بررسی آزمایشگاهی اثر آستانه در کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل در رسوبات چسبنده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۵

محمد مهدی احمدی[۱]، مجتبی حسین‌نژاد[۲]، مجید رحیم‌پور[۳]

چکیده

وقوع آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ها یکی از دلایل عمده‌ی عدم پایداری پل‌ها می‌باشد. بنابراین ارائه روش‌های مناسب به منظور پیش‌بینی و کنترل عمق آبشستگی از مسائلی است که بسیار مورد توجه بوده است. روش‌های مختلفی برای کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر اثر استفاده از آستانه در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در شرایط آب صاف، در رسوبات چسبنده مورد بررسی قرار گرفته است. آستانه در پایین دست پایه‌ها قرار داده شده و میزان اثر بخشی آن بر کاهش آبشستگی یا تغییر فاصله بین پایه و آستانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق از دو قطر پایه ۶۰ و ۷۵ میلی‌متری برای پایه پل استفاده شد. نتایج نشان دهنده تاثیر مثبت قرار دادن آستانه در کنترل آبشتگی بوده است و فاصله بین پایه و آستانه بیشترین تاثیر را داشته است. قرارگیری آستانه درست در پشت پایه حدود ۲۶٪ عمق و ۶۱٪ حجم حفره آبشستگی را کاهش داده است، با افزایش فاصله آستانه تا پایه پل از تاثیر محافظتی آن کاسته می‌شود. آستانه در هر دو حالت، دبی در آستانه حرکت ذرات و دبی کمتر از آستانه حرکت ذرات، باعث کاهش عمق آبشستگی به یک اندازه شد. همچنین مشاهده شد که عمق آبشستگی رابطه مشخصی با عدد فرود پایه ندارد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، آستانه، بررسی آزمایشگاهی، پایه پل، رسوبات چسبنده.

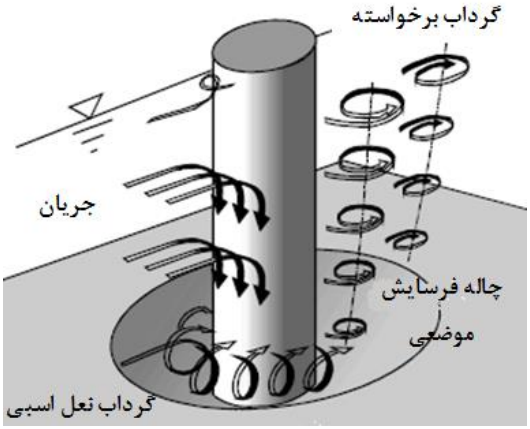
[۱] استادیار بخش علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. شماره تماس: ۰۹۱۵۵۵۱۶۲۷۰ .
email: ahmadi_mm@uk.ac.ir (مسئول مکاتبه)
[۲] کارشناسی ارشد سازه های آبی، ایران، شوشتر، بلوار کشاورز، خیابان دولت. شماره تماس: ۰۹۱۰۶۰۰۳۸۱۶.
email:hoseynnejad.m@gmail.com
[۳] دانشیار بخش علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. شماره تماس:۰۹۱۳۱۹۹۰۶۱۴.
email: rahimpour@uk.ac.ir

مقدمه

آبشستگی یک پدیده طبیعی است که در نتیجه عمل فرسایش دهنده جریان آب رخ می‌دهد. این پدیده یک تهدید جدی برای پایداری سازه‌های واقع در مسیر جریان مانند پایه پل‌ها محسوب می‌گردد. در اثر آبشستگی حفره‌ای در اطراف پایه پل ایجاد می‌گردد و پایداری آن را تضعیف می‌کند و ممکن است در اثر یک سیل بزرگ تخریب شود. این تخریب‌ها و خسارات وارده علاوه بر تلفات جانی و ضررهای مالی، سبب قطع راه‌های ارتباطی شده که بدین ترتیب حمل و نقل را نیز مختل می‌کند. با کنترل و محافظت از پایه‌های پل در برابر آبشستگی و ارائه روش‌های مناسب پیش‌بینی آبشستگی، می‌توان از وارد آمدن این خسارات پیش‌گیری کرد.

از عوامل مهم ایجاد آبشستگی در پایه‌های پل‌ها می‌توان به جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستگی اشاره کرد. که به طور خلاصه می‌توان گفت در اثر برخورد آب به پایه پل به علت کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر، جریان رو به پایین ایجاد می‌گردد و این جریان رو به پایین پس از برخورد به بستر با جریان اصلی برخورد کرده و گرداب نعل اسبی را به وجود می‌آورد. گرداب‌های نعل اسبی بیشتر در جلو پایه فعالیت دارند. جدایی جریان از پایه پل، در پشت پایه گرداب برخاستی را به وجود می‌آورد. علت تشکیل گرداب‌های برخاستگی افزایش تنش برشی در پشت پایه پل می‌باشد. (Breusers and Raudkvi, 1991) جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستگی در شکل (۱) نشان داده شده است.

راهکارهای کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پل را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های پوششی همراه با مقاوم سازی بستر رودخانه و استفاده از وسایل دگرگون کننده جریان دسته بندی نمود، (Burce et al., 1997).



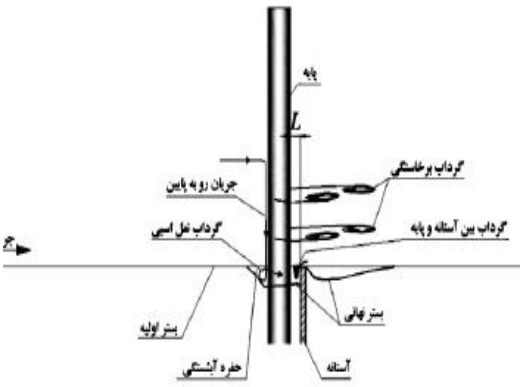
شکل(۱): شماتیکی از حفره آبشستگی و الگوی جریان اطراف پایه پل استوانه‌ای

