

## بررسی اثر شکل هندسی تکیه‌گاه پل در پایداری سنگ‌چین در قوس رودخانه

علیرضا مسجدی\* و مرتضی سبھانی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۱۰)

### چکیده

از جمله روش‌های کنترل آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه پل استفاده از سنگ‌چین در اطراف آن می‌باشد. در این مطالعه به منظور مقایسه پایداری سنگ‌چین‌ها در اطراف دو تکیه‌گاه پل با دو شکل متفاوت، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی با قوس ۱۸۰ درجه از جنس پلاکسی گلاس انجام گرفت. در این تحقیق با قراردادن دو تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی بالدار و قائم از جنس پلاکسی گلاس به همراه سنگ‌چین در اطراف آنها اقدام به انجام یک‌سری آزمایش گردید. آزمایش‌ها با استفاده از دو نوع سنگ‌چین با چگالی مختلف و با چهار قطر متفاوت در دبی ثابت در حالت آب زلال انجام شد. در هر آزمایش عمق جریان در شرایط آستانه حرکت اندازه‌گیری و سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده عدد پایداری محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان داد در شرایط یکسان، پایداری سنگ‌چین‌ها در تکیه‌گاه بالدار بیشتر از تکیه‌گاه قائم می‌باشد. همچنین بالدار بودن تکیه‌گاه با زاویه ۴۵ درجه به طور متوسط باعث افزایش ۹ درصد پایداری سنگ‌چین‌ها در مقایسه با تکیه‌گاه قائم می‌شود.

کلمات کلیدی: قوس ۱۸۰ درجه رودخانه، پایداری سنگ‌چین، تکیه‌گاه پل، عدد فرود

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: drmasjedi.2007@yahoo.com

## مقدمه

اگر تکیه‌گاهی به‌طور عمودی در مسیر جریان قرار گرفته باشد جریان آب در اطراف آن متلاطم شده و جریان‌های گردابی در اطراف آن ایجاد می‌شود. این جریان‌ها مکانیسم اصلی آب‌شستگی به‌حساب آمده که در دراز مدت باعث ایجاد حفره در محل تکیه‌گاه پل شده و ممکن است موجب ریزش و خرابی تکیه‌گاه پل گردد. براساس مطالعات سازمان بزرگراه‌های ایالات متحده در سال ۱۹۷۳، از تعداد ۳۸۳ مورد خرابی در پل ها، ۲۵٪ مربوط به خرابی پایه‌ها و ۷۲٪ مربوط به خرابی تکیه‌گاه‌ها بوده است (۱۵). همچنین بررسی‌های کانداسمی و همکاران در سال ۱۹۹۸، ۶ تا ۱۰ مورد تخریب پل در نیوزلند ناشی از آب‌شستگی در تکیه‌گاه آنها بوده است (۱). یکی از روش‌های کاهش آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها، استفاده از پوشش سنگ‌چین که به‌منظور تقویت بستر و بالابردن مقاومت آن در برابر تنش برشی ناشی از جریان استفاده می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم برای بررسی مقاومت سنگ‌چین در برابر تنش برشی ناشی از جریان، پارامتر بدون بعد عدد پایداری است. مطالعه پارولا به‌منظور ارائه روشی جهت تعیین اندازه مناسب سنگ‌چین با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر همچون سرعت جریان، عمق جریان، زبری بستر در بالادست، اندازه سنگ‌چین، تراز قرارگیری آن نسبت به سطح بستر و همچنین شکل پایه آزمایش‌های خود را انجام داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که محل قرارگیری لایه سنگ‌چین دور پایه و اندازه نسبی سنگ‌دانه‌ها بر عدد پایداری تأثیر زیادی دارد (۱۴). کاردوسو و همکاران آزمایش‌هایی در یک کانال مستطیلی با بستر ماسه‌ای و چهار طول مختلف تکیه‌گاه، سه اندازه مختلف سنگ‌چین دو نوع ماسه مختلف انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد قطر سنگ‌چین به عدد فرود و به طول دیواره تکیه‌گاه بستگی دارد. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های سنگ‌چین می‌توان فرسایش اطراف تکیه‌گاه را به حداقل رساند (۹). سیمارو و همکاران تحقیقاتی در مورد تعیین اندازه سنگ‌چین به‌منظور حفاظت از پایه‌های پل در مقابل فرسایش

