

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل

لیلا پرچی^۱، سید امین اصغری پری^{۲*}، محمود شفاعی بجستان^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۶

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء، بهبهان

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء، بهبهان

^۳ استاد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: asghari_amin@bkatu.ac.ir

چکیده

صفحات مستغرق سازه‌های مستطیلی نازکی هستند که به لحاظ داشتن زاویه با جهت جریان ناحیه پر فشار و کم فشار در دو طرف آن‌ها ایجاد می‌شود. این سازه‌ها باعث ایجاد گرداب ثانویه و تغییر الگوی جریان در کف رودخانه و در نتیجه تغییر روند انتقال رسوب و فرسایش می‌شوند. عملکرد صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی پایه پل و حرکت رسوب از اطراف صفحات، که به علت ایجاد جریان رو به پایین در جلوی آن‌ها به وجود می‌آید، تحت تأثیر نحوه قرارگیری صفحات می‌باشد. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر کارایی و عملکرد صفحات مستغرق، شکل صفحات می‌باشد. در این تحقیق، با استفاده از مدل فیزیکی، تأثیر شکل‌های مختلف صفحات، شامل: صفحه مستطیلی تخت، محدب، مقعر، محدب-تخت، مقعر-تخت، مشبک و زاویه‌دار بر کاهش آبشستگی پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پایه استوانه‌ای پل به قطر ۲/۵۴ سانتی-متر در کانال مستطیلی آزمایشگاه به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر در شرایط آب زلال با $V/V_c=0.96$ مدل‌سازی شد. در این آزمایش‌ها از صفحاتی با طول برابر قطر پایه و ارتفاع روی بستر صفر استفاده شده است. بیشترین مقدار کاهش عمق آبشستگی نسبت به پایه بدون محافظ مربوط به حالت صفحات تخت با آرایش نوک تیز می‌باشد و صفحات محدب نسبت به صفحات تخت قرار گرفته با زاویه حمله ۲۰ درجه و صفحات مقعر عملکرد بهتری داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، آزمایشگاهی، پایه پل، شکل صفحات، صفحات مستغرق

Experimental Investigation of Submerged Vanes Shape Effect on Bridge Pier Scouring

L Parchami¹, SA Asghari Pari^{*2}, M Shafai Bajestan³

Received: 15 August 2015

Accepted: 06 November 2016

¹M.Sc Student of River Engineering, Khatam Alanbia Technology University, Behbahan, Iran

² Assist. Prof., Faculty of Engin, Khatam Alanbia Technology University, Behbahan, Iran

³ Prof., Faculty of Water Sci. and Engin, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: asghari_amin@bkatu.ac.ir

Abstract

Submerged vanes are thin rectangular structures which have angle with respect to the flow direction, creating high and low pressure zones on both sides of the vanes. These structures generate a secondary vortex, change the near-bed flow pattern, and consequently alter the pattern of the sediment transport and erosion within the channel cross section. The function of submerged vanes to reduce scour around the bridge piers and movement of the sediments in the region of vanes, due to down flow in front of them, are affected by arrays of the vanes. Another factor affecting the performance and efficiency of a submerged vane is its shape. In the present study, a physical model was used to investigate the effect of various shapes of vanes including flat-rectangular, convex, concave, flat-convex, flat-concave, reticular, and angled vanes on bridge pier scouring reduction. To this end, a cylindrical bridge pier with the diameter of 2.54 cm was modeled in a 10m-long and 0.3m-wide flume under clear water condition with $v/v_c=0.96$. The length of the vanes was equal to the width of the pier and the vanes were installed on the bed. The highest level of reduction in scour depth was observed for acuminate vanes compared with the unprotected pier. Furthermore, convex vanes showed better performance compared to the flat vanes at angles of attack 20° and concave vanes.

Keywords: Bridge pier, Experimental, Local scour, Submerged vanes, Vanes Shape

مقدمه

در چند دهه اخیر پژوهش‌های بسیاری توسط محققان مختلف از جمله ادگار و کندی (۱۹۸۳) در طراحی سیستم صفحات مستغرق به منظور کاهش فرسایش کناره در انحنا رودخانه، وایزن و تانزند (۲۰۰۲) در تعیین ابعاد و آرایش بهینه صفحه‌ها در قوس ۹۰ درجه به منظور جلوگیری از فرسایش کناره خارجی قوس، سون کیت و همکاران (۲۰۰۵) در بررسی الگوی جریان حول یک صفحه طویل در رودخانه‌های عریض با بستر متحرک و گوپتا و شارما (۲۰۰۷) در طراحی شکل هندسی مناسب صفحه برای عملکرد بهتر در جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیرهای جانبی در خم رودخانه‌های آبرفتی انجام شده است. در خصوص استفاده از صفحات مستغرق در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل‌ها تحقیقات

وقوع آبشستگی در اطراف پایه‌های پل یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها می‌باشد. بنابراین حفاظت از پل‌ها در برابر آبشستگی ضروری است. افزایش مقاومت مواد بستر و کاهش قدرت فرسایش جریان اطراف پایه، دو روشی هستند که برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی استفاده می‌شوند. از جمله روش‌هایی که برای تغییر الگوی جریان و کاهش شدت گرداب‌های ایجاد شده در اطراف پایه به کار می‌رود استفاده از صفحات مستغرق^۱ می‌باشد. برخی از مهم‌ترین کاربردها صفحات مستغرق در مهندسی رودخانه حفاظت از ساحل خارجی رودخانه‌ها، حفاظت از دهانه آبگیرها، جلوگیری از آبشستگی پایه پل‌ها و افزایش عمر مفید سدها می‌باشد.

