

تعیین قطر سنگچین پایدار اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس رودخانه‌ها

ابراهیم نوحانی^{۱*}، محمود شفاعی بجستان^۲ و علیرضا مسجدی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۰۲)

چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌ها، آبستگی موضعی اطراف پایه‌های آنها در قوس رودخانه می‌باشد که سبب بروز مخاطراتی برای پایداری سازه و یا کاهش بهره‌وری آن می‌شود. قرار دادن سنگچین در اطراف پایه‌های پل مانع از ایجاد آبستگی موضعی اطراف آنها می‌شود. هدف از مطالعه حاضر ارائه رابطه‌ای برای تخمین قطر سنگچین پایدار در اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس رودخانه‌هاست. در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی با قوس ۱۸۰ درجه پایداری چهار قطر مختلف سنگچین تحت شرایط آب زلال و دبی‌های متفاوت جریان مورد بررسی قرار گرفت. براساس آنالیز ابعادی روابطی تجربی برای طراحی سنگچین پایدار در اطراف پایه‌های پل ارائه شد. هم‌چنین نتایج آزمایش‌ها با روابط ارائه شده توسط سایر محققین از جمله لاجلان (۱۹۹۹)، پارولا (۱۹۹۵) و چپو (۱۹۹۵) مقایسه شد که نشان داد رابطه ارائه شده در این تحقیق با درصد خطای نسبی ۰/۱۲۹ از دقت مناسبی برخوردار است. رابطه ارائه شده در این تحقیق ضمن سادگی، کلیه عوامل مؤثر در ناپایداری سنگچین را در بردارد و از این‌رو برای طراحی سنگچین در اطراف پایه‌های پل در قوس رودخانه‌ها توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، ناپایداری سنگچین، آبستگی، آب زلال

۱. گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

۲. گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. گروه سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nohani_e@yahoo.com

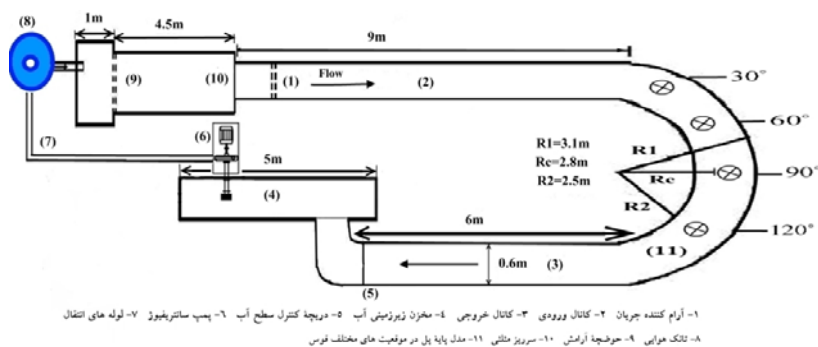
مقدمه

پایداری لایه سنگچین روی بستر متحرک و اثر متغیرهای مختلف بر آن در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار می‌گیرد. معمولاً در تعیین معیار سنگچین، عملکرد آن در وضعیت یا شرایط نامناسب منظور می‌گردد تا بتوان نتایج حاصل را با درجه اعتماد بالا توصیه نمود. یکی از دلایل اختلاف نتایج حاصل از روابط و روش‌های گزارش شده توسط محققین مختلف، انتخاب معیارهای متفاوت تخریب سنگچین می‌باشد. برای مثال پوزی (۱۳) حرکت اولین دانه‌های سنگچین را به‌عنوان معیار تخریب در نظر گرفت. پارولا (۱۱) در آزمایش‌های خود از سنگچین سه لایه‌ای، با لایه میانی رنگین، استفاده کرد. وی آستانه تخریب سنگچین را زمانی می‌داند که لایه رنگ آمیزی شده پس از ۳۰ دقیقه بدون حرکت نمایان شود.

