

# تأثیر شکاف پایه بر پایداری سنگ‌چین در اطراف پایه‌های استوانه‌ای پل‌ها

منوچهر حیدرپور<sup>۱\*</sup>، بهزاد قربانی<sup>۲</sup>، ملیحه کیخانی<sup>۳</sup>، رحیم پیرمحمدی<sup>۴</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۳ و ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان

heidar@cc.iut.ac.ir

**چکیده** - یکی از روش‌های مهندسی پذیرفته شده در مقابله با مسأله آب‌شستگی پایه پل، قرار دادن قطعات سنگ‌چین در اطراف پی پل است. تجربه نشان داده است که ذرات سنگ‌چین اغلب توسط جریانهای سیلابی تخریب شده و لذا چند بار پر کردن اطراف پایه با سنگ‌چین به منظور جایگزینی قطعه سنگهای حذف شده ضروری می‌شود. بنابراین توجه به افزایش پایداری سنگ‌چین، لازم بوده و این به‌عنوان هدف اصلی این تحقیق، مد نظر قرار گرفته است. در این تحقیق از چهار اندازه سنگ‌چین که در سه سطح بالاتر، هم‌تراز و پایین‌تر از سطح بستر قرار گرفته و دو اندازه شکاف پایه که تا بستر امتداد یافته، استفاده شده است. در این مطالعه تأثیر وجود و اندازه شکاف بر پایداری سنگ‌چین و حداقل ابعاد لازم برای محدوده پوشش سنگ‌چین بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده در محدوده آزمایشها نشان می‌دهد که وجود شکاف باعث مقاوم‌تر شدن و افزایش پایداری سنگ‌چین می‌شود که این مسأله در شکاف بزرگ بیشتر مشهود است. با بزرگ شدن اندازه سنگ‌دانه‌ها اثر مثبت هر دو اندازه شکاف بر افزایش پایداری سنگ‌چین کاسته می‌شود که این کاهش در شکاف بزرگ نسبت به شکاف کوچک بیشتر است. وجود شکاف، محدوده سنگ‌چین لازم برای کنترل آب‌شستگی را کاهش می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج مشخص شده است که سنگ‌چین پایین‌تر از بستر، بیشترین پایداری و سنگ‌چین بالاتر از بستر، کمترین پایداری را دارد.

**کلیدواژگان:** کنترل آب‌شستگی، پایه پل، شکاف، پایداری سنگ‌چین.

## ۱- مقدمه

رودخانه‌ها نسبت به این تعارض واکنش نشان داده و رژیم هیدرولیکی آنها در نوعی روند تغییر برای رسیدن به تعادل جدید قرار می‌گیرد.

رودخانه‌ها شریانهای اصلی حیات برای تمامی سازه‌های آبی محسوب می‌شوند. احداث سازه‌های تقاطعی باعث بر هم زدن رژیم متعادل و پایدار رودخانه می‌شود.

مطالعه رفتار سنگ‌چین و ناپایداری آن، معیارهایی را برای خرابی سنگ‌چین ارائه کرده‌اند.

Bonasoundas (1973), Quazi & Peterson (1973)

Yoon et al (1995), Breusers et al (1977), Neill (1973)

روابط تجربی مختلفی را برای محاسبه اندازه مناسب دانه‌های سنگ‌چین دور پایه پیشنهاد کرده‌اند. این روابط شبیه یکدیگر

بوده و فقط در ضرایب آنها اختلاف جزئی وجود دارد.

اختلاف بین نتایج حاصل از روابط و روشهای موجود

برای تعیین اندازه دانه‌های سنگ‌چین دور پایه ناشی از

تفاوت نظر محققان در معیار خرابی سنگ‌چین است.

خرابی سنگ‌چین، وضعیتی است که در آن عملکرد

لایه سنگ‌چین در کاهش میزان آب‌شستگی نامناسب

تشخیص داده می‌شود. معیار خرابی سنگ‌چین در تعیین

اندازه مناسب سنگ‌دانه‌ها بسیار حائز اهمیت است.

Parola (1993) برداشته شدن بعضی از سنگ‌دانه‌های لایه

رویی را به‌عنوان خرابی سنگ‌چین در نظر می‌گیرد.

Chiew (1995) و Croad (1997) گسیختگی کامل لایه

سنگ‌چین را به‌عنوان معیار خرابی سنگ‌چین در نظر

گرفته‌اند. Lauchlan & Melville (2001) عملکرد لایه

سنگ‌چین را قبل از آنکه عمق حفره آب‌شستگی در آن

به ۲۰ درصد حداکثر عمق آب‌شستگی دور پایه بدون

سنگ‌چین برسد قابل قبول دانسته‌اند.

Chiew (1995) خرابی سنگ‌چین را به سه دسته خرابی

برشی، خرابی غربالی و خرابی لبه‌ای تقسیم بندی کرده

است. در خرابی برشی اندازه و وزن سنگ‌دانه‌ها به

اندازه‌ای کافی نیست که بتواند در برابر جریان رو به پایین

و گرداب‌های نعل اسبی حاصل از تغییر الگوی جریان

توسط پایه مقاومت کند. Chiew (1995) زمان لازم برای

انجام این خرابی را کمتر از ۱۵ دقیقه به‌دست آورده است.

خرابی غربالی با خروج ذرات بستر ریزدانه از داخل

احداث پل در رودخانه‌ها موجب تغییر الگوی جریان آنها می‌شود. تمرکز زیاد سرعت، جریان رو به پایین و آشفستگی

ایجاد شده، به فرسایش بستر رودخانه و گسترش حفره

آب‌شستگی منجر می‌شود. محافظت از پل‌ها در برابر

آب‌شستگی موضعی، یکی از نکات مهم در طراحی این

سازه می‌باشد.

دو عامل اصلی تشکیل دهنده فرایند آب‌شستگی، برخورد

خطوط جریان و جدایی آن از پایه است. برخورد خطوط

جریان به پایه، گرداب نعل اسبی و جدایی خطوط جریان

از پایه، گرداب برخاستگی ایجاد می‌کند. تاکنون روشهای

مختلفی که به‌منظور کنترل و کاهش آب‌شستگی از سوی

محققان ارائه شده شامل دو روش اساسی می‌شود که

عبارتند از:

۱- بالابردن مقاومت مواد بستر در برابر فرسایش که

اغلب با قرار دادن لایه‌ای محافظ از جنس مواد با دانه‌بندی

درشت یا سنگ‌چین<sup>۱</sup> در پای پایه انجام می‌شود.

