بررسی الگوی پوشش سنگ‌چین در محل احداث گروه‌پایه‌های استوانه‌ای در پل‌ها

ملیحه کیخائی، منوچهر حیدرپور* و سیدفرهاد موسوی[۱]

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

چکیده

قرار دادن سنگ‌چین در اطراف پایه‌های پل‌ها مانع از ایجاد آب‌شستگی موضعی اطراف آنها می‌گردد. ارائه الگوی مناسب پوشش سنگ‌چین یک اصل ضروری برای اقتصادی بودن این روش است. در مطالعه حاضر محدوده پوشش سنگ‌چین در گروه‌پایه‌ها بررسی و با نتایج بدست آمده برای تک پایه مقایسه شده است. گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی در یک خط موازی با جهت جریان با قطر ۰/۰۲ متر در فاصله‌های دو و چهار برابر قطر پایه قرار گرفتند. چهار اندازه سنگ‌چین با قطرهای ۲/۸۶، ۳/۶۷، ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر برای پوشش دور پایه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در گروه‌پایه‌ها، پدیده حفاظت‌کننده و تقویت‌کننده در پایه جلویی و عقبی به ترتیب باعث ۳۱ درصد کاهش و ۶۰ درصد افزایش طول محدوده سنگ‌چین شد. افزایش فاصله بین پایه‌ها اگرچه موجب کاهش تأثیر پدیده تقویت‌کننده و حفاظت‌کننده شد ولی اثری بر تغییر الگوی پوشش سنگ‌چین نداشت. پدیده حفاظت‌کننده در گروه‌پایه‌های 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 گروه‌پایه سه‌تایی نسبت به گروه‌پایه دوتایی ۶۷ درصد بوده که به دلیل عامل حفاظ پایه‌های اول و دوم بر آن است. مناسب‌ترین شکل برای این‌که از آب‌شستگی بستر در انتهای محدوده سنگ‌چین در پشت پایه جلوگیری کند، نیم‌بیضی است. طول سنگ‌چین در پشت گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی به ترتیب نسبت به تک‌پایه به میزان ۳۱ و ۳۷/۵ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، سنگ‌چین، گروه‌پایه، گرداب برخاستگی

مقدمه

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 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 پایین‌دست 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

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

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 پایهٔ 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 زمینهٔ 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 ۰/۷۸ میلی‌متر انجام داد. طبق نتایج وی، زمانی که پایه‌ها دقیقاً کنار هم باشند، S/b=۱ (S فاصله پایه‌ها و b قطر پایه)، عمق آب‌شستگی در پایهٔ 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=۲/۵ به حداکثر خود می‌رسد و تا S/b=۱۱ وجود دارد. در فاصله‌های بیشتر از S/b=۱۱، عمق آب‌شستگی در پایه جلویی برابر با مقدار آن در تک‌پایه خواهد بود.

نظریها (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=۴ حداکثر بوده و باعث ۱۰ درصد افزایش در عمق آب‌شستگی پایهٔ جلویی نسبت به تک‌پایه شده و با تغییر فاصله این عامل کاهش پیدا کرده است. وی اثر زاویهٔ 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 α = ۵۰° و برای S/b=۲ اتفاق می‌افتد و در پایه عقبی در α = ۳۰° و S/b=۱۱ 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)، چیو (۶) و کومار و همکاران (۱۵)، استفاده از شکاف در میان پایه توسط چیو (۶)، کومار و همکاران (۱۵) و حیدرپور (۱۳) و استفاده از گروه پایه‌های جزئی توسط وایتال 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 قرارگرفتند. 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 (U^* سرعت برشی ذرات بستر، U^*_C سرعت برشی بحرانی آن) برابر ۰/۹ است، پس از گذشت ۱۵۰ ساعت از شروع آزمایش آب‌شستگی به جلوی پایه نرسیده و حداکثر عمق آب‌شستگی b ۰/۴۲ است. با افزایش این نسبت (U^*/U^*_C =۰/۹۵) در مدت ۱۷ ساعت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

آب‌شستگی به جلوی پایه می‌رسد. رسیدن آب‌شستگی به جلوی پایه و نفوذ جریان به زیر طوق به تشکیل گرداب نعل اسبی و افزایش نرخ آب‌شستگی منجر می‌شود. در چنین شرایطی حداکثر عمق آب‌شستگی ۱/۴b اندازه‌گیری شده است.

مطالعات مربوط به استفاده از سنگ‌چین دور پایه برای مهار آب‌شستگی موضعی شامل ارائه روش‌های مختلف طراحی سنگ‌چین، بررسی نحوه ناپایداری و خرابی سنگ‌چین دور پایه و اثر پارامترهای مختلف در پایداری سنگ‌چین در شرایط آب زلال و بستر متحرک می‌باشد.

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

چیو (۷) خرابی سنگ‌چین 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 سنگ‌چین ایجاد می‌شود. خروج ذرات زیر لایه سنگ‌چین باعث پایین افتادن سطح آن و کاهش پایداری می‌گردد. با افزایش ضخامت لایه سنگ‌چین و با استفاده از فیلتر در زیر لایه سنگ‌چین می‌توان مانع از این خرابی شد. حرکت سنگ‌دانه‌ها در مرز لایه سنگ‌چین و ذرات بستر باعث ایجاد خرابی لبه‌ای می‌گردند. اگر ابعاد پوشش سنگ‌چین به اندازه کافی نباشد، میدان جریان حاصل می‌تواند روی بستر حفاظت نشده اثر بگذارد و منجر به تشکیل آب‌شستگی گردد. با بزرگ‌تر شدن شیارهای تشکیل شده دور سنگ‌چین، سنگ‌دانه‌های لبهٔ لایه در معرض جریان قرار گرفته و به داخل گودال سقوط می‌کنند. گودال ایجاد شده می‌تواند منجر به ناپایداری لایه سنگ‌چین اطراف پایه گردد.

در زمینه ارائه ابعاد بهینه برای الگوی پوشش سنگ‌چین تحقیقات اندکی صورت گرفته است که به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول منظور از d_{R50} اندازهٔ متوسط قطعات سنگ‌چین، b قطر پایه، U سرعت متوسط جریان و K ضریب تعدیل شکل پایه که برای پایه مستطیلی پیشانی‌گرد برابر ۱/۵ و برای پایه مستطیلی برابر ۱/۷ می‌باشد. شکل ۱ ابعاد پیشنهادی الگوی پوشش سنگ‌چین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر این الگوها دایره‌ای شکل می‌باشند.