چیو (۴) در تحقیقات خود با در نظر گرفتن مدت زمان ۱۵ دقیقه برای مشاهده گسیختگی سنگچین در اطراف پایه پل، ناپایداری لایه سنگچین را به شرایط گسیختگی کامل آن مرتبط نموده است. در واقع از نظر او حرکت چند سنگدانه از لایه سنگچین برای تخریب آن کافی نمی‌باشد. لوچلان و ملویل (۷) عملکرد لایه سنگچین را قبل از اینکه عمق حفره آبشستگی در آن به ۲۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی، بدون وجود سنگچین، برسد قابل قبول دانستند. یکی دیگر از متغیرهای طراحی سنگچین، تعیین ضخامت آن و مشخصات لایه فیلتر است. تمایل خروج ذرات ریز موجود در حفره‌های بستر زیرین سنگچین منجر به تخریب آن از نوع غربالی می‌شود (۴). راه حل جلوگیری از این نوع تخریب، افزایش ضخامت لایه سنگچین و قرار دادن لایه فیلتر بین بستر ریزدانه و سنگچین است. ورمن (۱۸) در آزمایش‌های خود نشان داد که اگر ضخامت لایه سنگچین کافی باشد، نیازی به قرار دادن لایه فیلتر زیرین نخواهد بود. ورمن نتیجه گرفت که عملکرد یک سیستم سنگچین چند لایه‌ای با دانه‌بندی‌های مختلف، با یک لایه منفرد همگن با ضخامت لایه‌ای کمتر، یکسان خواهد بود. در صورتی که اندازه سنگ‌دانه‌های مورد استفاده برای حفاظت پایه پل به‌طور مناسب انتخاب شوند، لایه سنگچین می‌تواند در برابر تنش‌های برشی

آبشستگی موضعی پایین دست سازه‌های رودخانه‌ای از مسائل عمده‌ای است که همواره مورد توجه مهندسين و طراحان بوده است. اصولاً پل‌ها در بازه‌ای از رودخانه احداث می‌شوند که رودخانه پایدارتر باشد. در این مسیر، ممکن است به‌علت محدودیت‌های احداث راه و یا عدم پایداری رودخانه در بازه‌های مستقیم، پل در قوس رودخانه احداث شود. وقوع آبشستگی در اطراف پایه‌های پل یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها می‌باشد. پس از برخورد جریان به دماغه پل، روی پایه با توجه به اینکه سرعت جریان از بستر رودخانه به‌طرف سطح آب بیشتر می‌شود فشار بیشتری نیز در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌شود و به این ترتیب گرادیان فشاری روی پایه از بالا به پایین به‌وجود می‌آید که خود باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه می‌شود (۱۵). مقداری از این جریان که به‌سمت بالا بازگشت می‌کند، در برخورد به جریان عمومی رودخانه، مجبور به حرکت در جهت جریان شده و مجدداً به پایه برخورد کرده و نتیجتاً، گردابی تشکیل می‌دهد که به‌تدریج در دو طرف پایه، امتداد یافته و شکل شبیه نعل اسب پدید می‌آورد که به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند. در اثر جدایی جریان در کناره‌های پایه نیز گرداب‌هایی تشکیل می‌شوند که محور آنها عمود بر بستر رودخانه می‌باشد و به آنها گرداب برخاستگی می‌گویند.

استفاده از سنگچین با اندازه‌های درشت‌تر از اندازه مصالح بستر در محل آبشستگی یکی از روش‌های متداول برای کنترل توسعه چاله آبشستگی می‌باشد که از دیرباز مورد توجه مهندسين هیدرولیک بوده است. محققین زیادی از جمله مسجلی و همکاران (۸)، حیدرنژاد و همکاران (۵) و شفاعی بجمستان و همکاران (۱) آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های استوانه‌ای در قوس رودخانه‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مطالعات مربوط به استفاده از سنگچین برای مهار آبشستگی موضعی، روش‌های مختلف طراحی سنگچین (تعیین اندازه متوسط سنگدانه‌ها، ضخامت لایه سنگچین، عمق و نحوه استقرار آن)،



شکل ۱. پلان فلوم آزمایشگاهی و منطقه انجام آزمایش ها

قوسی شکل توسط کانال مستقیم دیگری به طول ۵/۵ متر به دریچه کنترل عمق جریان و سپس مخزن خروجی متصل می شود. دریچه‌ی کنترل به ضخامت ۲ سانتی متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. آزمایشات با بازشدگی های متفاوت دریچه کشویی صورت گرفت. جهت اندازه گیری دبی جریان در ورودی کانال از سرریز مثلثی ۶۰ درجه که قبلاً به دقت واسنجی شده بود، استفاده گردید.