انجام دادند. در این تحقیق اثر هیدرولیک جریان و همچنین فاصله بین پایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی با چهار اندازه سنگ‌چین با شیب ۷ درصد انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد فاصله بین پایه‌های پل تأثیر کمی بر روی اندازه سنگ‌چین دارد (۱۸). مارتین و همکاران تحقیقاتی در زمینه مقابله با آب‌شستگی در قوس انجام دادند. در این تحقیق کل قوس بیرونی توسط سنگ‌چین پوشانده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد سنگ‌چین می‌تواند به‌صورت مؤثر از آب‌شستگی قوس بیرونی بکاهد. همچنین سنگ‌چین با انتقال خط‌القعر به سمت مرکز کانال، ساحل بیرونی قوس را محافظت می‌کند و با قراردادن سنگ‌چین به داخل خط‌القعر، توسعه آب‌شستگی کاهش یافته و ساحل بیرونی کمتر تحت تأثیر فرسایش قرار می‌گیرد (۱۱). قربانی و همکاران به‌منظور کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی با استفاده از چهار اندازه سنگ‌چین و دو اندازه شکاف پایه نشان داد وجود شکاف باعث مقاوم‌تر شدن و افزایش پایداری پایداری سنگ‌چین می‌گردد (۳). نوحانی و همکاران به‌منظور بررسی پایداری سنگ‌چین در اطراف پایه پل در قوس ۱۸۰ تحقیقی انجام دادند. در این تحقیق با قرار دادن یک پایه استوانه‌ای به‌همراه سه طوقه دایره‌ای با اندازه‌های مختلف در چهار موقعیت از قوس و چهار اندازه مختلف سنگ‌چین، پایداری لایه سنگ‌چین حول پایه پل در حالت آب زلال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش قطر نسبی سنگ‌دانه‌ها، باعث ناپایداری آنها می‌گردد. همچنین با افزایش عدد فرود در شرایط آستانه حرکت، عدد پایداری کاهش می‌یابد (۷). منصوری و همکاران به‌منظور طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی در قوس ۹۰ درجه رودخانه تحقیقی انجام دادند. در این تحقیق آزمایش‌ها در چگالی، دبی و قطرهای مختلفی انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد به ازای هر اندازه قطر سنگ‌چین ثابت، با افزایش دبی، عمق ناپایداری افزایش می‌یابد. همچنین در دبی ثابت، با کاهش عمق ناپایداری، اندازه قطر سنگ‌چین افزایش می‌یابد (۵).

$$f_1(R, B, \theta, V, y_t, g, \rho_w, S_s, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad [1]$$

در رابطه (۱) شعاع مرکزی قوس،  $B$  عرض مجرا،  $\theta$  زاویه موقعیت قرارگیری تکیه‌گاه در قوس،  $V$  سرعت جریان،  $y_t$  عمق جریان آب در پائین‌دست،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $S_s$  شیب طولی کف مجرا،  $D_{50}$  قطر متوسط سنگ‌چین و  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات سنگ‌چین می‌باشد. با صرف‌نظر کردن از پارامترهای ثابت در رابطه (۱)، رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$f_1(V, y_t, g, \rho_w, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad [2]$$

با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه (۲) به‌صورت زیر بدون بعد می‌شود:

$$f_2\left(\frac{gy_t}{V^2}, \frac{D_{50}}{y_t}, \frac{\rho_s}{\rho_w}\right) = 0 \quad [3]$$

و یا:

$$f_2\left(Fr, \frac{D_{50}}{y_t}, G_s\right) = 0 \quad [4]$$

در رابطه (۴)  $Fr$  عدد فرود،  $D_{50}/y_t$  قطر نسبی سنگ‌چین و  $G_s$  چگالی سنگ‌چین می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها با توجه به آشفتگی جریان در اطراف تکیه‌گاه، جریان از نوع متلاطم بوده و عدد رینولدز حذف گردید. از ترکیب سه پارامتر رابطه ۴، معادله عدد فرود ذره یا عدد پایداری بصورت زیر به‌دست می‌آید:

$$SN = \frac{V}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \quad [5]$$

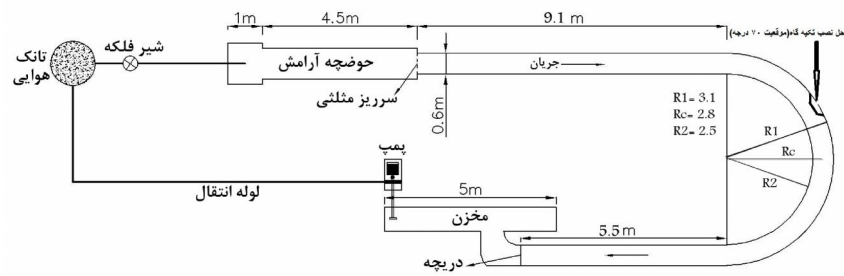
در رابطه (۵)،  $V$  سرعت جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $G_s$  چگالی سنگ‌چین و  $D_{50}$  قطر متوسط سنگ‌چین می‌باشد.