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

مواد و روش‌ها

الف) فلوم و سنگ‌چین

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.

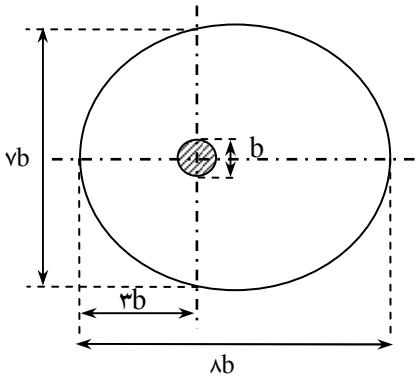
تمام آزمایش‌ها در حداکثر دبی انجام شد و تغییر سرعت با تنظیم ارتفاع آب در کانال صورت می‌گرفت. در انتهای فلوم یک سرریز قابل تنظیم، عمق آب در کانال را تنظیم می‌نمود. کف کانال به جز محدوده‌ای به طول یک متر که از رسوبات غیر چسبنده پرمی‌شد و مدل پایه در آن نصب می‌گردید، توسط دو سکوی فلزی در بالادست و پایین‌دست 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

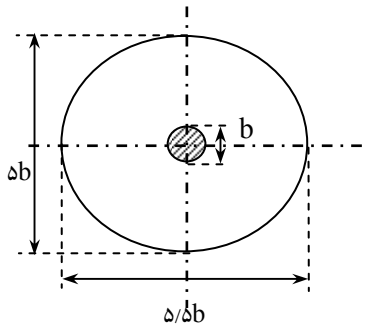
[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

جدول۱. مشخصات محدوده پوشش سنگ‌چین پیشنهادی در مطالعات قبلی

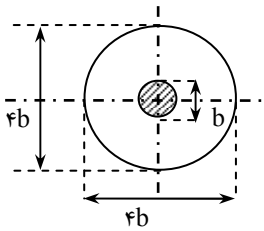
محدوده ابعاد سنگ‌چین			اندازه سنگ‌دانه	روش
ضخامت	عرض	طول		
نامعین	۵b	۵/۵b	نامعین	گیلز (به نقل از چیو، (۷))
b/۳	۶b	۷b که ۲/۵ b آن در جلوی پایه قرار دارد	$d_{R۵۰}$=۶-۳/۳u+۴u^{۲} (S_G=۲/۶۵)	بوناسونداس (۴)
>۲$d_{R۵۰}$	برابر با طول آن	۱/۵b از سطح پایه در تمام جهات	$d_{R۵۰}$=۱/۵۲ u^{۲}/(S_G-۱)g (S_G=۲/۶۵)	نیل (۲۰)
نامعین	برابر با طول آن	۱/۵-۲/۵b از سطح پایه در تمام جهات	نامعین	پوزی (به نقل از چیو، (۷))
نامعین	نامعین	نامعین	۱/۳۸۴u^{۲}/(S_G-۱)۲g	بروسرز و همکاران (۵)
>۳$d_{R۵۰}$	۲b از سطح پایه	نامعین	۰/۶۹۲(Ku^{۲})/(S_G-۱)۲g	ریچاردسون و همکاران (۲۴)



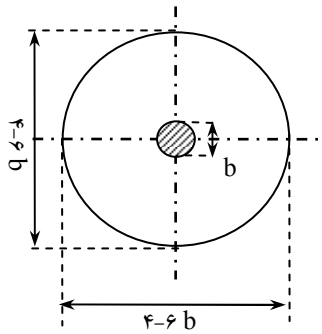
بوناسونداس (۲)



گیلز (به نقل از چیو، (۷))



نیل (۱۷)



پوزی (به نقل از چیو ،(۷))

شکل ۱. الگوی پیشنهادی پوشش سنگ‌چین دور پایه در مطالعات قبل (جهت جریان از راست به چپ می‌باشد)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

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 ۲b و ۴b 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 σ_g =۱/۱۳ می‌باشند. با توجه به حداکثر عمق آب شستگی برابر b=۷/۷ ۲/۴ سانتی‌متر و افزایش ۳۰ درصدی آن، ضخامت مصالح بستر ۱۰ سانتی‌متر انتخاب گردید (۱۸).

حداقل و حداکثر اندازه ذرات سنگ‌چین در این تحقیق (به ترتیب ۲/۸۶ و ۵/۱۸ میلی‌متر)، با توجه به محدودیت‌هایی که در مورد اندازه دانه‌های سنگ‌چین وجود دارد انتخاب شده است. بر اساس مطالعه چیو (۷)، اگر قطر دانه‌های سنگ‌چین نسبت به قطر پایه بیش از حد بزرگ باشد، الگوی تغییر جریان موضعی در محل پایه اثر نامحسوسی در گسیختگی لایه سنگ‌چین دور پایه دارد. هم‌چنین اگر b/d_{R50}≥۲/۲۵ (b قطر پایه، d_{R50} قطر متوسط ذرات سنگ‌چین) باشد، نسبت U/U_C (U سرعت متوسط جریان، U_C سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات بستر) برابر ۱ می‌شود. بنابراین وجود پایه در ناپایداری سنگ‌چین دور آن بی‌تأثیر است.