روش‌های پوششی در پایه پل‌ها برای مقابله با تنش‌های برشی که در طی جریان‌های شدید ایجاد می‌شود به کار رفته و به صورت سپری در برابر آن‌ها عمل می‌کنند. در حالی که هدف وسایل دگرگون کننده جریان گسسته کردن میدان جریان اطراف پایه‌ها و در نتیجه کاهش قدرت فرسایش دهنده جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی اطراف پایه‌ای پل است (Melville and Hadfield, 1999). امکان اجرا و اطمینان در هر یک از روش‌های کاهش آبشستگی، تابعی از عوامل مختلف مانند کارائی، هزینه، نگهداری و آگاهی از معایب هر روش می‌باشد. روش‌هایی که تاکنون برای کاهش آبشستگی موضعی به کار رفته است شامل استفاده از سنگ چین توسط (Breusers et. Al., 1999) و (Parola and Jones, 1991)، استفاده از طوقه در اطرف پایه توسط (Ettema, 1980)، (Chiew, 1992)، (Kumar et al., 1999) و (Zarrati et al., 2006)، همچنین استفاده از شکاف در پایه توسط (Chiew, 1992) و (Heidarpour, 2002) و ... می‌باشد.

Chiew and Lim برای اولین بار استفاده از یک آستانه در بالادست پایه را به عنوان یک روش کنترل آبشستگی تحت شرایط آب صاف و بستر زنده پیشنهاد

دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین حالت استفاده از آستانه در بالادست پایه این است که آستانه عمودی باشد (زاویه آن صفر باشد)، ارتفاع آستانه بزرگ‌تر از ۰/۳ عمق جریان باشد و فاصله بین پایه و آستانه ۴/۴ برابر عرض پایه باشد. بیشترین کاهش آبشستگی در آزمایشات آن‌ها حدود ۵۰٪ بود (cheiw and lim, 2003). همچنین (Grimaldi et al., 2009) یک کار مشابه، با این تفاوت که این بار آستانه در پایین دست پایه قرار داده شد، را مورد مطالعه قرار دادند. آستانه به‌طور همزمان با مواد بستر (رسوبات غیر چسبنده) و در کل عرض فلوم در پایین دست پایه قرار داده شد. آن‌ها خاطر نشان کردند که از استفاده از آستانه در بالادست پایه به خاطر اینکه خطر کاهش سطح بستر را به علت ایجاد آبشستگی موضعی و کلی در پایین دست آستانه افزایش می‌دهد، باید اجتناب کرد. آن‌ها نشان دادند که عمق آبشستگی در بهترین شکل استفاده از آستانه ۲۶٪ و مساحت و حجم حفره آبشستگی حدود ۸۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین (Grimaldi et al., 2009) از ترکیب آستانه در پایین دست پایه و شکاف در پایه برای کاهش آبشستگی استفاده کردند. آن‌ها با این روش، عمق آبشستگی را ماکزیمم ۴۵٪ کاهش دادند. همچنین ماکزیمم کاهش مساحت و حجم حفره آبشستگی در بهترین حالت به ترتیب ۸۰ و ۹۰٪ بود (Grimaldi et al., 2009).

تحقیقات زیادی برای کاهش حفره آبشستگی اطراف پایه‌های پل در رسوبات غیرچسبنده انجام شده است، اما به دلیل طبیعت پیچیده رس‌ها، کنترل آبشستگی پایه پل در رسوبات چسبنده کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، لذا در مطالعه حاضر اثر استفاده از آستانه در پایین‌دست پایه‌های پل در رسوبات چسبنده مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل استفاده از آستانه در پایین‌دست پایه‌ها در تحقیق حاضر این است که مشاهدات نظری نشان می‌دهد که آبشستگی اطراف پایه پل در رسوبات چسبنده، در ابتدا از پشت پایه شروع می‌شود و حفره آبشستگی در پشت پایه به سمت منطقه برخاستگی و جلوی پایه گسترده می‌شود. این با چیزی که برای آبشستگی در ماسه مشاهده شده متفاوت است که حفره آبشستگی ابتدا در جلوی پایه شروع به گسترده شدن می‌کند، لذا استفاده از روشی که آبشستگی در پشت پایه را کاهش دهد مناسب‌تر می‌باشد. اثر آستانه بر کاهش آبشستگی اطراف پایه، با تغییر فاصله (L) آن از پایه (شکل ۲)، بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. همچنین به منظور بهتر ارزیابی کردن اثر آستانه بر کاهش آبشستگی، حداکثر عمق و حجم حفره آبشستگی در تمامی آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است.



شکل(۲) : شماتیکی از نحوه عملکرد آستانه در جلوگیری از فرسایش موضعی

آنالیز ابعادی

آبشستگی اطراف پایه پل به پارامترهای زیادی از جمله خصوصیات جریان، خصوصیات رسوب و هندسه پایه بستگی دارد. عمق آبشستگی (d_s) را می‌توان به‌صورت تابعی از پارامترهای زیر نوشت:

$$d_s = f\,(U,h,B,d_{50},b,L,t,g,\rho,\rho_s,\nu) \qquad (۱)$$

که در آن U سرعت جریان بالادست، h عمق جریان بالادست، B عرض فلوم، d_{50} میانگین قطر ذرات، b

قطر پایه پل، L فاصله آستانه از پایه، t زمان، g شتاب گرانشی زمین، ρ دانسیته آب، ρ_s جرم مخصوص ذرات جامد، ν لزجت سینماتیک می‌باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه (۱) را می‌توان بصورت پارامترهای بی‌بعد بصورت زیر در آورد:

$$\frac{ds}{b} = f1\left(\frac{U}{\sqrt{gb}}, \frac{Ub}{\nu}, \frac{h}{b}, \frac{B}{b}, \frac{\rho s}{\rho}, \frac{b}{d50}, \frac{L}{b}, \frac{Ut}{b}\right) \quad (۲)$$

که $U/(gb)^{0.5}$ عدد فرود پایه نامیده می‌شود. محققین زیادی معنی فیزیکی هر یک از پارامترهای بی بعد رابطه (۲) را بررسی کردند، بنابراین اثر هر یک از آن‌ها بر تابع $f1$ مشخص است: اگر عدد رینولدز پایه (R_p- Ub/ν) بزرگ‌تر از ۷۰۰۰ باشد، ترم دوم سمت راست معادله تأثیری بر فرآیند آبشستگی موضعی ندارد (Franzetti et al., 1994)؛ اگر $h/b \geq 2$ باشد، عمق جریان تأثیری بر آبشستگی (Laursen and Toch, 1956) اگر $B/b \geq 10$، دیواره‌های فلوم بر آبشستگی اثر نمی‌گذارند همچنین $\rho s/\rho$ در یک نمونه خاک عدد ثابتی است؛ اگر $b/d50 \geq 50$، آبشستگی موضعی را می‌توان مستقل از d_{50} در نظر گرفت (Ettema, 1980).