¹ Submerged vanes

درجه با جهت جریان نیز نسبت به صفحات با زاویه ۲۰ درجه عملکرد بهتری را از خود نشان دادند. تفرج نوروز و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی شش روش کاهش آبشستگی پایه پل پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود بهترین تنظیمات ارائه شده در آزمایش‌های انجام شده توسط محققان دیگر را مورد بررسی قرار دادند و در مورد صفحات مستغرق به این نتیجه رسیدند که درصد کاهش آبشستگی در صفحات مستغرق بسیار کمتر از موارد اعلام شده توسط محققان قبل می‌باشد و دلیل آن، مدت زمان کوتاه آزمایش و همچنین اثرات عمق بسیار کم ($h/b \ll 2.5$) می‌باشد. در خصوص شکل صفحات نیز تحقیقاتی صورت گرفته است از جمله می‌توان به تحقیقات شاهرخی ساردو و بارانی (۱۳۸۶) اشاره کرد. آن‌ها تأثیر دو نوع از صفحات مستغرق انحنادار و زاویه‌دار در کنترل فرسایش در انحناء رودخانه را مورد بررسی قرار دادند. این صفحات در یک انحنای ۱۸۰ درجه با آرایش-های قرارگیری متفاوت با هم مقایسه شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از صفحات مستغرق انحنادار به صورت سه‌تایی عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر حالات و همین‌طور نسبت به صفحات زاویه‌دار دارند و به‌میزان قابل توجه در تثبیت ساحل بیرونی انحناء مؤثر واقع می‌شوند. صانعی و همکاران (۱۳۹۳) نیز به بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق انحنادار با قطاع ۶۰ درجه بر راندمان حوضچه رسوبگیر گردابی پرداختند. در حالت بهینه صفحات مستغرق انحنادار، ۲۵/۵۶ درصد رسوبشویی از کف حوضچه رسوبگیر گردابی بیشتر از حالت بدون کاربرد صفحات، اتفاق افتاد.

نظریه و اصول طراحی صفحات مستغرق بر نظریه ایرفویل (باله هواپیما) بنا نهاده شده است. مطالعه این جریان از طریق مفاهیم آیرودینامیک صورت می‌گیرد. در این حالت نیروهای رانشی و بالابرنده، تشکیل لایه مرزی و جدایی جریان از سطح باله و جریان‌های گردابی در لبه‌های کناری و انتهایی باله اهمیت پیدا می‌کند. هنگامی که

متعددی انجام گردیده است. قربانی و کریمی (۲۰۰۷) تأثیر صفحات مستغرق منفرد و دابل را در کاهش آبشستگی پایه‌های پل از طریق مطالعه آزمایشگاهی بررسی کردند، آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از دو صفحه مستغرق نسبت به یک صفحه در کاهش عمق آبشستگی مؤثرتر است. در حالت استفاده از دو صفحه مستغرق بیشترین کاهش در عمق آبشستگی در موقعیت ۳۰ درجه نسبت به مرکز پایه و به‌میزان ۸۷/۷ درصد اتفاق افتاد و در حالت استفاده از یک صفحه مستغرق بیشترین کاهش در عمق آبشستگی در زاویه ۸/۵ درجه و ارتفاع صفر و به‌میزان ۱۷/۳ درصد اتفاق افتاد. شجاعی و همکاران (۱۳۹۱) نشان دادند با افزایش تعداد صفحات مستغرق، همچنین با کم‌شدن فاصله صفحات مستغرق در جهت جریان و نیز در راستای عمود بر جهت جریان، عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبشستگی افزایش یافت. با نصب ردیف صفحات مستغرق در فاصله‌ای عقب‌تر از ابتدای پایه، درصد کاهش آبشستگی بیشتری در جلوی پایه حاصل شد. با کاهش ارتفاع روی بستر صفحات مستغرق تا نسبت $L/H=3$ ، عملکرد آن‌ها در کاهش عمق آبشستگی در جلوی پایه افزایش یافت. همچنین تغییر زاویه‌ها در هر ردیف از صفحات مستغرق به بهبود عملکرد آن‌ها در کاهش آبشستگی منجر شد. حسینی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبشستگی پایه مستطیلی با دماغه گرد پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از ۶ صفحه مستغرق و یک طوق استفاده کردند. آزمایش‌های مختلفی بر روی پایه با زاویه‌های مختلف انجام شد. همچنین عملکرد صفحات مستغرق در ارتفاع‌های مختلف روی بستر و زاویه‌های مختلف با جهت جریان بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه پایه با جهت جریان از عملکرد طوق کاسته می‌شود. همچنین صفحات با ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر روی بستر بهترین عملکرد را در کاهش آبشستگی داشتند و با کاهش ارتفاع صفحات روی بستر از عملکرد آن‌ها کاسته می‌شود. صفحات با زاویه ۳۰