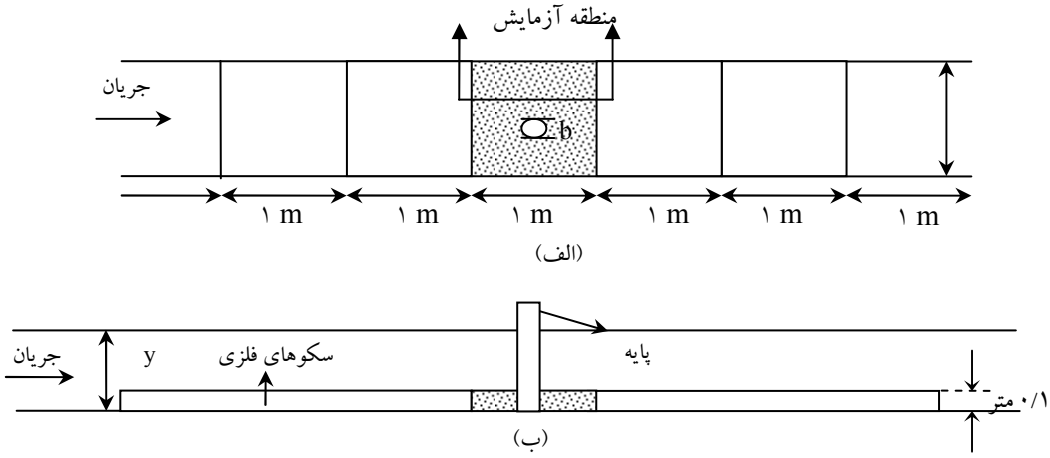
با توجه این‌که قطر پایه در این مطالعه ۲۰ میلی‌متر است، طبق ضابطه b/d_{R50}≥۲/۲۵، قطر متوسط ذرات سنگ‌چین باید کمتر از ۸/۸۹ میلی‌متر باشد. بنابراین از رسوبات رودخانه‌ای گردگوشه با چگالی نسبی ۲/۶۵ با چهار اندازه مختلف که دارای دانه‌بندی نسبتاً یک‌نواخت و قطر متوسط ۲/۸۶، ۳/۶۷، ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر بودند به عنوان سنگ‌چین استفاده شد.

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

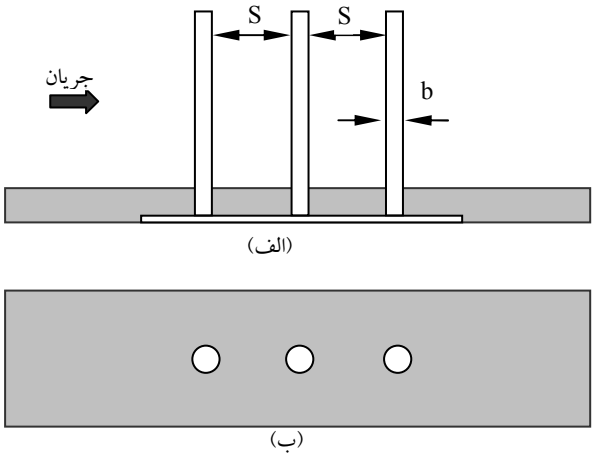
با توجه به این‌که آب‌شستگی موضعی و هم‌چنین تعیین الگوی مناسب برای پوشش سنگ‌چین، در شرایط آب زلال بررسی می‌گردد لذا بایستی $U<U_C$ باشد. مطابق مطالعات رودکیوی (۲۲) شرایط آب‌شستگی زلال در U =۰/۹۵ U_C برقرار می‌گردد. اما حداکثر عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال زمانی ایجاد می‌شود که U =۰/۹۵U_C باشد. بنابراین با توجه به دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه و با استفاده از معادلات ملویل (۱۷)، عمق جریان به گونه‌ای تنظیم شد که شرط U =۰/۹۵U_C

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



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

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 آب‌شستگی مطرح است. برای زمان تعادل از نظریه چیو (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.

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

جدول ۲. شرایط هیدرولیکی جریان

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

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 قرارگرفته 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 هیدورلیکی 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 منتفی 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 الگوی پوشش سنگ‌چین دور پایه را نشان می‌دهد. آب‌شستگی دیده شده در پشت پایه شامل حفره آب‌شستگی و تپه بعد ازآن 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 پایین‌دست 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.

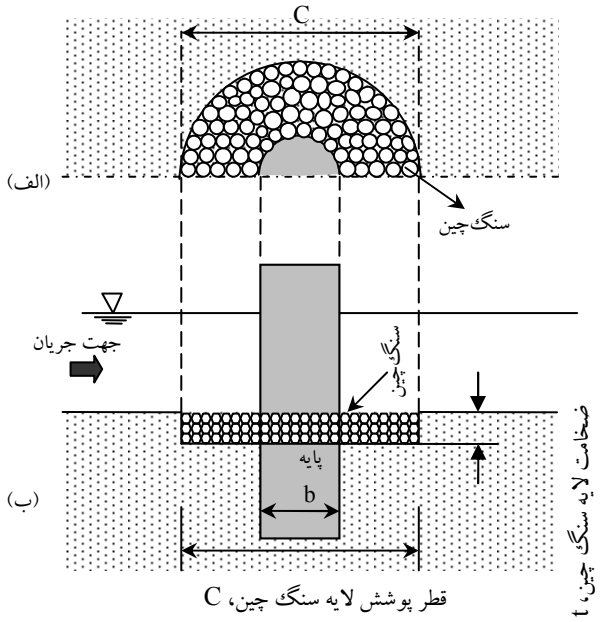
نتایج و بحث

الف) مشاهده نحوه آب‌شستگی بستر بدون سنگ‌چین حفاظتی

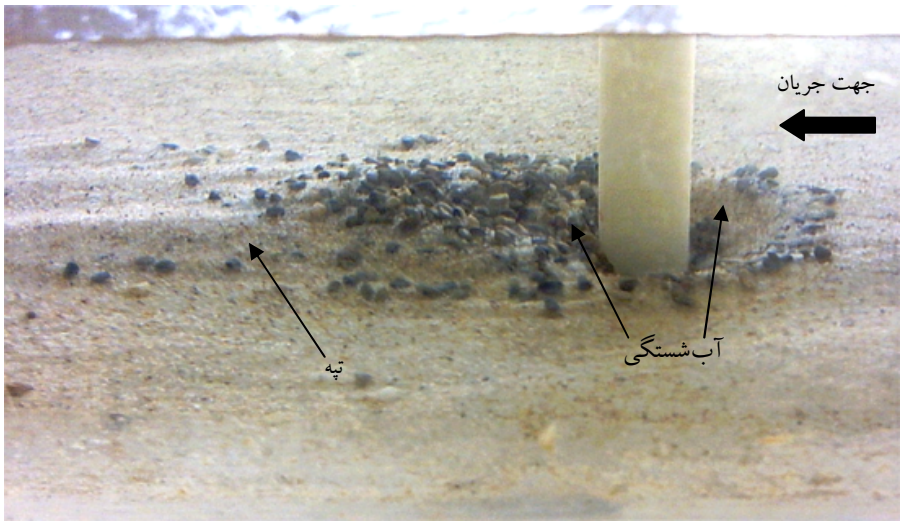
شکل ۶ مقایسهٔ توسعه زمانی آب‌شستگی را در تک‌پایه و گروه‌پایهٔ دوتایی نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در تمام مدت زمان آزمایش، عمق آب‌شستگی پایهٔ جلویی بیشتر از عمق آب‌شستگی تک‌پایه بوده و در پایهٔ عقبی عمق آب‌شستگی کمتر از مقادیر مربوط به تک‌پایه است. دلیل این موضوع تأثیر پدیده تقویت‌کننده بر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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



