

بررسی الگوی پوشش سنگ چین در محل احداث گروه پایه‌های استوانه‌ای در پل‌ها

ملیحه کیخانی، منوچهر حیدرپور* و سیدفرهاد موسوی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۴/۱)

چکیده

قرار دادن سنگ چین در اطراف پایه‌های پل‌ها مانع از ایجاد آب‌شستگی موضعی اطراف آنها می‌گردد. ارائه الگوی مناسب پوشش سنگ چین یک اصل ضروری برای اقتصادی بودن این روش است. در مطالعه حاضر محدوده پوشش سنگ چین در گروه پایه‌ها بررسی و با نتایج بدست آمده برای تک پایه مقایسه شده است. گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی در یک خط موازی با جهت جریان با قطر ۰/۲ متر در فاصله‌های دو و چهار برابر قطر پایه قرار گرفتند. چهار اندازه سنگ چین با قطرهای ۲/۸۶، ۳/۶۷، ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر برای پوشش دور پایه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در گروه پایه‌ها، پدیده حفاظت‌کننده و تقویت‌کننده در پایه جلویی و عقبی به ترتیب باعث ۳۱ درصد کاهش و ۶۰ درصد افزایش طول محدوده سنگ چین شد. افزایش فاصله بین پایه‌ها اگرچه موجب کاهش تأثیر پدیده تقویت‌کننده و حفاظت‌کننده شد ولی اثری بر تغییر الگوی پوشش سنگ چین نداشت. پدیده حفاظت‌کننده در گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی، گودال آب‌شستگی در پایه عقبی را به ترتیب به میزان ۴۶ درصد و ۵۴ درصد نسبت به تک پایه کاهش داده است. مقدار کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی در پایه عقبی گروه پایه سه‌تایی نسبت به گروه پایه دوتایی ۶۷ درصد بوده که به دلیل عامل حفاظ پایه‌های اول و دوم بر آن است. مناسب‌ترین شکل برای این که از آب‌شستگی بستر در انتهای محدوده سنگ چین در پشت پایه جلوگیری کند، نیم‌بیضی است. طول سنگ چین در پشت گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی به ترتیب نسبت به تک پایه به میزان ۳۱ و ۳۷/۵ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، سنگ چین، گروه پایه، گرداب برخاستگی

مقدمه

شیارهایی در کناره‌های پایه شده و رشد حفره در جلوی پایه را افزایش می‌دهد. گرداب‌های به وجود آمده در حفره و گرداب‌های نعل اسبی، رشد حفره و حمل مواد رسوبی به پایین دست را تسریع می‌کنند. هم‌چنین برخورد خطوط جریان و جدایی آنها از پایه عامل تشکیل گرداب برخاستگی است. عملکرد دو گرداب به وجود آمده زیر پی را خالی کرده و

یکی از مسائل مهم در تخریب پل‌های احداث شده روی رودخانه‌ها، آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های آنهاست (۲). برخورد جریان آب با پایه، جریان رو به پایینی در اثر گرادیان فشار به وجود می‌آورد که باعث حفر بستر در جلوی پایه می‌شود. افزایش تنش برشی در دو طرف پایه منجر به ایجاد

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشیار و استاد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: heidar@cc.iut.ac.ir

موجب تخریب سازه می‌گردند.

فرایند آب‌شستگی در حضور گروه پایه تحت تأثیر مکانیزم‌هایی است که آن را نسبت به تک پایه پیچیده‌تر می‌کند. تفاوت موجود باعث تغییر عمق و شکل آب‌شستگی در اطراف گروه پایه‌ها می‌شود. دو مکانیزم مهم که آب‌شستگی در گروه پایه‌های در امتداد هم را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارت‌اند از (۲۱ و ۲۲):

۱- عامل تقویت کننده (Reinforcing): این عامل باعث افزایش عمق آب‌شستگی در پایه جلویی می‌شود.

۲- عامل حفاظ بودن: وجود پایه بالادست باعث کاهش سرعت مؤثر جریان برای پایه پایین‌دست و بنابراین کاهش آب‌شستگی در آن می‌گردد.

هانا (۱۴) مطالعات خود را در زمینه آب‌شستگی در گروه پایه‌های دوتایی با استفاده از پایه‌های استوانه‌ای در جریان دائمی و در شرایط آب زلال و با استفاده از رسوبات یک‌نواخت با قطر متوسط 0.78 میلی‌متر انجام داد. طبق نتایج وی، زمانی که پایه‌ها دقیقاً کنار هم باشند، $S/b=1$ (فاصله پایه‌ها و b قطر پایه)، عمق آب‌شستگی در پایه جلویی برابر با آب‌شستگی در تک‌پایه خواهد بود. ولی با افزایش فاصله، تأثیر عامل تقویت‌کننده در پایه اول مشاهده می‌شود که این عامل در $S/b=2/5$ به حداکثر خود می‌رسد و تا $S/b=11$ وجود دارد. در فاصله‌های بیشتر از $S/b=11$ ، عمق آب‌شستگی در پایه جلویی برابر با مقدار آن در تک‌پایه خواهد بود.

نظریه‌ها (۱۹) فرایند آب‌شستگی موضعی را در گروه پایه‌های استوانه‌ای ۲، ۳، ۴ و ۶ تایی مورد بررسی قرار داد. نتایج مربوط به آب‌شستگی در گروه پایه‌های دوتایی نشان می‌دهد که تأثیر عامل تقویت‌کنندگی در $S/b=4$ حداکثر بوده و باعث ۱۰ درصد افزایش در عمق آب‌شستگی پایه جلویی نسبت به تک‌پایه شده و با تغییر فاصله این عامل کاهش پیدا کرده است. وی اثر زاویه برخورد جریان (α) در گروه پایه‌های سه‌تایی را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که با افزایش (α) حداکثر عمق آب‌شستگی پایه میانی در $\alpha = 50^\circ$ و برای $S/b=2$ اتفاق می‌افتد

و در پایه عقبی در $\alpha = 30^\circ$ و $S/b=11$ حداکثر عمق آب‌شستگی مشاهده می‌شود.

روش‌هایی که تاکنون برای کاهش آب‌شستگی موضعی به کار رفته شامل استفاده از سنگ‌چین توسط بروسرز و همکاران (۵) و پارولا (۲۱)، استفاده از طوقه در اطراف پایه توسط اتما (۱۲)، چپو (۶) و کومار و همکاران (۱۵)، استفاده از شکاف در میان پایه توسط چپو (۶)، کومار و همکاران (۱۵) و حیدرپور (۱۳) و استفاده از گروه پایه‌های جزئی توسط ویتال و همکاران (۲۷) بوده است.

حیدرپور و همکاران (۱)، با به کارگیری ۲۰ مدل آزمایشگاهی، کنترل آب‌شستگی موضعی در پایه پل را در شرایط آب زلال بررسی نمودند. مدل‌ها شامل یک پایه استوانه‌ای (Circular pier) بدون شکاف، سه پایه مستطیلی پیشانی گرد (Round – nosed pier) بدون شکاف و ۱۶ پایه شکاف‌دار بودند. طول شکاف‌ها برابر عرض (قطر) پایه و دو برابر آن انتخاب شد و در دو موقعیت نزدیک بستر و نزدیک سطح آب قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای پایه استوانه‌ای، شکاف‌هایی با طولی معادل قطر پایه و دو برابر آن در حالی که نزدیک سطح آب قرار گرفته باشند تأثیری بر روی آب‌شستگی نهایی ندارند. هم‌چنین برای کلیه مدل‌های مورد استفاده حداکثر کاهش آب‌شستگی توسط شکاف‌هایی با اندازه دو برابر عرض (قطر) پایه و موقعیت نزدیک بستر اتفاق می‌افتد.

مکلف سربند و همکاران (۳) توسعه حفره آب‌شستگی اطراف تک پایه مستطیلی به همراه طوق را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که نصب طوق علاوه بر کاهش مقدار عمق آب‌شستگی، نرخ آب‌شستگی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در شرایطی که نسبت U^*/U^*_c (سرعت برشی ذرات بستر، U^*_c سرعت برشی بحرانی آن) برابر 0.9 است، پس از گذشت ۱۵۰ ساعت از شروع آزمایش آب‌شستگی به جلوی پایه نرسیده و حداکثر عمق آب‌شستگی $b/42$ است. با افزایش این نسبت ($U^*/U^*_c = 0.95$) در مدت ۱۷ ساعت

گودال ایجاد شده می‌تواند منجر به ناپایداری لایه سنگ چین اطراف پایه گردد.

در زمینه ارائه ابعاد بهینه برای الگوی پوشش سنگ چین تحقیقات اندکی صورت گرفته است که به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول منظور از d_{R50} اندازه متوسط قطعات سنگ چین، b قطر پایه، U سرعت متوسط جریان و K ضریب تعدیل شکل پایه که برای پایه مستطیلی پیشانی گرد برابر $1/5$ و برای پایه مستطیلی برابر $1/7$ می‌باشد. شکل ۱ ابعاد پیشنهادی الگوی پوشش سنگ چین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر این الگوها دایره‌ای شکل می‌باشند.

تحقیق حاضر به بررسی ابعاد لازم برای محدوده پوشش سنگ چین در گروه پایه دوتایی و سه‌تایی و مقایسه آن با تک پایه در یک فلوم آزمایشگاهی پرداخته است.

