاه ایفا کرده‌اند. محل حداکثر عمق آبشستگی از نقطه‌ی مبنا به پای صفحه منتقل شد. دیده می‌شود که تک صفحه متصل به تکیه‌گاه بیشترین تأثیر را دارد. نتایج آزمایش‌های A و B نشان داد که صفحات مستغرق در این جا فقط باعث انحراف خطوط جریان شده و از برخورد مستقیم خطوط جریان لایه‌های پایین به تکیه‌گاه جلوگیری می‌کنند. در نتیجه عملاً حفره آبشستگی در نقطه مبنا کاهش می‌یابد و با مقداری کاهش به نوک دماغه صفحه منتقل می‌شود.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌ها مربوط به تعیین تعداد بهینه صفحات

نام آزمایش	$y_{sm}(mm)$	$y_{sv}(mm)$	موقعیت y_{sm}	Pr درصد
B1	۱۱۵	۱۱۵	ن.م	۱۱
B2	۱۱۴	۱۱۴	ن.م	۱۱
B3	۱۱۰	۱۱۰	ن.م	۱۴
B4	۷۹	۶۹	پ.ص	۴۶

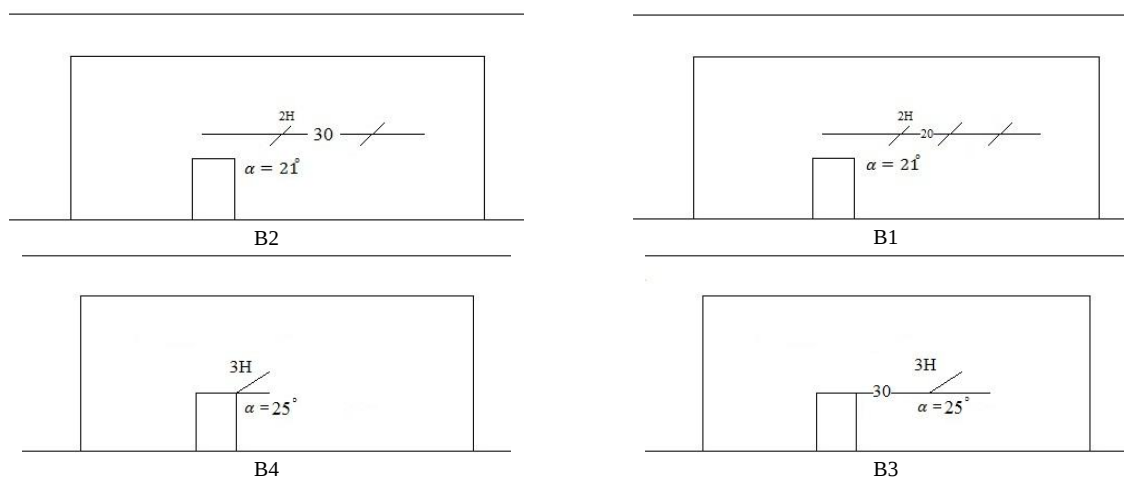
جدول ۲- نتایج آزمایش‌های مربوط به تعیین موقعیت بهینه نصب صفحات (عدد فرود ۰/۲۲)

نام آزمایش	$y_{sm}(mm)$	$y_{sv}(mm)$	موقعیت y_{sm}	Pr درصد
A1	۱۱۰	۱۱۰	ن.م	۱۴
A2	۱۰۹	۱۰۹	ن.م	۱۵
A3	۱۰۳	۱۰۳	ن.م	۲۰
A4	۸۳	۷۲	پ.ص	۴۴