طبق شرایط بالا، برای مطالعه حاضر عمق آبشستگی بی بعد بصورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{ds}{b} = f2\left(Fp, \frac{L}{b}, \frac{Ut}{b}\right) \quad (۳)$$

که در آن F_p عدد فرود پایه می‌باشد. در حالت تعادل، یعنی وقتی که ابعاد حفره آبشستگی ثابت و بدون تغییر ماند رابطه (۳) بصورت زیر در می‌آید:

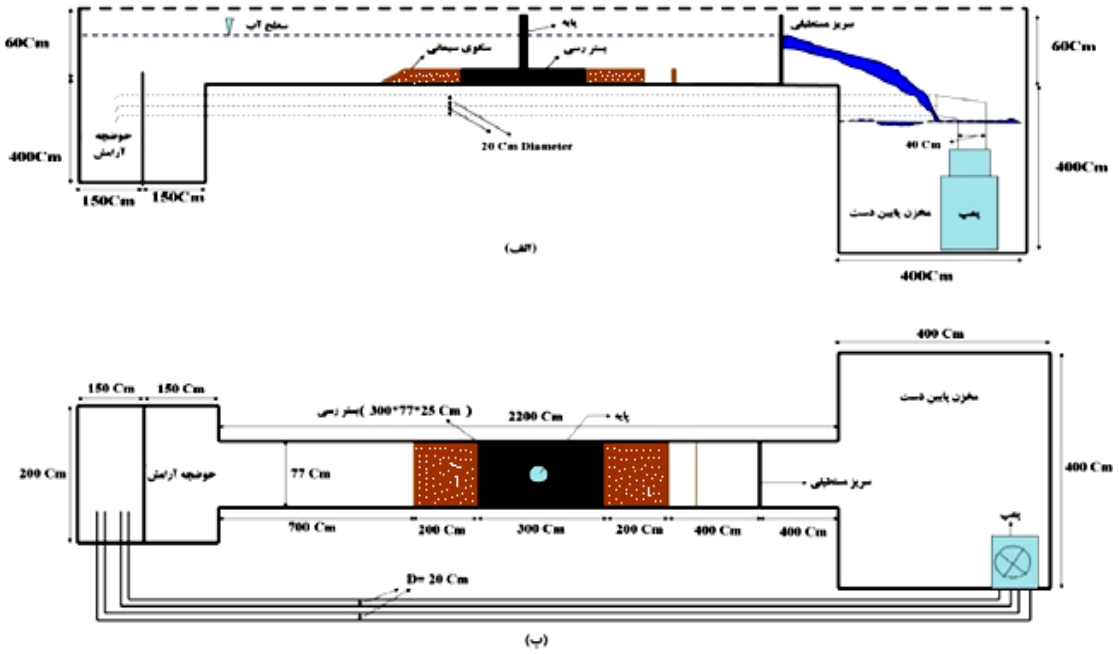
$$\frac{dse}{b} = f3\left(Fp, \frac{L}{b}\right) \quad (۴)$$

که در آن d_{se} عمق آبشستگی در حالت تعادل می‌باشد.

انجام آزمایشات

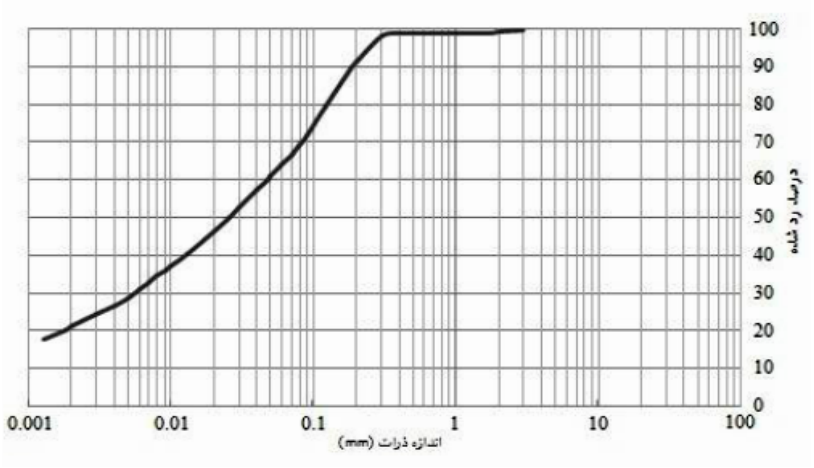
آزمایشات در فلوم مستطیلی بتنی به طول ۲۲، عرض ۰/۷۷ و ارتفاع ۰/۶ متر و شیب طولی ۰/۰۰۵ موجود در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی گروه عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، انجام شد. کف کانال به جز در محدوده‌ی سه متری که از رسوبات چسبنده پر می‌شود و مدل پایه در آن نصب می‌گردید، توسط دو سکوی سیمانی در بالادست و پایین‌دست این محدوده به طول ۲ متر تا ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بالا آورده شد. همچنین یک حوضچه در انتهای سکوی سیمانی برای تله اندازی ذرات شسته شده تعبیه شده است. کانال مجهز به یک حوضچه انتهایی است، که آب به وسیله یک پمپ از این حوضچه به یک حوضچه آرامش واقع در بالادست کانال منتقل و پس از آرام شدن جریان به کانال انتقال می‌یابد. شکل (۳) نمایی از کانال آزمایشگاهی مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال بر آبشستگی موضعی در اطراف پایه طبق معیار (Laursen and Toch, 1956) قطر پایه نباید بیشتر از ده درصد عرض کانال باشد، لذا در این تحقیق از دو پایه استوانه‌ای به قطرهای ۶۰ و ۷۵ میلی‌متر از جنس PVC استفاده شده است. پایه‌ها در وسط کانال قرار داده شدند. آستانه به‌کار رفته از جنس گالوانیزه به ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد، که به‌طور همزمان با بستر رسوبی در پایین‌دست پایه در فواصل مختلف L کار گذاشته شد. آستانه هم‌تراز سطح بستر و عرض آن برابر عرض فلوم بوده است.