در کلیه آزمایش ها برای از بین رفتن تأثیر دیواره های کانال بر آبشستگی موضعی، طبق توصیه های چیو و ملویل (۳) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد. لذا برای مدل کردن پایه پل از لوله PVC به قطر ۶۰ میلی متر استفاده شد. به توصیه راودکیوی و اتما (۱۵) برای جلوگیری از تشکیل رپیل قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی متر بزرگ تر باشد. هم چنین برای حذف اثر رسوبات روی عمق آبشستگی نسبت قطر پایه به متوسط قطر ذرات باید کمتر از ۵۰ باشد (۳). در همین راستا راودکیوی و اتما (۱۵) این نسبت را ۳۰-۲۵ پیشنهاد کرده اند. با توجه به این موارد یک لایه از ماسه طبیعی رودخانه ای با قطر متوسط معادل ۱/۶ میلی متر و ضریب انحراف استاندارد معادل ۱/۱۳ انتخاب و در لایه ای به ضخامت تقریبی ۱۵ سانتی متر برای انجام آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت. طبق توصیه لیوتو و هاگر (۱۰) برای جلوگیری از اثرات زبری عمق آب را بیشتر از ۲۰ میلی متر پیشنهاد کرده اند که در کلیه آزمایش ها عمق آب متغیر و بیش از این مقدار بود. با توجه به اینکه آبشستگی موضعی در شرایط آب زلال بررسی شد لذا به منظور

حاصل از میدان جریان مقاومت کند. مطالعات زیادی تاکنون به منظور ارائه روابط مختلف برای محاسبه اندازه لازم برای دانه های سنگچین در مسیر مستقیم رودخانه ها انجام شده است. که از آن جمله می توان به روابط لاچلان (۶)، پارولا (۱۲)، ریچاردسون و دیویس (۱۷) و چیو (۴) اشاره نمود. در روابط ارائه شده توسط محققان ذکر شده، در تعیین قطر سنگچین می بایست از جداول و گراف های متعددی استفاده نمود که برخی از جداول به صورت کیفی بوده و استفاده محاسباتی از آنها امکان نخواهد داشت. از این رو ارائه فرمول ساده ای که از دقت مناسبی برخوردار باشد ضروری به نظر می رسد. هم چنین تا به حال هیچ رابطه ای به منظور تعیین اندازه مناسب سنگچین در اطراف پایه استوانه ای در قوس رودخانه ها ارائه نشده است. به این منظور در تحقیق حاضر به بررسی رفتار سنگچین در قوس رودخانه پرداخته شده است.

مواد و روش ها

به منظور بررسی رفتار سنگچین اطراف پایه پل در قوس رودخانه، یک مدل آزمایشگاهی تهیه شد. آزمایش ها در یک فلوم از جنس پلاکسی گلاس قوسی شکل با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه، شعاع مرکزی $R = 2/8 \text{ m}$ ، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر انجام شد که نمای کلی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. انحنا ی نسبی قوس ($R/D = 4/7$) 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

گسیختگی لایه سنگ‌چین، U_c سرعت متوسط جریان در آستانه‌ی گسیختگی ذرات بستر، y عمق جریان در آستانه‌ی گسیختگی لایه سنگ‌چین، b قطر پایه، t_R ضخامت سنگ‌چین، g شتاب ثقل، SH فاکتور شکل پایه، θ_p زاویه قرارگیری پایه در قوس، c طول لایه سنگ‌چین در جهت جریان، B عرض کانال (فلوم) و S_o شیب کف کانال می‌باشد. کلیه پارامترها در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند. در کلیه آزمایش‌ها مقادیر $U_c, t_R, c, d_{50}, SH, B, H, S_o, \rho_s$ ثابت در نظر گرفته شد و آزمایش‌ها با در نظر گرفتن مشخصات جریان، مشخصات آبراهه و مشخصات سنگ‌چین و به‌کارگیری نظریه ابعادی باکینگهام مبتنی بر رابطه:

$$\frac{d_R}{y} = f(R_e, F_r, \theta_p) \quad [2]$$

که در آن، F_r عدد فرود جریان و R_e ، عدد رینولدز ذره می‌باشد، برنامه‌ریزی گردید تا به‌توان با اعمال شرایط هیدرولیکی مختلف و به‌کار بردن قطرهای مختلف سنگدانه‌ها، روش طراحی مناسب و کاربردی را برای طراحی سنگ‌چین اطراف پایه استوانه‌ای در قوس رودخانه‌ها توصیه نمود. با توجه به اینکه در کلیه آزمایش‌ها، جریان به‌شدت آشفته ($148000 < R_e < 96000$) بوده، می‌توان تأثیر عدد رینالدز ذره بر ناپایداری سنگ‌چین را ناچیز فرض نمود و معادله ۲ به شکل زیر کاهش داد:

$$\frac{d_R}{y} = f(F_r, \theta_p) \quad [3]$$

از معادله ۳ به‌منظور تعیین اندازه مناسب ذرات سنگ‌چین در قوس استفاده می‌شود که براساس نتایج مشاهداتی آزمایش‌ها، رابطه نهایی استخراج می‌شود.