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی با طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام گرفت. کانال دارای کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای است و امکان تغییر شیب کف آن به کمک چهار چک و الکتروموتور که به صورت دیجیتالی عمل می‌کند وجود دارد. کانال در قسمت ابتدایی و انتهایی دارای مخزن است. جریان مورد نیاز با استفاده از یک پمپ با قدرت 22kw از مخزن اصلی به کانال منتقل می‌شود و توسط یک دریچه کشویی در انتهای کانال عمق آب در کانال تنظیم می‌شود. کانال آزمایشگاهی به دو قسمت بستر متحرک و بستر ثابت (کف کاذب) تقسیم شد. بستر متحرک از فاصله ۴ متری از ابتدای کانال شروع شده و دارای طول ۳ متر است که ارتفاع رسوبات در این قسمت ۱۵ سانتی‌متر بوده و توسط رسوبات غیرچسبنده پر شده است (شکل ۱). قسمت ابتدای کانال تا ابتدای بستر متحرک و انتهای بستر متحرک تا انتهای کانال را کف کاذب تشکیل می‌دهد که از صفحه‌های گالوانیزه تشکیل شده‌اند. ارتفاع کف کاذب نیز ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. شیب بستر فلوم صفر و از یک ماله دستی قبل از هر مرحله از آزمایش برای مسطح کردن سطح مصالح بستر استفاده گردید و از تراز بودن سطح توسط متر لیزری اطمینان حاصل شد. به منظور حذف تلاطم جریان ورودی و یکنواخت کردن جریان، از یک صفحه مشبک آرام‌کننده استفاده شده است. آب پس از یک آرامش نسبی به داخل کانال جریان می‌یابد و پس از طی طول ۱۰ متری کانال و عبور از دریچه انتهایی وارد حوضچه‌ها می‌شود. کنترل دبی با شیر کنارگذر انجام گرفته و اندازه‌گیری توسط دبی‌سنج الکترومغناطیس صورت پذیرفت. با توجه به مطالعات چپو (۱۹۹۵)، چنانچه $Y/D > 3$ باشد (Y عمق جریان و D قطر پایه) عمق جریان تأثیری بر روی عمق آبشستگی ندارد. در این پژوهش این نسبت برابر $4/4$ می‌باشد. با توجه به اینکه آبشستگی موضعی در شرایط آب

یک صفحه مستغرق به‌طور قائم در بستر آبراهه نصب می‌شود، شرایط تقریباً مشابهی با باله هواپیما به وجود می‌آید با این تفاوت که در حالت اخیر، سیال جاری، آب است و صفحات نیز حرکتی ندارند. هنگامی که یک جسم به شکل ایرفویل در معرض جریان سیال قرار می‌گیرد، نیروی آیرودینامیکی تولید می‌نماید. مؤلفه‌ای از این نیرو که عمود بر جهت حرکت است، نیروی بالابرنده و مؤلفه مماس بر جهت حرکت، نیروی رانشی نامیده می‌شود که از دو بخش تشکیل می‌گردد: نیروی رانشی فشاری و نیروی رانشی اصطکاکی. نیروی رانشی (F_d) به چگالی سیال (ρ)، سرعت جریان بالادست (V)، شکل و اندازه جسم و وضعیت استقرار جسم بستگی دارد. نیروی رانشی اصطکاکی، به مساحت رویه جسم نیز بستگی دارد. نیروی رانشی فشاری به مساحت تصویر از جلوی جسم و به اختلاف فشار بین ناحیه جلو و پشت جسم بستگی دارد (عزیزی ۱۳۹۱). در پشت هر جسم به تناسب شکل آن، گردابه‌هایی ایجاد می‌شود که دارای یک خلأ فشاری می‌باشد (فشار از فشار جریان سیال کمتر است) و در عوض جلوی جسم فشار زیاد است. هنگامی که سیال از سطح جسم جدا می‌شود، یک ناحیه جدانشدگی بین سطح جسم و لایه سیال به وجود می‌آید. هر چقدر که ناحیه جدانشدگی بزرگتر باشد، به دلیل اختلاف فشار بیشتر، نیروی رانشی فشاری بزرگتری ایجاد می‌شود. در این مطالعه عملکرد شکل‌های مختلف صفحات مستغرق (تخت، محدب، مقعر، تخت-محدب، تخت-مقعر، مشبک و زاویه‌دار) در کاهش عمق آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، به منظور کاهش آبشستگی پیرامون صفحات، اصلاح شکل صفحات با ایجاد انحنا، زاویه و نیز مشبک کردن صفحات مستطیلی اولیه مورد توجه قرار گرفته است. فرضیه تحقیق حاضر این است که ایجاد انحنا، زاویه و نیز مشبک کردن صفحات می‌تواند نیروی مقاوم در مقابل جریان را کاهش داده و در نتیجه موجب کاهش آبشستگی موضعی گردد.