شکل(۳) : شکل کانال آزمایشگاهی و محدوده بستر رسوبی الف) نمای جانبی ب)پلان

بستر چسبنده کانال با مصالح چسبنده پر گردید. بیش از ۵۰٪ ذرات مصالح بستر مورد استفاده از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند که معرف خاک ریزدانه محسوب و چسبنده نامیده می باشد. مشخصات رسوب بستر مورد استفاده در جدول (۱) و همچنین دانه‌بندی آن در شکل (۴) نشان داده شده است. از آنجا که میزان رطوبت و فشردگی (تراکم) رسوبات چسبنده از پارامترهای مهم در میزان آبشستگی هستند، سعی بر این بود که در آزمایش‌های مختلف این پارامترها ثابت نگه داشته شوند. برای آماده‌سازی بستر رسوبی، ابتدا مصالح بستر در محدوده‌ی در نظر گرفته شده با اندازه ۳×۰/۷۷ ×۰/۲۵ سانتی‌متر ریخته شده سپس پایه به آرامی درون بستر فروبرده شد.



شکل(۴): منحنی دانه‌بندی رسوبات استفاده شده در آزمایش

جدول (۱): مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

پارامتر	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیرایی	درصد رس	درصد سیلت	درصد ماسه	D_{50} (mm)	G_s	PH	EC ($ds.m^{-1}$)
مقدار	۲۵	۲۰	۵	۲۱	۴۰	۳۹	۰/۰۲۵	۲/۶۳	۷/۰۹	۰/۶۸۵

در هر آزمایش دبی وروی به کانال و عمق جریان اندازه‌گیری شده است. همچنین حداکثر عمق آبشستگی، حجم حفره آبشستگی و هندسه چاله آبشستگی در هر آزمایش برداشت شده است. اندازه‌گیری دبی با یک سریز لبه تیز مستطیلی که در انتهای کانال نصب شده بود انجام گرفت. همچنین عمق آبشستگی و توپوگرافی بستر حول پایه پل در آزمایش‌های مختلف، پس از تخلیه کامل آب از درون کانال، بوسیله ترازسنج با دقت یک میلی‌متر صورت گرفت. منظور از حجم حفره آبشستگی، حجمی از بستر است که بعد از هر آزمایش فرسایش یافته و در نتیجه آن حفره‌ای در اطراف پایه پل نمایان می‌شود، با توجه به اینکه بلافاصله بعد از اتمام آزمایش و خاموش کردن پمپ، این حفره‌ها از آب پر می‌باشند (بدلیل اشباع بودن خاک رس، آب درون حفره تا چندین ساعت فروکش نمی‌کند) حجم این حفره‌ها از طریق مکش بوسیله سرنگی با حجم ۶۰ سی سی اندازه‌گیری شد.

طراحی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در شرایط آب صاف انجام شد. در آبشستگی آب صاف به علت عدم حرکت رسوبات بالادست پل، حداکثر مقدار عمق حفره آبشستگی ایجاد می‌گردد. در آبشستگی بستر زنده، بستر بالادست پایه حمل رسوب دارد و به همین دلیل حفره آبشستگی را کاهش می‌دهد. چنانچه U سرعت متوسط جریان و U_c سرعت متوسط جریان در آستانه حرکت ذرات رسوبی باشد، آبشستگی آب صاف موقعی ایجاد می‌گردد که سرعت متوسط جریان در محدوده $0.3U_c< U< U_c$ باشد، (Melville and Hadfield, 1999). در این تحقیق از دو دبی (و عمق) مختلف برای انجام آزمایشات انجام

شد. در آزمایشات اولیه با سعی و خطا (با تغییر دبی و عمق و مشاهده میزان آبشستگی)، سرعت بحرانی (U_c) که در آن ذرات در آستانه حرکت قرار می‌گیرند تعیین گردید. در یکی از این دو دبی و عمق (دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه و عمق ۰,۲ متر) به‌کار رفته، سرعت در طی آزمایش‌ها به منظور نزدیک شدن به شرایط تشکیل حداکثر عمق آبشستگی موضعی در شرایط آب صاف، سرعت جریان، $0.9U_c$ ، در نظر گرفته شد و دبی و عمق دیگر (دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه و عمق ۰/۱۵ متر) به منظور بررسی اثر فرود پایه بر عمق آبشستگی و همچنین برای پاسخ به این سوال که آیا در سرعت های کمتر از سرعت بحرانی (0.7 Uc)، آستانه باز هم کارایی دارد یا نه انجام شد. انتخاب پارامترهایی نظیر عمق جریان، اندازه ذرات رسوب، سرعت و دبی جریان بر اساس شرایط ذکر شده در آنالیز ابعادی بود که تأثیر آن‌ها بر عمق آبشستگی حذف گردد. آزمایشات در نهایت مطابق مقادیر ذکر شده در جدول (۲) انجام گردید. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر عدد فرود کمتر از یک می‌باشد که نشان می‌دهد تمام آزمایشات در شرایط جریان زیر بحرانی انجام شده‌اند.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای مختلف در آزمایش‌ها