مواد و روش‌ها

الف) فلوم و سنگ چین

فلوم مورد استفاده در آزمایشگاه، فلوم مستطیلی با طول ۷ متر، عرض ۳۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۶ سانتی‌متر بود. شیب کف کانال صفر و جریان حاصل شبه یک‌نواخت بود. دیواره‌های فلوم از فایبرگلاس شیشه‌ای و کف آن PVC می‌باشد. سیستم به یک مخزن حجم - زمان مجهز بود که به کمک آن می‌توان دبی را به دست آورد. آب در کانال به وسیله یک پمپ با حداکثر دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه در یک مدار بسته جاری می‌شد.

تمام آزمایش‌ها در حداکثر دبی انجام شد و تغییر سرعت با تنظیم ارتفاع آب در کانال صورت می‌گرفت. در انتهای فلوم یک سرریز قابل تنظیم، عمق آب در کانال را تنظیم می‌نمود. کف کانال به جز محدوده‌ای به طول یک متر که از رسوبات غیر چسبنده پرمی شد و مدل پایه در آن نصب می‌گردید، توسط دو سکوی فلزی در بالادست و پایین‌دست به ترتیب به طول‌های ۳ متر تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بالا آورده شد. محدوده بالادست (ابتدای کانال) نقش حوضچه آرامش را برای جریان خروجی از

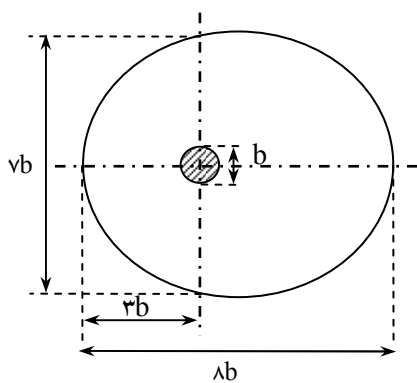
آب شستگی به جلوی پایه می‌رسد. رسیدن آب شستگی به جلوی پایه و نفوذ جریان به زیر طوق به تشکیل گرداب نعل اسبی و افزایش نرخ آب شستگی منجر می‌شود. در چنین شرایطی حداکثر عمق آب شستگی $1/4b$ اندازه‌گیری شده است. مطالعات مربوط به استفاده از سنگ چین دور پایه برای مهار آب شستگی موضعی شامل ارائه روش‌های مختلف طراحی سنگ چین، بررسی نحوه ناپایداری و خرابی سنگ چین دور پایه و اثر پارامترهای مختلف در پایداری سنگ چین در شرایط آب زلال و بستر متحرک می‌باشد.

پارولا (۲۱)، کروود (۱۱) و چپو (۷) خرابی سنگ چین را در شرایط آب زلال بررسی و روابطی تجربی نیز برای تعیین اندازه مناسب ذرات سنگ چین ارائه نمودند. چپو و لیم (۹ و ۱۰)، لوچلان و ملویل (۱۶)، چپو (۸) و آنگر و هگر (۲۶) رفتار سنگ چین و ناپایداری آن را در شرایط بستر زنده بررسی کردند.

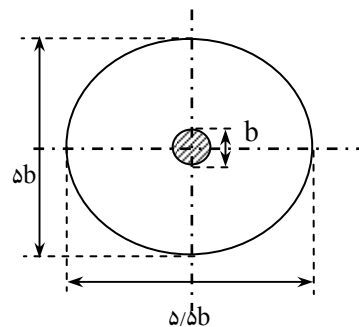
چپو (۷) خرابی سنگ چین را به سه دسته خرابی برشی، غربالی و لبه‌ای تقسیم‌بندی نمود. در خرابی برشی، اندازه و وزن سنگ‌دانه‌ها به اندازه‌ای کافی نیست تا بتواند در برابر جریان رو به پایین و گرداب‌های نعل اسبی حاصل از تغییر الگوی جریان توسط پایه مقاومت کند. وی زمان لازم برای انجام این خرابی را کمتر از ۱۵ دقیقه به دست آورد. خرابی غربالی با خروج ذرات بستر ریزدانه از داخل حفره‌های سنگ چین ایجاد می‌شود. خروج ذرات زیر لایه سنگ چین باعث پایین افتادن سطح آن و کاهش پایداری می‌گردد. با افزایش ضخامت لایه سنگ چین و با استفاده از فیلتر در زیر لایه سنگ چین می‌توان مانع از این خرابی شد. حرکت سنگ‌دانه‌ها در مرز لایه سنگ چین و ذرات بستر باعث ایجاد خرابی لبه‌ای می‌گردند. اگر ابعاد پوشش سنگ چین به اندازه کافی نباشد، میدان جریان حاصل می‌تواند روی بستر حفاظت نشده اثر بگذارد و منجر به تشکیل آب شستگی گردد. با بزرگ‌تر شدن شیارهای تشکیل شده دور سنگ چین، سنگ‌دانه‌های لبه لایه در معرض جریان قرار گرفته و به داخل گودال سقوط می‌کنند.

جدول ۱. مشخصات محدوده پوشش سنگ چین پیشنهادی در مطالعات قبلی

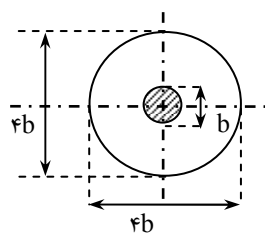
روش	اندازه سنگ دانه	محدوده ابعاد سنگ چین		
		طول	عرض	ضخامت
گیلز (به نقل از چپو، (۷))	نامعین	$5/5b$	$5b$	نامعین
بوناسونداس (۴)	$d_{R50} = 6 - 3/3u + 4u^2$ ($S_G = 2/65$)	$b/3$ که $2/5 b$ آن در جلوی پایه قرار دارد		
نیل (۲۰)	$d_{R50} = 1/52 u^2 / (S_G - 1)g$ ($S_G = 2/65$)	$1/5b$ از سطح پایه در تمام جهات	برابر با طول آن	$> 2d_{R50}$
پوزی (به نقل از چپو، (۷))	نامعین	$1/5 - 2/5b$ از سطح پایه در تمام جهات	برابر با طول آن	نامعین
بروسرز و همکاران (۵)	$1/384 u^2 / (S_G - 1)2g$	نامعین	نامعین	نامعین
ریچاردسون و همکاران (۲۴)	$0/692 (Ku^2) / (S_G - 1)2g$	نامعین	$2b$ از سطح پایه	$> 3d_{R50}$



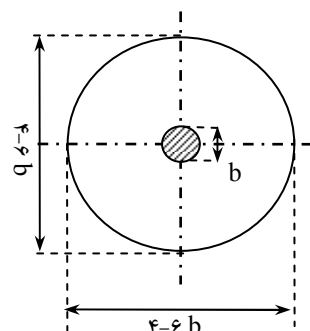
بوناسونداس (۲)



گیلز (به نقل از چپو، (۷))



نیل (۱۷)



پوزی (به نقل از چپو، (۷))

شکل ۱. الگوی پیشنهادی پوشش سنگ چین دور پایه در مطالعات قبل (جهت جریان از راست به چپ می باشد)

در مورد اندازه دانه‌های سنگ چین وجود دارد انتخاب شده است. بر اساس مطالعه چپو (۷)، اگر قطر دانه‌های سنگ چین نسبت به قطر پایه بیش از حد بزرگ باشد، الگوی تغییر جریان موضعی در محل پایه اثر نامحسوسی در گسیختگی لایه سنگ چین دور پایه دارد. همچنین اگر $b/d_{R50} \geq 2/25$ (b قطر پایه، d_{R50} قطر متوسط ذرات سنگ چین) باشد، نسبت U/U_C سرعت متوسط جریان، U_C سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات (بستر) برابر ۱ می‌شود. بنابراین وجود پایه در ناپایداری سنگ چین دور آن بی‌تأثیر است.

با توجه این که قطر پایه در این مطالعه ۲۰ میلی‌متر است، طبق ضابطه $b/d_{R50} \geq 2/25$ ، قطر متوسط ذرات سنگ چین باید کمتر از ۸/۸۹ میلی‌متر باشد. بنابراین از رسوبات رودخانه‌ای گردگوشه با چگالی نسبی ۲/۶۵ با چهار اندازه مختلف که دارای دانه‌بندی نسبتاً یک‌نواخت و قطر متوسط ۲/۸۶، ۳/۶۷، ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر بودند به عنوان سنگ چین استفاده شد.

حداقل ضخامت لایه سنگ چین با توجه به معیار ارائه شده توسط ریچاردسون و همکاران (۲۴) انتخاب شد؛ یعنی حداقل ضخامت لایه، سه برابر قطر متوسط ذرات سنگ چین در نظر گرفته شد. بر اساس مطالعه ورمن (۲۸) با انتخاب مناسب ضخامت لایه سنگ چین نیازی به قرار دادن لایه فیلتر در زیر آن نیست. بنابراین دو لایه به ضخامت سنگ چین افزوده شد و ضخامت لایه سنگ چین به همراه لایه فیلتر، حداقل ۵ برابر قطر متوسط قطعات سنگ چین در نظر گرفته شد. به این ترتیب احتمال وقوع خرابی به صورت غربالی از بین خواهد رفت.