۲- کاهش قدرت عوامل فرسایش، جریان رو به پایین و

گرداب نعل اسبی که از طریق قرار دادن طوق<sup>۲</sup> در اطراف

پایه یا با استفاده از شکاف<sup>۳</sup> انجام می‌شود.

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 بر پایداری

سنگ‌چین در شرایط آب زلال<sup>۴</sup> و بستر متحرک<sup>۵</sup> می‌شود.

Chiew (1995), Croad (1997), Parola (1993)

Chiew & Lim (2000), Chiew & Lim (2001)

Lauchlan & Melville (2001) و Chiew (2004) در

1. Riprap

2. Collar

3. Slot

4. Clear - water

5. Live - bed

حفره‌های سنگ‌چین ایجاد می‌شود. خروج ذرات زیرلایه سنگ‌چین باعث پایین افتادن سطح آن و کاهش پایداری می‌شود. با افزایش ضخامت لایه سنگ‌چین و با استفاده از فیلتر در زیر لایه سنگ‌چین می‌توان از این خرابی پیشگیری کرد. خرابی لبه‌ای بر اثر حرکت سنگ‌دانه‌ها در مرز لایه سنگ‌چین و ذرات بستر ایجاد می‌شود. این مرز در معرض تنش برشی بزرگی قرار می‌گیرد و به تدریج به ایجاد شیارهای کوچکی در دو طرف سنگ‌چین منجر می‌شود. شیارها به سمت جلوی سنگ‌چین منتقل شده و بزرگ می‌شوند. با بزرگ شدن شیارها، قطعات سنگ‌چین در معرض جریان قرار گرفته و به داخل گودال‌ها می‌غلطند.

شکاف با منحرف کردن یا کاهش جریان رو به پایین برخورد کننده با پایه، به‌عنوان روشی در کاهش آب‌شستگی مطرح است. پارامترهایی مانند عرض، طول و تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارند. یکی از معایب شکاف در کنترل آب‌شستگی موضعی، کاهش مقاومت سازه‌ای پایه بوده و لازم است در بررسی پایداری سازه‌ای پایه، مورد توجه قرار گیرد.

Chiew (1992) تأثیر شکاف را در دو موقعیت نزدیک بستر و سطح آب بر میزان آب‌شستگی بررسی کرد. نتایج وی نشان داد که حداکثر کاهش عمق آب‌شستگی توسط شکاف نزدیک بستر با عرض یک چهارم قطر پایه و ارتفاع دو برابر آن برابر ۲۰ درصد و برای شکاف نزدیک سطح آب با ابعاد فوق برابر ۵ درصد بوده است.

نتایج مطالعه Kumar et al (1999) نشان می‌دهد که شکاف در کاهش آب‌شستگی موثر است، به ویژه اگر شکاف تا سطح بستر امتداد داشته باشد. اما برای جریانهایی که نسبت به شکاف زاویه انحراف بالایی دارند در عمل بی‌تأثیر است.

حیدرپور و همکاران (۱۳۸۰)، با به کارگیری ۲۰ مدل آزمایشگاهی، کنترل آب‌شستگی موضعی را در پایه پل در شرایط آب زلال بررسی کردند. مدل‌ها شامل یک پایه استوانه‌ای<sup>۱</sup> بدون شکاف، سه پایه مستطیلی پیشانی گرد<sup>۲</sup> بدون شکاف و ۱۶ پایه شکاف‌دار بوده است. طول شکاف‌ها برابر عرض (قطر) پایه و دو برابر آن انتخاب شده و در دو موقعیت نزدیک بستر و نزدیک سطح آب قرار گرفته است. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که برای پایه استوانه‌ای، شکاف‌هایی با طولی برابر با قطر پایه و دو برابر آن در حالی که نزدیک سطح آب قرار گرفته باشند، تأثیری بر آب‌شستگی نهایی ندارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای تمامی مدل‌هایی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته، بیشینه کاهش آب‌شستگی توسط شکاف‌هایی با اندازه دو برابر عرض (قطر) پایه و موقعیت نزدیک بستر اتفاق می‌افتد. همچنین کارایی شکاف در کنترل آب‌شستگی موضعی برای پایه مستطیلی پیشانی گرد بیشتر از پایه استوانه‌ای است (برای حالتی که قطر پایه استوانه‌ای برابر عرض پایه مستطیلی پیشانی گرد می‌باشد).

تجربه نشان داده است که ذرات سنگ‌چین اغلب به تدریج توسط جریان‌های سیلابی تخریب شده و لذا چند بار پر کردن مجدد اطراف پایه توسط سنگ‌چین برای جایگزین کردن قطعه سنگهای حذف شده لازم می‌شود (Chiew & Lim, 2000). بنابراین توجه به افزایش پایداری سنگ‌چین، ضروری به نظر می‌رسد که این به عنوان هدف اصلی این تحقیق، مدنظر قرار گرفته است. در تحقیق حاضر برای نخستین بار به بررسی تأثیر شکاف بر پایداری و ابعاد لازم برای محدوده پوشش سنگ‌چین پرداخته شده است.

1. Circular Pier  
2. Round-nosed Pier

## ۲- تحقیقات آزمایشگاهی

### ۱-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

فلوم مورد استفاده در آزمایشگاه، دارای طول ۷ متر، عرض ۳۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۶ سانتی‌متر است. دیوارهای فلوم از فایبر گلاس شیشه‌ای و کف آن از جنس PVC است. کانال به صورت افقی و جریان حاصل شبه‌یکنواخت است. سیستم به نوعی مخزن حجم - زمان مجهز است که به کمک آن می‌توان دبی را اندازه‌گیری کرد. آب در کانال به وسیله پمپ با حداکثر دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه در مداری بسته جاری می‌شود.