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

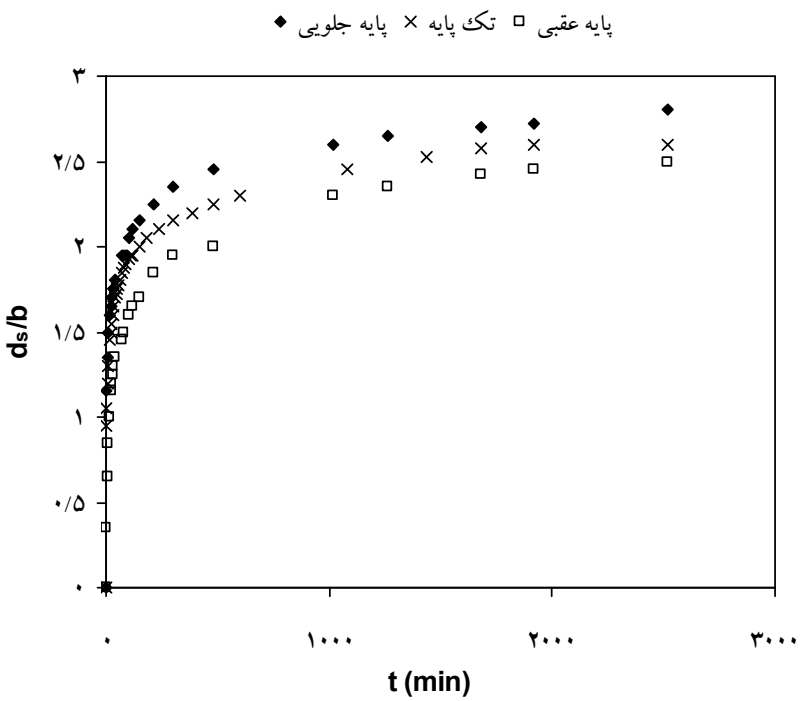


شکل ۵. آب‌شستگی موضعی بستر و تپه بعد از آن به علت نامناسب بودن الگوی سنگ‌چین

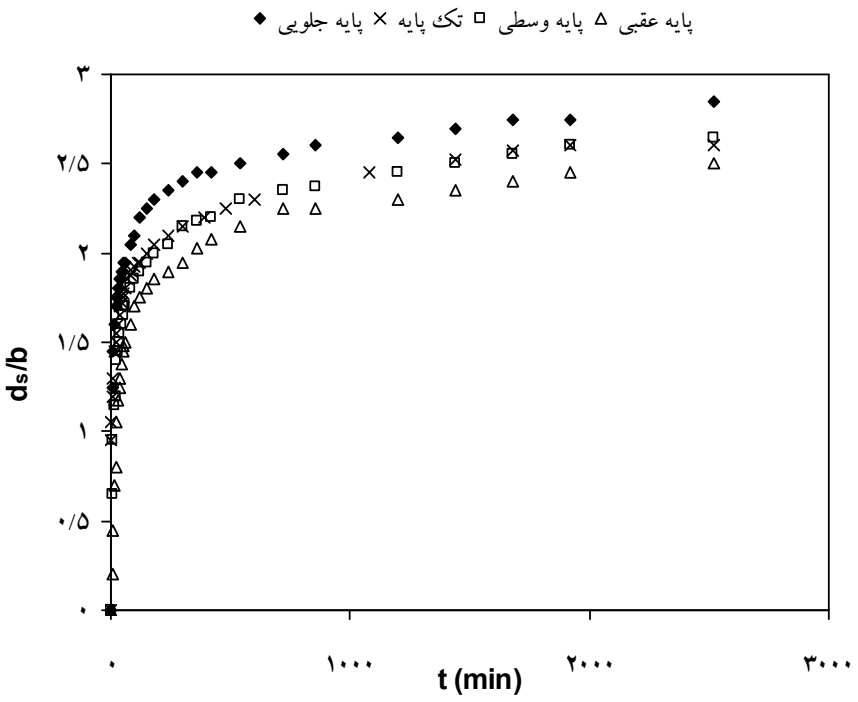
توسعهٔ زمانی عمق آب‌شستگی برای گروه‌پایه سه‌تایی به فاصله ۲b و مقایسهٔ آن با نتایج تک‌پایه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در تمام مدت آزمایش، عمق آب‌شستگی در پایهٔ دوم کمتر از عمق آب‌شستگی در پایهٔ اول و عمق آب‌شستگی در پایهٔ سوم کمتر از عمق آب‌شستگی در پایه‌های اول و دوم می‌باشد. پایه اول گروه‌پایه سه‌تایی تحت تأثیر پدیده تقویت‌کننده پایه‌های دوم و سوم می‌باشد. در حالی که پایه اول گروه‌پایه دوتایی تنها تحت تأثیر پایه دوم است که همین عامل منجر به افزایش عمق آب‌شستگی در پایه اول گروه پایه سه‌تایی نسبت به تک‌پایه وگروه‌پایه دوتایی می‌گردد. در گروه‌پایه دوتایی، پایه دوم تنها تحت تأثیر پدیده حفاظت‌کننده پایه اول بوده و پایه سوم

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



شکل ۶. مقایسهٔ توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در تک‌پایه و گروه‌پایهٔ دوتایی با فاصله ۲b



شکل ۷. مقایسهٔ توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در تک‌پایه و گروه‌پایهٔ سه‌تایی به فاصلهٔ ۲b

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

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 تقویت کننده در پایه جلویی گروه‌پایه‌های دوتایی و سه تایی ابعاد گودال آب‌شستگی در آن را به ترتیب ۱۴٪ و ۳۵٪ نسبت به تک پایه افزایش داده است. با توجه به این‌که پایه اول در گروه‌پایه سه‌تایی تحت تأثیر پدیده تقویت کننده 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 رسوبات بستر را با خود به طرف پایین‌دست 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 فاصلهٔ پایه‌ها بر عمق نهایی آب‌شستگی