با توجه به این که آب‌شستگی موضعی و هم‌چنین تعیین الگوی مناسب برای پوشش سنگ چین، در شرایط آب زلال بررسی می‌گردد لذا بایستی $U < U_C$ باشد. مطابق مطالعات رودکیوی (۲۲) شرایط آب‌شستگی زلال در $U = 0.95 U_C$ برقرار می‌گردد. اما حداکثر عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال زمانی ایجاد می‌شود که $U = 0.95 U_C$ باشد. بنابراین با توجه به دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه و با استفاده از معادلات ملویل (۱۷)، عمق جریان به گونه‌ای تنظیم شد که شرط $U = 0.95 U_C$

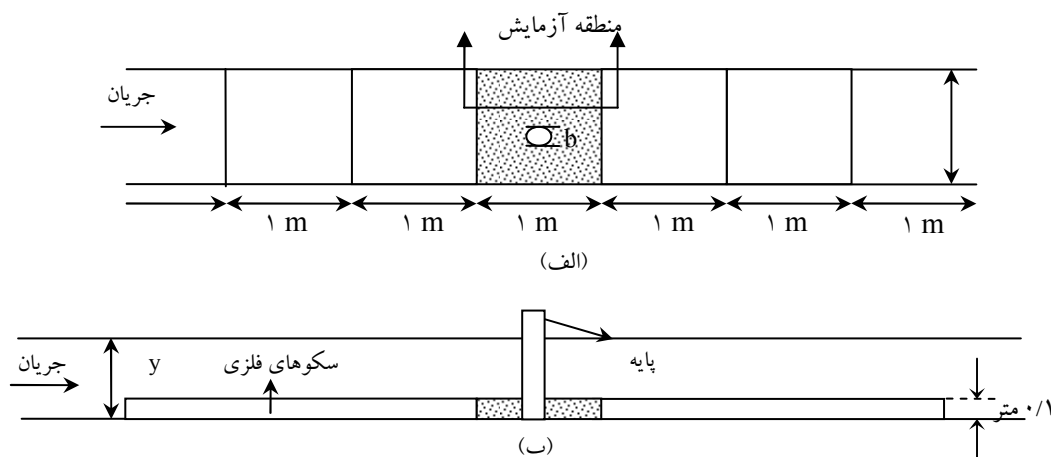
لوله انتقال آب داشت و محدوده انتهای کانال جهت جمع‌آوری رسوبات فرسایش یافته در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمایی از کانال آزمایشگاهی و منطقه مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

مدل مورد استفاده در این مطالعه، پایه استوانه‌ای با قطر ۲۰ میلی‌متر بوده که گروه پایه‌ها به صورت دوتایی و سه‌تایی در یک امتداد و در جهت جریان با فواصل $2b$ و $4b$ در کانال قرار می‌گرفتند (شکل ۳).

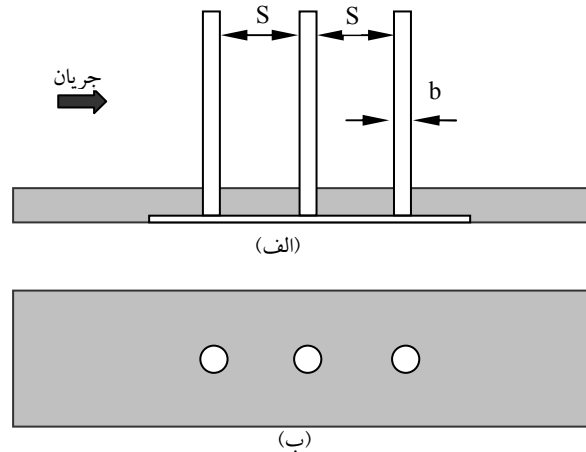
برای حذف تأثیر دیواره‌های کانال بر آب‌شستگی موضعی پایه، نسبت فاصله محور پایه تا دیواره کانال به قطر پایه باید از ۶/۲۵ بزرگ‌تر باشد (۲۲). به منظور برآورده شدن شرط فوق، قطر پایه ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد.

ذرات بستر باید به نحوی انتخاب شوند که علاوه بر داشتن حداکثر عمق آب‌شستگی، وضعیت بستر نیز همواره در شرایط آب زلال (Clear water) باشد. آب‌شستگی در رسوبات غیر چسبنده‌ای که دارای قطر کمتر از ۰/۷ میلی‌متر باشند همراه با حرکت ذرات بستر در بالادست پایه همانند وضعیت بستر زنده (Live bed) است. شروع حرکت در شرایطی است که سرعت برشی در کف به حدود ۰/۶ سرعت برشی بحرانی بستر ریزدانه برسد. حرکت ذرات در بالادست پایه منجر به تشکیل پشته (ریپل) می‌گردد (۲۲). ریپل‌های تشکیل شده وضعیت جریان را آشفته‌تر کرده و آب از حالت زلال خارج می‌شود. هم‌چنین نسبت b/d_{50} (b قطر پایه، d_{50} قطر متوسط ذرات بستر) باید بزرگ‌تر از ۲۰ تا ۲۵ باشد تا آب‌شستگی مستقل از اندازه ذرات باشد (۲۳). برای حذف تأثیر غیریک‌نواختی رسوبات بر آب‌شستگی، انحراف معیار هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۳ باشد (۲۵). با توجه به شرایط فوق، رسوبات انتخاب شده برای آزمایش‌ها دارای اندازه متوسط ۰/۷۲ میلی‌متر و $\sigma_g = 1/13$ می‌باشند. با توجه به حداکثر عمق آب‌شستگی برابر $b = 7/4$ سانتی‌متر و افزایش ۳۰ درصدی آن، ضخامت مصالح بستر ۱۰ سانتی‌متر انتخاب گردید (۱۸).

حداقل و حداکثر اندازه ذرات سنگ چین در این تحقیق (به ترتیب ۲/۸۶ و ۵/۱۸ میلی‌متر)، با توجه به محدودیت‌هایی که



شکل ۲. نمایی از کانال آزمایشگاهی و منطقه انجام آزمایش‌ها در کانال: الف) پلان و ب) مقطع عرضی



شکل ۳. آرایش و فاصله مدل‌ها: الف) نیم‌رخ و ب) پلان

آب‌شستگی مطرح است. برای زمان تعادل از نظریه چپو (۶) استفاده شده است و زمانی به عنوان زمان تعادل آب‌شستگی انتخاب گردید که ۸ ساعت پس از آن، عمق آب‌شستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند.

برقرار گردد. بنابراین حداکثر سرعت متناسب با حداقل عمق ۱۲ سانتی‌متر انتخاب گردید. جدول ۲ شرایط هیدرولیکی جریان را نشان می‌دهد.

ب) نحوه آب‌شستگی بستر ریزدانه

این آزمایش‌ها بدون قرارگیری سنگ‌چین دور پایه به منظور بررسی حداکثر ابعاد گودال آب‌شستگی دور تک پایه و گروه پایه دوتایی و سه‌تایی انجام شد. این آزمایش‌ها از نوع بلند مدت می‌باشد و در آنها زمان تعادل یا زمان رسیدن به حداکثر

ج) تعیین حداقل محدوده سنگ‌چین در شرایط آب زلال اگرچه مطالعات زیادی در باره تعیین اندازه مناسب قطعات سنگ‌چین برای حفاظت پایه‌های پل در مقابل آب‌شستگی انجام شده اما تعداد تحقیقات انجام شده در زمینه الگوی

جدول ۲. شرایط هیدرولیکی جریان

d_{50} (mm)	b/d_{50}	U_{*c} (m/s)	Y_0 (m)	U_c (m/s)	Y_c/b	U_c/U_c	Fr
۰/۷۲	۲۷/۷	۰/۰۱۸۸	۰/۱۲	۰/۲۹۳	۶	۰/۹	۰/۲۳۴

الگوی پوشش سنگ‌چین دور پایه را نشان می‌دهد. آب‌شستگی دیده شده در پشت پایه شامل حفره آب‌شستگی و تپه بعد از آن است. عامل این آب‌شستگی گرداب‌های برخاستگی پشت پایه، البته در سنگ‌دانه‌های با قطر کم (۲/۸۶ و ۳/۶۷ میلی‌متر) است که باعث حرکت سنگ‌دانه‌ها و انتقال از لبه لایه سنگ‌چین به پایین دست می‌شود. خرابی به وجود آمده در این حالت از نوع خرابی لبه‌ای می‌باشد. حتی اگر دانه‌های سنگ‌چین به اندازه کافی سنگین باشند، در صورتی که ابعاد و شکل محدوده پوشش آن دور پایه کافی و مناسب نباشد، احتمال خرابی سنگ‌چین وجود دارد.