نتایج و بحث

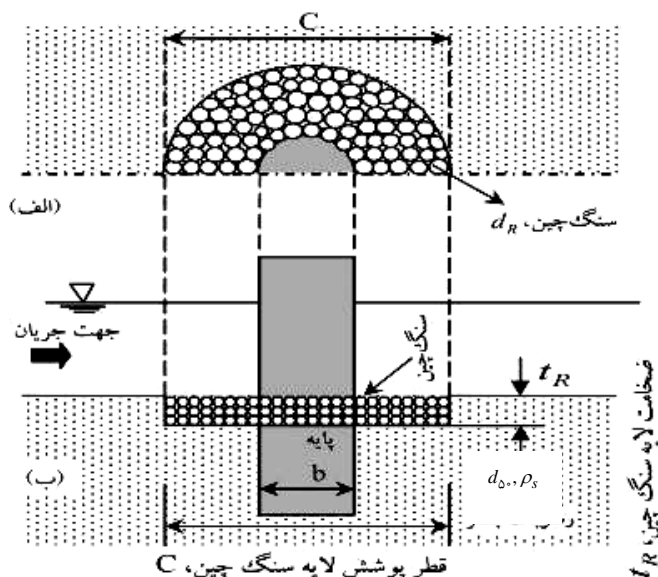
در شکل ۳ مقادیر عمق جریان مربوط به دبی‌های ثابت، در آستانه حرکت برای هر سنگ‌چین در موقعیت‌های مختلف قوس ارائه شده است. مشاهده می‌شود به‌ازای شدت جریان معینی سنگدانه‌های بزرگ‌تر با عمق جریان کمتری ناپایدار می‌شوند که

جلوگیری از فرسایش و انتقال رسوبات در بالادست پایه، سرعت متوسط جریان باید کمتر از سرعت بحرانی ($u < u_c$) باشد. در کلیه آزمایش‌ها نسبت سرعت متوسط جریان (u) به سرعت بحرانی (u_c) ۰/۹۳ بود. براساس مطالعه چپو (۴) اگر قطر دانه‌های سنگ‌چین نسبت به قطر پایه بیش از حد بزرگ باشد، الگوی تغییر جریان موضعی در محل پایه اثر نامحسوسی در ناپایداری لایه سنگ‌چین دور پایه دارد. هم‌چنین اگر $b/d_R < 2.25$ (قطر متوسط ذرات سنگ‌چین)، آنگاه وجود پایه در ناپایداری سنگ‌چین دور آن بی‌تأثیر است. در این تحقیق از چهار اندازه مختلف سنگدانه‌های رودخانه‌ای گرد گوشه (قطر سنگدانه‌های ۲/۵۸، ۳/۶۸، ۴/۳۸ و ۵/۵۳ میلی‌متر) با چگالی نسبی ۲/۶۵ که دارای دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت بودند به‌عنوان دانه‌های سنگ‌چین استفاده شد. در تحقیق حاضر، بررسی‌ها با پوشش سنگ‌چین که ضخامت آن به‌قدر کافی بزرگ (حداقل ۶ برابر قطر متوسط سنگ‌چین) بوده است صورت گرفته و حرکت اولیه ذرات سنگ‌چین به‌عنوان معیار تخریب آن منظور گردیده است که بیانگر ضریب اطمینان بیشتر نتایج به‌دست آمده نسبت به تحقیقات پیشین خواهد بود.

قبل از انجام هر آزمایش مصالح سنگ‌چین در اطراف پایه پل کار گذاشته شد و پس از صاف کردن سطح آن، دریچه انتهایی را کاملاً بسته و شیر فلکه به مقدار کم باز گردید تا بدون آنکه سنگ‌چین کوچک‌ترین حرکتی داشته باشد، کانال از آب پر شود. سپس با تنظیم دبی مورد نظر و با استفاده از دریچه لولایی پایاب کانال، عمق جریان برای ایجاد سرعت‌های مختلف تنظیم گردید. کلیه پارامترهای مؤثر بر حرکت ذرات سنگ‌چین در اطراف پایه پل در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f(d_R, d_{50}, \mu, \rho, \rho_s, U, U_c, y, b, t_R, g, SH, \theta_p, c, B, S_o) = 0 \quad [1]$$