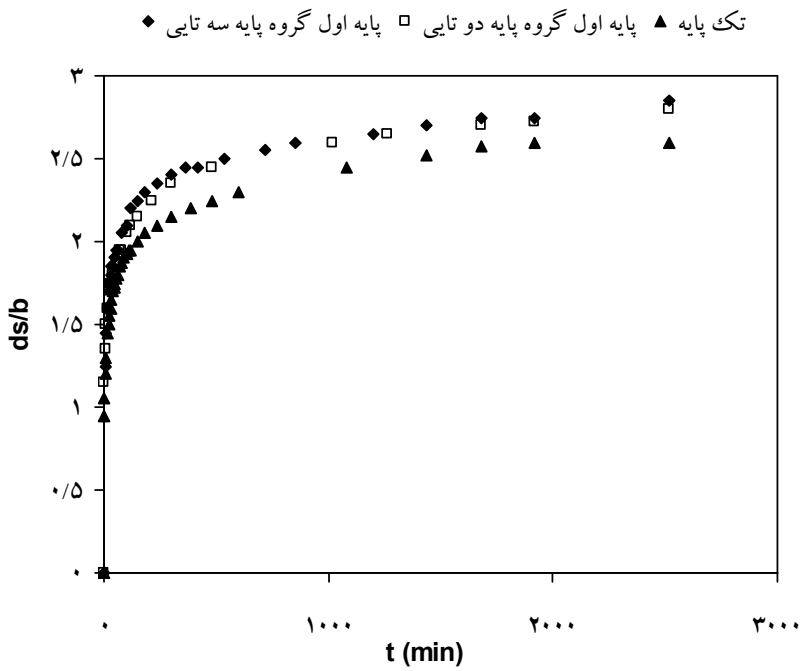
نتایج مربوط به کاهش و یا افزایش عمق نهایی آب‌شستگی در گروه‌پایه‌ها نسبت به عمق نهایی آب‌شستگی در تک‌پایه در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول اعداد مثبت نشان دهنده درصد افزایش و اعداد منفی نشان دهنده درصد کاهش میزان عمق نهایی آب‌شستگی نسبت به تک‌پایه می‌باشند. اعداد جدول میزان افزایش عمق آب‌شستگی در 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

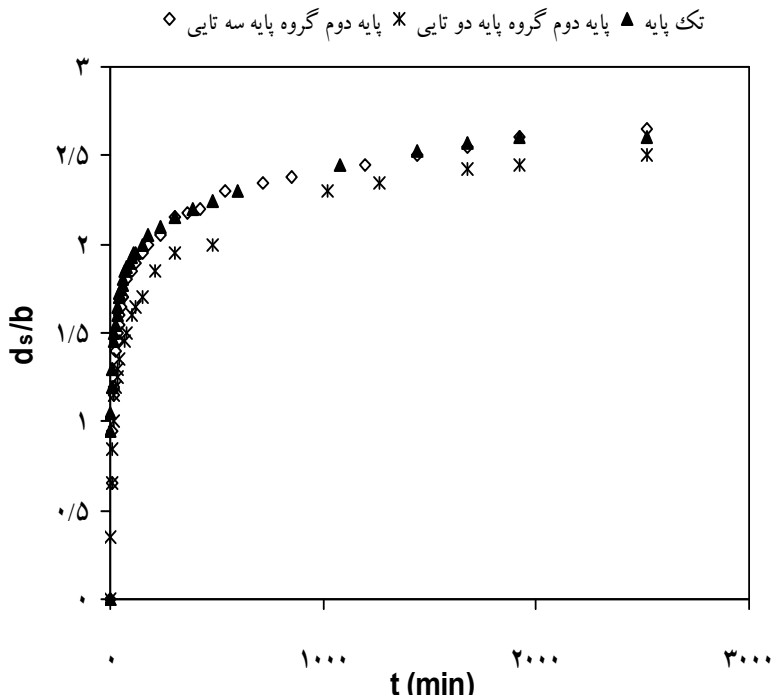
با توجه به این‌که عمق آب‌شستگی در مطالعه حاضر پس از گذشت۴۲ ساعت به تعادل رسیده است و شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که در ۵ ساعت اولیه آزمایش ۸۵٪ عمق آب‌شستگی ایجاد گردیده است، زمان لازم برای بررسی کارایی ابعاد پوشش سنگ‌چین در حفاظت اطراف پایه، ۵ ساعت در نظر گرفته شد. قرار دادن سنگ‌چین طبق ابعاد پیشنهادی 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).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