با توجه به این‌که بیشتر تحقیقات در خصوص پایداری سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه در مسیر مستقیم بوده و از آنجائی‌که الگوی جریان در مسیر مستقیم با مسیرهای غیرمستقیم متفاوت است لذا در این تحقیق اقدام به بررسی اثر شکل هندسی تکیه‌گاه پل در پایداری سنگ‌چین در دو تکیه‌گاه با دیواره عمودی بالدار و دیواره قائم در موقعیت ۷۰ درجه در قوس ۱۸۰ درجه به‌همراه سنگ‌چین در اطراف آنها با چگالی و با قطرهای متفاوت در دبی ثابت در حالت آب زلال شده است. طبق تحقیقات آزمایشگاهی صفرزاده و همکاران و مسجیدی و

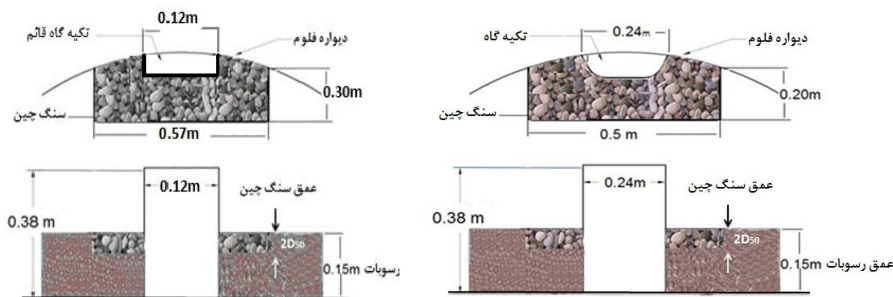
تکیه‌گاه پل سازه‌هایی هستند که از طرف ساحل به داخل جریان اصلی امتداد یافته و موجب تنگ‌شدگی موضعی در داخل جریان می‌گردد. مکانیزم آب‌شستگی بدین‌صورت است که پس از برخورد جریان به تکیه‌گاه پل، با توجه به این‌که سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب بیشتر می‌شود فشار بیشتری نیز در ترازهای بالاتر بر روی بالادست تکیه‌گاه پل ایجاد می‌شود و به این ترتیب گرادیان فشاری روی تکیه‌گاه از بالا به پایین به‌وجود می‌آید که خود باعث ایجاد یک جریان رو به پایین می‌شود. جریان رو به پایین همانند یک جت عمودی عمل کرده و پس از برخورد به بستر رودخانه ضمن حفر بستر ذرات رسوبی به اطراف پراکنده می‌شود (۱۷). بخشی از جریان رو به پایین که به سمت بالا بازگشت می‌کند، در برخورد به جریان عمومی رودخانه، مجبور به حرکت در جهت جریان شده و مجدداً به پایه برخورد می‌کند. این چرخش جریان و بازگشت آن در داخل حفره کنده شده، گردابی تشکیل می‌دهد که به‌شکل شبیه نعل اسب می‌باشند که به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند. تشکیل گرداب نعل اسبی در داخل حفره آب‌شستگی، باعث تسریع در حفر آن شده و ذرات جدا شده از بستر، توسط جریان اصلی رودخانه به پایین‌دست حمل می‌شوند (۸).

در پائین‌دست تکیه‌گاه، در اثر جدایی جریان گرداب‌هایی تشکیل می‌شوند که محور آنها عمود بر بستر رودخانه می‌باشد و به آنها گرداب برخاستگی می‌گویند. این گرداب‌ها همانند گردباد ذرات بستر را جدا کرده و در معرض جریان قرار می‌دهند و به انتقال ذرات در اطراف تکیه‌گاه به‌سمت پایین‌دست کمک می‌کنند. حفر گودال آب‌شستگی توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می‌یابد تا حجم آب درون حفره آب‌شستگی زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک کند. در این حالت عمق آب‌شستگی به حالت تعادل می‌رسد (۱۷).

با در نظر گرفتن جریان دائمی و ثابت بودن خصوصیات سیال رابطه ذیل بین پارامترهای مؤثر بر پایداری سنگ‌چین در حالت تعادل برقرار است:



شکل ۱. پلان کانال قوسی شکل



شکل ۲. مشخصات تکیه گاه ها و سنگ چین در اطراف آن

با دیواره عمودی بالدار با زاویه ۴۵ درجه و دیواره عمودی قائم با زاویه ۹۰ درجه با عرض ۶ سانتی متر از جنس پلکسی گلاس استفاده شد (شکل ۲). هر دو تکیه گاه به صورت مجزا در موقعیت ۷۰ درجه در قوس نصب شدند (شکل ۱). سنگ چین های به کار رفته در این تحقیق از مصالح طبیعی گرد گوشه با ۲ نوع چگالی ۱/۷ و ۱/۲ با اندازه قطر متوسط ۴/۷۶، ۹/۵۲، ۱۲/۷، ۱۹/۱ میلی متر استفاده شد. چگالی مخصوص سنگ چین ها و اندازه قطر متوسط آنها در آزمایشگاه مکانیک خاک با استفاده از روش ارشمیدس تعیین شدند. همچنین چگالی و اندازه سنگ چین ها در آزمایش ها طوری انتخاب شدند که در دبی و عمق مورد نظر جابجا شوند (۱۰) (جدول ۱). به توصیه راودکیوی و اتما برای جلوگیری از تشکیل رپل قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی متر بزرگ تر باشد (۱۶). همچنین برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آب شستگی، انحراف معیار ذرات باید کمتر از ۱/۳ باشد. با توجه به این موارد یک لایه از ماسه طبیعی رودخانه ای با قطر متوسط معادل ۱/۵۹ میلی متر و ضریب انحراف استاندارد معادل ۱/۲۹ انتخاب و در لایه ای به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی متر

همکاران، در نیمه اول قوس ۱۸۰ درجه و در موقعیت ۶۰ تا ۷۰ درجه بیشترین جریان های ثانویه و آب شستگی در این موقعیت ایجاد می شود (۲ و ۶). لذا این تحقیق با هدف کنترل آب شستگی در اطراف تکیه گاه با استفاده از سنگ چین انجام شد.