سری آزمایش‌ها		b(m)	H(m)	Q(m^3/s)	D_{50} (mm)	b (m)	U(m/s)	Fr	B/b	h/b	B/h
پایه۱	A	۰/۷۷	۰/۲۰	۰/۰۶۲	۰/۰۲۵	۰/۰۶	۰/۴۰	۰/۲۹	۱۲/۸	۳/۳۳	۳/۸۵
	B	۰/۷۷	۰/۱۵	۰/۰۳۶	۰/۰۲۵	۰/۰۶۰	۰/۳۱	۰/۲۶	۱۲/۸	۲/۵۰	۵/۱۳
پایه۲	C	۰/۷۷	۰/۲۰	۰/۰۶۲	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۴۰	۰/۲۹	۱۰/۳	۲/۶۷	۳/۸۵
	D	۰/۷۷	۰/۱۵	۰/۰۳۶	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۳۱	۰/۲۶	۱۰/۳	۲	۵/۱۳

در کل ۲۴ آزمایش انجام شده؛ ۱۲ آزمایش با قطر پایه ۶۰ میلی‌متر، که شامل ۶ آزمایش با دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه (A_0 تا A_5) و ۶ آزمایش دیگر با دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه (B_0 تا B_5) انجام شد. همچنین ۱۲ آزمایش با قطر ۷۵ میلی‌متر که شامل ۶ آزمایش با دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه (C_0 تاC_5) و ۶ آزمایش با دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه (D_0 تاD_5) انجام گردید. آزمایش‌های A_0، B_0، C_0 و D_0 به منظور بررسی میزان اثر آستانه بر کاهش آبشستگی، بدون حضور آستانه انجام شده‌اند. جدول (۳) فاصله بین آستانه و پایه و نسبت فاصله به قطر پایه را برای آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۳): فاصله بین پایه و آستانه و نسبت فاصله به قطر پایه

آزمایش	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
L(cm)	-	۰	۳	۶	۱۲	۴۰	-	۰	۳/۸	۷/۵	۱۵	۵۰
L/b	-	۰	۰/۵	۱	۲	۶/۷	-	۰	۰/۵	۱	۲	۶/۷

سرعت آبشستگی در خاک رس خیلی آهسته‌تر از خاک ماسه‌ای است (Ting et al., 2002) لذا برای رسیدن عمق آبشستگی به مرحله تعادل کامل زمان زیادی لازم است. از آن‌جا که تعداد آزمایش‌ها زیاد بوده و در شرایط آزمایشگاهی امکان برقراری جریان برای چندین روز امکان‌پذیر نیست، بنابراین استفاده از یک روش برای تخمین عمق آبشستگی تعادلی ضروری می‌باشد. بربود و همکاران یک روش جدید به نام SRICOS برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در مقابل زمان اطراف پایه پل استوانه‌ای در خاک رس

پیشنهاد دادند. در این روش از یک مدل هذلولی با رابطه زیر برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در مقابل زمان تا مرحله تعادل استفاده شده است، (Briaud et al.,1992)

$$d_s=\frac{t}{\frac{1}{dsi}+\frac{t}{dse}} \qquad (۵)$$

که در آن d_{si} سرعت آبشستگی ابتدایی در زمان $t=0$ و d_{se} عمق آبشستگی تعادلی در $t\to\infty$ می باشد. همچنین برای تخمین عمق آبشستگی تعادلی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر روی خاک رس رابطه‌ی زیر را استخراج کردند:

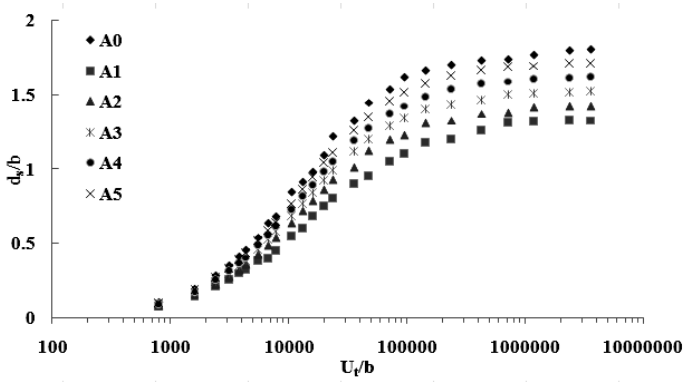
$$d_{se}=0.18R_p^{0.635} \qquad (۶)$$

که R_p عدد رینولدز پایه می‌باشد.

با توجه به این که هدف از این تحقیق بررسی میزان تأثیر آستانه بر کاهش آبشستگی پایه می‌باشد و بدست آوردن عمق آبشستگی تعادلی ملاک نیست، لذا زمان هر آزمایش ۴ ساعت در نظر گرفته شد و در صورت نیاز از رابطه (۵) برای تخمین عمق آبشستگی در زمان‌های بیشتر استفاده شده است.

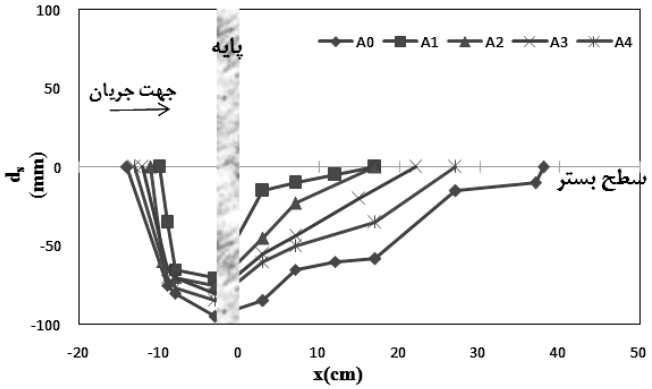
نتایج و بحث

نمودار پیشرفت عمق آبشستگی جلوی پایه در مقابل زمان به صورت بدون بعد برای آزمایش‌های A_0 تا A_5 در شکل (۵) نشان داده شده است (نمودار مشابهی برای قطر پایه ۷۵ میلی‌متر در دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه بدست آمد). همانطور که در شکل مشاهده می‌شود آستانه عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد و هرچه فاصله‌ی آستانه از پایه کمتر می‌شود، کاهش عمق آبشستگی بیشتر می‌شود. بیشترین کاهش زمانی اتفاق می‌افتد که فاصله آستانه با پایه صفر باشد (آزمایش A_0) و در فاصله $L/b=6.67$ (آزمایش A_5) کمترین میزان کاهش عمق آبشستگی اتفاق افتاده است.