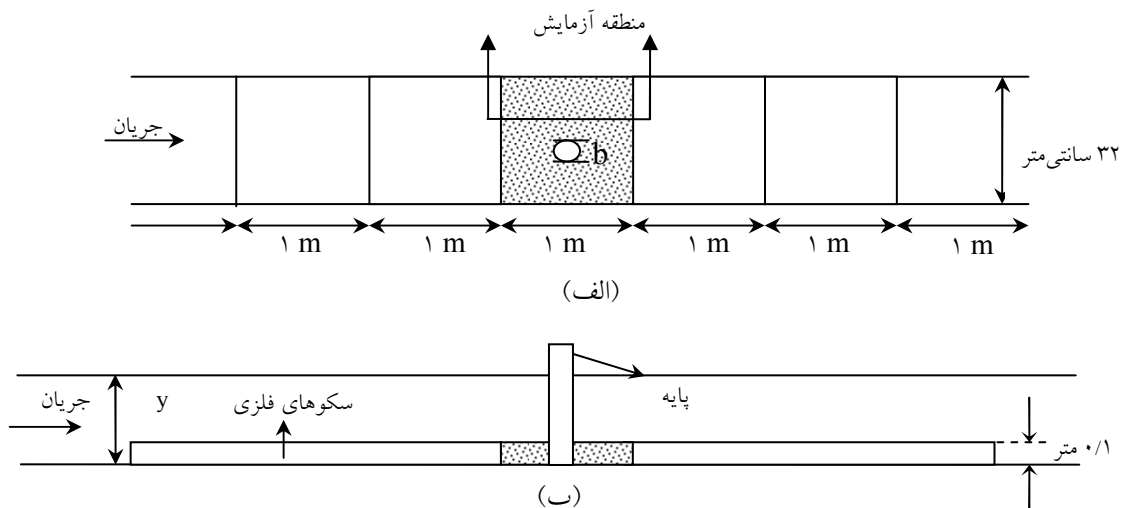
تمامی آزمایش‌ها در دبی حداکثر و تغییر سرعت با تنظیم ارتفاع آب توسط سرریز در پایین‌دست کانال انجام شد. کف کانال به جز محدوده‌ای به طول یک متر که از رسوبهای غیر چسبنده پر و مدل پایه در آن نصب می‌شود، توسط دو سکوی فلزی در بالادست و پایین‌دست به طولهای ۳ متر، تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بالا آورده شده است. شکل ۱ نمایی را از کانال آزمایشگاهی و منطقه مورد آزمایش نشان می‌دهد.

### ۲-۲- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی

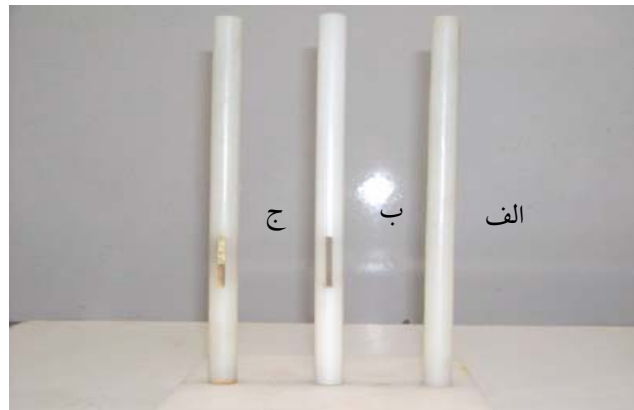
از سه مدل پایه، یک پایه بدون شکاف و دو پایه شکاف‌دار با دو شکاف به طول  $b$  و  $2b$  و عرض  $0.25b$  استفاده شد ( $b$  قطر پایه می‌باشد) (شکل ۲). مدل‌ها با زاویه صفر درجه نسبت به جهت جریان در داخل رسوبها نصب شد. همچنین پایه به گونه‌ای نصب شد که همواره انتهای شکاف هم‌تراز با سطح بستر قرار گیرد. تراز قرارگیری شکاف نسبت به بستر بر اساس تحقیقات (Kumar et al 1999) و حیدرپور و همکاران (۱۳۸۰) انتخاب گردید.

### ۳-۲- انتخاب پارامترها

عرض پایه: برای حذف تأثیر دیوارهای کانال بر آب‌شستگی موضعی پایه، نسبت فاصله محور پایه تا دیوار کانال به قطر پایه بزرگتر از  $6/25$  باشد (Raudkivi et al, 1983). به‌منظور برآورده شدن این شرط، قطر پایه برابر ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد.



شکل ۱ نمایی از کانال آزمایشگاهی و منطقه انجام آزمایشها؛ الف- پلان، ب- مقطع عرضی



شکل ۲ مدل پایه های مورد استفاده؛ الف- بدون شکاف، ب- شکاف دار با شکاف ۴ سانتی متر و ج- شکاف دار با شکاف ۲ سانتی متر

سنگ دانه‌ها وجود دارد انتخاب شده است. بر اساس مطالعه Chiew (1995) اگر قطر دانه‌های سنگ‌چین نسبت به قطر پایه بیش از حد بزرگ باشد، الگوی تغییر جریان موضعی در محل پایه اثر نامحسوسی بر گسیختگی لایه سنگ‌چین دور پایه دارد. همچنین اگر  $b/d_{R50} < 2.25$  شود (اندازه متوسط ذرات سنگ‌چین)، نسبت  $U/U_C$  سرعت متوسط جریان،  $U_C$  سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات بستر) برابر ۱ می‌شود که وجود پایه در ناپایداری سنگ‌چین دور آن بی‌تأثیر است.

با توجه به اینکه قطر پایه در این مطالعه برابر ۲۰ میلی‌متر است، بر طبق ضابطه  $b/d_{R50} > 2.25$ ، قطر متوسط ذرات سنگ‌چین باید کمتر از ۸/۸۹ میلی‌متر باشد. بنابراین از رسوبهای رودخانه‌ای گردگوشه با چگالی نسبی ۲/۶۵ با چهار اندازه مختلف - که دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت و قطر متوسط ۲/۸۶، ۳/۸۶، ۴/۳۸ و ۵/۱۸ میلی‌متر داشتند - به‌عنوان سنگ‌چین استفاده شد.

**ضخامت مصالح بستر:** با توجه به حداکثر عمق آب‌شستگی ( $b=7/7$  cm) و افزایش ۳۰ درصدی آن، ضخامت مصالح بستر برابر ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد (Melville et al, 1999).

**اندازه و یکنواختی ذرات:** ذرات بستر باید به نحوی انتخاب شوند که علاوه بر داشتن بیشینه عمق آب‌شستگی، وضعیت بستر نیز همواره در شرایط آب زلال باشد. آب‌شستگی در رسوبهای غیر چسبنده‌ای که قطر کمتر از ۰/۷ میلی‌متر دارند همراه با حرکت ذرات بستر در بالادست پایه، مانند وضعیت بستر زنده است. حرکت ذرات در بالادست پایه، به تشکیل پشته‌های ریبیل<sup>۱</sup> شکل منجر می‌شود (Raudkivi, 1998). تموج‌های تشکیل شده، وضعیت جریان را آشفته‌تر کرده و لذا آب‌شستگی از حالت زلال خارج می‌شود. همچنین نسبت  $b/d_{50}$  (قطر متوسط ذرات بستر) باید بزرگتر از ۵۰ باشد تا آب‌شستگی مستقل از اندازه ذرات شود. برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبها بر آب‌شستگی، انحراف معیار هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۳ باشد (Shafai-Bajestan, 1991). با توجه به شرایط فوق، رسوبهای انتخاب شده برای آزمایشها، با اندازه متوسط ۰/۷۲ میلی‌متر و  $\sigma_g=1/13$  انتخاب شد.