## مواد و روش ها

به منظور بررسی پایداری سنگ چین در اطراف دو تکیه گاه با دیواره عمودی بالدار و دیواره قائم در قوس رودخانه، یک مدل فیزیکی تهیه شد. آزمایش ها در یک فلوم از جنس پلاکسی گلاس قوسی شکل با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه، شعاع مرکزی  $R=2/8$  m و عرض  $B=0/6$  m انجام شد. انحنای نسبی قوس  $R/B=4/7$  بوده که قوس را در رده قوس های ملایم قرار می دهد. کانال مستقیم ورودی به طول ۹/۱ متر به یک کانال با قوس ۱۸۰ درجه متصل می گردد. این کانال قوسی شکل توسط کانال مستقیم دیگری به طول ۵/۵ متر به دریچه کنترل عمق جریان و سپس مخزن خروجی متصل می شود (شکل ۱).

طبق توصیه های چپو و ملویل تنگ شدگی در عرض کانال نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد (۱۰). لذا دو تکیه گاه

جدول ۱. مشخصات سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه

چگالی سنگ‌چین	اندازه متوسط سنگ‌چین (mm)
۱/۷	۱۹/۱ ، ۱۲/۷ ، ۹/۵۲ ، ۴/۷۶
۱/۲	۱۹/۱ ، ۱۲/۷ ، ۹/۵۲

جهت انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

طبق توصیه الیوتو و هاگر برای جلوگیری از اثرات زبری عمق آب را بیشتر از ۲۰ میلی‌متر پیشنهاد نموده‌اند که در کلیه آزمایش‌ها عمق آب بالاتر از ۲۰ میلی‌متر انتخاب گردید (۱۳).

برای تعیین مساحت سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه‌ها، آزمایش زمان تعادل بدون قرارگیری سنگ‌چین در اطراف دو تکیه‌گاه به منظور بررسی حداکثر ابعاد گودال آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه انجام شد. در این آزمایش طی یک آزمایش طولانی به مدت ۱۴ ساعت بر روی هر یک از تکیه‌گاه بطور جداگانه بدون سنگ‌چین در یک لایه از ماسه به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی‌متر با دبی حداکثر ۲۷ لیتر بر ثانیه در موقعیت ۷۰ درجه در قوس در عمق جریان ۱۰ سانتی‌متر انجام گردید. در انتهای آزمایش، پمپ خاموش و دریچه انتهایی بسته شد تا آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شد تا تأثیری بر روی توپوگرافی بستر ایجاد نشود. پس از تخلیه کامل آب از درون کانال، محدوده چاله آب‌شستگی در اطراف دو تکیه‌گاه توسط عمق‌سنج با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمایش محدوده سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه بالدار برای انجام آزمایش‌ها به طول ۵۰ و عرض ۲۰ سانتی‌متر و برای تکیه‌گاه قائم ۵۷ در ۳۰ سانتی‌متر به دست آمد.

براساس مطالعات ملویل و همکاران شکل چیدمان سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه به صورت مستطیلی و هم‌تراز مصالح بستر در نظر گرفته شد (۱۲). همچنین با توجه به معیار ارائه شده توسط ملویل و همکاران، ضخامت لایه سنگ‌چین دو برابر قطر متوسط سنگ‌چین انتخاب شد (۱۲) (شکل ۲). کلیه آزمایش‌ها در این تحقیق در دبی ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه انجام شد. دبی مورد نیاز توسط سرریز مثلی ۶۰ درجه در ابتدای ورودی فلوم اندازه‌گیری شد.