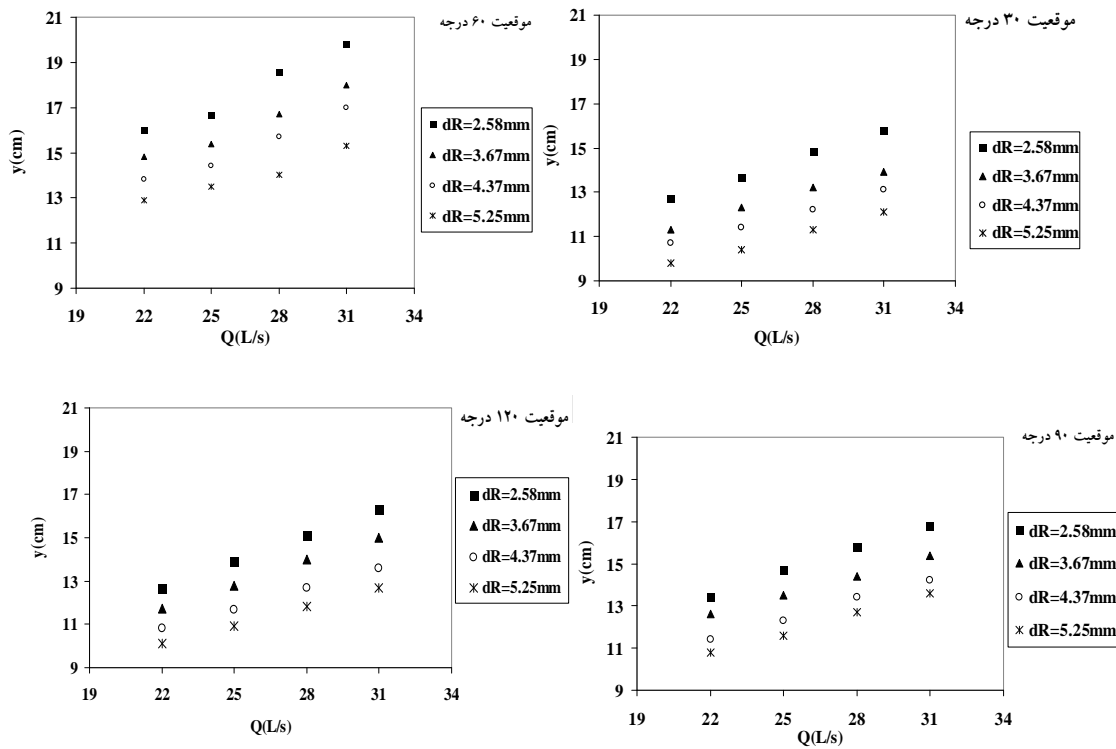
که d_R قطر متوسط ذرات سنگ‌چین، d_{50} قطر متوسط رسوبات بستر، μ لزجت مطلق سیال، ρ جرم مخصوص سیال، ρ_s جرم مخصوص ذرات جامد، U سرعت متوسط جریان در آستانه‌ی



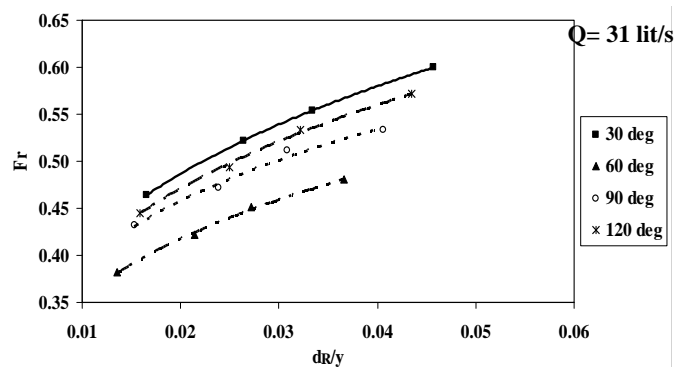
شکل ۲. پارامترهای مؤثر بر ناپایداری سنگچین پایه پل؛ الف- پلان؛ ب- مقطع