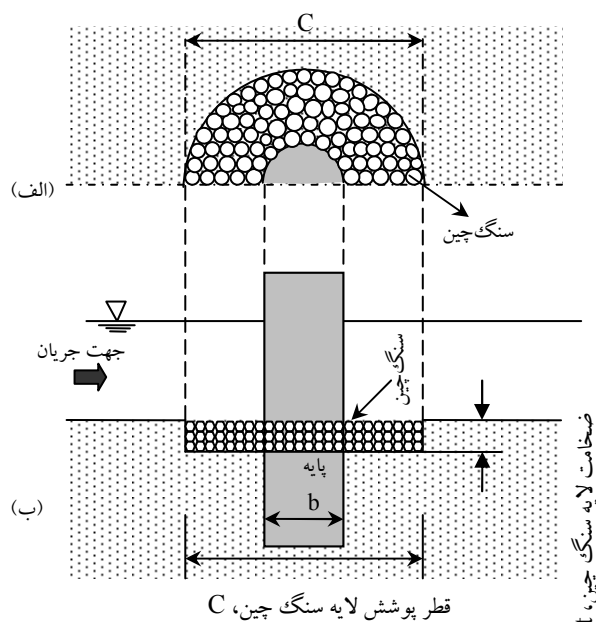
لازم به توضیح است که انتخاب شکل و ابعاد اولیه برای محدوده پوشش سنگ‌چین دور پایه با استفاده از درک و تجربه‌ای که از مشاهده الگوی جریان، نحوه آب‌شستگی و ابعاد حفره آب‌شستگی دور پایه در آزمایش‌های مربوط به بستر ریزدانه بدون سنگ‌چین به دست آمده صورت می‌گیرد.

نتایج و بحث

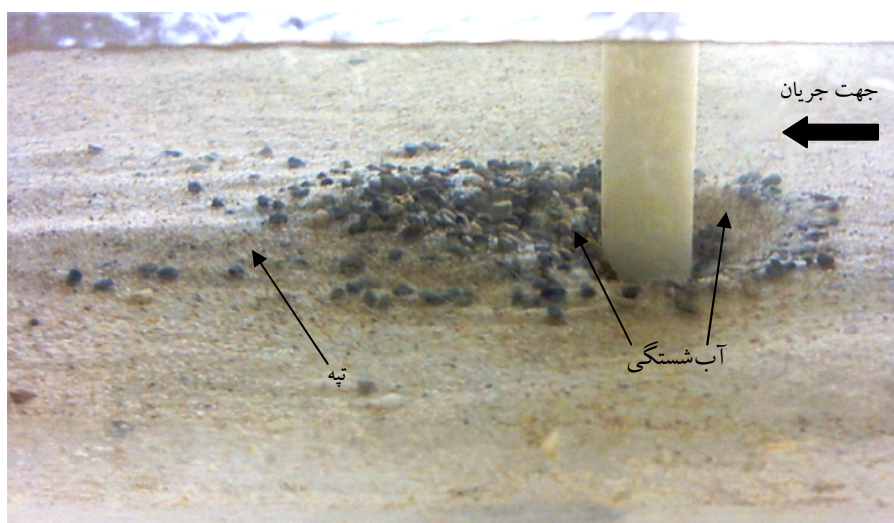
الف) مشاهده نحوه آب‌شستگی بستر بدون سنگ‌چین حفاظتی

شکل ۶ مقایسه توسعه زمانی آب‌شستگی را در تک‌پایه و گروه‌پایه دوتایی نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در تمام مدت زمان آزمایش، عمق آب‌شستگی پایه جلویی بیشتر از عمق آب‌شستگی تک‌پایه بوده و در پایه عقبی عمق آب‌شستگی کمتر از مقادیر مربوط به تک‌پایه است. دلیل این موضوع تأثیر پدیده تقویت‌کننده بر افزایش عمق آب‌شستگی پایه جلویی نسبت به تک‌پایه و اثر پدیده حفاظت‌کننده بر کاهش عمق آب‌شستگی پایه عقبی نسبت به تک‌پایه می‌باشد.

محدوده پوشش سنگ‌چین بسیار اندک است. طراحی نامناسب سنگ‌چین از نظر ابعاد محدوده پوشش، از کارایی سنگ‌چین در کنترل آب‌شستگی به میزان زیادی می‌کاهد. از این رو در تحقیق حاضر به تعیین حداقل ابعاد لازم برای محدوده پوشش سنگ‌چین در شرایط آب‌شستگی آب زلال پرداخته شده است و تأثیر تعداد پایه بر این ابعاد مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها بهترین الگوی ممکن برای پوشش سنگ‌چین دور تک پایه و گروه پایه دو تایی و سه تایی در یکی از شرایط هیدرولیکی بستر ریز دانه نزدیک به آستانه حرکت، تعیین شده است. شکل ۴ نمایی از بستر و پایه محافظت شده را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها از میان سه خرابی برشی، غربالی و لبه‌ای، دو نوع خرابی اول کاملاً متفی است و سعی شد که با انتخاب شکل و ابعاد مناسب برای محدوده پوشش سنگ‌چین دور پایه از خرابی سنگ‌چین در لبه‌ها و آب‌شستگی بستر دور آن جلوگیری شود. در این مرحله برای سه حالت ذکر شده، ابتدا شکل و ابعاد اولیه پوشش سنگ‌چین دور پایه قرار داده می‌شد. پس از تثبیت دبی و عمق مورد نظر در کانال، با آزمون و خطا، حداقل محدوده سنگ‌چین لازم برای کنترل آب‌شستگی در دبی حداکثر و عمق ۱۲ سانتی‌متر و نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت متوسط بحرانی آستانه حرکت رسوبات برابر با ۰/۹۵ به دست آمد. پس از برقراری عمق جریان در کانال، با مشاهده آب‌شستگی در اطراف محدوده سنگ‌چین، محدوده اعمال شده در آزمایش بعدی بزرگ‌تر و در غیر این صورت محدوده کوچک‌تر انتخاب شد. این کار تا رسیدن به محدوده لازم برای کنترل آب‌شستگی ادامه یافت. این روند در گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی نیز انجام شد. شکل ۵ آب‌شستگی موضعی بستر به دلیل نامناسب بودن



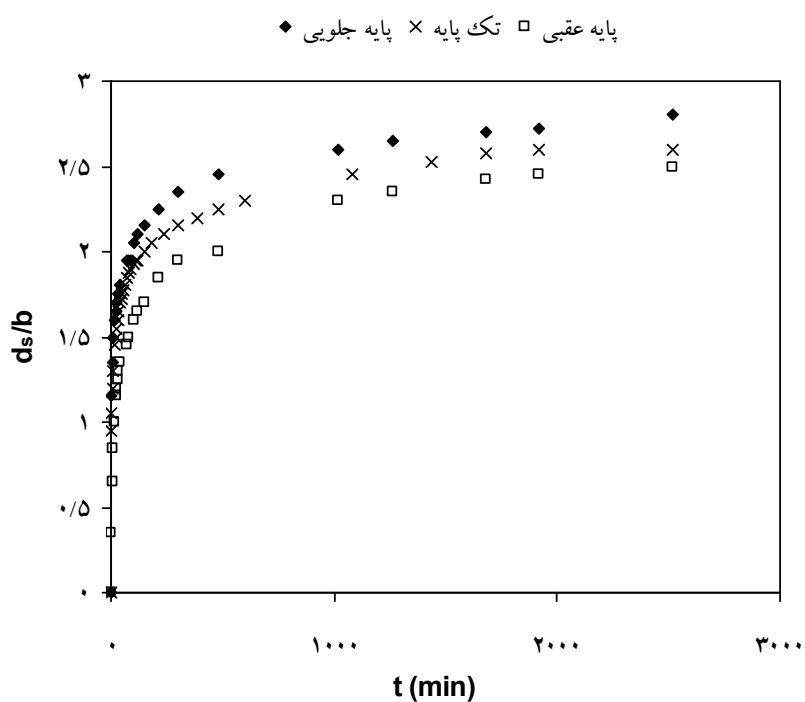
شکل ۴. طرح شماتیک لایه سنگ چین: الف) پلان و ب) مقطع عرضی



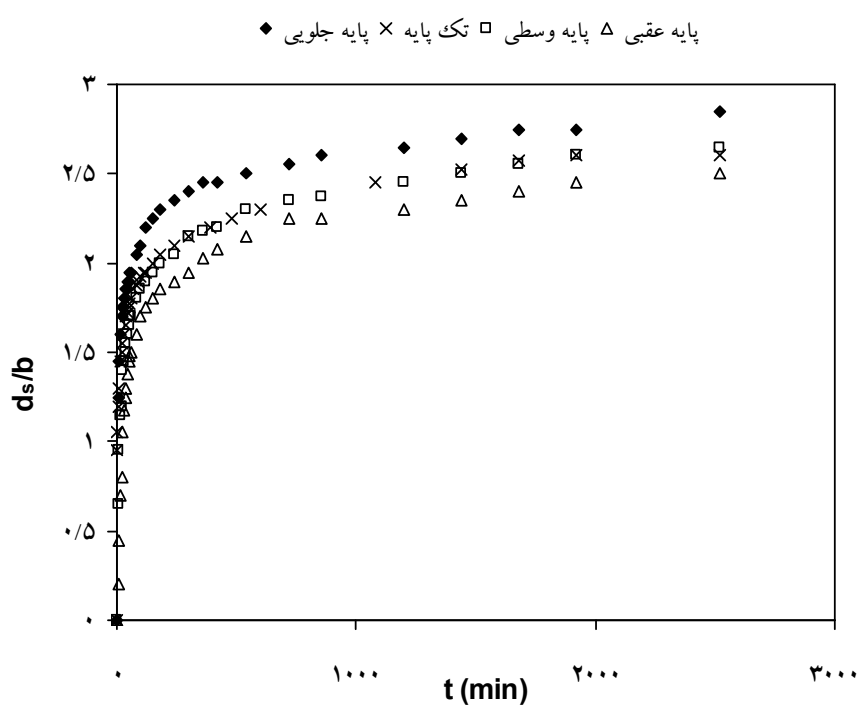
شکل ۵. آب شستگی موضعی بستر و تپه بعد از آن به علت نامناسب بودن الگوی سنگ چین