باید بزرگتر از ۶/۲۵ باشد، با توجه به این نکات مدل پایه از یک لوله استوانه‌ای شکل فولادی به قطر ۲/۵۴ سانتی متر استفاده شد. جهت ثابت ماندن پایه، مدل پایه بر روی یک صفحه افقی چوبی متصل گردید و در فاصله ۱/۵ متری از ابتدای محدوده ۳ متری رسوبات قرار داده شد. با توجه به پیشنهاد تفرج نوروز و همکاران (۲۰۱۰) چنانچه نسبت عرض پایه به قطر متوسط ذرات (b/d_{50}) در محدوده ۲۵ تا ۱۳۰ باشد، عمق آبشستگی متعادل تحت تأثیر اندازه ذرات رسوبی قرار نمی‌گیرد. لذا با توجه به قطر انتخاب شده برای پایه و نیز جهت جلوگیری از تشکیل ریبیل در بستر d_{50} ذرات رسوبی بایستی از ۰/۷ میلی‌متر بزرگتر باشد بنابراین d_{50} ذرات رسوبی برابر ۰/۸ میلی‌متر انتخاب گردید تا بیشینه مقدار آبشستگی بدست آید و هم از ایجاد پشته‌های کوچک جلوگیری شود. با توجه به این که غیر یکنواختی ذرات رسوبی باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود، لذا سعی گردید از رسوبات یکنواخت در آزمایش‌ها استفاده شود. برای بررسی یکنواختی رسوبات از رابطه $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ استفاده کرده که در آن σ_g انحراف معیار هندسی ذرات است که برابر ۱/۳ می‌باشد. چگالی نسبی ذرات رسوبی بستر برابر ۲/۶۴ بود. مدل صفحات مستغرق، از ورقه‌های گالوانیزه به ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شد. طول این صفحات برابر ۲/۵۴ سانتی‌متر (برابر قطر پایه) می‌باشد. سطح بالای صفحات هم‌سطح رسوبات بستر قرار دارد به طوری که صفحات در زیر رسوبات مدفون شده و هم‌سطح بستر هستند. تعداد صفحات در هر آزمایش ۲ عدد، زاویه برخورد با جریان 20° و موقعیت قرارگیری صفحات نسبت به پایه 30° می‌باشد، صفحات به حالت چسبیده به پایه می‌باشد (مشابه شرایط آزمایش‌های قربانی و کلز (۲۰۰۸) و تفرج نوروز و همکاران (۲۰۱۲)).

زالال بررسی می‌شود باید $V/V_c < 1$ باشد. در این تحقیق مدل برای حالت آبشستگی آب زلال طراحی شد. سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان در چند مرحله و چندین تکرار محاسبه گردید و سپس درستی آن با روابط تجربی مقایسه شد. ملویل (۱۹۹۷) برای تعیین سرعت برشی بحرانی روابط زیر را ارائه نمود که تخمین خوبی برای منحنی شیلدز می‌باشد.

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad [1]$$

$$\Rightarrow 0.1mm < d_{50} < 1mm$$

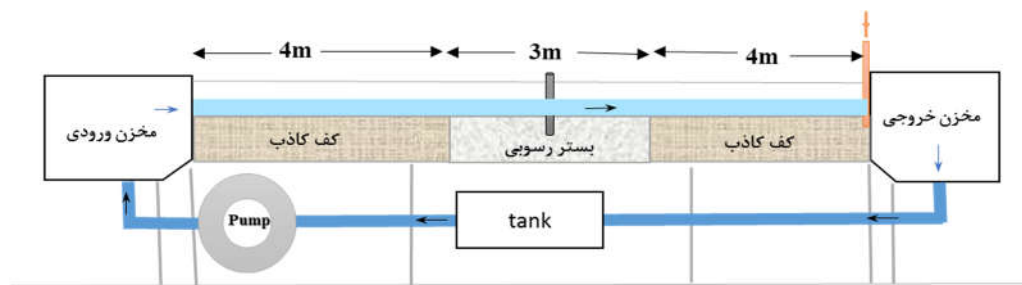
$$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \quad [2]$$

$$\Rightarrow 1mm < d_{50} < 100mm$$

و برای سرعت بحرانی از رابطه زیر (توزیع لگاریتمی سرعت) استفاده نمود:

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \log 5.53y/d_{50} \quad [3]$$

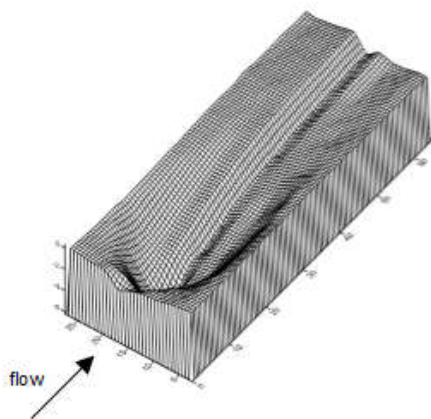
از رابطه ۱ مقدار سرعت برشی بحرانی برابر ۰/۰۲ متر بر ثانیه به دست آمده و با استفاده از معادله ۲، سرعت بحرانی برابر با ۰/۳۳ متر بر ثانیه محاسبه گردید. مشاهدات آزمایشگاهی در دامنه‌ای از عمق‌ها و سرعت‌های مختلف نشان داد که سرعت جریان آستانه حرکت معادل با ۰/۳۴ متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین در کلیه آزمایش‌ها، این سرعت به عنوان مبنای سرعت بحرانی در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن عمق جریان ۱۱ سانتی‌متر و دبی ۱۰/۵ لیتر بر ثانیه، سرعت متوسط برابر با ۰/۳۱۸ متر بر ثانیه به دست آمد لذا شرط $V/V_c = 0.96$ در آزمایش‌ها برقرار شد. با توجه به محاسبات فوق برای از بین بردن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی، طبق نظر چیو و ملویل (۱۹۸۷) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد ($B/b \geq 10$) و بر اساس نظر رادکیوی واتما (۱۹۸۳) نسبت عرض کانال به قطر پایه



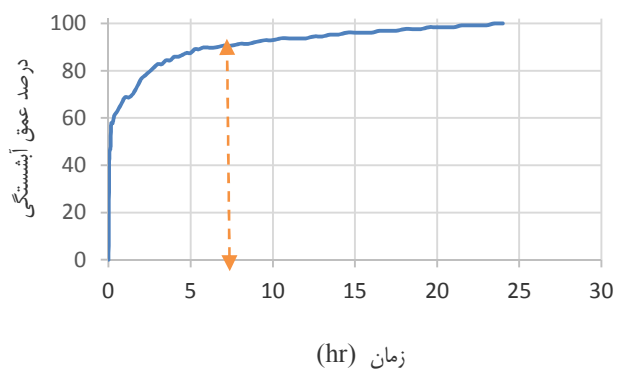
شکل ۱- نمای شماتیک از فلوم آزمایشگاهی.