در ابتدای هر آزمایش تکیه‌گاه مورد نظر را در موقعیت ۷۰ درجه در قوس نصب و سپس با استفاده از ارباب متحرک، رسوبات بستر کانال تحت شیب ثابت مسطح گردید. سپس سنگ‌چین مورد نظر با ضخامت ۲D۵۰ و هم‌تراز با مصالح بستر در اطراف تکیه‌گاه قرار داده شد (شکل ۳). پیش از راه اندازی پمپ، دریچه انتهایی بسته و سپس آب زلال به آرامی به درون کانال هدایت گردید تا از ایجاد رپل و ناهمواری در سطح بستر جلوگیری شود. مدت زمان اشباع کانال بین ۲۰ تا ۳۰ دقیقه بود. پس از بالا آمدن آب و اطمینان از مرطوب شدن رسوبات بعد از گذشت چند دقیقه، پمپ با دبی کمی راه‌اندازی شد و به آرامی توسط شیر فلکه اصلی روی لوله ورودی به حوضچه آرامش، دبی به میزان موردنظر رسانده شد. پس از تنظیم دبی موردنظر، عمق جریان توسط دریچه در پائین دست به آهستگی کاهش داده شد تا شرایط جریان برای جابه‌جایی کم ذرات سنگ‌چین به وجود آید. پس از اطمینان از ثابت بودن عمق جریان در طول فلوم نحوه حرکت ذرات سنگ‌چین به صورت چشمی بررسی گردید. شرایط جریان درحالتی که ذرات سنگ‌چین از محل خود کنده و به پائین دست منتقل شود آستانه حرکت گفته و در این شرایط عمق جریان در پائین دست قوس به عنوان عمق آستانه به وسیله عمق‌سنج با دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۴). در انتهای هر آزمایش، پمپ خاموش و دریچه انتهایی بسته گردید تا آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شد و تأثیری بر روی توپوگرافی بستر ایجاد نگردد.

## بحث و نتایج

در کلیه آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی و عمق جریان در حالت آستانه، بلافاصله در اطراف تکیه‌گاه، گردابه‌ها تشکیل و سنگ‌چین‌ها تحت تأثیر جریان ثانویه به سمت پائین دست منتقل شدند. در هر دو تکیه‌گاه، جابجایی سنگ‌چین‌ها در قسمت پائین دست و به سمت قوس داخلی مشاهده می‌شود که نشان دهنده قدرت بالای جریان ثانویه در این ناحیه می‌باشد. همچنین در کلیه آزمایش‌ها میزان جابه‌جایی سنگ‌چین‌ها به پائین دست در تکیه‌گاه قائم بیشتر از تکیه‌گاه بالدار مشاهده گردید.



شکل ۳. تکیه گاه و سنگ چین اطراف آن قبل از آزمایش



شکل ۴. تکیه گاه ها و سنگ چین اطراف آن بعد از آزمایش

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش آستانه حرکت سنگ چین در تکیه گاه بالدار

Gs	Q (m <sup>3</sup> /s)	D (۵۰mm)	y <sub>tc</sub> (m)	Vc (m/s)	Fr <sub>c</sub>	SNc
۱/۷	۰/۰۲۷	۴/۷۶	۰/۱۳۵	۰/۳۳	۰/۲۹	۱/۸۴
۱/۷	۰/۰۲۷	۹/۵۲	۰/۱۱۲	۰/۴	۰/۳۸	۱/۵۷
۱/۷	۰/۰۲۷	۱۲/۷	۰/۱۰۴	۰/۴۳	۰/۴۳	۱/۴۷
۱/۷	۰/۰۲۷	۱۹/۱	۰/۰۹	۰/۵	۰/۵۳	۱/۳۸
۱/۲	۰/۰۲۷	۹/۵۲	۰/۱۰۹	۰/۴۱	۰/۴۰	۱/۳۹
۱/۲	۰/۰۲۷	۱۲/۷	۰/۰۹۸	۰/۴۶	۰/۴۷	۱/۲۷
۱/۲	۰/۰۲۷	۱۹/۱	۰/۰۸۴	۰/۵۴	۰/۵۹	۱/۱۸

دو تکیه گاه بالدار و قائم در دبی ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه و در دو چگالی ۱/۷ و ۱/۲ در حالت آستانه حرکت نشان می دهد. نتایج حاصل از نمودارها نشان می دهد، عدد فرود در آستانه حرکت عامل مؤثر در پایداری سنگ چین ها بوده و در هر دو چگالی، عدد پایداری در آستانه حرکت در دو تکیه گاه با افزایش عدد فرود، کاهش می یابد. با افزایش عدد فرود، سرعت جریان در کانال افزایش یافته و باعث کاهش پایداری سنگ چین ها در دو تکیه گاه می شود. همچنین در هر دو چگالی، عدد پایداری در تکیه گاه بالدار بیشتر از تکیه گاه قائم مشاهده می شود. زیرا عدد پایداری وابسته به عمق ناپایداری بوده و در کلیه آزمایش ها

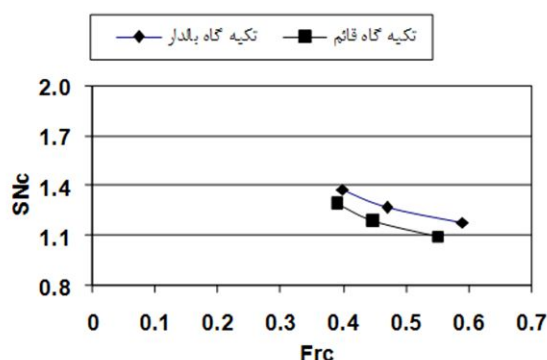
در کلیه آزمایش ها پس از تنظیم دبی، عمق جریان در حالت آستانه حرکت اندازه گیری شد. مطابق جدول شماره ۲ و ۳ به ازای دبی های آزمایشی (Q) و عمق جریان اندازه گیری شده در حالت آستانه حرکت (y<sub>tc</sub>) و همچنین در قطر (D<sub>50</sub>) و چگالی های مورد استفاده برای ذرات سنگ چین (G<sub>s</sub>)، مقادیر سرعت متوسط جریان (V<sub>c</sub>)، عدد فرود (Fr<sub>c</sub>) و عدد پایداری در حالت آستانه حرکت (SN<sub>c</sub>) در دو تکیه گاه محاسبه شد.

#### پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود در دو تکیه گاه

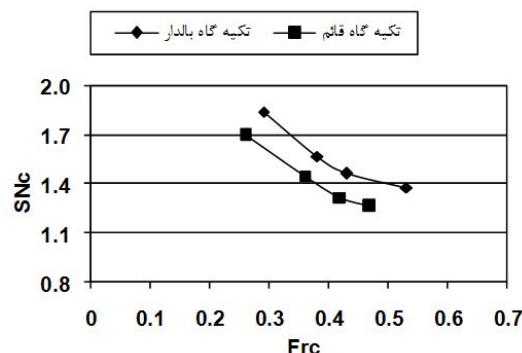
شکل ۵ و ۶ مقایسه پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود در

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش آستانه حرکت سنگ‌چین در تکیه‌گاه قائم

Gs	Q (m <sup>3</sup> /s)	D (mm)	y <sub>tc</sub> (m)	V <sub>c</sub> (m/s)	Fr <sub>c</sub>	SNC
۱/۷	۰/۰۲۷	۴/۷۶	۰/۱۴۵	۰/۳۱	۰/۲۶	۱/۷۰
۱/۷	۰/۰۲۷	۹/۵۲	۰/۱۲۵	۰/۳۶	۰/۳۶	۱/۴۵
۱/۷	۰/۰۲۷	۱۲/۷	۰/۱۰۳	۰/۴۴	۰/۴۲	۱/۳۲
۱/۷	۰/۰۲۷	۱۹/۱	۰/۰۹۸	۰/۴۶	۰/۴۲	۱/۲۷
۱/۲	۰/۰۲۷	۹/۵۲	۰/۱۱۵	۰/۳۹	۰/۳۹	۱/۲۹
۱/۲	۰/۰۲۷	۱۲/۷	۰/۱۰۳	۰/۴۴	۰/۴۵	۱/۱۹
۱/۲	۰/۰۲۷	۱۹/۱	۰/۰۹۶	۰/۴۷	۰/۵۵	۱/۱۰



شکل ۶. تأثیر عدد فرود بر پایداری سنگ‌چین در حالت آستانه حرکت در چگالی ۱/۲



شکل ۵. تأثیر عدد فرود بر پایداری سنگ‌چین در حالت آستانه حرکت در چگالی ۱/۷

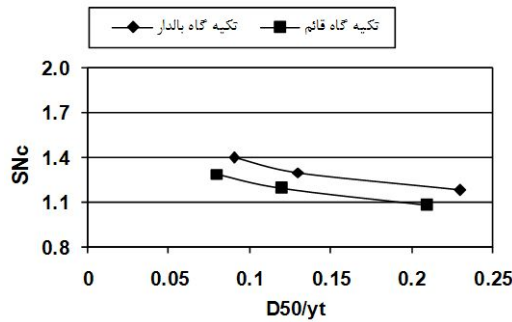
دو چگالی، عدد پایداری در آستانه حرکت در دو تکیه‌گاه با افزایش قطر نسبی سنگ‌چین، کاهش می‌یابد. با افزایش اندازه قطر سنگ‌چین‌ها، سطح تماس آنها بیشتر شده و درگیری آنها نسبت به هم کمتر می‌شوند در نتیجه سنگ‌چین‌ها با اندازه بیشتر در عمق جریان بیشتر و سرعت جریان کمتر پایداری خود را از دست می‌دهند. همچنین در هر دو چگالی، در کلیه قطره نسبی سنگ‌چین، عدد پایداری در تکیه‌گاه بالدار در مقایسه با تکیه‌گاه قائم بیشتر مشاهده می‌شود. به دلیل همسو بودن جریان با بدنه تکیه‌گاه، جریان‌های گردابی ضعیفی نسبت به تکیه‌گاه قائم تولید شده در نتیجه در تکیه‌گاه بالدار، سنگ‌چین‌ها در مقایسه با تکیه‌گاه قائم پایدار خواهند بود.