گروه پایه سه تایی تحت تأثیر پدیده تقویت کننده پایه های دوم و سوم می باشد. در حالی که پایه اول گروه پایه دوتایی تنها تحت تأثیر پایه دوم است که همین عامل منجر به افزایش عمق آب شستگی در پایه اول گروه پایه سه تایی نسبت به تک پایه و گروه پایه دوتایی می گردد. در گروه پایه دوتایی، پایه دوم تنها تحت تأثیر پدیده حفاظت کننده پایه اول بوده و پایه سوم

توسعه زمانی عمق آب شستگی برای گروه پایه سه تایی به فاصله $2b$ و مقایسه آن با نتایج تک پایه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود در تمام مدت آزمایش، عمق آب شستگی در پایه دوم کمتر از عمق آب شستگی در پایه اول و عمق آب شستگی در پایه سوم کمتر از عمق آب شستگی در پایه های اول و دوم می باشد. پایه اول



شکل ۶. مقایسه توسعه زمانی عمق آب شستگی در تک پایه و گروه پایه دوتایی با فاصله ۲b



شکل ۷. مقایسه توسعه زمانی عمق آب شستگی در تک پایه و گروه پایه سه تایی به فاصله ۲b

رسوبات بستر را با خود به طرف پایین دست حمل می‌کند. شکل غیر هندسی و نامنظم گودال آب‌شستگی تحت تأثیر این گرداب‌ها ایجاد می‌گردد. تأثیر گرداب‌های نعل اسبی در افزایش ابعاد گودال در گروه‌پایه سه‌تایی بیشتر است.

ب) تأثیر فاصله پایه‌ها بر عمق نهایی آب‌شستگی

نتایج مربوط به کاهش و یا افزایش عمق نهایی آب‌شستگی در گروه‌پایه‌ها نسبت به عمق نهایی آب‌شستگی در تک‌پایه در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول اعداد مثبت نشان دهنده درصد افزایش و اعداد منفی نشان دهنده درصد کاهش میزان عمق نهایی آب‌شستگی نسبت به تک‌پایه می‌باشند. اعداد جدول میزان افزایش عمق آب‌شستگی در پایه جلویی گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی را تحت تأثیر پدیده تقویت‌کننده و کاهش آن را تحت تأثیر پدیده حفاظ به خوبی نشان می‌دهند. با افزایش تعداد پایه از دو به سه، تأثیر پدیده تقویت‌کننده افزایش و با افزایش فاصله پایه‌ها تأثیر این پدیده کاهش می‌یابد. افزایش فاصله پایه‌ها همچنین موجب کاهش تأثیر پدیده حفاظ می‌شود. افزایش تعداد پایه از دو به سه، هنگامی که پایه‌ها از یکدیگر به اندازه ۲b فاصله داشته باشند تأثیری بر افزایش پدیده حفاظ در پایه سوم گروه‌پایه سه‌تایی ندارد.

ج) شکل و ابعاد لازم برای محدوده پوشش سنگ‌چین

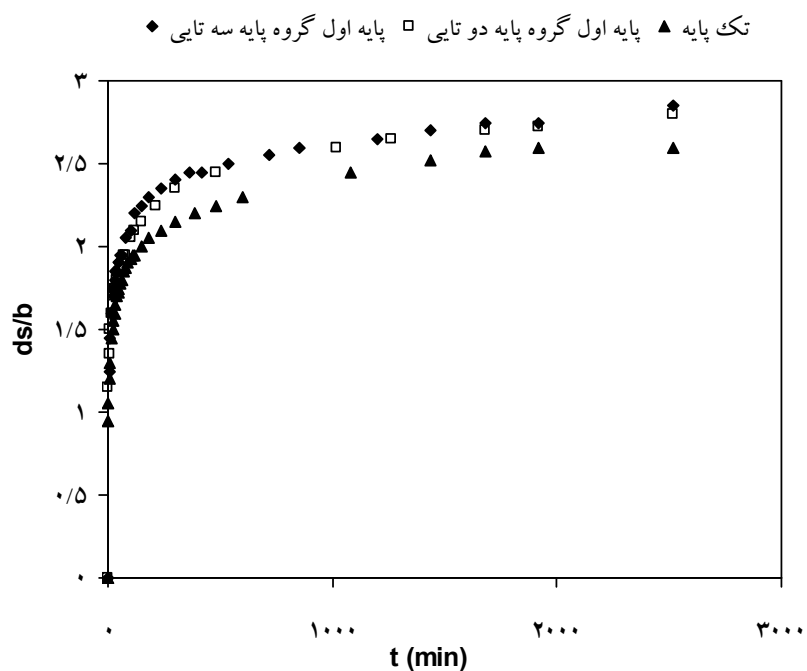
با توجه به این که عمق آب‌شستگی در مطالعه حاضر پس از گذشت ۴۲ ساعت به تعادل رسیده است و شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که در ۵ ساعت اولیه آزمایش ۸۵٪ عمق آب‌شستگی ایجاد گردیده است، زمان لازم برای بررسی کارایی ابعاد پوشش سنگ‌چین در حفاظت اطراف پایه، ۵ ساعت در نظر گرفته شد. قرار دادن سنگ‌چین طبق ابعاد پیشنهادی پوزی (به نقل از چیو، (۷)) اطراف تک پایه منجر به تخریب لایه سنگ‌چین گردید. در این حالت گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه توسعه پیدا کرده و باعث ایجاد گودال آب‌شستگی در انتهای محدوده پوشش سنگ‌چین گردید (ناحیه ۱، شکل ۱۱).

گروه‌پایه سه‌تایی تحت تأثیر پدیده حفاظت‌کننده پایه اول و تقویت‌کننده پایه سوم است (شکل ۸). شکل ۹ نشان می‌دهد که عمق آب‌شستگی در پایه دوم در گروه‌پایه سه‌تایی و دوتایی به ترتیب کاهش می‌یابد. به طوری که پایه دوم گروه‌پایه سه‌تایی بیشترین مقدار و پایه دوم گروه‌پایه دوتایی کمترین مقدار آب‌شستگی را داراست. در گروه‌پایه سه‌تایی بیشتر بودن تأثیر پدیده تقویت‌کننده پایه اول نسبت به اثر پدیده حفاظ پایه دوم منجر به نزدیک شدن روند تغییرات عمق آب‌شستگی در پایه دوم نسبت به تک‌پایه شده است.

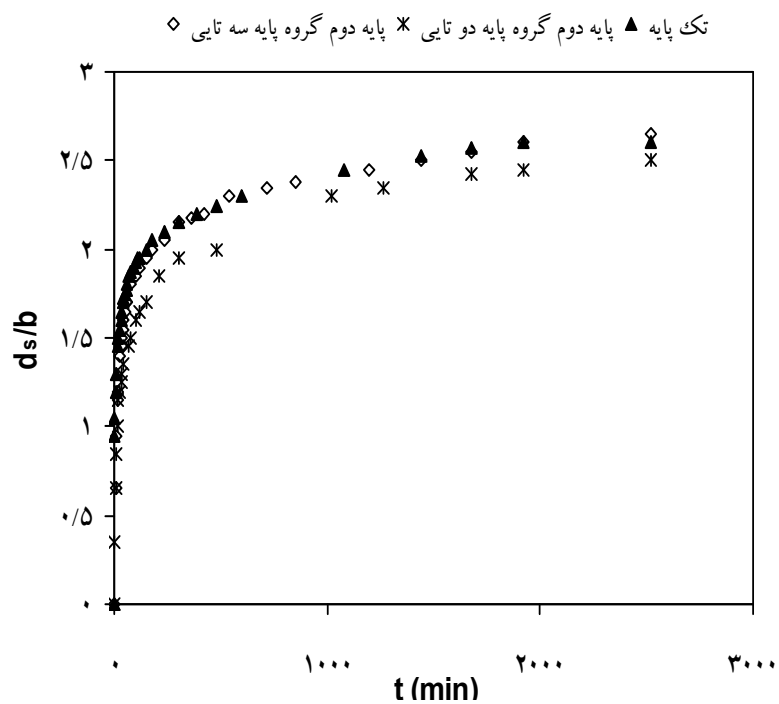
شکل ۱۰ ابعاد گودال آب‌شستگی در گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی را بعد از گذشت سه ساعت از آزمایش نشان می‌دهد. تأثیر پدیده تقویت‌کننده در پایه جلویی گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی ابعاد گودال آب‌شستگی در آن را به ترتیب ۱۴٪ و ۳۵٪ نسبت به تک پایه افزایش داده است. با توجه به این که پایه اول در گروه‌پایه سه‌تایی تحت تأثیر پدیده تقویت‌کننده پایه‌های دوم و سوم است، بنابراین گسترش گودال آب‌شستگی در آن نسبت به پایه اول گروه‌پایه دوتایی که تنها تحت تأثیر عامل تقویت پایه دوم قرار دارد، ۱۸٪ افزایش یافته است.