**مشخصات سنگ‌چین:** حداقل و حداکثر اندازه برای سنگ دانه‌ها در این تحقیق (به ترتیب برابر ۲/۸۶ و ۵/۱۸ میلی‌متر) با توجه به محدودیت‌هایی که در مورد اندازه

1. Ripple

ب: شرایط بستر زنده: در این دسته از آزمایشها، خرابی سنگ‌چین در لحظات اولیه آزمایش تحت خرابی برشی به وقوع می‌پیوست. به این ترتیب مدت زمان آزمایشها در این حالت مطابق مطالعات (Chiew 1995) و همچنین مشاهدات آزمایشگاهی برابر ۱۵ دقیقه انتخاب شد.

**عمق و سرعت جریان:** با توجه به اینکه آب‌شستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی می‌شود، لذا باید  $U < U_c$  باشد. مطابق مطالعات رودکیوی شرایط آب‌شستگی زلال در  $U < 0.95U_c$  برقرار می‌شود (Raudkivi, 1998). اما بیشینه عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال زمانی برقرار می‌شود که  $U = 0.95U_c$  باشد. بنابراین با توجه به دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه و با استفاده از معادلات (Melville 1997) عمق جریان طوری تنظیم شد که شرایط  $U = 0.95U_c$  برقرار شود. بنابراین حداکثر سرعت متناسب با حداقل عمق ۱۲ سانتی‌متر انتخاب شد.

### ۳- معرفی آزمایشهای انجام شده

#### ۳-۱- مشاهده نحوه آب‌شستگی بستر ریزدانه

این آزمایشها بدون قرارگیری سنگ‌چین دور پایه به منظور بررسی حداکثر ابعاد گودال آب‌شستگی دور پایه در حالت شکاف‌دار و بدون شکاف انجام شد. این آزمایشها از نوع بلند مدت بوده و در آنها زمان تعادل یا زمان رسیدن به حداکثر آب‌شستگی مطرح است. برای زمان تعادل از نظریه (Chiew 1992) استفاده شده و زمانی به‌عنوان زمان تعادل آب‌شستگی انتخاب شد که ۸ ساعت پس از آن، عمق آب‌شستگی کمتر از یک میلی‌متر تغییر کند.

#### ۳-۲- آزمایشهای مربوط به دانه‌های سنگ‌چین

هدف از انجام این آزمایشها، مشاهده، بررسی و تحلیل رفتار سنگ‌چین با اندازه‌های مختلف در برابر جریانهای

**ضخامت لایه سنگ‌چین:** حداقل ضخامت لایه سنگ‌چین با توجه به معیار ارائه شده توسط (Richardson et al 1991) انتخاب شد؛ یعنی حداقل ضخامت لایه، سه برابر قطر متوسط ذرات سنگ‌چین در نظر گرفته شد. بر اساس مطالعه (Worman 1989) با انتخاب مناسب ضخامت لایه سنگ‌چین به قرار دادن لایه فیلتر در زیر آن نیاز نیست. بنابراین دو لایه به ضخامت سنگ‌چین افزوده و ضخامت لایه سنگ‌چین همراه با لایه فیلتر، حداقل پنج برابر قطر متوسط قطعات سنگ‌چین در نظر گرفته شد. به این ترتیب احتمال وقوع خرابی به صورت غربالی از بین خواهد رفت.

**معیار خرابی سنگ‌چین:** در این تحقیق مطابق معیار در نظر گرفته شده توسط (Chiew 1995) و (Croad 1997) گسیختگی کامل لایه سنگ‌چین در نظر گرفته شد.

**مدت زمان آزمایشها با وجود سنگ‌چین:** همان‌گونه که در بخش ۲-۳ توضیح داده خواهد شد آزمایشها با وجود سنگ‌چین در دو بخش آب زلال و بستر زنده انجام شده است که مدت زمان آزمایش مربوط به هر یک متفاوت است. الف: شرایط آب زلال: همان‌گونه که در بخش مقدمه گفته شد در لایه سنگ‌چین سه نوع خرابی برشی، غربالی و لبه‌ای رخ می‌دهد. در این آزمایشها بر اساس مطالعات (Worman 1989) ضخامت لایه سنگ‌چین طوری تعیین شد که خرابی غربالی اتفاق نیفتد. با توجه به ابعاد سنگ‌چین و شرایط آب زلال آزمایش، خرابی برشی نیز اتفاق نمی‌افتد. بنابراین در شرایط آب زلال خرابی سنگ‌چین از نوع خرابی لبه‌ای است. این مرحله از آزمایشها تا وقوع خرابی لبه‌ای ادامه می‌یافت که معمولاً بین ۱ تا ۲ ساعت از شروع آزمایش بسته به گستره سنگ‌چین ادامه داشت.

آب‌شستگی انجام شده، اما در زمینه الگوی پوشش سنگ‌چین تحقیقات انجام شده بسیار اندک است (Chiew, 1995). 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 و تأثیر شکاف بر این ابعاد، مطالعه شده است.

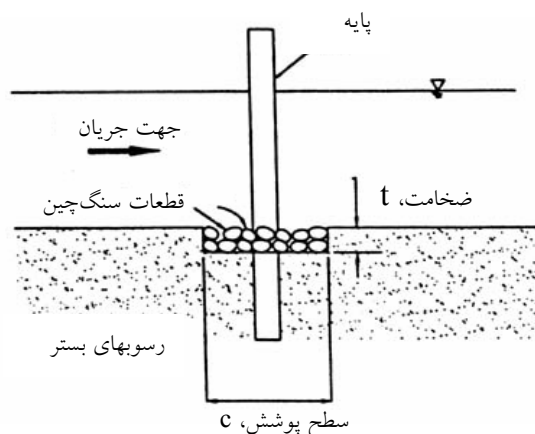
در این مرحله برای سه حالت پایه بدون شکاف و پایه با شکافهای بزرگ و کوچک، ابتدا شکل و ابعاد اولیه برای محدوده پوشش سنگ‌چین در نظر گرفته شد. پس از تثبیت دبی و سرعت جریان مورد نظر در کانال، با آزمون و خطا، حداقل محدوده سنگ‌چین لازم برای کنترل آب‌شستگی در دبی بیشینه و عمق ۱۲ سانتی‌متر و نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت متوسط بحرانی آستانه حرکت رسوبها برابر ۰/۹۵ بدست آمد.

لازم است توضیح داده شود 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، انجام شد.