ن.م. نقطه مبنا
پ.ص. پای صفحه

تعیین تعداد بهینه صفحات

برای تعیین تعداد بهینه صفحات سه گزینه مختلف، نشان داده شده در شکل ۶ بررسی شد. یک گزینه تکمیلی هم برای کنترل موقعیت بهینه که در مرحله قبل بررسی شده، انجام گرفت. در این مرحله ابتدا در گزینه‌های B1 تا B3 تأثیر تعداد صفحات به ترتیب با در نظر گرفتن سه مقدار ۱، ۲ و ۳ صفحه بررسی شد، ضمن این که پارامترهای دیگری مانند فاصله‌ی بین صفحات و فاصله‌ی اولین صفحه تا تکیه‌گاه نیز به عنوان پارامترهای فرعی بررسی شدند. نتایج این مرحله نشان داد (جدول ۳) که تعداد صفحات تأثیر چندانی در عمل کرد صفحات ندارد، صفحه‌ی مجاور تکیه‌گاه نقش اصلی را در کاهش آبشستگی بر عهده داشته و صفحات دیگر به طور تقریبی بی‌تأثیر بودند. در آزمایش B4 وضعیت بهینه مرحله اول و دوم آزمایش‌ها مورد بررسی و کنترل قرار گرفت. در این آزمایش تک‌صفحه در



شکل ۶- آزمایش‌ها مربوط به تعیین تعداد بهینه صفحات

منطقه‌های بیشتری از محدوده‌ی تکیه‌گاه تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته اند. از این رو زاویه مناسب نصب صفحه‌ی مستغرق به لبه بالادست تکیه‌گاه برابر ۴۰ درجه توصیه می‌شود. در مطالعات جانسون و همکاران (۲۰۰۱) برای صفحه‌ی متصل به سواحل کانال اصلی برای کاهش عمق آبشستگی بستر کانال اصلی در محدوده‌ی تکیه‌گاه، این زاویه ۲۵ تا ۳۰ درجه توصیه شده‌است. توضیح این که تکیه‌گاه مورد آزمایش آن‌ها در سیلاب‌دشت، با بستر صلب، قرار داشت ولی بستر کانال اصلی ماسه‌ای بود. آزمایش C5 جهت اطمینان از روند نتایج تکرار شد که نتیجه به دست آمده در تکرار، صحت نتایج را تأیید می‌کند.

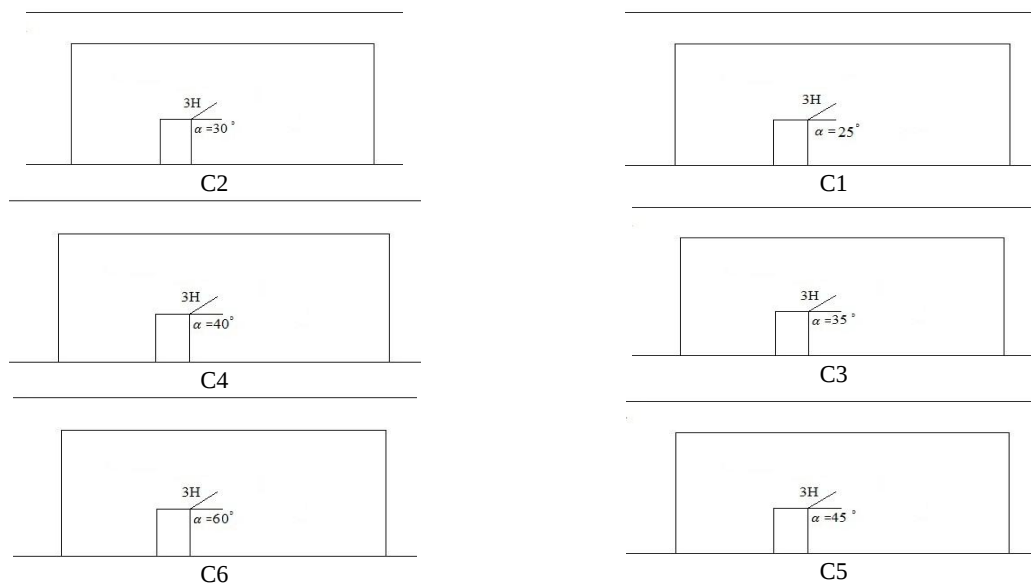
جدول ۴- نتایج آزمایش‌های مربوط به تعیین زاویه بهینه نصب صفحات