پدیده حفاظت‌کننده در گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی، گودال آب‌شستگی در پایه عقبی را به ترتیب به میزان ۴۶٪ و ۵۴٪ نسبت به تک پایه کاهش داده است. مقدار کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی در پایه عقبی گروه پایه سه‌تایی نسبت به گروه پایه دوتایی ۶۷٪ بوده که به دلیل عامل حفاظ پایه اول و دوم بر آن می‌باشد.

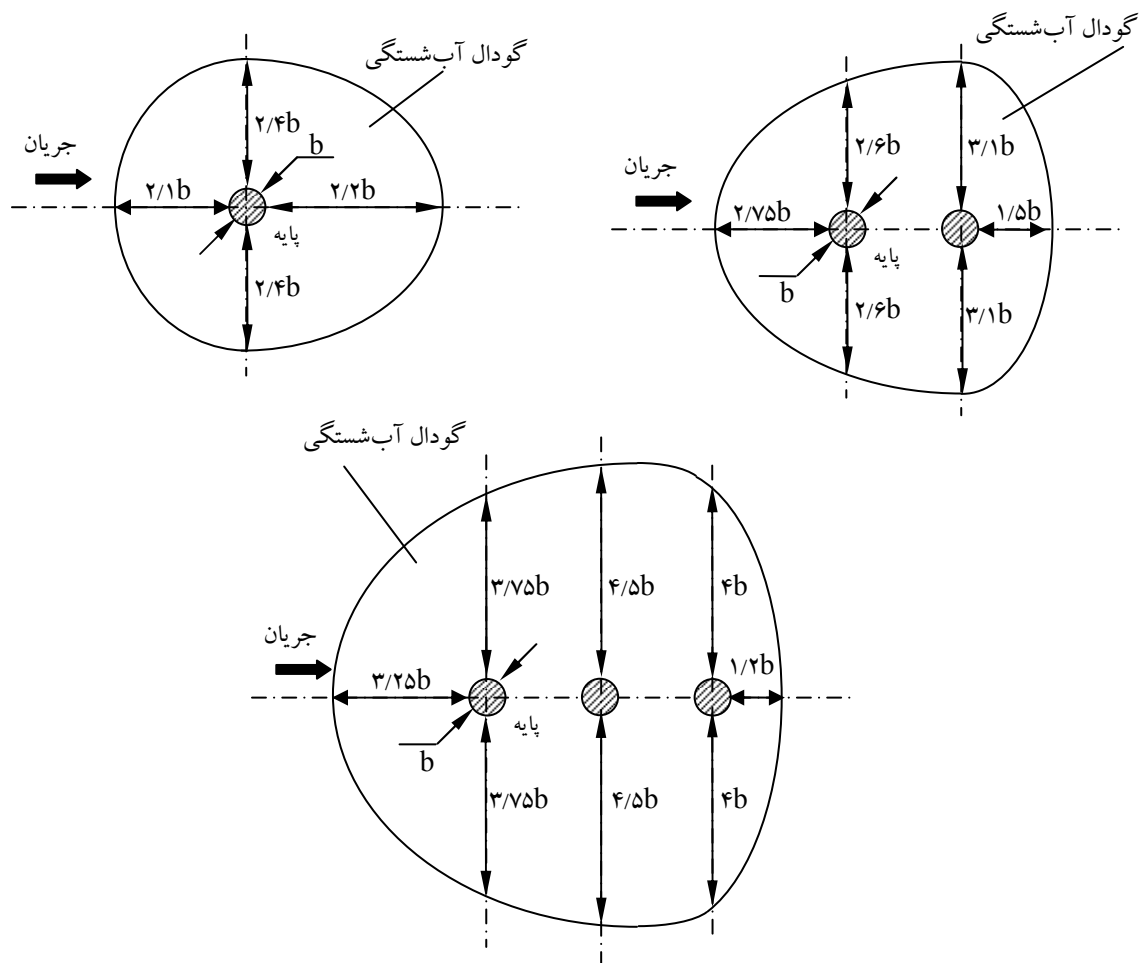
در گروه‌پایه دوتایی، وجود پایه اول باعث محدود شدن گسترش گودال آب‌شستگی در جلوی پایه دوم می‌گردد و چرخش گرداب‌های نعل اسبی موجب افزایش ابعاد گودال در طرفین پایه می‌شود. دوران گرداب‌های نعل اسبی در گودال آب‌شستگی منجر به عمیق‌تر شدن آن می‌گردد. گرداب نعل اسبی در فاصله‌ای مساوی با چند برابر قطر پایه بسیار ضعیف شده، هویت خود را از دست می‌دهد و جزء آشفتگی جریان می‌گردد ولی قبل از آن مانند یک جریان مارپیچ به جلو رفته و



شکل ۸. مقایسه تغییرات عمق آب‌شستگی در پایه اول گروه پایه‌های دو تایی و سه تایی با تک پایه



شکل ۹. مقایسه تغییرات عمق آب‌شستگی در پایه دوم گروه پایه‌های دو تایی و سه تایی با تک پایه



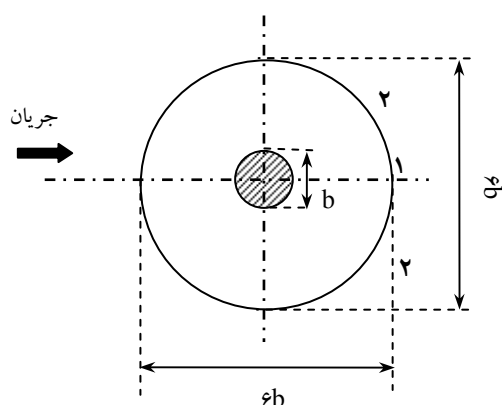
شکل ۱۰. ابعاد گودال آب شستگی در تک پایه و گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی (فاصله پایه‌ها دو برابر قطر پایه است)

جدول ۳. درصد کاهش یا افزایش عمق نهایی آب شستگی در گروه پایه‌ها نسبت به تک پایه

گروه پایه سه‌تایی			گروه پایه دوتایی		فاصله
پایه عقبی	پایه وسطی	پایه جلویی	پایه عقبی	پایه جلویی	
-۳/۸۴	۱/۹	۹/۶	-۳/۸۴	۷/۶۹	$S = 2b$
-۲/۶۹	۰/۹۶	۸/۶۵	-۱/۹۲	۴/۸	$S = 4b$

پایه حرکت کرده و بعد از گذشت ۲۰ دقیقه از شروع آزمایش به جلوی پایه رسیدند. تا قبل از متصل شدن آنها در جلوی پایه سنگ چین این ناحیه هیچ تغییری نداشت. با رسیدن این شیارها در جلوی پایه به دلیل تأثیر وجود جریان رو به پایین، لایه سنگ چین در جلوی پایه تخریب شد. تأثیر جریان رو به پایین

این گرداب‌ها بعد از گذشت ۰/۵ ساعت از شروع آزمایش قدرت بیشتری پیدا کردند و منجر به تشکیل گودال آب شستگی به عمق ۱۶ میلی‌متر در پشت پایه شدند. شیارهایی نیز هم‌زمان با فعالیت گرداب‌های برخاستگی در دو طرف پایه ایجاد شدند (ناحیه ۲، شکل ۱۱) که این شیارها به سمت جلوی

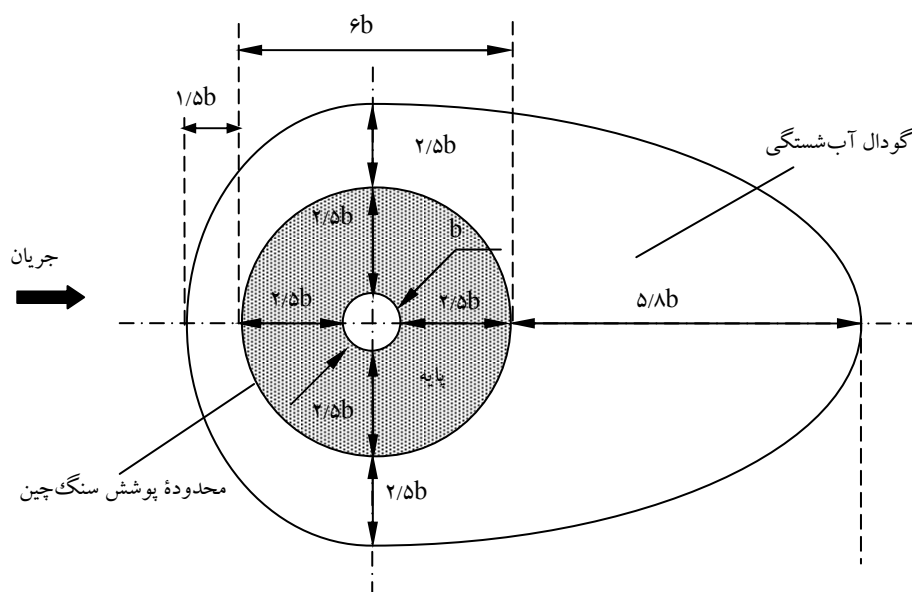


شکل ۱۱. تک پایه به همراه محدوده پوشش سنگ چین پیشنهادی پوزی (به نقل از چپو، (۷))