### ب- آزمایشهای گروه دوم (بررسی پایداری سنگ‌چین)

پس از آماده شدن بستر به ازاء دبی بیشینه در کانال، سرعت جریان در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه افزایش داده شد تا جایی که لایه سنگ‌چین به‌طور کامل گسیخته شده و آب‌شستگی موضعی اطراف پایه آغاز شود. بدین صورت که آزمایش با سرعتی بیشتر از  $U > 0.95U_c$  شروع و پس از گذشت ۱۵ دقیقه، در صورت مشاهده نشدن گسیختگی

موضعی و سازوکار خرابی سنگ‌چین دور پایه شکاف‌دار و بدون شکاف، بررسی اثر انواع پارامترهای کمی مؤثر در پایداری سنگ‌چین، بررسی اثر هر یک از شکافها در پایداری سنگ‌چین، محدوده پوشش لازم دور پایه در دو حالت شکاف‌دار و بدون شکاف است. بدین منظور آزمایشها در دو دسته اصلی انجام شد. در آزمایشهای گروه اول، طراحی سنگ‌چین از نظر محدوده پوشش آن دور پایه مد نظر است و در آزمایشهای گروه دوم، هدف نهایی به‌دست آوردن روشی برای طراحی سنگ‌چین از نظر اندازه متوسط دانه‌ها است. در این آزمایشها پس از آماده‌سازی بستر ریز دانه ذرات سنگ‌چین با ضخامت  $5d_{R50}$  در سه سطح همتراز، بالاتر از بستر (به اندازه  $2d_{R50}$ ) و پایین‌تر از بستر (به اندازه  $2d_{R50}$ )، اطراف پایه قرار داده می‌شد. نحوه قرارگیری سنگ‌چین داخل بستر در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ طرحواره لایه سنگ‌چین

### الف- آزمایشهای گروه اول (بررسی حداقل محدوده سنگ‌چین در شرایط آب زلال)

اگر چه مطالعات زیادی در باره تعیین اندازه مناسب قطعرات سنگ‌چین برای حفاظت پایه‌های پل در مقابل



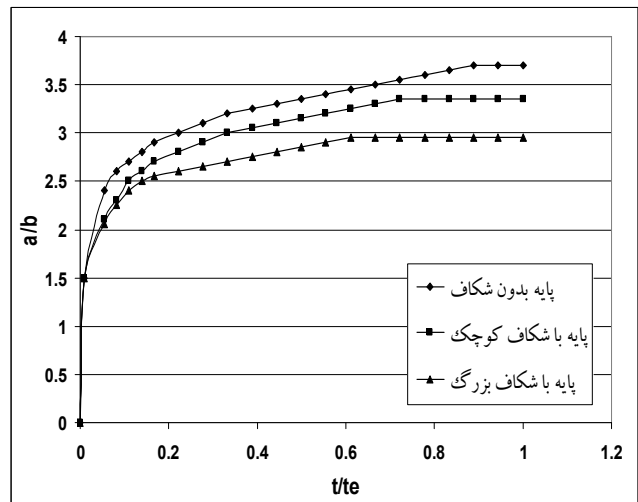


پایه بیشتر از کنارها است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر شکاف در جلوی پایه نسبت به کنارهای آن است. افزایش محدوده گودال آب‌شستگی در پشت پایه شکاف‌دار نسبت به پایه بدون شکاف به دلیل تأثیر جریان عبور کننده از میان شکاف است. این جریان به تپه‌ای که از انباشته شدن رسوبات در پشت پایه ایجاد شده، برخورد کرده و باعث انتقال این تپه به پایین دست شده و لذا به بزرگتر شدن گودال پشت پایه منجر می‌شود.

با توجه به این مطالب می‌توان گفت، در محدوده آزمایشهای انجام شده، ابعاد نهایی حفره آب‌شستگی بر اثر استفاده از شکاف نسبت به پایه بدون شکاف کاهش می‌یابد و هر چه شکاف بزرگتر باشد تأثیر آن بر کاهش وسعت حفره آب‌شستگی بیشتر است. همچنین تأثیر شکاف بر کاهش وسعت حفره آب‌شستگی در جلوی پایه نسبت به کنارها بیشتر است که این پدیده در پایه با شکاف بزرگ بیشتر مشهود است. لازم است ذکر شود که تعمیم دادن ابعاد به دست آمده در محدوده این آزمایشها به حالت‌های دیگر، به بررسی و مطالعات بیشتری نیاز دارد.

#### ۴-۲- بررسی پایداری سنگ‌چین

فرایند گسیختگی سنگ‌چین دور پایه به اندازه سنگ دانه‌ها بستگی دارد. سنگ‌های درشت معمولاً تحت تأثیر تنش برشی در کنار پایه، ناپایدار می‌شوند و سنگهای ریز بیشتر بر اثر گرداب‌های برخاستگی پشت پایه ناپایدار می‌شوند. شکل ۸ سرعت جریان را در حالت ناپایداری سنگ‌چین برای سه مدل پایه بدون شکاف و شکاف دار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با بزرگتر شدن اندازه سنگ دانه‌ها، سرعت جریان مورد نیاز برای شروع ناپایداری سنگ‌چین افزایش می‌یابد. به بیان دیگر هر چه اندازه سنگ‌دانه‌ها بزرگتر باشد، میزان تنش برشی اعمال شده



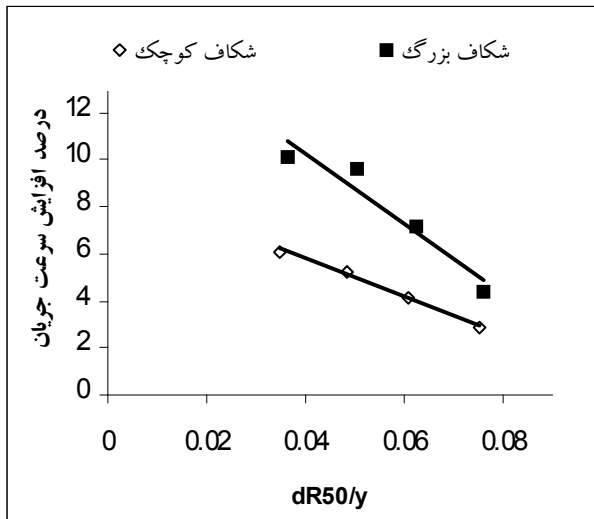
شکل ۷ توسعه زمانی آب‌شستگی در سه مدل پایه

نتایج مربوط به تأثیر استفاده از شکاف در پایه بر کاهش میزان آب‌شستگی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ درصد تغییرات ابعاد نهایی آب‌شستگی تحت تأثیر شکاف