شکل(۵): عمق آبشستگی بدون بعد جلو پایه در مقابل زمان بی‌بعد، آزمایش A_0 تا A_5

شکل (۶) پروفیل طولی حفره آبشستگی اطراف پایه ۶۰ میلی‌متری در دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. آستانه علاوه بر کاهش عمق آبشستگی، مساحت و حجم آبشستگی را کاهش می‌دهد.



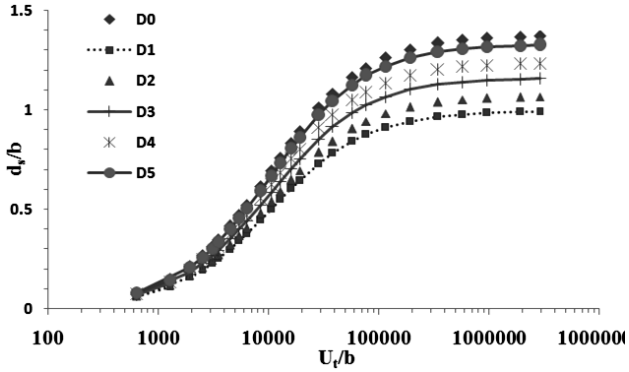
شکل(۶): پروفیل حفره آبشستگی اطراف پایه آزمایش A_0 تا A_5

جدول (۴) کاهش عمق آبشستگی جلوی پایه و کاهش حجم حفره آبشستگی در فواصل مختلف قرارگیری آستانه برای پایه ۶۰ میلی‌متری در دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه آورده شده است (اعداد مشابهی برای قطر پایه ۷۵ میلی‌متر بدست آمده است). همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین کاهش عمق و حجم حفره آبشستگی به ترتیب با مقادیر ۲۶,۳ و ۶۱,۷ درصد مربوط به حالتی است که آستانه دقیقا چسبیده به پایه می‌باشد و کمترین میزان کاهش آبشستگی مربوط به حالتی است که آستانه بیشترین فاصله را تا پایه پل دارد.

جدول (۴): درصد کاهش عمق و حجم حفره آبشستگی در پایه پل ۶۰ میلی‌متری

آزمایش	L/b	کاهش عمق آبشستگی (٪)	کاهش حجم آبشستگی (٪)
A_0	-	-	-
A_1	۰	۲۶/۳	۶۱/۷
A_2	۰/۵	۲۱/۰	۵۵/۴
A_3	۱	۱۵/۸	۴۰/۶
A_4	۲	۱۰/۵	۳۶/۳
A_5	۶/۶۷	۵/۲	۱/۳

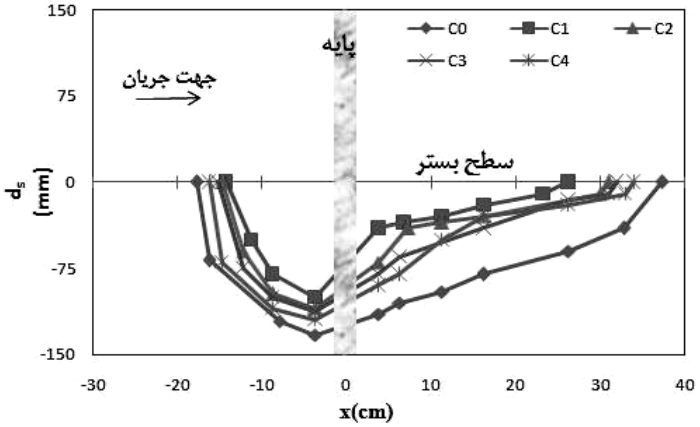
شکل (۷) نمودار عمق آبشستگی جلوی پایه در مقبل زمان بصورت بدون بعد را برای پایه با قطر ۷۵ میلی‌متر در دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه (آزمایش D_0 تا D_5) نشان می‌دهد.



شکل(۷): عمق آبشستگی بدون بعد جلو پایه در مقابل زمان بی بعد، آزمایش D_0 تا D_5

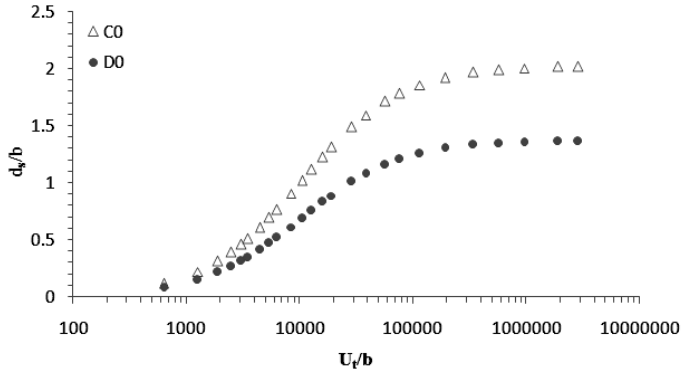
با توجه به شکل نیز مشخص است که آستانه باعث کاهش عمق آبشستگی شده است، همچنین نشان می‌دهد که آستانه در سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی نیز باعث کاهش عمق آبشستگی می‌شود. آستانه در فاصله صفر از پایه بیشترین تأثیر را داشته است.

در شکل (۸) پروفیل طولی حفره آبشستگی اطراف پایه ۷۵ میلی‌متری نشان داده شده است. حفره آبشستگی بدون آستانه بیشترین حجم و مساحت آبشستگی را دارا می‌باشد و استفاده از آستانه در پشت پایه سبب کاهش حجم و مساحت آبشستگی شده و اثر فاصله آستانه بر کاهش آبشستگی در این شکل قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل(۸): پروفیل حفره آبشستگی اطراف پایه آزمایش A_0 تا A_5

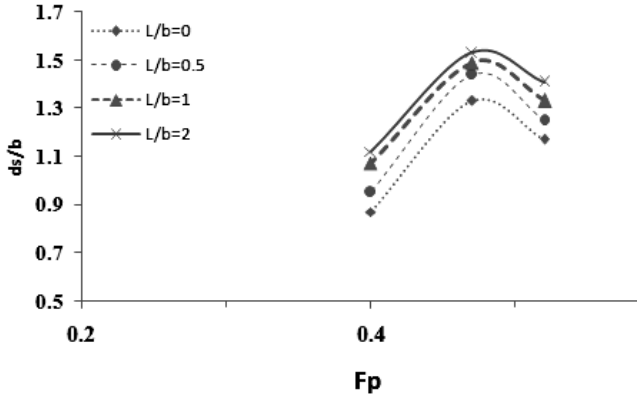
در شکل (۹) مقایسه بین عمق آبشستگی پایه در جلوی پایه، در دو قطر ۶۰ و ۷۵ میلی‌متری در دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه آورده شده است. با توجه به شکل، قطر پایه بر میزان عمق آبشستگی تأثیر دارد و هرچه قطر پایه افزایش می‌یابد، عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد، که بدلیل تاثیری است که روی جریان به سمت پایین و جریان‌های گردابی می‌گذارد.