به‌منظور مقایسه تأثیر قطر نسبی سنگ‌چین‌ها بر پایداری سنگ‌چین در تحقیق حاضر با سایر محققین، از نتایج تحقیقات کیخانی و همکاران، یون و همکاران و کوزی و پترسون استفاده شد (۴، ۱۵ و ۱۹). با توجه به شکل ۷ عدد پایداری اندازه‌گیری

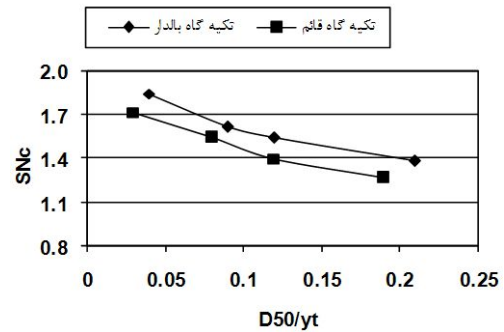
عمق جریان در حالت ناپایداری (آستانه حرکت) سنگ‌چین در تکیه‌گاه بالدار در مقایسه با تکیه‌گاه قائم کمتر مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه بالدار، عمق جریان کمتر و سرعت جریان بیشتری در مقایسه با تکیه‌گاه قائم تحمل می‌کنند. به دلیل همسو بودن جریان با بدنه تکیه‌گاه، جریان‌های گردابی ضعیفی نسبت به تکیه‌گاه قائم تولید شده در نتیجه در تکیه‌گاه بالدار، سنگ‌چین‌ها در عمق جریان کمتری نسبت به تکیه‌گاه قائم پایدار خواهند بود.

#### پایداری سنگ‌چین براساس قطر نسبی سنگ‌چین در دو تکیه‌گاه

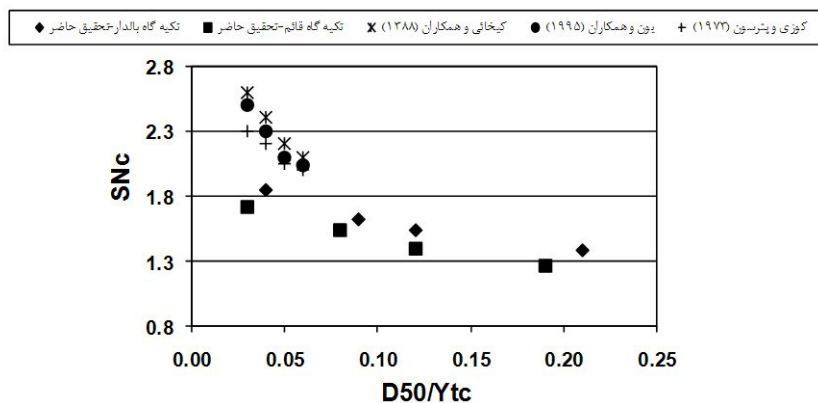
شکل ۷ و ۸ مقایسه پایداری سنگ‌چین براساس قطر نسبی سنگ‌چین در دو تکیه‌گاه بالدار و قائم در دبی ثابت ۲۷ لیتر بر ثانیه و در دو چگالی ۱/۷ و ۱/۲ در حالت آستانه حرکت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از نمودارها نشان می‌دهد قطر نسبی سنگ‌چین نیز عامل مؤثر در پایداری سنگ‌چین‌ها بوده و در هر



شکل ۸. تأثیر قطر نسبی سنگدانه‌ها بر پایداری سنگ‌چین در حالت آستانه حرکت در چگالی ۱/۲



شکل ۷. تأثیر قطر نسبی سنگدانه‌ها بر پایداری سنگ‌چین در حالت آستانه حرکت در چگالی ۱/۷



شکل ۹. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققین

۱. در کلیه آزمایش‌ها، ناپایداری سنگ‌چین‌ها در هر دو تکیه‌گاه در پائین‌دست دماغه تکیه‌گاه مشاهده گردید.  
۲. در دو تکیه‌گاه، در هر چگالی با دبی ثابت، با افزایش عدد فرود در شرایط آستانه حرکت، عدد پایداری کاهش می‌یابد.  
۳. در دو تکیه‌گاه، به ازای دبی ثابت، با افزایش قطر نسبی سنگ‌چین‌ها، عدد پایداری در حالت آستانه حرکت کاهش می‌یابد.

۴. در کلیه شرایط، عدد پایداری در تکیه‌گاه بالدار به دلیل همسو بودن جریان با بدنه تکیه‌گاه و ایجاد جریان‌های گردابی ضعیفی نسبت به تکیه‌گاه قائم بیشتر است. به عبارت دیگر در شرایط یکسان، پایداری سنگ‌چین‌ها در تکیه‌گاه بالدار بیشتر از تکیه‌گاه قائم می‌باشد.

۵. بالدار بودن تکیه‌گاه با زاویه ۴۵ درجه به‌طور متوسط باعث افزایش ۹ درصد پایداری سنگ‌چین‌ها در مقایسه با تکیه‌گاه قائم می‌شود.