نام آزمایش	$y_{sm}(mm)$	$y_{ss}(mm)$	موقعیت y_{sm}	Pr درصد
C1(B4)	۷۹	۶۹	پ.ص	۴۶
C2	۸۳	۶۲	پ.ص	۵۲
C3	۹۵	۲۴	پ.ص	۸۱
C4	۹۶	۱۴	پ.ص	۸۹
C5	۱۰۲	۳۰	پ.ص	۷۷
۱C5	۹۸	۲۸	پ.ص	۷۸
C6	۱۱۲	۱۶	پ.ص	۸۸

تعیین زاویه بهینه نصب صفحات

برای تعیین زاویه بهینه نصب صفحات علاوه بر گزینه B4 که در مرحله قبلی انجام شده بود، شش گزینه، نشان داده شده در شکل ۷، نیز بررسی شد. نتایج نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

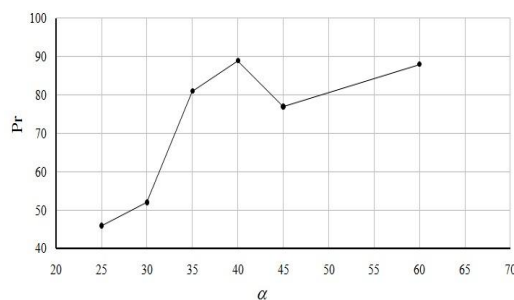
مطابق جدول ۴ در تمامی شش گزینه، حداکثر عمق آبشستگی از نقطه‌ی مبنا به پای صفحه منتقل شد. نتایج این مرحله نشان می‌دهد که زاویه نصب صفحات، تأثیر فراوانی در عمل‌کرد صفحات ایفا می‌کند. تغییر زاویه از ۲۵ تا ۴۰ درجه، تأثیر زیادی در افزایش میزان عمل‌کرد صفحه دارد و پس از آن به طور تقریبی روند مذکور تغییر کرده و حالت مشخصی را دنبال نمی‌کند، برای درک بهتر این نکته شکل ۸ ترسیم شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که با افزایش زاویه، حداکثر عمق آبشستگی در نقطه‌ی مبنا کاهش می‌یابد و دلیل آن هم دور شدن بیشتر جریان از تکیه‌گاه است. البته نرخ تغییرات از زاویه ۲۵ تا ۳۰ درجه کمتر از نرخ تغییرات از زاویه ۳۵ تا ۴۰ درجه است. دوباره شیب منحنی از زاویه ۳۵ تا ۴۰ درجه کمتر می‌شود. در زاویه ۴۰ درجه (گزینه C4) بیشترین کاهش عمق آبشستگی به میزان حدود ۸۹ درصد اتفاق افتاده است و از آن به بعد تأثیر افزایش زاویه باعث کاهش بیشتر عمق آبشستگی نمی‌شود و حتی در زاویه ۴۵ درجه کمی هم افزایش داشته است. دلیل آنهم انحراف ناگهانی خطوط جریان لایه‌های پایین و در نتیجه افزایش قدرت جریان‌های گردابی می‌تواند باشد. با مقایسه توپوگرافی بستر در زاویه ۶۰ درجه با آزمایش شاهد دیده شد که هر چند عمق آبشستگی در محل تکیه‌گاه کاهش داشته ولی



شکل ۷- آزمایش‌ها مربوط به تعیین زاویه بهینه نصب صفحات

جدول ۵- وضعیت بهینه نصب صفحات مستغرق در شرایط مختلف جریان و زمان ۱۳ ساعته

نام آزمایش	$y_{sm}(mm)$	$y_{sv}(mm)$	موقعیت y_{sm}	Pr درصد
۱	۵۹	۳	پ.ص	۹۵
۲	۷۸	۱۰	پ.ص	۸۷
۳	۱۱۰	۳۰	پ.ص	۷۲
۴	۱۴۳	۶۰	پ.ص	۶۱