مشخصات شکاف	جلوی پایه	کنار پایه	پشت پایه
شکاف بزرگ	-۲۴٪	-۱۸٪	+۱۲/۵٪
شکاف کوچک	-۱۰٪	-۱۰٪	+۱۲/۵٪

در این جدول اعداد مثبت نشان دهنده افزایش ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی در پایه شکاف‌دار نسبت به پایه بدون شکاف و اعداد منفی نشان دهنده کاهش میزان آب‌شستگی است. بر اساس مشاهدات انجام شده، محدوده آب‌شستگی در جلو و کنار پایه شکاف‌دار نسبت به پایه بدون شکاف، مستقل از ابعاد آن، کاهش یافته است. کاهش محدوده گودال آب‌شستگی در جلوی پایه شکاف‌دار و در کنارها نشان‌دهنده تأثیر شکاف بر کاهش گردابان فشار و جریان رو به پایین در جلوی پایه است. اما بر طبق جدول، کاهش محدوده آب‌شستگی در جلوی

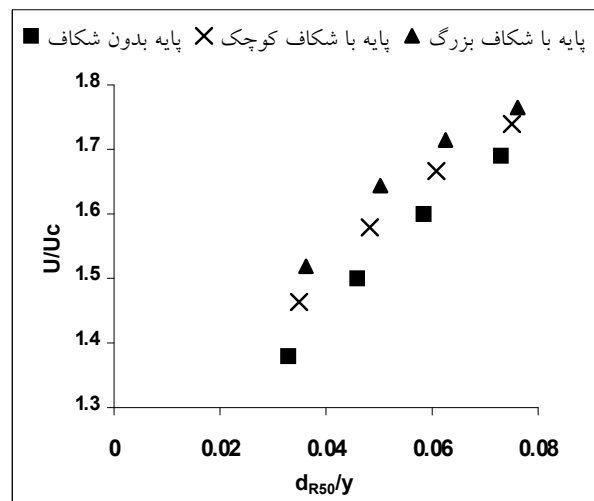


شکل ۹ درصد افزایش سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگ‌چین بر اثر استفاده از شکاف (سطح سنگ‌چین همتراز با بستر)

اندازه شکاف نیز بر پایداری سنگ‌چین مؤثر است. شکل ۹ بیانگر افزایش پایداری سنگ‌چین در شکاف بزرگ نسبت به شکاف کوچک است. همچنین با بزرگتر شدن اندازه سنگ‌دانه‌ها در هر دو اندازه شکاف، تأثیر شکاف بر افزایش پایداری سنگ‌چین کاهش می‌یابد، اما این کاهش برای شکاف بزرگ بیشتر مشهود است. این مسأله را می‌توان چنین توجیه کرد که با افزایش اندازه سنگ‌چین، تأثیر نیروی وزن بر افزایش پایداری سنگ‌چین بیشتر از تأثیر شکاف می‌شود.

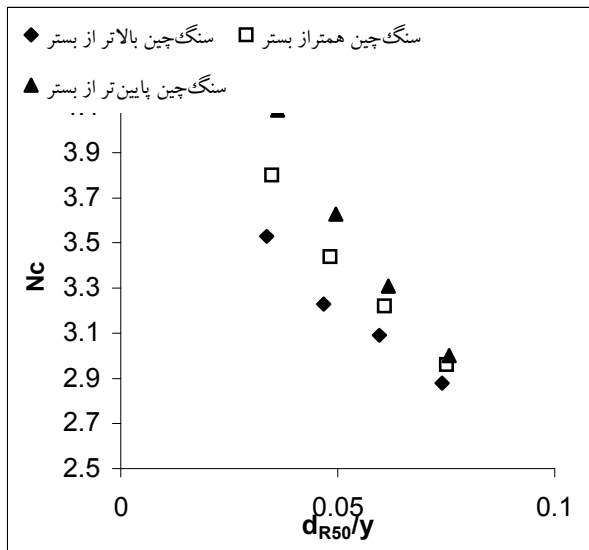
در شکل ۹ ملاحظه می‌شود که شیب تغییرات درصد افزایش پایداری سنگ‌چین با بزرگتر شدن سنگ‌دانه‌ها در شکاف بزرگ نسبت به شکاف کوچک، بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت که با افزایش سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگ‌دانه‌ها (بزرگ‌تر شدن سنگ‌دانه‌ها)، از عملکرد شکاف بزرگ به میزان بیشتری کاسته می‌شود و شکاف مزبور، حساسیت بیشتری نسبت به افزایش سرعت دارد؛ در حالی‌که کاهش عملکرد

برای گسیختگی سنگ‌چین افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگ‌چین در دو پایه شکاف‌دار با اندازه متفاوت شکاف در مقایسه با پایه بدون شکاف، افزایش یافته که این بیانگر افزایش پایداری سنگ‌چین تحت تأثیر شکاف می‌باشد.



شکل ۸ سرعت جریان به‌ازای اندازه متوسط سنگ‌دانه‌ها در حالت ناپایداری سنگ‌چین (سطح سنگ‌چین همتراز بستر)

به‌منظور بررسی میزان افزایش پایداری سنگ‌چین بر اثر استفاده از شکاف، اختلاف میان سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگ‌چین اطراف پایه بدون شکاف و شکاف‌دار بر سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگ‌چین دور پایه بدون شکاف تقسیم و به صورت درصد بیان شده است. درصد افزایش سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگ‌چین در شکل ۹ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که کاربرد شکاف مستقل از ابعاد آن باعث افزایش سرعت جریان در آستانه ناپایداری سنگ‌چین و به بیان دیگر افزایش پایداری سنگ‌چین نسبت به حالت پایه بدون شکاف می‌شود.

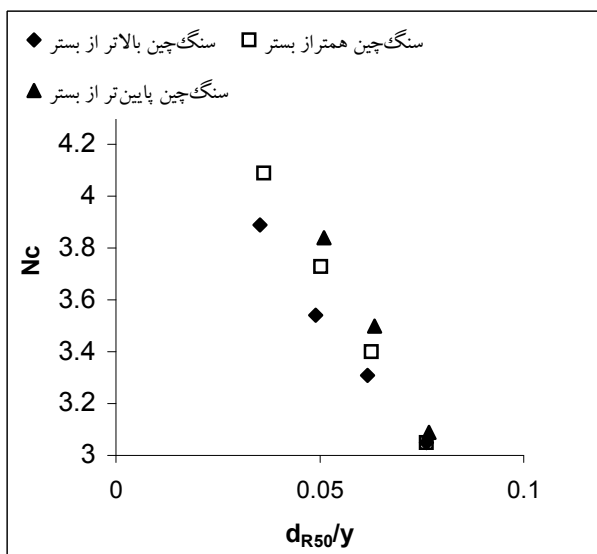


شکل ۱۱ عدد پایداری سنگ‌چین در سطوح مختلف قرارگیری لایه سنگ‌چین اطراف پایه با شکاف کوچک