شده برای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه در این تحقیق برای دو تکیه‌گاه در مقایسه با نتایج سایر محققین نشان داده شده است. همان‌گونه که از این نمودار مشاهده می‌شود عدد پایداری تحقیق کمتر از نتایج سایر محققین دیگر می‌باشد. علت عمده این کاهش وجود نیروی گریز از مرکز ناشی از جریان حلزونی در قوس خارجی ۱۸۰ درجه در این تحقیق بوده در صورتی تحقیقات محققین در کانال مستقیم انجام شده است.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها جهت تعیین پایداری سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره بالدار و قائم و مقایسه بین آنها در قوس ۱۸۰ درجه در دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه و با دو چگالی ۱/۷ و ۱/۲ و چهار اندازه مختلف ۴/۷۶، ۹/۵۲، ۱۲/۷، ۱۹/۱ میلی‌متر انجام گرفت. متغیرهای مؤثر در این تحقیق دبی، چگالی و قطر سنگ‌چین بود. نتایج این تحقیق به‌صورت زیر بیان می‌شود:



۶. مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات محققین پیشین نشان داد عدد پایداری اندازه‌گیری شده در دو تکیه‌گاه، کمتر از نتایج سایر محققین دیگر بوده که علت عمده این کاهش وجود نیروی گریز از مرکز ناشی از جریان حلزونی در قوس خارجی  $180^\circ$  درجه در این تحقیق می‌باشد.
۷. پیشنهاد می‌گردد تکیه‌گاه‌ها در موقیت‌های دیگر در طول قوس قرار داده و پایداری سنگ‌چین در این شرایط بررسی و با نتایج این تحقیق مقایسه گردد.

## منابع مورد استفاده

۱. صانعی، م. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی اثر درصد انسداد در آب‌شستگی موضعی آب‌شکن‌ها، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، بهمن ماه ۱۳۸۵.
۲. صفرزاده گندشمین، ا. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی الگوی جریان در آبرگیری جانبی از قوس  $180^\circ$  درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
۳. قربانی، ب. و حیدرپور، م. ۱۳۸۴. کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی با استفاده هم‌زمان از شکاف و سنگ‌چین، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، دانشگاه شهرکرد و صنعتی اصفهان، ۱۱۲ص.
۴. کیخانی، م.، حیدرپور، م. و موسوی، س. ف. ۱۳۸۸. بررسی الگوی پوشش سنگ‌چین در محل احداث گروه پایه‌های استوانه‌ای در پل‌ها، مجله علوم فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۳(۴۹): ۲۹-۱۳.
۵. منصوری، ه. م. و شفاعی بجستانی، م. ۱۳۹۰. طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ۱(۴): ۴۵-۳۵.
۶. مسجدی، ع. و مرادی، ا. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی اثر موقعیت تک آب‌شکن بر عمق آب‌شستگی اطراف آن در خم  $180^\circ$  درجه، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی) ۱۳(۴۳): ۵۱-۵۰.
۷. نوحانی، ا.، شفاعی بجستانی، م.، مسجدی، ع.، کشکولی، ح. و ح. سامانی. ۱۳۹۱. کنترل آب‌شستگی پایه پل در فلول  $180^\circ$  درجه با روش‌های سنگ‌چین و طوقه، پایان‌نامه دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان، ۱۸۹ ص.
8. Breusers H. N. C., G. Nicollet H. W. Shen. 1977. Local scour around cylindrical piers. J. of Hydraulic Res., IAHR 15(3): 211-252.
9. Cardoso, A. H. and M. S. Cristina. 2009. Protecting vertical-wall abutment with riprap mattresses. J. of Hydraulic Eng. 135(6):457-465.
10. Chiew, Y. M, B. W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. J. of Hydraulic Res. 25(1):15-26.
11. Martin-Vide, J. P., M. Roca and C. A. Alvarado. 2010. Bend scour protection using riprap. Water Management 163(2):489-497.
12. Melville, B. W., S. Van Ballegooy, S. E. Coleman and B. Barkdoll. 2007. Riprap size selection at wing-wall abutment. ASCE. J. Hydraul. Eng. 133(11): 1265-1269.
13. Oliveto, G., W. H. Hager. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. J. of Hydraulic Eng. ASCE 128(9): 811-820.
14. Parola, A. C. 1993. Stability of riprap at bridge piers. J. of Hydraulic Eng. ASCE, 119(10): 1080-1093.
15. Quazi, M. E., A. W. Peterson. 1973. A method for bridge pier riprap design. Proceedings First Canadian Hydraulics Conference, CSCE, Edmonton, AB, PP: 96-106.
16. Raudkivi, A. J., R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. of Hydraulic Eng. ASCE 109(3): 338-350.
17. Raudkivi, A. J. 1986. Functional trends of scour at bridge. J. of Hydraulic Eng. 112(1):1-13.
18. Simarro, G., Ch. Chreties and L. Teixeira. 2011. Riprap sizing for pile group. J. of Hydraulic Eng. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943.1943-7900.0000458.
19. Yoon, T. H., S. B. Yoon, K. S. Yoon. 1995. Design of riprap for scour protection around bridge piers. 26<sup>th</sup> IAHR Congress, UK, 1: 105-110.