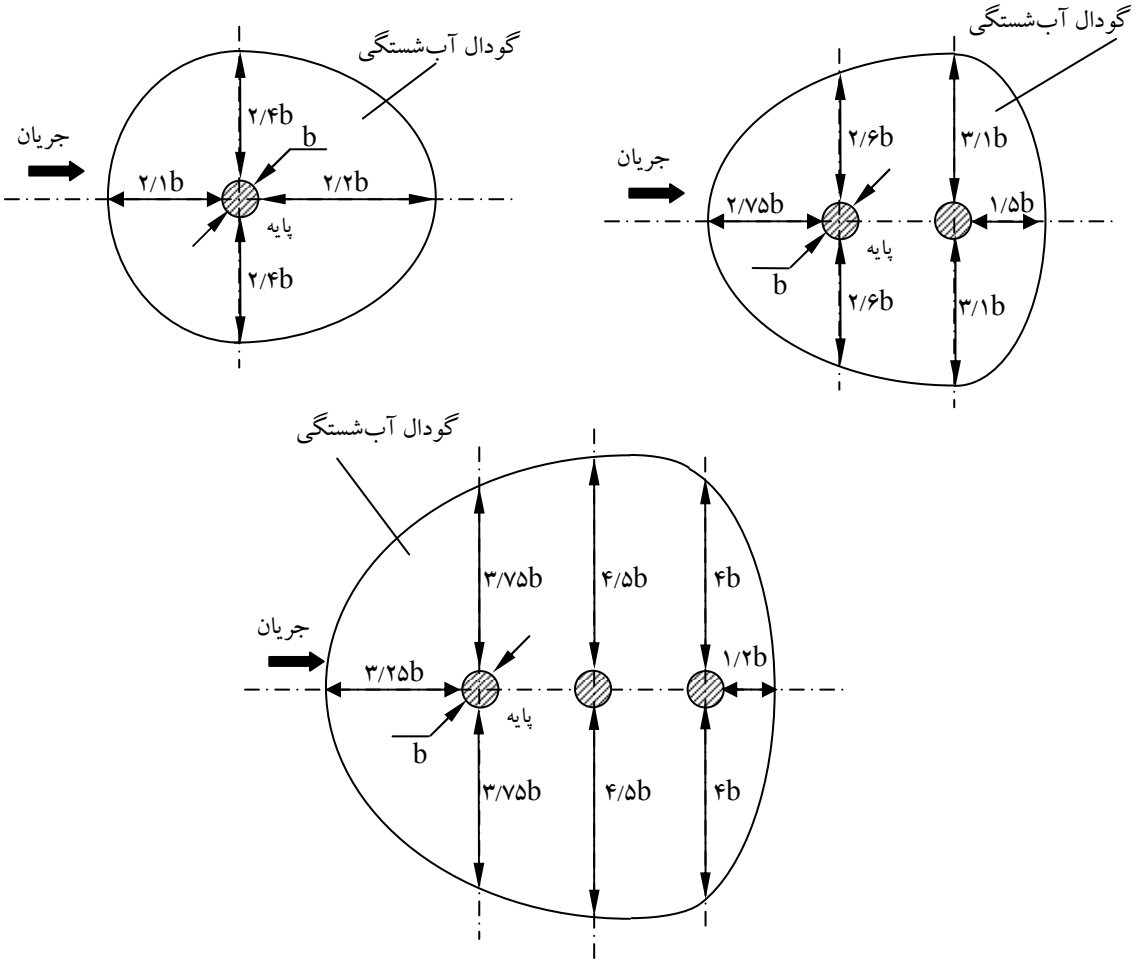
شکل ۸ . مقایسهٔ تغییرات عمق آب‌شستگی در پایه اول گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی با تک پایه



شکل ۹ . مقایسهٔ تغییرات عمق آب‌شستگی در پایه دوم گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی با تک پایه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



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

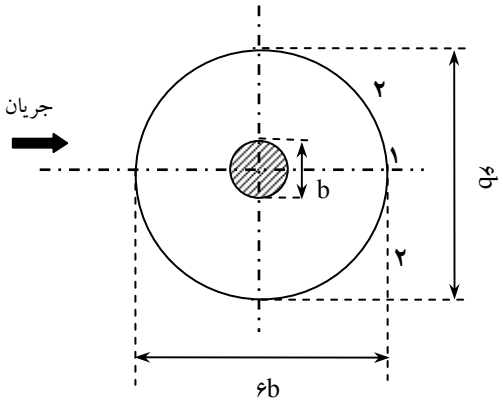
جدول۳. درصد کاهش یا افزایش عمق نهایی آب‌شستگی در گروه‌پایه‌ها نسبت به تک‌پایه

فاصله	گروه‌پایه دوتایی		گروه‌پایه سه‌تایی		
	پایه جلوئی	پایه عقبی	پایه جلویی	پایه وسطی	پایه عقبی
S = ۲b	۷/۶۹	−۳/۸۴	۹/۶	۱/۹	−۳/۸۴
S = ۴b	۴/۸	−۱/۹۲	۸/۶۵	۰/۹۶	−۲/۶۹

این گرداب‌ها بعد از گذشت ۰/۵ ساعت از شروع آزمایش قدرت بیشتری پیدا کردند و منجر به تشکیل گودال آب‌شستگی 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 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 سنگ‌چین این ناحیه هیچ تغییری نداشت. با رسیدن این شیارها در جلوی پایه به دلیل تأثیر وجود جریان رو به پایین، لایه سنگ‌چین در جلوی پایه تخریب شد. تأثیر جریان رو به پایین

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



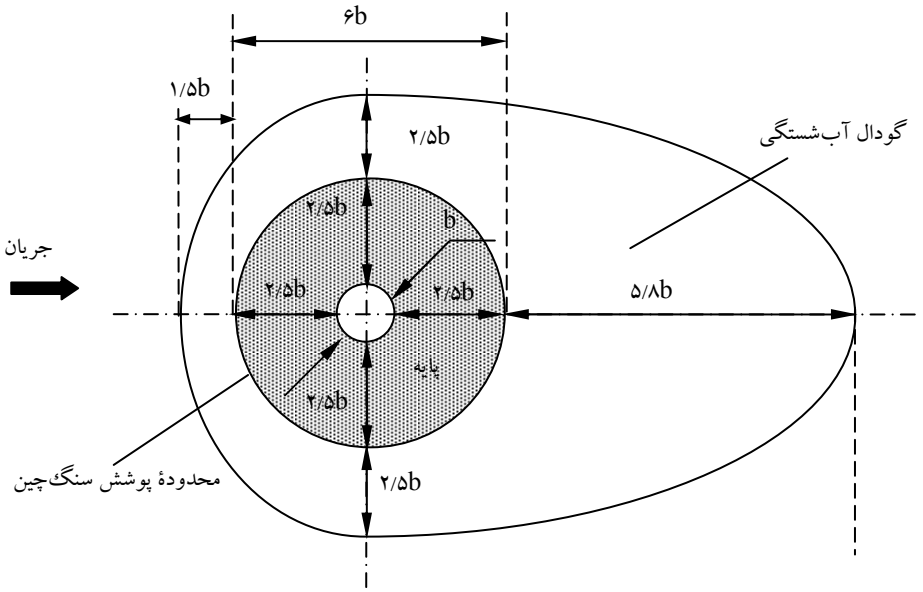
شکل ۱۱. تک پایه به همراه محدوده پوشش سنگ‌چین پیشنهادی پوزی (به نقل از چیو، (۷))