برای روشن شدن این مسئله، مقادیر قطر نسبی ذرات سنگچین در برابر عدد فرود جریان در حداکثر دبی و موقعیت 60° درجه (ناپایدارترین موقعیت در قوس (۴)) در شکل ۴ رسم گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت d_R / y مقدار عدد فرود جریان نیز افزایش می‌یابد. که دلیل آن افزایش قطر سنگدانه‌های لایه سنگچین (d_R) و کاهش عمق جریان و در نتیجه افزایش سرعت جریان در حالت ناپایداری سنگچین می‌باشد. با توجه به توضیحات فوق، از عدد فرود جریان نیز می‌توان به‌عنوان معیاری برای سنجش پایداری لایه سنگچین استفاده نمود. بدین ترتیب که برای یک قطر معین سنگدانه‌ها، هرچه عدد فرود جریان در حالت ناپایداری سنگچین بزرگ‌تر باشد، میزان پایداری لایه سنگچین بیشتر خواهد بود. هم‌چنین با توجه به شکل‌های به‌دست آمده، تغییر موقعیت قرارگیری پایه پل در قوس رودخانه باعث تغییر عدد فرود در حالت ناپایداری سنگچین در مقابل d_R / y می‌شود، به‌طوری‌که در کلیه دبی‌های جریان، بیشترین اعداد فرود جریان در موقعیت‌های 30° و 120° درجه رخ داده (بیشترین پایداری) و حداقل اعداد فرود مربوط به قرارگیری پایه پل در موقعیت 60° درجه قوس می‌باشد (حداقل پایداری). زاویه 90° درجه حالتی مابین زاویه

این امر را می‌توان به افزایش سرعت متوسط جریان و در نتیجه تنش برشی مؤثر بر روی سنگچین مرتبط دانست. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که در آستانه حرکت هراندازه سنگچین، عمق جریان با دبی مربوطه رابطه مستقیم دارد طوری‌که با افزایش دبی جریان، آستانه حرکت ذره سنگچین در عمق بیشتری اتفاق خواهد افتاد. مقایسه اعماق ناپایداری در موقعیت‌های مختلف قوس نشان می‌دهد که فاصله بین نقاط به‌ازای دبی ثابت، در موقعیت 30° درجه کمترین و در موقعیت 60° درجه بیشترین می‌باشد به‌طوری‌که به‌ازای دبی ثابت 31 لیتر بر ثانیه، در موقعیت 30° درجه فاصله‌ی بین حداقل و حداکثر عمق ناپایداری معادل $3/5$ سانتی‌متر و در موقعیت 60° درجه این فاصله به $4/55$ سانتی‌متر افزایش می‌یابد که این امر به دلیل کمتر شدن قدرت جریان ثانویه در موقعیت 30° درجه نسبت به موقعیت 60° درجه که حداکثر قدرت جریانات ثانویه و حلزونی در این موقعیت رخ می‌دهد، می‌باشد. با توجه به روند تغییرات عمق ناپایداری، در تمامی موقعیت‌ها، با کاهش دبی جریان، فاصله‌ی بین نقاط کاهش پیدا کرده و نزدیکی نقاط در زاویه 60° درجه مشهودتر می‌باشد که حاکی از کاهش تأثیر قطر سنگدانه‌ها بر پایداری لایه سنگچین به‌ازای کاهش دبی جریان می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات عمق نسبت به دبی جریان در آستانه حرکت ذرات سنگچین در موقعیت‌های مختلف قوس



شکل ۴. مقادیر عدد فرود جریان در حالت ناپایداری سنگچین در موقعیت‌های مختلف قوس

$$\left(\frac{d_R}{y} \right) = a_0 F_r^{4/9} \quad [4]$$

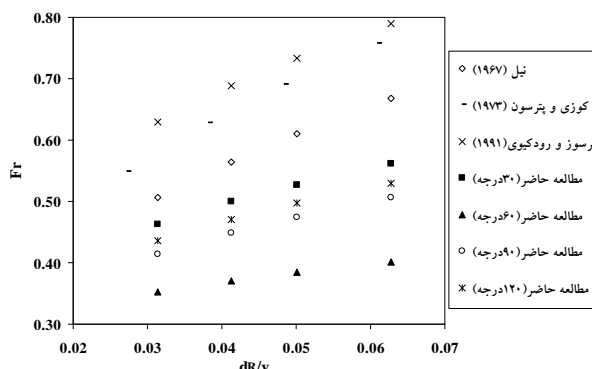
$$\begin{cases} \theta_p = 30^\circ \rightarrow a_0 = 0/55 \\ \theta_p = 60^\circ \rightarrow a_0 = 1/44 \\ \theta_p = 90^\circ \rightarrow a_0 = 0/87 \\ \theta_p = 120^\circ \rightarrow a_0 = 0/72 \end{cases}$$

همان‌طور که در روابط فوق ملاحظه می‌شود، a_0 ضریبی ثابت است که به‌ازای موقعیت‌های (θ_p) قرارگیری پایه استوانه‌ای در