شد. اما با گذشت زمان تغییرات عمق حفره آبستگي کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۲-الف در مدت زمان ۷ ساعت حدود ۹۱ درصد عمق تعادل آبستگي اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب مدت زمان آزمایش‌ها ۷ ساعت در نظر گرفته شد. در شکل ۲-ب طرح سه‌بعدی تراز حفره آبستگي موضعی در اطراف پایه در آزمایش شاهد مشاهده می‌شود.

جهت تعیین زمان تعادل یک آزمایش ۲۴ ساعته انجام گرفت و عمق آبستگي در زمان‌های مختلف ثبت گردید. شکل ۲-الف نمودار توسعه زمانی حفره آبستگي پایه بدون حفاظت را در مدت زمان ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، سرعت آبستگي در ابتدای آزمایش بسیار زیاد است به طوری که پس از ۱ ساعت از شروع آزمایش (۴ درصد مدت زمان آزمایش)، ۶۸ درصد از کل آبستگي ایجاد



ب

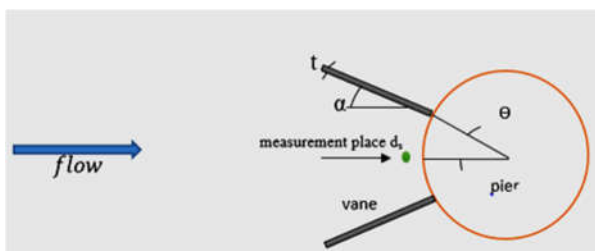


الف

شکل ۲- نمودار توسعه زمانی (الف) و طرح سه‌بعدی تراز حفره آبستگي (ب) در آزمایش بدون حفاظت.

استفاده از متر لیزری با دقت یک میلی‌متر برداشت و ترسیم شده است. شکل ۳ نحوه قرارگیری صفحات و پارامترهای مربوطه و شکل ۴، شکل صفحات استفاده شده را نشان می‌دهد.

در کلیه آزمایش‌ها، پس از اتمام زمان آزمایش (معادل زمان تعادل)، دریچه ورودی و خروجی فلوم بسته شده و آب درون فلوم به آرامی با زهکش‌های تعبیه شده در کف فلوم تخلیه گردید، سپس توپوگرافی بستر رسوبی به صورت یک شبکه $2/5 \times 2/5$ سانتی‌متری با



شکل ۳- نحوه قرارگیری صفحات و پارامترهای مربوطه.



شکل ۴- صفحات مورد استفاده در آزمایش‌ها.

به شکل دوزاویه‌ای با زوایای ۸۰ درجه شکل داده شده است. صفحات تخت نوک تیز شامل دو صفحه تخت با طول ۲/۵۴ سانتی‌متر می‌باشد که با زاویه ۶۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

آزمایش پایه بدون حفاظت

ابتدا آزمایش بدون صفحات مستغرق (آزمایش شاهد) انجام شد. در این آزمایش، آبشستگی از همان لحظات ابتدایی با تشکیل گرداب نعل اسبی آغاز شده و به سرعت ادامه می‌یافت. در این حالت آبشستگی از جلوی پایه و به صورت متقارن نسبت به محور پایه شروع شد و مواد رسوبی از جلو و اطراف پایه شسته و به صورت پشته در پشت پایه جمع شدند. این پشته‌ها به تدریج به طرف پایین دست انتقال یافت. پس از توسعه حفره آبشستگی و مستهلک شدن گرداب‌های نعل اسبی درون حفره، رسوبات تنها درون چاله آبشستگی حرکت می‌کردند و به پایین دست انتقال نمی‌یافتند. سرعت گسترش آبشستگی در لحظات اول زیاد بود و پس از مدتی به آرامی ادامه یافت.

جدول ۱ فهرست آزمایش‌ها و نحوه قرارگیری

صفحات در هر آزمایش را نشان می‌دهد.

در طرح صفحات بر این فرض بوده است که کوچک‌ترین تغییرات در شکل صفحات بر نیروی هیدرودینامیکی که از طرف جریان بر صفحات اعمال می‌شود مؤثر است. لذا از مدل A (صفحه مستطیلی پایه) تا I، به طور گام‌به‌گام بر تغییرات شکل صفحات افزوده شده است. این تغییرات با تأثیر بر جریان‌های ثانوی ناشی از صفحات، عملکرد صفحات را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مدل A یک صفحه مستطیلی ساده به ارتفاع ۷ سانتی‌متر و طول ۲/۵۴ سانتی‌متر است. در مدل B، صفحه به طرف وجه پرفشار خمیده شده و انحنا پیدا کرده است. به عبارت دیگر تقعر انحنا ایجاد شده به سمت وجه پرفشار صفحه می‌باشد. در مدل C عکس این عمل انجام شده است. در مدل‌های D و E یک صفحه تخت ساده به وجه کم‌فشار اضافه شده است. در کلیه صفحات انحنا دار طول انحنا برابر با ۲/۵۴ سانتی‌متر و شعاع انحنا برابر ۰/۷ سانتی‌متر می‌باشد. در مدل F صفحه ساده، مشبک گردیده است. درصد تخلخل ۱۵٪ می‌باشد. صفحه مدل G به صورت زواویه‌دار با زاویه ۱۳۰ درجه و صفحه مدل H

جدول ۱- فهرست آزمایش‌ها و نحوه قرارگیری صفحات.