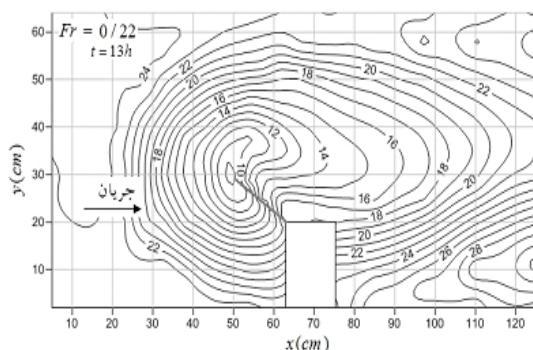
شکل ۸- تأثیر زاویه نصب صفحات مستغرق در کاهش عمق آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل

برای بررسی توسعه دامنه تأثیر صفحه بر الگوی فرسایش و رسوب در وضعیت بهینه نصب صفحه برای آزمایش ۱۳ نشان داده شده است. از مقایسه این شکل و توپوگرافی بستر مربوط به آزمایش شاهد ۱۳ ساعته (شکل ۹- ب)، دیده شد که دامنه تأثیر به دلیل وجود صفحه مستغرق ناچیز است و دلیل اصلی آن هم این است که صرفاً لایه‌های زیرین آب توسط صفحه تحت تأثیر قرار گرفته است در حالیکه اگر از صفحات غیرمستغرق استفاده می‌شد، به دلیل تنگ‌شدگی عرض کلی توسعه آبشستگی بیشتر به سمت مرکز منتقل می‌شد و باعث تشدید عمق آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی در لبه صفحه می‌شد. در آزمایش‌های جانسون و همکاران (۲۰۰۱) که از صفحه (غیرمستغرق) متصل به ساحل استفاده شده بود عمق آبشستگی از محدوده تکیه‌گاه دور شده بود ولی عمق آبشستگی در لبه صفحه سه برابر شده بود (بارکدل، ۲۰۰۳).

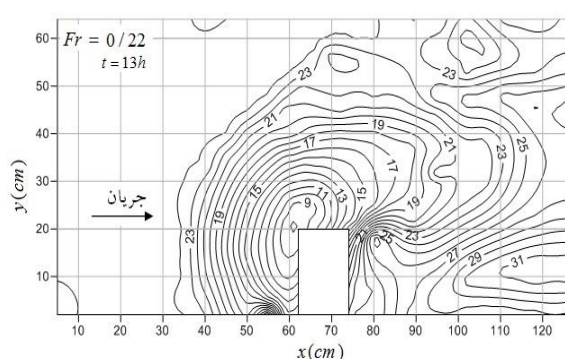
آزمایش‌های تکمیلی

- ارزیابی وضعیت بهینه نصب صفحات مستغرق در شرایط مختلف جریان

در این مرحله از آزمایش‌ها، وضعیت بهینه نصب صفحات مستغرق تحت آزمایش طولانی به مدت ۱۳ ساعت در عددهای فرود ۰/۱۵، ۰/۱۸، ۰/۲۰ و ۰/۲۲ قرار گرفت تا عملکرد صفحات ارزیابی شود که نتایج آن در جدول ۵ به ترتیب در ردیف‌های ۱ الی ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۵ مشخص است، هرچه عدد فرود جریان کمتر باشد، عملکرد صفحات بهتر می‌شود به طوری که در عدد فرود ۰/۱۵ توانسته است تا ۹۵ درصد عمق آبشستگی را نسبت به آزمایش شاهد ۱۳ ساعته کاهش دهد. بدیهی است با افزایش عدد فرود میزان درصد کاهش عمق آبشستگی نیز کاهش و در عدد فرود ۰/۲۲ به حدود ۶۱ درصد آزمایش ۱۳ ساعته می‌رسد.