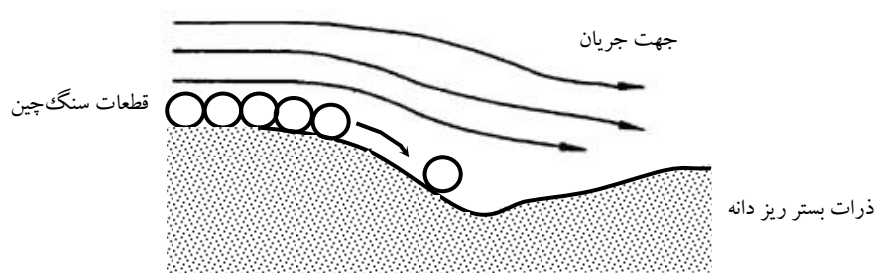
پایه گودال آب‌شستگی ایجاد شده ولی خرابی ذرات سنگ چین در این حالت بسیار کاهش یافته است. گودال آب‌شستگی در پشت پایه ۱۴ درصد، در طرفین آن ۶۰ درصد و در جلوی پایه ۶۷ درصد نسبت به ذرات سنگ چین با قطر ۲/۶۸ میلی‌متر کاهش یافته است. شکل ۱۴ گودال آب‌شستگی در اطراف پایه محافظت شده با ذرات سنگ چین به قطر ۵/۱۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود گودال آب‌شستگی به جلوی پایه نرسیده و با یک زاویه خاص نسبت به لایه سنگ چین گسترش یافته است. خرابی سنگ چین بیشتر در پشت و کناره‌های پایه اتفاق افتاده و انتقال ذرات سنگ چین به سمت پایین دست وجود نداشت. مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد محدوده پیشنهادی پوزی (به نقل از چپو، (۷)) در کنترل آب‌شستگی کارایی نداشته که در آزمایش‌های بعدی ابعاد پوشش سنگ چین بزرگ‌تر در نظر گرفته شد. کارایی ۱۰ الگوی متفاوت در محافظت تک پایه برای هر چهار اندازه سنگ چین بررسی گردید که در نهایت الگوی بهینه جهت پوشش سنگ چین دور تک پایه مطابق با شکل ۱۵ تعیین شد.

شکل ۱۶ ابعاد پوشش سنگ چین به طور منقطع در گروه پایه دوتایی را طبق پیشنهاد پوزی (به نقل از چپو، (۷)) نشان می‌دهد. در این حالت گرداب‌های برخاستگی به دلیل عامل حفاظ پایه اول بر پایه عقبی اثری بر ایجاد آب‌شستگی و

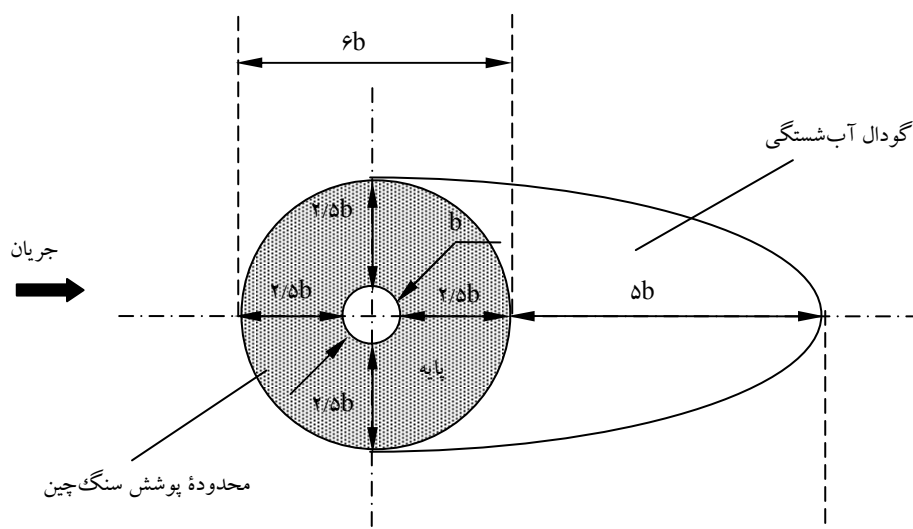
و گرداب‌های نعل اسبی شدت آب‌شستگی و در نتیجه تخریب لایه سنگ چین را افزایش داد و گودال آب‌شستگی مطابق با شکل ۱۲ در اطراف پایه ایجاد شد. برای ذرات سنگ چین با قطرهای ۲/۸۶ و ۳/۶۷ میلی‌متر که دارای وزن کمتری هستند، تأثیر گرداب‌های برخاستگی در تخریب سنگ چین مشهودتر است به طوری که باعث بلند شدن و پرتاب کردن این ذرات در گودال آب‌شستگی می‌گردند. ابعاد گودال آب‌شستگی در تک پایه دارای سنگ چین با قطر ۳/۶۷ میلی‌متر نسبت به قطر ۲/۸۶ میلی‌متر کاهش یافته است که به دلیل افزایش وزن ذرات و کاهش قدرت گرداب‌ها در تخریب لایه سنگ چین است. گودال آب‌شستگی برای ذرات سنگ چین با قطر ۳/۶۷ میلی‌متر در پشت پایه ۵ درصد، در طرفین آن ۴۰ درصد و در جلوی پایه ۳۳ درصد نسبت به لایه سنگ چین با قطر ۲/۸۶ میلی‌متر کاهش یافته است. برای ذرات سنگ چین با قطر ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر افزایش وزن منجر به کاهش تأثیر گرداب‌های برخاستگی در خرابی سنگ چین در لبه‌های آن می‌گردد. گرداب برخاستگی تنها منجر به تشکیل گودال در پشت پایه گردیده، قطعات سنگ چین در معرض جریان قرار گرفته و به داخل گودال می‌غلطند. شکل ۱۳ نحوه تخریب را تحت این شرایط نشان می‌دهد. برای ذرات سنگ چین با قطر ۴/۳۸ میلی‌متر، با گسترش شیارهای به وجود آمده در ناحیه ۲ به سمت جلوی



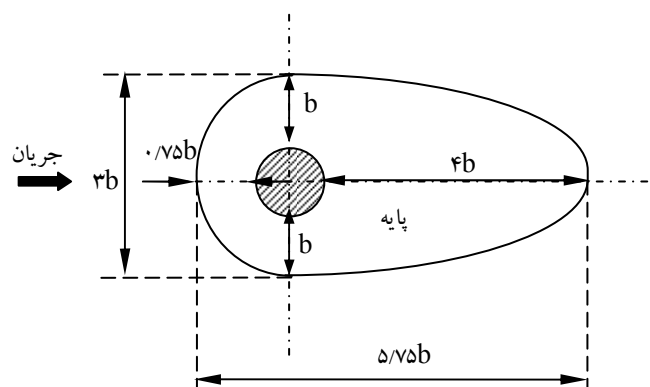
شکل ۱۲. ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی دور تک پایه دارای سنگ چین با قطر ۲/۸۶ میلی‌متر در حالت $U/U_c = 0.95$



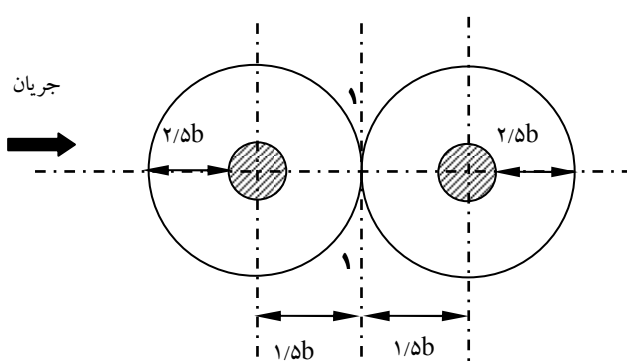
شکل ۱۳. نمایی از نحوه خرابی لبه‌ای در لایه سنگ چین (۷)



شکل ۱۴. ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی دور تک پایه دارای سنگ چین با قطر ۵/۱۸ میلی‌متر در حالت $U/U_c = 0.95$



شکل ۱۵. محدوده پوشش پیشنهادی سنگ چین دور تک پایه

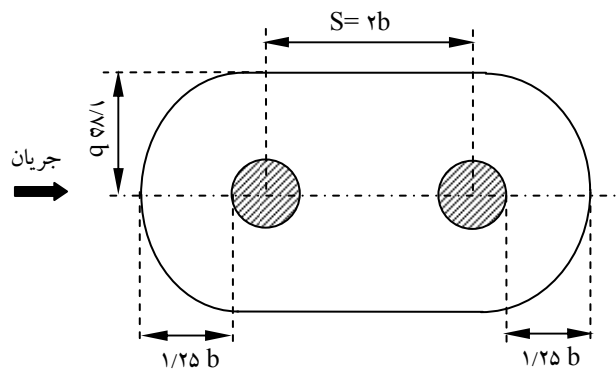


شکل ۱۶. گروه پایه دوتایی به همراه محدوده پوشش سنگ چین به صورت منقطع

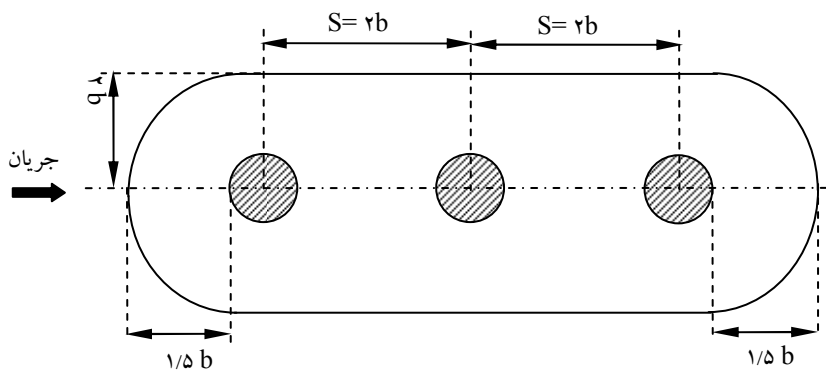
شده‌اند. همان طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، مناسب‌ترین شکل برای این که از آب‌شستگی بستر در انتهای محدوده سنگ چین در پشت پایه جلوگیری کند نیم بیضی است. لازم به ذکر است که تعمیم دادن ابعاد به دست آمده در محدوده این آزمایش‌ها به حالت‌های دیگر نیاز به بررسی و مطالعات بیشتری دارد.