مدل	شکل	نحوه قرارگیری
A	تخت	
B	محدب	
C	مقعر	
D	تخت - محدب	
E	تخت - مقعر	
F	مشبک	
G	زاویه دار	
H	دوزاویه ای	
I	تخت نوک تیز	

آزمایش های پایه با صفحات مستغرق

در آزمایش A به دلیل شکل صفحه جداشدگی خطوط جریان زیاد است، بنابراین گردابه های بیشتری در پشت صفحه ایجاد می شود و در نتیجه اختلاف فشار جلو و عقب صفحه بیشتر شده و به تبع آن آبستگی بیشتری اتفاق می افتد. در آزمایش B با استفاده از صفحه محدب، به دلیل شکل آیرودینامیکی صفحه جداشدگی خطوط جریان کمتر می شود بنابراین نسبت به آزمایش A گردابه های کمتری در پشت صفحه ایجاد می گردد در نتیجه اختلاف فشار کمتری به وجود آمده و آبستگی کم تر می شود. در آزمایش D با اضافه کردن یک صفحه تخت به ناحیه پشت صفحه محدب، مقدار گردابه های تشکیل شده در پشت صفحه به میزان زیادی کاهش می یابد، بنابراین اختلاف فشار جلو و پشت صفحه کاهش یافته و

آبستگی به مقدار قابل توجهی کم می گردد. در شکل ۵ توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی در پایان آزمایش های شاهد، A، B و D نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است در آزمایش A گودال آبستگی از لحاظ عرضی تغییر چندانی نداشته ولی در آزمایش های B و D علاوه بر عمق در محدوده عرضی و طولی نیز بسیار کوچک تر شده است. در آزمایش C صفحه به صورت مقعر می باشد. نیروی درگ درون صفحه مقعر بیشتر از صفحه محدب است. پس اختلاف فشار بیشتر و در نتیجه آبستگی بیشتر را در پی دارد. در شکل ۶ توپوگرافی ایجاد شده در بستر در پایان آزمایش های C، E و B نشان داده شده است. حفره آبستگی در صفحه محدب هم از لحاظ عمق و هم از لحاظ عرض و طول کوچک تر از صفحات مقعر است.



آزمایش شاهد آزمایش A آزمایش B آزمایش D

شکل ۵- توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی در پایان آزمایش های شاهد، A، B و D.

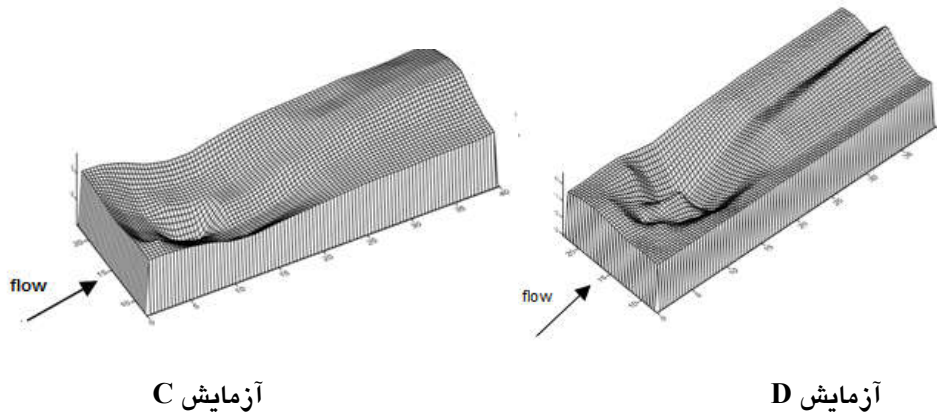


آزمایش C آزمایش E آزمایش B

شکل ۶- توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی در پایان آزمایش های B، C، E.

در شکل ۷ طرح سه بعدی تراز حفره آبشستگی موضعی در اطراف پایه در آزمایش D و C نشان داده

شده، همان طور که مشاهده می شود حفره آبشستگی در آزمایش C که صفحه مقعر است بزرگ تر می باشد.



شکل ۷- طرح سه بعدی تراز حفره آبشستگی موضعی در اطراف پایه در آزمایش های C و D.

در آزمایش F از دو صفحه مشبک استفاده شده است. جریان لایه مرزی از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات جریان اطراف صفحه مشبک می باشد. با مشبک (زبر) شدن صفحه، لایه مرزی آشفته شده در نتیجه نقطه جدایی به تأخیر خواهد افتاد. در آزمایش های G و H نیز شرایط تقریباً مشابه صفحات محدب و مقعر است، در آزمایش G به دلیل شکل صفحه جداشدگی خطوط جریان کمتر شده در نتیجه گردابه های کمتری در پشت صفحه

ایجاد شده و در میزان آبشستگی کمتر می شود ولی در آزمایش H نیروی درگ درون صفحه بیشتر از صفحه G است. در شکل ۸ می توان ملاحظه نمود که گودال ایجاد شده در آزمایش H بزرگتر از آزمایش G می باشد. همچنین در مقایسه آزمایش F و آزمایش A مشاهده می شود که مشبک نمودن صفحات باعث کوچکتر شدن گودال آبشستگی در تمامی جهات است.