و گرداب‌های نعل اسبی شدت آب‌شستگی و در نتیجه تخریب لایه سنگ‌چین را افزایش داد و گودال آب‌شستگی مطابق با شکل ۱۲ در اطراف پایه ایجاد شد. برای ذرات سنگ‌چین با قطرهای ۲/۸۶ و ۳/۶۷ میلی‌متر که دارای وزن کمتری هستند، تأثیر گرداب‌های برخاستگی در تخریب سنگ‌چین مشهودتر است به طوری که باعث بلند شدن و پرتاب کردن این ذرات در گودال آب‌شستگی می‌گردند. ابعاد گودال آب‌شستگی در تک‌پایه دارای سنگ‌چین 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 سنگ‌چین است. گودال آب‌شستگی برای ذرات سنگ‌چین با قطر ۳/۶۷ میلی‌متر در پشت پایه ۵ درصد، در طرفین آن ۴۰ درصد و در جلوی پایه ۳۳ درصد نسبت به لایه سنگ‌چین با قطر ۲/۸۶ میلی‌متر کاهش یافته است. برای ذرات سنگ‌چین با قطر ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر افزایش وزن منجر به کاهش تأثیر گرداب‌های برخاستگی در خرابی سنگ‌چین در لبه‌های آن می‌گردد. گرداب برخاستگی تنها منجر به تشکیل گودال در پشت پایه گردیده، قطعات سنگ‌چین در معرض جریان قرار گرفته و به داخل گودال می‌غلطند. شکل ۱۳ نحوهٔ تخریب را تحت این شرایط نشان می‌دهد. برای ذرات سنگ‌چین با قطر ۴/۳۸ میلی‌متر، با گسترش شیارهای به وجود آمده در ناحیه ۲ به سمت جلوی پایه گودال آب‌شستگی ایجاد شده ولی خرابی ذرات سنگ‌چین در این حالت بسیارکاهش یافته است. گودال آب‌شستگی در پشت پایه ۱۴ درصد، در طرفین آن ۶۰ درصد و در جلوی پایه ۶۷ درصد نسبت به ذرات سنگ‌چین با قطر ۲/۶۸ میلی‌متر کاهش یافته است. شکل ۱۴ گودال آب‌شستگی در اطراف پایه محافظت شده با ذرات سنگ‌چین 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 سنگ‌چین گسترش یافته است. خرابی سنگ‌چین بیشتر در پشت و کناره‌های پایه اتفاق افتاده و انتقال ذرات سنگ‌چین به سمت پایین‌دست وجود نداشت. مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد محدوده پیشنهادی پوزی (به نقل از چیو، (۷)) در کنترل آب‌شستگی کارایی نداشته که در آزمایش‌های بعدی ابعاد پوشش سنگ‌چین بزرگ‌تر در نظر گرفته شد. کارایی ۱۰ الگوی متفاوت در محافظت تک‌پایه برای هر چهار اندازه سنگ‌چین بررسی گردید که در نهایت الگوی بهینه جهت پوشش سنگ‌چین دور تک‌پایه مطابق با شکل ۱۵ تعیین شد.

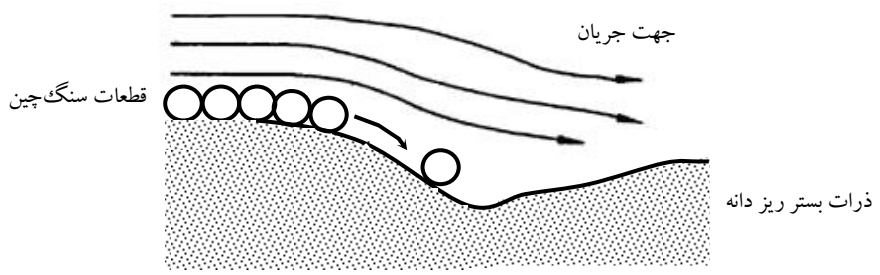
شکل ۱۶ ابعاد پوشش سنگ‌چین به طور منقطع در گروه پایه دوتایی را طبق پیشنهاد پوزی (به نقل از چیو، (۷)) نشان می‌دهد. در این حالت گرداب‌های برخاستگی به دلیل عامل حفاظ پایه اول بر پایه عقبی اثری بر ایجاد آب‌شستگی و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

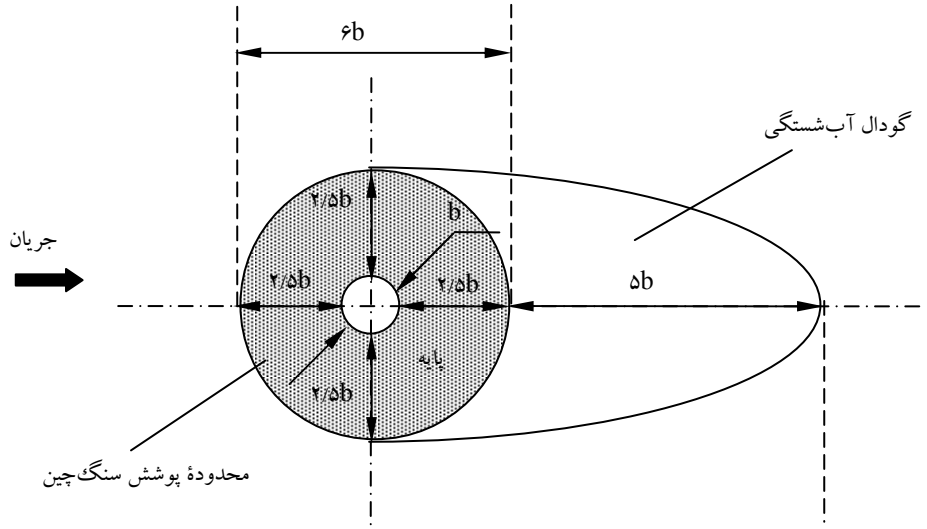
[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



شکل ۱۲. ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی دور تک پایه دارای سنگ‌چین با قطر ۲/۸۶ میلی‌متر در حالت U/Uc=۰/۹۵



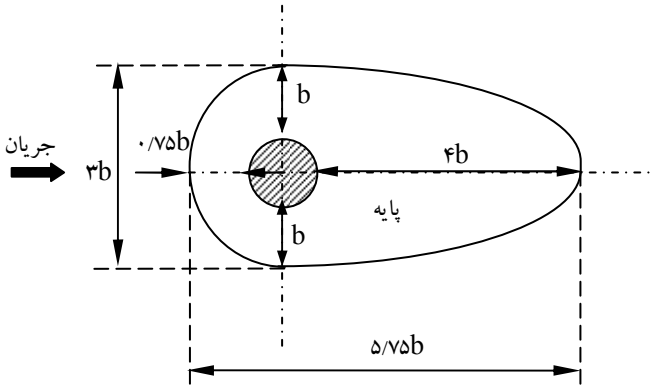
شکل۱۳. نمایی از نحوه خرابی لبه‌ای در لایه سنگ‌چین (۷)