مقایسه شکل‌های ۱۵، ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهد که طول محدوده پوشش سنگ چین در پشت تک پایه نسبت به گروه پایه‌ها بیشتر است. دلیل این امر تأثیر سیستم گردابی در پشت پایه بر ایجاد آب‌شستگی موضعی است. مقایسه الگوی سنگ چین دور تک پایه در مطالعه حاضر با نتایج سایر محققین نشان می‌دهد که الگوهای مطالعات قبلی به دلیل در نظر نگرفتن اثر این عوامل از نظر شکل و ابعاد مناسب نیستند. استفاده از این الگوها برای حفاظت تک پایه منجر به خرابی لبه‌ای در پشت

تخریب لایه سنگ چین در پشت پایه مانند تک پایه نداشته و تنها دو شیار در ناحیه ۱ به وجود آمده که به سمت جلوی پایه گسترش می‌یابد. منقطع بودن الگو و تأثیر پدیده تقویت کننده پایه دوم باعث گردیده تا لایه سنگ چین در این ناحیه تحت تأثیر تنش قرار گیرد. با افزایش ابعاد شیارها ذرات سنگ چین در این ناحیه در معرض جریان قرار گرفته و به داخل شیار می‌غلطند. با رسیدن شیارها در جلوی پایه، گرداب نعل اسبی تشکیل شده که تأثیر این گرداب‌ها و پدیده تقویت کننده باعث افزایش نرخ آب‌شستگی و تخریب لایه سنگ چین در جلوی پایه می‌گردد. بنابراین استفاده از الگوی منقطع برای گروه پایه‌ها به دلیل بر افزایش مقدار سنگ چین مورد نیاز و کارایی بسیار پایین در حفاظت گروه پایه‌ها مناسب نبوده و از الگوی پیوسته استفاده شد. ابعاد پیشنهادی پوشش سنگ چین برای گروه پایه‌های دوتایی و سه تایی در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آورده



شکل ۱۷. محدوده پیشنهادی پوشش سنگ‌چین دور گروه پایه دوتایی



شکل ۱۸. محدوده پیشنهادی پوشش سنگ‌چین دور گروه پایه سه‌تایی

وجود دارد و به همین دلیل نمی‌توان از پوشش سنگ‌چین به طور منقطع، به طوری که فقط پشت پایه اول تا یک فاصله مشخص محافظت شود برای گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی با فاصله $2b$ استفاده نمود و برای فاصله‌های بیشتر پایه‌ها این مسأله نیاز به بررسی بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

- ۱- محدوده پوشش سنگ‌چین در پشت تک پایه نسبت به گروه پایه‌ها دارای طول بیشتری است. دلیل این امر تأثیر سیستم گردابی پشت پایه بر ایجاد آب‌شستگی موضعی است. در حالی که در گروه پایه‌ها عامل حفاظت بودن از قدرت گرداب‌های برخاستگی پشت پایه کاسته و در نتیجه محدوده پوشش سنگ‌چین در پشت پایه کاهش یافته است.
- ۲- مساحت محدوده پوشش سنگ‌چین در گروه پایه‌ها برای هر

پایه و گسترش آن به سمت جلوی پایه می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که طول سنگ‌چین در پشت گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی به ترتیب نسبت به تک‌پایه به میزان ۳۱ و ۳۷/۵ درصد کاهش یافته است. این کاهش به دلیل اثر عامل حفاظت‌کننده پایه‌های جلویی بر پایه‌های عقبی می‌باشد. عامل تقویت‌کننده در گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی باعث افزایش پوشش محدوده سنگ‌چین در حدود ۶۰ درصد گردیده است. اثر گرداب‌های نعل اسبی در گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی شدیدتر است که موجب افزایش طول محدوده سنگ‌چین لازم در کناره‌های گروه‌پایه‌ها می‌گردد. اگر چه با افزایش فاصله پایه‌ها، اثر پدیده حفاظت‌کننده و تقویت‌کننده کاهش می‌یابد ولی طول پوشش سنگ‌چین در پشت گروه پایه دوتایی و سه‌تایی تغییری نیافته است. پوشش سنگ‌چین در تک‌پایه نشان می‌دهد که تأثیر گرداب‌های برخاستگی تا فاصله $2b$ از پایه

- پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است که یکی از امتیازات کاربرد سنگ چین برای حفاظت گروه پایه‌هاست.
- ۳- تأثیر زیاد گرداب‌های نعل اسبی در افزایش ابعاد گودال آب شستگی در گروه پایه‌ها نسبت به تک پایه منجر به افزایش
- محدوده پوشش سنگ چین در کناره‌های پایه شده است.
- ۴- با توجه به تأثیر گرداب‌های برخاستگی در گروه پایه‌ها الگوی منقطع سنگ چین برای حفاظت پایه‌ها مناسب نمی‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. حیدرپور، م.، ح. افصلی مهر و م. نادری بنی. ۱۳۸۲. کنترل و کاهش آب شستگی موضعی در پایه‌های پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۷(۳): ۱۳-۲۸.
۲. زرانی، ا. ر. ۱۳۸۱. نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
۳. مکلف سربند، ا. م. بدلی مشاهیر و ا. زرانی. ۱۳۸۵. توسعه حفره آب شستگی موضعی اطراف یک پایه مستطیلی همراه با طوق. هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
4. Bonasoundas, M. 1973. Flow structure and problems at circular bridge piers. Report No. 28, Oskar V. Miller Institute, Univ. Munich, Germany.
5. Breusers, N. H. C., G. Nicollet and H. W. Shen. 1977. Local scour around cylindrical piers. IAHR, J. Hyd. Res. 15(3): 211-252.
6. Chiew, Y. M. 1992. Scour protection at bridge piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 118(9): 1260-1269.
7. Chiew, Y. M. 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 121(9): 635-643.
8. Chiew, Y. M. 2004. Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel. ASCE, J. Hyd. Eng. 130(3): 218-225.
9. Chiew, Y. M. and F. H. Lim. 2000. Failure behavior of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions. ASCE, J. Hyd. Eng. 126(1): 43-55.
10. Chiew, Y. M. and F. H. Lim. 2001. Parametric study of riprap failure around bridge piers. IAHR, J. Hyd. Res. 39(1): 61-72.
11. Croad, R. N. 1997. Protection from scour of bridge piers using riprap. Transit New Zealand Res. Rep. No. PR3-0071, Works Consultancy Services Ltd., Central Laboratories, Lower Hutt, New Zealand.
12. Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers. Report No. 216, University of Auckland, New Zealand.
13. 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.
14. Hannah, C. R. 1978. Scour at pile groups. Research Rep. No. 78-3, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, New Zealand, pp. 18-40.
15. 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.
16. Lauchlan, C. S. and B. W. Melville. 2001. Riprap protection at bridge piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 127(5): 412-418.
17. Melville, B. W. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. ASCE, J. Hyd. Eng. 123(2): 125-136.
18. Melville, B. W. and Y. M. Chiew. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 125(1): 59-65.
19. Nazariha, M. 1996. Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups. PhD. Dissertation, University of Ottawa, Canada.
20. Neill, C. R. 1973. Guide to Bridge Hydraulics. Road and Transportation Association of Canada, Univ. of Toronto, Canada.
21. Parola, A. C. 1993. Stability of riprap at bridge piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 119(10): 1080-1093.
22. Raudkivi, A. J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
23. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 109(3): 338-350.
24. Richardson, E. V., R. W. Vance and S. R. Davis. 1991. Evaluation of scour at bridges. Rep. No. FHWA-IP-90-017 HEC 18, Federal Hwy. Administration, Washington, D.C.
25. Shafai-Bajestan, M. 1991. Critical stability number in rock lined channels. J. Iran Agric. Res. 9(2): 121-138.
26. Unger, J. and W. H. Hager. 2006. Riprap failure at circular bridge piers. ASCE, J. Hyd. Eng. 132(4): 354-362.
27. Vittal, N., U. C. Kuthyari and M. Haghighat. 1994. Clear-water scour around bridge pier group. ASCE, J. Hyd. Eng. 120(11): 1309-1318.
28. Worman, A. 1989. Riprap protection without filter layers. ASCE, J. Hyd. Eng. 115(12): 1600-1615.