آزمایش H آزمایش G آزمایش A آزمایش F

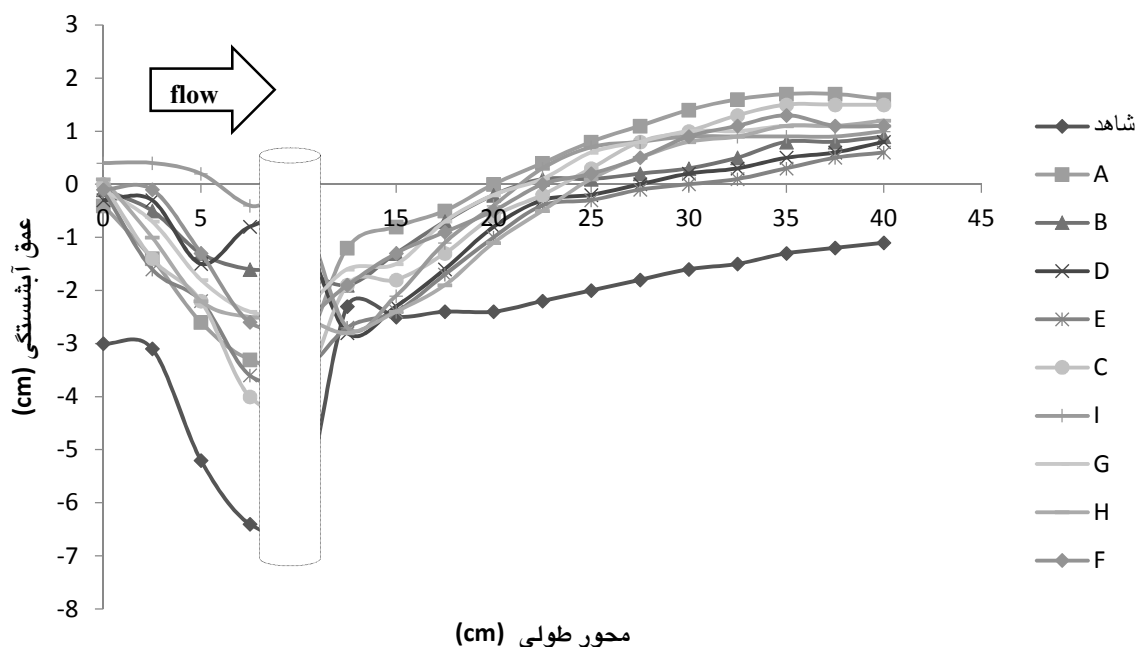
شکل ۸- توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی در پایان آزمایش های H، G، A، و F.

شکل ۹ توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی در پایان آزمایش I مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است حفره آبشستگی هم از لحاظ عمق آبشستگی و هم از لحاظ طولی و عرضی بسیار کاهش یافته است. شکل ۱۰ پروفیل طولی گودال آبشستگی و بخش رسوبگذاری را در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ نیز نمودار ستونی درصد کاهش آبشستگی در آزمایش‌ها را می‌توان ملاحظه نمود، به خوبی مشاهده می‌شود که عمق آبشستگی پایه پل همراه با صفحات بسیار کمتر از پایه بدون محافظ است.

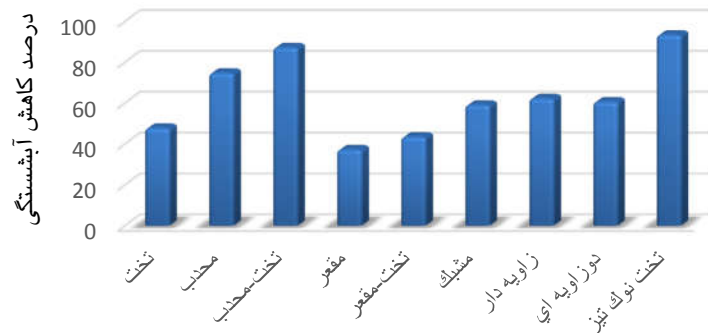
بیشترین کاهش آبشستگی مربوط به آزمایش I می‌باشد. به دلیل نحوه قرارگرفتن صفحات در این آزمایش، این مدل در واقع نوعی دیوار هدایت کننده به شمار می‌رود و نحوه عملکرد آن با صفحات مستغرق متفاوت است. این مدل با انحراف خطوط جریان از جلوی پایه و ایجاد خطوط جریان ملایم و کاهش تلاطم باعث کاهش آبشستگی می‌شود. با توجه به نحوه قرارگیری صفحات و ایجاد حالت نوک تیز در جلو پایه جدا شدگی خطوط جریان بسیار کمتر می‌گردد و در نتیجه گردابه‌های ایجاد شده در پشت پایه بسیار کمتر می‌شود. در



شکل ۹- توپوگرافی ایجاد شده در بستر رسوبی در پایان آزمایش I.



شکل ۱۰- پروفیل طولی بستر در محور پایه.



شکل صفحات

شکل ۱۱- درصد کاهش آبستگی در آزمایش‌های مختلف.