۱۲۰ درجه و ۶۰ درجه را دارد که با این حال اعداد فرود آن به زاویه ۱۲۰ درجه نزدیک‌تر است. در واقع عوامل تخریب لایه سنگچین در موقعیت ۶۰ درجه، که علاوه بر جریان رو به پایین و جریان نعل اسبی شامل جریان‌ات ثانویه و گرداب‌های حلزونی می‌باشند، حداکثر و در موقعیت ۳۰ درجه حداقل می‌باشند. معادله به‌دست آمده از نتایج تحقیق حاضر به‌صورت رابطه زیر بیان شد:

جدول ۱. مقایسه روابط محاسباتی با داده‌های مشاهده شده

MPE			
مطالعه حاضر	لاچلان	پارولا	چیو
۰/۱۲۹	۵/۶۹۹	۴/۸۱۷	۲/۹۷۳



شکل ۵. تغییرات عدد فرود جریان با d_R / y در حالت ناپایداری سنگچین برای روابط مختلف

داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کلیه روابط ارائه شده محققین، قطر سنگدانه‌های سنگچین را در مسیر مستقیم رودخانه‌ها برآورد می‌کنند به منظور تعیین قطر مناسب سنگدانه‌ها در اطراف پایه استوانه‌ای در قوس، می‌توان از رابطه‌ی تحقیق حاضر با توجه به حداقل بودن مقدار خطای محاسباتی استفاده نمود.

شکل ۵ مقایسه بین مقادیر عدد فرود جریان محاسبه شده از داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با مقادیر حاصل از عمق‌های جریان به دست آمده از روش‌های نیل (۹)، کوزی و پترسون (۱۴) برسوز و رودکیوی (۲) در مسیر مستقیم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر F_T محاسبه شده از عمق‌های جریان به دست آمده از تحقیق حاضر (در قوس رودخانه) کمتر از مقادیر به دست آمده از روش‌های سایر محققین در مسیر مستقیم بوده و بیشترین اعداد فرود به دست آمده مربوط به نتایج برسوز و رودکیوی (۲) در مسیر مستقیم می‌باشد. هم‌چنین نزدیک‌ترین اعداد فرود در مطالعه حاضر در قوس به مطالعات سایر محققین در مسیر مستقیم مربوط به قرارگیری پایه پل در موقعیت 30° درجه قوس می‌باشد که به نتایج حاصل از نیل (۹) نزدیک‌تر است.

قوس مشخص شده است. در صورتی که پایه در موقعیتی غیر از موارد فوق باشد می‌توان بدین شکل در نظر گرفت که از موقعیت 30° تا 120° درجه تغییرات ضریب ثابت به صورت $1/44 < a_0 < 5/55$ متغیر می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی این معادله برابر $0/973$ می‌باشد. برای ارزیابی و مقایسه مقادیر به دست آمده از روابط دیگر محققین و رابطه‌ی استخراجی از تحقیق حاضر، با مقادیر مشاهده شده در آزمایش‌ها، از شاخص میانگین درصد خطا استفاده شد. این شاخص میزان خطای رابطه‌ی مورد نظر را نسبت به مقدار واقعی اندازه سنگدانه‌ها نشان می‌دهد و هرچه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کمتر بودن خطا در رابطه مورد نظر می‌باشد.

$$MPE = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{|d_R \text{sim}_i - d_R \text{obs}_i|}{d_R \text{obs}_i} \right) \times 100 \right] / n \quad [5]$$

جدول ۱ میانگین درصد خطای نسبی نتایج به دست آمده از روابط تحقیق حاضر، لاچلان (۶)، پارولا (۱۲) و چیو (۴) نسبت به داده‌های مشاهده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که رابطه ۴ (تحقیق حاضر) کمترین خطا را در برآورد قطر سنگچین پایدار نسبت به

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی، معیار تعیین آستانه حرکت برای سنگچین محافظ اطراف پایه‌های استوانه‌ای در قوس رودخانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج زیر قابل ارائه می‌باشند:

با بزرگ‌تر شدن اندازه سنگ دانه‌ها، عمق جریان لازم برای شروع ناپایداری سنگچین کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هرچه اندازه سنگ دانه‌ها بزرگ‌تر باشد، سرعت جریان لازم برای شروع ناپایداری سنگچین افزایش می‌یابد.

در شرایط سرعت ثابت متوسط جریان، افزایش عمق جریان باعث افزایش تنش برشی مؤثر بر روی سنگچین می‌گردد که حساسیت سنگدانه‌های بزرگ‌تر نسبت به عمق، بیشتر از سنگدانه‌های ریزتر است. با افزایش عدد فرود به دلیل افزایش سرعت متوسط و به طور کلی افزایش توان فرسایشی جریان، قطر سنگچین پایدار افزایش می‌یابد.