ب- آزمایش با نصب صفحه در زاویه مناسب



الف- آزمایش شاهد (بدون صفحه)

شکل ۹- توپوگرافی بستر قبل و پس از نصب صفحه (پس از زمان ۱۳ ساعت و عدد فرود ۰/۲۲)

- Barkdoll B. D. 2003. Discussion of 'use of vanes for control of scour at vertical wall abutments' by Johnson P. A. Hey R. D. Tessier M. and Rosgen D. L. Journal of Hydraulic Engineering. 129(3):246.
- Derrick D. L. 1996. The bendway weir: An in-stream erosion control and habitat improvement structures for the 1990's. Proc., XXVII Int. Conf. on Erosion Control Technology-Bringing Home, Erosion Control Association, Steamboat Springs, Colo. pp. 227-241.
- Ghorbani B. and Kells J. A. 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. Journal of Hydraulic Research. 46(4):610-619.
- Johnson P. A. Hey R. D. Tessier M. and Rosgen D. L. 2001. Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 127(9):772-778.
- Korkut R. Martinez E. J. Morales R. Ettema R. and Barkdoll B. 2006. Geobag performance as scour countermeasure for bridge abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 133(4):431-439.
- Lagasse P. F., Zevenbergen L. W. Schall J. D. and Clopper P. E. 2001. Bridge scour and stream instability countermeasures. Rep. No. FHWA-NHI-01-003, Hydraulic Engineering Circular No. 23 (HEC-23), 2nd Ed., Office of Bridge Technology, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 398p.
- Lauchlan C. S. 1999. Countermeasures for pier scour. Ph.D. thesis, The Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand. 378 p.
- Li H. Barkdoll B. D. Kuhnle R. and Alonson C. 2006. Parallel Walls as an Abutment Scour Countermeasure. Journal of Hydraulic Engineering. 132(5):510-520.
- Melville B. Ballegooy S. V. Coleman S. and Barkdoll B. 2006. Scour countermeasure for wing-wall abutments. Journal of Hydraulic Engineering. 132(6):563-574.
- Morales R. Ettema R. and Barkdoll B. 2008. Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد صفحه و نیز موقعیت قرارگیری صفحات در بالادست پل تأثیر بسیار کمی در کاهش عمق آبشستگی دارد. مناسب‌ترین موقعیت نصب صفحه، اتصال آن به گوشه بالادست تکیه‌گاه تشخیص داده شد. بررسی تأثیر زوایای مختلف در این موقعیت نشان داد که زاویه ۴۰ درجه مناسب‌تر است. به طور کلی نتایج نشان داد که با نصب صفحه مستغرق الگوی جریان نزدیک‌شونده به گونه‌ای تغییر می‌کند که منطقه تمرکز سرعت را از نزدیک تکیه‌گاه دور می‌کند و باعث کاهش عمق آبشستگی در محل تکیه‌گاه تا ۸۹ درصد می‌شود. نصب صفحه‌ی مستغرق تغییرات عمده‌ای در الگوی عرضی رسوب و فرسایش نسبت به حالت بدون صفحه ایجاد نمی‌کند. بدیهی است برای کاربرد این روش در عمل باید آزمایش‌های بیشتری به‌خصوص در شرایط بستر به طور کامل زیر انجام شود تا تأثیر سایر متغیرها نظیر ابعاد صفحه نیز بررسی شود.

سپاس‌گزاری

بخشی از هزینه‌های این پژوهش از محل پژوهانه نویسنده دوم تأمین شده است که بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر می‌شود.

منابع

- منصوری هفشجانی م. و شفاعی بجستان م. ۱۳۹۰. کنترل آبشستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه با استفاده از سنگ‌چین. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۹):۷۳-۸۲

- Performance at a Bridge Abutment on a Floodplain. Journal of Hydraulic Engineering. 134(6):800-809.
10. Odgaard J. 2010. River Training and Sediment Management with Submerged Vanes. ASCE press. 171 p.
11. Przedwojski B. 1995. Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes. Journal of Hydraulic Research. 33(2):257-273