دادند که تکنیک صفحات مستغرق یک روش مناسب برای کاهش آبستگی در اطراف پایه‌ها می‌باشد. در واقع این صفحات با ایجاد یک سری جریان‌ها ثانویه چرخشی مقدار و توزیع تنش‌های برشی بستر، سرعت، عمق و انتقال رسوب را در منطقه مورد نظر تغییر می‌دهند. هم‌چنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که انحنا در صفحات در کاهش عمق آبستگی مؤثر می‌باشد. به طوری که صفحات محدب - تخت، محدب و زاویه‌داری که مشابه حالت محدب، نسبت به صفحات تخت، مقعر و زاویه‌دار مشابه مقعر عملکرد بهتری در کاهش آب شستگی داشته‌اند. مقایسه صفحات انحنا دار و زاویه‌دار نشان داد صفحات انحنا دار در کاهش عمق آبستگی نسبت به صفحات زاویه‌دار مؤثرتر می‌باشند. مقایسه صفحات انحنا دار و زاویه‌دار نشان داد صفحات انحنا دار در کاهش عمق آبستگی نسبت به صفحات زاویه‌دار مؤثرتر می‌باشند. بهترین عملکرد در آزمایش‌ها مربوط به مدل I (مدل صفحات نوک تیز) می‌باشد.

مقایسه نتیجه تحقیق حاضر با نتایج قربانی و کلز (۲۰۰۸) در آزمایش کاربرد دو صفحه تخت، مقدار کاهش آبستگی در تحقیق قربانی و کلز (۲۰۰۸) را ۳۹ درصد بیشتر از مطالعه حاضر نشان داد که علت آن می‌تواند متفاوت بودن شرایط آزمایش در برخی پارامترها باشد. به طور مثال مقدار پارامتر b/d_{50} در تحقیقات قربانی و کلز (۲۰۰۸)، برابر ۲۰۰ است که این مقدار بسیار بیشتر از محدوده معیار تفرج نوروز (۲۰۱۰)، $(25 < b/d_{50} < 130)$ می‌باشد. این مقدار در تحقیق حاضر برابر با $31/75$ می‌باشد. همچنین مقدار h/b بسیار کمتر از $2/5$ می‌باشد که این مقدار در تحقیق حاضر $4/33$ در نظر گرفته شد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تأثیر شکل صفحات مستغرق بر آبستگی موضعی پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها به ترتیب بر روی یک صفحه مستطیلی ساده، و هشت شکل صفحه دیگر انجام گرفت. آزمایش‌ها نشان

منابع مورد استفاده

حسینی سح، حسین زاده دلیر، فرسادی زاده د، ارونقی ه و قربانی م، ۱۳۹۱. تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبستگی پایه‌های مستطیلی با دماغه گرد. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۳، صفحه‌های ۸۷ تا ۱۰۱.

- شجاعی پ، فرسادی زاده د، حسین زاده دلیر ع، سلماسی ف و قربانی م، ۱۳۹۱. کاربرد صفحات مستغرق در کاهش آبستنگی پایه استوانه‌ای پل‌ها. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۱، صفحه‌های ۹۱ تا ۱۰۷.
- شاهرخی ساردو م و بارانی غ، ۱۳۸۶. مقایسه عملکرد صفحات مستغرق انحنا دار و زاویه دار در کنترل رسوب در انحنا رودخانه، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
- صانعی م، اژدری مقدم م و حاجی احمدی ا، ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق انحنا دار با قطاع ۶۰ درجه بر راندمان حوضچه رسوبگیر گردابی. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۶، شماره ۱، صفحه‌های ۸۳ تا ۹۴.
- عزیزی ر، ۱۳۹۱. بررسی اثر شکل بهینه و فاصله نصب صفحات مستغرق بر الگوی رسوب در بستر کانال. رساله دکتری تخصصی، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Chiew YM, 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 121(9): 635-643.
- Chiew YM, Melville BW, 1987. Local Scour around Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 25(1):15-26.
- Ghorbani B and A Karimi, 2007. A comparison of single and double submerged vanes effect on the scour occurring at a cylindrical pier. Pp. 260-276. *Proc. of 6th Conf. of hydraulic*. Sep. 4-6, Shahrekord, Iran.
- Ghorbani B and Kells JA, 2008. Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5): 610-619.
- Gupta P and Sharma N, 2007. Performance evaluation of tapered vane. *Journal of Hydraulic Research* 45(4): 472-477.
- Melville BW, 1997. Pier and abutment scour-an integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 123(2): 125-136.
- Melvill BW and Sutherland AJ, 1988. Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 114 (10): 1210-1226.
- Odgaard AJ and Kennedy JF, 1983. River-bend bank protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 109(8): 1161-1173.
- Raudkivi A and Ettema R, 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 109(3): 338-350.
- Soon-Keat T, Guoliang Y, Siow-Yong L and Muk-Chen, 2005. Flow structure and sediment motion around submerged vanes in open channel. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering ASCE* 131(3):132-136.
- Tafarajnoruz A, Gaudio R and Calomino F, 2012. Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 138: 297-305.
- Tafarajnoruz A, Gaudio R, Grimaldi C and Calomino F, 2010. Required conditions to achieve the maximum local scour depth at a circular pier. *Proc. XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Farina, Palermo, Italy.
- Voisin A and Townsend RD, 2002. Model testing of submerged vanes in strongly curved narrow channel bends. *Canadian Journal of Civil Engineering* 29(1): 37-49.