شکل(۹): نمودار مقایسه عمق آبشستگی در قطر پایه ۶۰ و ۷۵ میلی‌متر در دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه

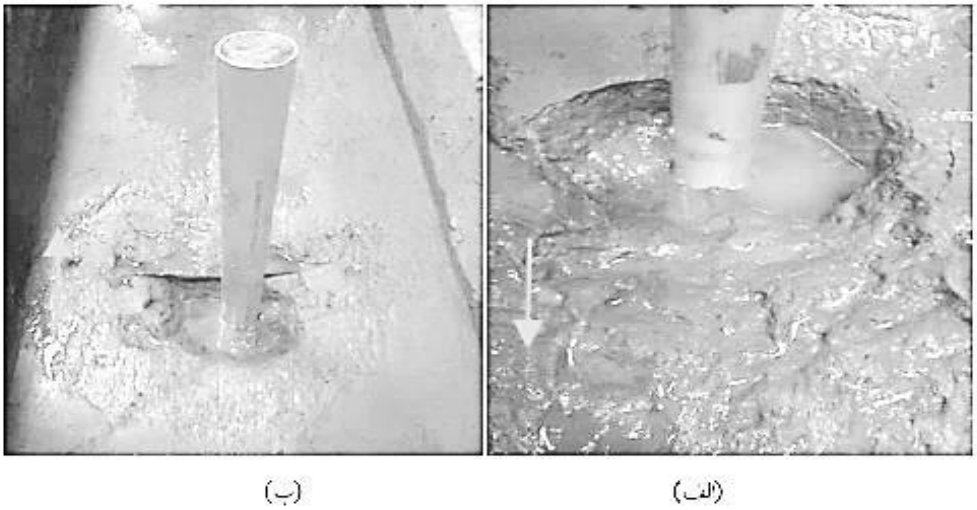
برای بررسی اثر عدد فرود پایه بر عمق آبشستگی در رابطه (۴)، شکل (۱۰) ترسیم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، عمق آبشستگی ابتدا با افزایش عدد فرود پایه افزایش یافته، ولی سپس کاهش یافته است. لذا نمی‌توان رابطه روشنی بین این دو پارامتر پیدا کرد.

گریملدی و همکاران (۲۰۰۹) با انجام آزمایشات روی کنترل آبشستگی اطراف پایه‌های پل با استفاده از آستانه در رسوبات غیرچسبنده دریافتند که آستانه از همان ابتدای آزمایش شروع به کاهش عمق آبشستگی نمی‌کند بلکه بعد از یک زمان مشخص (t_0) شروع به عمل می‌کند. این زمان بستگی به فاصله آستانه از پایه دارد و هرچه این فاصله کمتر باشد، زمان شروع به عمل آستانه کمتر می‌شود. در واقع هروقت آستانه در بستر خاک پدیدار شد شروع به کاهش آبشستگی می‌کند(Grimaldi et al., 2009). اما در رسوبات چسبنده با توجه به مشاهدات نظری در آزمایشات و همچنین با توجه به آزمایشات (Ting et al., 2002) روی آبشستگی رسوبات چسبنده اطراف پایه‌ی پل، حفره آبشستگی ابتدا در پشت پایه شروع شده و با گذشت زمان حفره آبشستگی به سمت جلوی پایه گسترده می‌شود، اما در رسوبات غیرچسبنده آبشستگی ابتدا از جلوی پایه شروع می‌شود و سپس به سمت پایه گسترش می‌یابد. لذا در رسوبات چسبنده آستانه همانطور که در نمودارهای قبلی مشاهده می‌شود، برخلاف رسوبات غیرچسبنده از همان ابتدای شروع به کاهش عمق آبشستگی می‌کند.

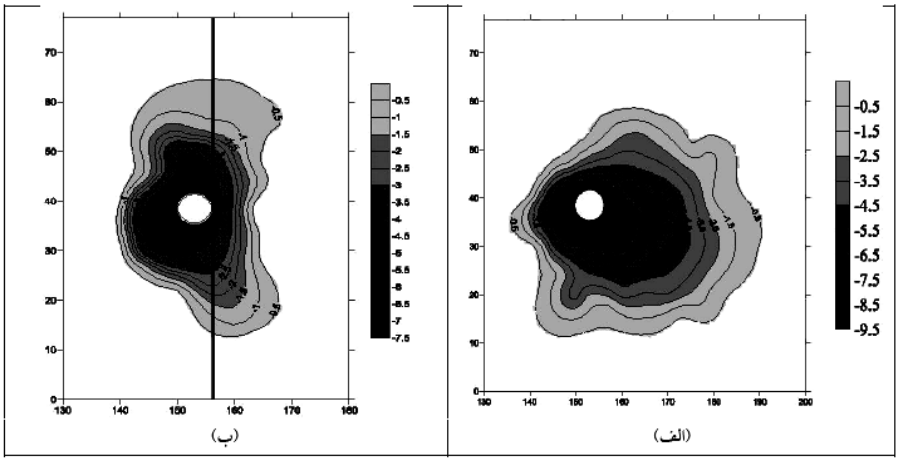


شکل(۱۰): عمق آبشستگی بدون بعد در مقابل عدد فرود پایه

در شکل (۱۱) حفره آبشستگی اطراف پایه پل با قطر ۶۰ میلی‌متر در دو حالت با و بدون حضور آستانه نشان داده شده است. در شکل (۱۲) منحنی‌های تراز اطراف پایه پل برای پایه با قطر ۶۰ میلی‌متر در دبی ۶۲ لیتر بر ثانیه برای دو حالت بدون آستانه و با آستانه در فاصله صفر از پایه آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود آستانه جلوی گسترش حفره آبشستگی به سمت پایین دست را گرفته است البته در نزدیکی آستانه حفره آبشستگی مقداری به صورت عرضی گسترش پیدا کرده است.