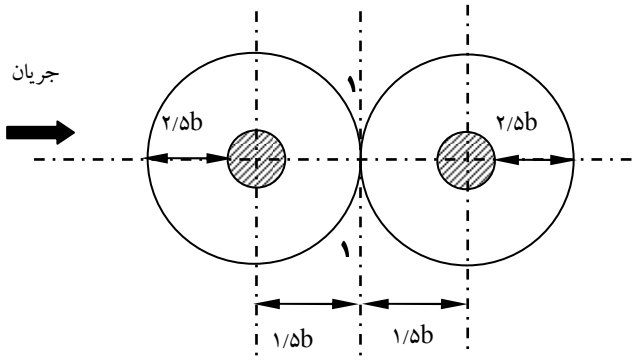
شکل ۱۴. ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی دور تک پایه دارای سنگ چین با قطر ۵/۱۸ میلی‌متر در حالت U/Uc=۰/۹۵

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



شکل ۱۵. محدوده پوشش پیشنهادی سنگ‌چین دور تک‌پایه



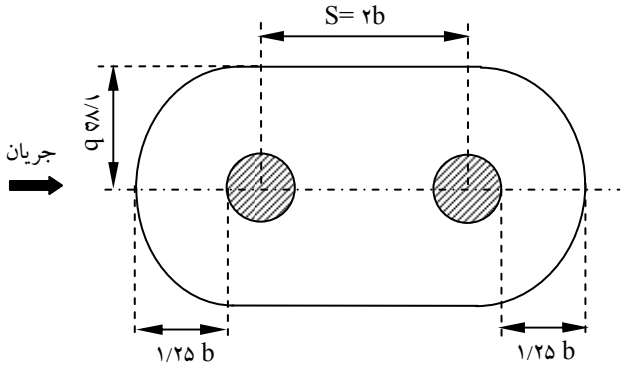
شکل ۱۶. گروه پایه دوتایی به همراه محدوده پوشش سنگ‌چین به صورت منقطع

تخریب لایه سنگ‌چین در پشت پایه مانند تک‌پایه نداشته و تنها دو شیار در ناحیه ۱ به وجود آمده که به سمت جلوی پایه گسترش می‌یابد. منقطع بودن الگو و تأثیر پدیده تقویت‌کننده پایه دوم باعث گردیده تا لایه سنگ‌چین در این ناحیه تحت تأثیر تنش قرار گیرد. با افزایش ابعاد شیارها ذرات سنگ‌چین 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 تقویت‌کننده باعث افزایش نرخ آب‌شستگی و تخریب لایه سنگ‌چین در جلوی پایه می‌گردد. بنابراین استفاده از الگوی منقطع برای گروه پایه‌ها به دلیل بر افزایش مقدار سنگ‌چین مورد نیاز و کارایی بسیار پایین در حفاظت گروه پایه‌ها مناسب نبوده و از الگوی پیوسته استفاده شد. ابعاد پیشنهادی پوشش سنگ‌چین برای گروه‌پایه‌های دوتایی و سه‌تایی در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آورده شده‌اند. همان طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، مناسب‌ترین شکل برای این‌که از آب‌شستگی بستر در انتهای محدوده سنگ‌چین در پشت پایه جلوگیری کند نیم بیضی است. لازم به ذکر است که تعمیم دادن ابعاد به دست آمده در محدوده این آزمایش‌هابه حالت‌های دیگر نیاز به بررسی و مطالعات بیشتری دارد.

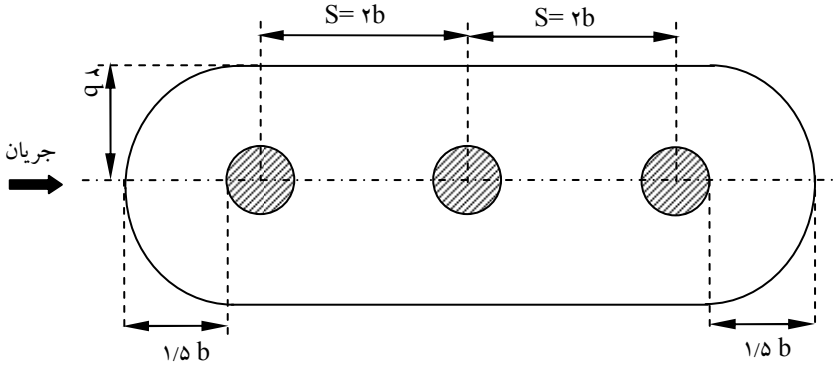
مقایسه شکل‌های ۱۵، ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهد که طول محدوده پوشش سنگ‌چین در پشت تک‌پایه نسبت به گروه‌پایه‌ها بیشتر است. دلیل این امر تأثیر سیستم گردابی در پشت پایه بر ایجاد آب‌شستگی موضعی است. مقایسه الگوی سنگ‌چین دور تک‌پایه در مطالعه حاضر با نتایج سایر محققین نشان می‌دهد که الگوهای مطالعات قبلی به دلیل در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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]



شکل ۱۷. محدوده پیشنهادی پوشش سنگ‌چین دور گروه‌پایه دوتایی



شکل ۱۸. محدوده پیشنهادی پوشش سنگ‌چین دور گروه‌پایه سه‌تایی

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 ۴b از پایه 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 ۴b 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 حفاظ 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]

پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است که یکی از امتیازات کاربرد سنگ‌چین برای حفاظت گروه پایه‌هاست.

۳- تأثیر زیاد گرداب‌های نعل اسبی در افزایش ابعاد گودال آب‌شستگی در گروه پایه‌ها نسبت به تک پایه منجر به افزایش محدوده پوشش سنگ‌چین در کناره‌های پایه شده است.

۴- با توجه به تأثیر گرداب‌های برخاستگی در گروه پایه‌ها الگوی منقطع سنگ‌چین برای حفاظت پایه‌ها مناسب نمی‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. حیدرپور، م.، ح. افضلی مهر و م. نادری بنی. ۱۳۸۲. کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی در پایه‌های پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی۷(۳): ۱۳-۲۸.

۲. زراتی، 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. زراتی. ۱۳۸۵. توسعه حفره آب‌شستگی موضعی اطراف یک پایه مستطیلی همراه با طوق. هفتمین کنگره بین اللملی 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-01]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.2.4]