پایداری سنگدانه‌ها در قوس به موقعیت قرارگیری بستگی

دارد به طوری که در زاویه 60° درجه حداقل پایداری و در زاویه 30° درجه قوس حداکثر پایداری لایه سنگچین در قوس رخ می‌دهد. به طور کلی پایداری سنگدانه‌های کار گذاشته شده در اطراف پایه‌های پل در قوس رودخانه به علت عوامل تشدید کننده آبشستگی (جریان‌های ثانویه و حلزونی)، کمتر از رودخانه‌های مستقیم می‌باشد. مشاهدات انجام شده و مقایسه آن با تحقیقات محققان پیشین نشان داد که به منظور طراحی قطر متوسط ذرات سنگچین پایدار در اطراف پایه پلاستوانه‌ای در قوس رودخانه‌ها، می‌توان رابطه ساده‌ای مبتنی بر عدد فرود جریان و نسبت قطر متوسط سنگچین به عمق جریان ارائه نمود که علاوه بر سهولت استفاده، دارای دقت بالاتری نسبت به روابط موجود می‌باشد.

پیشنهاد می‌شود برای اطمینان از کاربرد دقیق نتایج توصیه شده، تحقیقات در کانال‌های بزرگ‌تر با سنگچین درشت‌دانه و غیریکنواخت انجام پذیرد تا نتایج حاضر را کامل‌تر نماید.

منابع مورد استفاده

۱. شفاعی بجزستان، م. و محمودی، غ. ۱۳۸۸. عملکرد طوقه در کاهش نرخ آبشستگی پایه استوانه‌ای پل‌ها در قوس رودخانه. هشتمین سمینار بین المللی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۸-۶ بهمن‌ماه.
2. Breusers, H. N. C, Raudkivi, A. J. 1991. Scouring, 2nd Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
3. Chiew, Y. M and B. W. Melville. 1987. Local scour around bridge piers. J. Hydraul. Res., 25(1):15-26.
4. Chiew, Y. M. 1995. Mechanics of riprap failure at bridge piers. J. Hydraul. Eng., ASCE 121(9): 635-643.
5. Heidarnejad, M., M. Shafai Bajestan and A. Masjedi. 2010. The Effect of Slots on Scouring Around Piers in Different Positions of 180-Degrees Bends. World Appl. Sci. J. 8 (7): 892-899.
6. Lauchlan, C. S. 1999. Pier Scour Countermeasures. PhD. Thesis, Civil and Resource Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
7. Lauchlan, C. S. and B. W. Melville, 2001. Riprap protection at bridge piers. J. Hydraul. Eng., ASCE 127(5): 412-418.
8. Masjedi A., M. S. Bejestan and H. Kazemi. 2010. Effects of bridge pier position in a 180 degree flume bend on scour hole depth. J. Appl. Sci. 10(8):670-675.
9. Neill, C. R. 1967. Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material. 12th IAHR Cong. Proc. Fort Collins, Colorado, Vol. 3, C6.1-C6.9. USA.
10. Oliveto, G. and W. H. Hager. 2002. Temporal Evolution of Clear-Water Pier and Abutment Scour. J. Hydraul. Eng., ASCE, 128 (9): 811-820.
11. Parola AC, 1993. Stability of riprap at bridge piers. J. Hydrul. Eng. ASCE 119(10): 1080-1093.
12. Parola, A. C. 1995. Boundary stress and stability of riprap at bridge piers. PP. 149-159. In: River, Coastal, and Shoreline Protection. C. R. Thorne *et al.*, (Eds.), John Wiley Pub., New York.
13. Posey, C. J. 1974. Tests of scour protection for bridge piers J. Hydraul. Div. ASCE 100(12): 773- 1783.
14. Quazi, M. E. and A. W. Peterson. 1973. A method for bridge pier riprap design. Proc. First Canad. Hydraul. Conf.,

- CSCE, Edmonton, AB, PP: 96-106.
15. Raudkivi, A. J. and R. Ettema. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. Hydraul. Eng. ASCE 109(3): 338-350.
 16. Raudkivi, A. J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. CRC Press, The Netherland.
 17. Richardson, E. V. and S. R. Davis, 1995. Evaluating scour at bridges. Hydraulic engineering circular No. 18 (HEC-18) 3rd ed., FHWA-HI-96-031, Federal Highway. Administration, Washington, DC.
 18. Worman, A. 1989. Riprap protection without filter layers. J. Hydraul. Eng. ASCE 115(12): 1615-1630.