شکل(۱۱): تصویر آبشستگی اطراف پایه پل (جهت فلش نشان دهنده جهت جریان است) الف) بدون آستانه ب) با آستانه



شکل(۱۲) خطوط هم آبشستگی اطراف پایه پل الف) بدون آستانه ب) با آستانه

نتیجه‌گیری

تاثیر کاربرد آستانه در کنترل آبشستگی موضعی اطراف پایه پل و جلوگیری از توسعه چاله فرسایش به‌صورت آزمایشگاهی در رسوبات چسبنده و آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. قطر پایه مختلف، فواصل متفاوت آستانه تا پایه تحت شرایط جریان مختلف بررسی شد. فاصله آستانه تا پایه بعنوان موثرترین عامل در تغییر پارامترهای آبشستگی موضعی تعیین گردید و کاربرد آن باعث کاهش آبشستگی موضعی گردید. فاصله کمتر بین پایه و آستانه، اثر بیشتری در کاهش عمق داشته است. به طوری که قرارگیری آستانه درست در پشت آستانه (L/b=0) حدود ۲۶٪ عمق و ۶۱٪ حجم حفره آبشستگی را کاهش داده است و هرچه این فاصله بیشتر می‌شود کاهش آبشستگی کمتر می‌شود. آستانه در هر دو حالت، دبی در آستانه حرکت ذرات و دبی کمتر از آستانه حرکت ذرات، باعث کاهش عمق آبشستگی به یک اندازه شد. همچنین مشاهده شد که عمق آبشستگی رابطه مشخصی با عدد فرود پایه ندارد.

منابع

Breusers N. H. C. and A. J. Raudkvi. 1991. Scouring, 2nd Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Briaud, J. L., F., Ting, H. C., Chen, S. R., Gudavalli, S., Perugu, and G. Wei. 1999. SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. J Geotech Geoenviron. Eng., 125(4): 237–246.

Breusers, N. H. C., G. Nicollet, and H. W. Shen, 1977. Local scour around cylindrical piers. IAHR, J. Hyd. Res., 15(3): 211-252.

Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge Piers. JHE, ASCE, 118(9): 260-1269.

Chiew, Y. M. and S. Y. Lim, 2003. Protection of bridge piers using a sacrificial sill. Proc. ICE Water, Maritime and Energy 156(1): 53–62.

Ettem, R. 1980. Scour at Bridge Piers. Report No.216, University of Aucland, School of Engineering, New Zealand.

Franzetti, S., S. Malavasi, and C. Piccinin, 1994. Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare. Proc., XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Vol. II, T4 13–24.

Grimaldi, C., R., Gaudio, F., Calomino, A.H. Cardoso. 2009. Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. J. Hyd. Eng., 135(1): 13–21.

Grimaldi, C., R., Gaudio, F., Calomino, A.H. Cardoso. 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers: Slot and combined system of slot and bed sill. J. Hyd. Eng., 135(5): 425–431.

Heidarpour, M. 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot. Proc. International Conf. on Fluvial Hydraulics, 3-6 Sept., Louvain-la-Neuve, Belgium. 2:1069-1072.

Kumar, V., K. G. Ranga Raju, and N. Vittal, 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. ASCE, J. Hyd. Eng. 125(12): 1302-1305.

Laursen, E. M. and A. Toch. 1956. Scour around bridge piers and abutments. Iowa Highway Res. Board, Bulletin No. 4.

Melville1, B. W. and C. Yee-Meng. 1999. Time Scale for Local Scour at Bridge Piers, J.Hyd. Eng, ASCE, 125(1): 59-65.

Melvill B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. J Hyd Eng ASCE, 125 (1): 59-65.

Melville, B. W. and A. C. Hadfield. 1999. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures, J.Hyd. Eng, ASCE, 125(11): 1221-1224.

Parola, A.C. and J.S. Jones. 1991. Sizing riprap to protect bridge piers from scour. Transport. Res. Rec. No. 1290, pp: 276-280.

Ting, Francis. C. K., J-S., Briaud, R., Gudavalli , S., Perugu , G. Wei. 2002. Flume test for scour in clay at circular piers. J. Hyd. Eng., 127(11): 969-978.

Zarrati, A. R., M. Nazariha, and M. B. Mashahir. 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap. ASCE, J. Hyd. Eng. 132(2): 154-161.

Experimental Study on Effect of Downstream Bed Sill on Local Scour Around Bridge Piers in Cohesive Sediment

Mohammad Mehdi Ahmadi[1] , Mojtaba Hoseynnejad[2], Majid Rahimpour[3]

Abstract

Bridge pier scour is one of the three main causes of bridge failure. With the prospect of more severe and more frequent floods due to climate change, reducing the risk of bridge failure is becoming increasingly important. Therefore, different methods have been proposed to control scouring around bridge piers. In this study, the effect of bed sill on local scour around bridge piers that are embedded in cohesive soils has been studied experimentally. The bed sill was located in downstream and different distances from the piers. Cylindrical pipes with diameters of 60 mm and 75 mm were used as piers model.Result show that the effects of bed sill distance from piers in reduction of scour depth and scour volume is larger than the other parameter. By reducing the bed sill distance to the piers, scour depth and volume reduced. The best place to install bed sill is right next to the piers. It was found that the scour depth has no direct relationship with the piers Froude number.

Keyword: bridge pier, cohesive soil, Experimentation, Local scour, sill.

[1]Assistant professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
[2] Master of Water Structure, No 104 ,3 Alley, Dovlat St., Keshavarz Blvd, Shooshtar, Iran.
[3] Associate professor, Department of Water Engineering. Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.