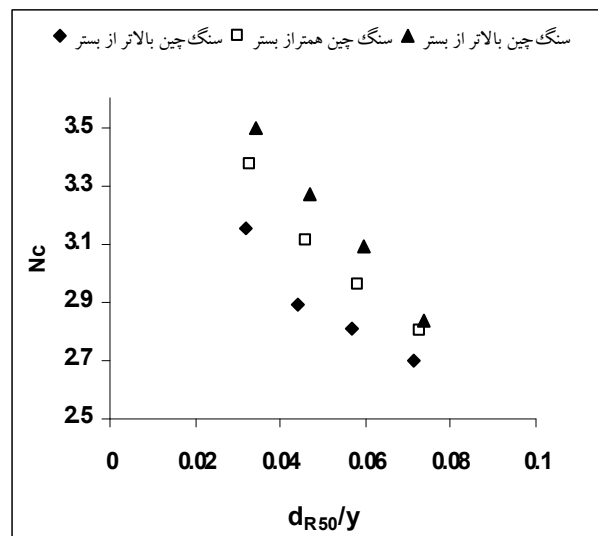
شکاف کوچک تحت تأثیر همان مقدار افزایش سرعت جریان، کمتر بوده و این شکاف، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات سرعت دارد

### ۳-۴- تأثیر سطح قرارگیری لایه سنگ‌چین بر پایداری آن

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مقادیر عدد پایداری محاسبه شده از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر را در حالت ناپایداری سنگ‌چین به ازای تغییرات  $d_{R50}/y$  در سطوح مختلف قرارگیری سنگ‌چین نسبت به بستر - به ترتیب برای پایه بدون شکاف، پایه با شکاف بزرگ و پایه با شکاف کوچک - نشان می‌دهند.



شکل ۱۲ عدد پایداری سنگ‌چین در سطوح مختلف قرارگیری لایه سنگ‌چین اطراف پایه با شکاف بزرگ

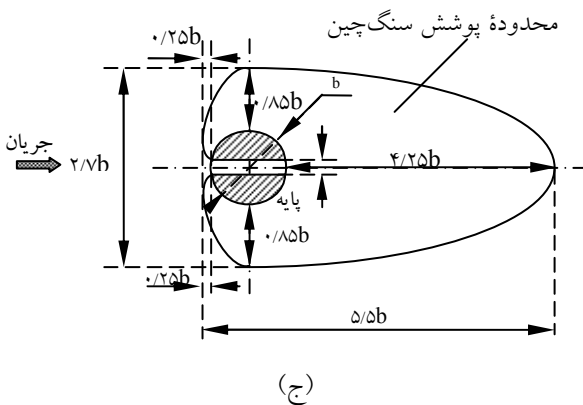
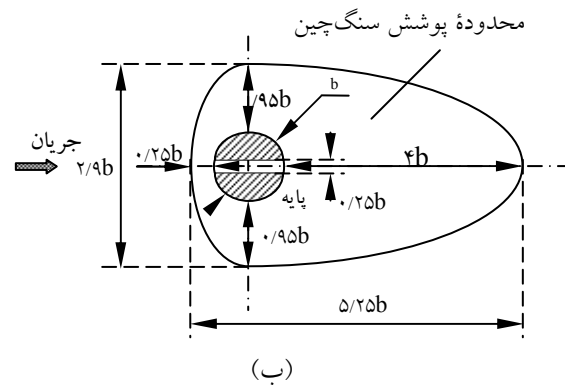
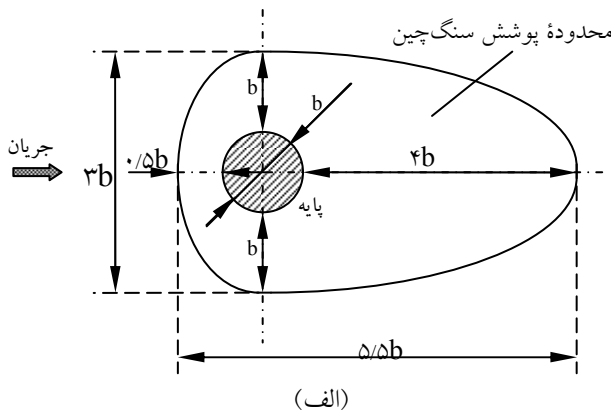


شکل ۱۰ عدد پایداری سنگ‌چین در سطوح مختلف قرارگیری لایه سنگ‌چین اطراف پایه بدون شکاف

عدد پایداری به صورت  $N_c = U^2 / (S_G - 1) g d_{R50}$  تعریف می‌شود که  $S_G$  وزن مخصوص نسبی قطعات سنگ‌چین می‌باشد. با توجه به این شکلها به نتایج زیر می‌توان رسید.

عدد پایداری، پارامتری بی‌بعد است که از آن می‌توان برای تعیین شرایط آستانه حرکت ذرات سنگ‌چین و همچنین تشخیص وضعیت سنگ‌چین از نظر پایداری استفاده کرد.

کوچک در جلوی پایه تا فاصله  $0.25b$ ، وجود سنگ‌چین لازم است.



شکل ۱۳ الگوی پوشش سنگ‌چین در الف- پایه بدون شکاف، ب- پایه با شکاف کوچک و ج- پایه با شکاف بزرگ

(۱) به‌طورکلی هم در پایه بدون شکاف و هم در پایه شکاف‌دار با هر دو اندازه شکاف، در حالتی که سطح سنگ‌چین بالاتر از سطح بستر باشد، لایه سنگ‌چین در همتراز یا پایین‌تر از سطح بستر قرار دارد، ناپایدار می‌شود. با توجه به مقادیر عدد پایداری در شکلهای ۱۰ تا ۱۲، سنگ‌چین پایین‌تر از سطح بستر بیشترین پایداری و سنگ‌چین بالاتر از سطح بستر، کمترین پایداری را داشته و سنگ‌چین همتراز سطح بستر از نظر پایداری در میان این دو حالت قرار می‌گیرد.

(۲) در حالتی که سطح سنگ‌چین بالاتر از سطح بستر قرار دارد، تأثیر هر دو اندازه شکاف بر کاهش عمق جریان در حالت ناپایداری سنگ‌چین نسبت به حالتی که سطح لایه، همتراز یا پایین‌تر از سطح بستر باشد، بیشتر است. همچنین مقایسه نتایج در حالتی که سطح سنگ‌چین همتراز با سطح بستر و حالتی که سطح سنگ‌چین پایین‌تر از سطح بستر باشد، نشان می‌دهد که کمترین تأثیر شکاف بر افزایش عدد پایداری لایه سنگ‌چین، مربوط به حالتی است که سنگ‌چین پایین‌تر از سطح بستر باشد؛ اگرچه بین تأثیر شکاف در این حالت با حالتی که سطح سنگ‌چین همتراز سطح بستر باشد، تفاوت چندانی وجود ندارد.

#### ۴-۴- تعیین حداقل ابعاد لازم برای محدوده

##### پوشش سنگ‌چین دور پایه

شکل ۱۳ (الف تا ج) حداقل محدوده لازم پوشش سنگ‌چین را به ترتیب در اطراف پایه بدون شکاف، پایه با شکاف کوچک و بزرگ برای  $U/U_c = 0.95$  و اندازه متوسط سنگ‌دانه  $2/86$  میلی‌متر نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که شکاف بزرگ، سنگ‌چین را به طور کامل از جلوی پایه حذف کرده، در حالیکه شکاف

در مقایسه با پایه بدون شکاف حدود ۸ درصد کاهش می‌دهد.

## ۶- فهرست علائم

a	شعاع حفرة آب‌شستگی
b	عرض پایه
$d_{R50}$	اندازه متوسط قطعات سنگ‌چین
g	شتاب ثقل
$N_C$	عدد پایداری
$S_G$	وزن مخصوص نسبی قطعات سنگ‌چین
$t_e$	زمان تعادل آب‌شستگی
t	ضخامت لایه سنگ‌چین
U	سرعت متوسط جریان
$U_C$	سرعت متوسط بحرانی آستانه حرکت ذرات

## ۷- منابع

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 طبیعی، جلد هفتم، شماره سوم، ص. ۱۳-۲۸.

Bonassoudas, M. (1973). "Flow structure and problems at circular bridge piers", Report No. 28, Oskar V. Miller Inst., Univ., Munich, West Germany.

Breusers, N. H. C., Nicollet, G. and Shen, H. W. (1977), "Local scour around cylindrical piers", J. Hyd. Res., IAHR, Vol. 15, No. 3, pp. 211-252.

Chiew, Y. M. (1992), "Scour protection at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 118, No. 9, pp. 1260-1269.

Chiew, Y. M. (1995), "Mechanics of riprap failure at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 121, No. 9, pp. 635-643.

همچنین وجود شکاف بزرگ، محدوده سنگ‌چین را در کنارهای پایه نسبت به شکاف کوچک بیشتر کاهش داده است. وجود شکاف هیچ تأثیری بر کاهش محدوده پوشش سنگ‌چین نداشته و حتی منجر به افزایش این محدوده در پشت پایه با شکاف بزرگ شده است.

در نهایت با مقایسه مساحت محدوده سنگ‌چین در شکلهای ۱۳ (الف تا ج) تأثیر وجود شکاف و اندازه آن بر سطح پوشش مورد نیاز سنگ‌چین مشخص می‌شود. اگر مساحت محدوده سنگ‌چین به صورت ضربی از  $b^2$  اندازه‌گیری شود، این مساحت برای پایه بدون شکاف، پایه با شکاف بزرگ و پایه با شکاف کوچک به ترتیب برابر  $1.0/33b^2$ ،  $9/48b^2$  و  $8/78b^2$  خواهد بود. بنابراین شکاف‌های کوچک و بزرگ سطح محدوده سنگ‌چین را نسبت به پایه بدون شکاف به ترتیب، ۸ و ۱۵ درصد کاهش داده است. همچنین سطح محدوده سنگ‌چین در پایه با شکاف بزرگ نسبت به پایه با شکاف کوچک ۷/۵ درصد کاهش داشته است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر شکاف بر پایداری سنگ‌چین اطراف آن با استفاده از دو اندازه شکاف که تا بستر امتداد داشتند، ارائه شده است. نتایج به دست آمده در محدوده آزمایشها نشان داد که وجود شکاف، پایداری لایه سنگ‌چین را افزایش می‌دهد و تأثیر شکاف بزرگ بر افزایش پایداری از شکاف کوچک بیشتر است. با بزرگتر شدن اندازه سنگ‌دانه‌ها، از تأثیر شکاف در افزایش پایداری لایه سنگ‌چین کاسته می‌شود که این کاهش، عملکرد در شکاف بزرگ‌تر بیشتر است. همچنین وجود شکاف بزرگ مساحت محدوده پوشش سنگ‌چین را نسبت به پایه بدون شکاف حدود ۱۵ درصد و شکاف کوچک این محدوده را

- Melville, B.W. and Chiew, Y. M. (1999), "Time scale for local scour at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65.
- Parola, A. C. (1993), "Stability of riprap at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1080-1093.
- Quazi, M. E., and Peterson, A. W. (1973). "A method for bridge pier riprap design", Proc., First Canadian Conf., Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, pp. 96-106.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1983), "Clear-water scour at cylindrical piers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 338-350.
- Raudkivi, A. J. (1998), "Loose Boundary Hydraulics". A. A. Balkema. Rotterdam, pp. 8-28.
- Richardson, E. V., Vance, R. W. and Davis, S. R. (1991), "Evaluation scour at bridges". Rep. No. FHWA-IP-90-017 HEC 18, Federal Hwy. Administration, Washington, D.C.
- Shafai-Bajestan, M. (1991), "Critical stability number in rock lined channels", J. Iran Agric. Res., Vol. 9, No. 2, pp. 121-138.
- Worman, A. (1989), "Riprap protection without filter layers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 115, No. 12, pp. 1615-160
- Yoon, T. H., Yoon, S. B. and Yoon, K. S. (1995), "Design of riprap for scour protection around bridge piers", 26 th IAHR Congress, UK, Vol. 1, pp. 105-110.
- Chiew, Y. M. and Lim, F. H. (2000), "Failure behavior of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 43-55.
- Chiew, Y. M. and Lim, F. H. (2001), "Parametric study of riprap failure around bridge piers", J. Hyd. Res., IAHR, Vol. 39, No. 1, pp. 61-72.
- Chiew, Y. M. (2004), "Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 218-225.
- 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.
- Kumar, V., Ranga Raju, K. G. and Vittal, N. (1999), "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 125, No. 12, pp. 1302-1305.
- Lauchlan, C. S. and Melville, B. W. (2001), "Riprap protection at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 412- 418.
- Neill, C. R. (1973), "Guide to Bridge Hydraulics", Road and Transportation Association of Canada, Univ. of Toronto, Canada.
- Melville, B. W. (1997), "Pier and abutment scour: integrated approach", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 2, pp. 125-136.