

کلیدواژه‌ها: عدد فرود، سنگچین، عدد پایداری، سرریز جامی

## مقدمه

با احداث سدهای بلند در مسیر رودخانه‌ها، سیلاب مازاد بر گنجایش مخزن سد بوسیله سرریزها تخلیه می‌شود. با توجه به اینکه جریان در سرریزها فوق‌بحرانی است، در نتیجه انرژی جنبشی جریان در انتهای سرریز بسیار زیاد است و می‌تواند موجب فرسایش در پایین‌دست سرریز شود. بنابراین یک سرریز نیاز به سازه مستحکم‌کننده انرژی در قسمت انتهایی دارد تا از انرژی مازاد خروجی کاسته و میزان فرسایش و آبشستگی در پایین‌دست سرریز به حداقل برسد. آبشستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از مسائل عمده‌ای است که همواره مورد توجه مهندسين و طراحان بوده است. حفره آبشستگی ایجاد شده در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی موجب افزایش جریان زیر سازه‌ای و در نتیجه پیشرفت حفره آبشستگی به سمت سازه می‌شود که می‌تواند پایداری سد، سرریز و سازه‌های مرتبط را تهدید کرده و حتی منجر به شکست آن‌ها شود. پناهی و همکاران [۱۴]، روش‌های مختلفی برای جلوگیری و کاهش آبشستگی در سازه‌های هیدرولیکی پیشنهاد شده است که می‌توان آن‌ها را به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی کرد. در روش مستقیم مقاومت بستر در مقابل تنش‌های وارده افزایش می‌یابد. این کار با تقویت مصالح موجود به مصالح مقاومت‌تر انجام می‌شود، از روش‌های معمول و اقتصادی استفاده از بلوک‌های بتنی و سنگ‌چین است. در روش غیرمستقیم با اصلاح الگوی جریان در اطراف سازه مورد نظر باعث کاهش نیروی مخرب و کاهش آبشستگی می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از پرتاب‌کننده‌های جامی به دلیل مزایای اقتصادی این سازه در مقایسه با سایر مستحکم‌کننده‌ها مثل حوضچه آرامش بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. باوان و ماچلا [۱، ۸]، پرتاب‌کننده جامی ساده و جامی دندان‌ه‌ای در حالت مستغرق به دلیل شرایط مناسب‌تر استهلاک انرژی بهتر از حالت آزاد یا فیلد عمل می‌کند و آبشستگی کم‌تری را ایجاد می‌کند.

حفاظت بستر بوسیله سنگ‌چین یکی از روش‌های پرکاربرد در مقابل آبشستگی بوده که در صورت وجود مصالح مناسب در نزدیکی محل اجرا علاوه بر اجرا سریع و آسان از نظر اقتصادی نیز مناسب است سحر پناهی و همکاران [۱۴]. پایداری سنگ‌چین در برابر جریان‌های با سرعت زیاد یکی از موضوعات مهم در استفاده از

## بررسی اثر دندانه سرریز جامی در پایداری سنگ‌چین در پایین‌دست سازه

مهدی نیروبخش<sup>۱</sup>، علیرضا مسجدی<sup>۲</sup>، محمد حیدر نژاد<sup>۳</sup> و امین بردبار<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۳

DOI: 10.22034/17.63.51

## چکیده

سرریزها یکی از کم هزینه‌ترین سازه‌های استهلاک انرژی در سدها است که موجب اتلاف انرژی جریان در انتهای سازه می‌شود. از موارد موجود در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی، پدیده آبشستگی است که منجر به آسیب و تخریب سازه‌های هیدرولیکی می‌شود. یکی از روش‌های کنترل آبشستگی در پایین‌دست سرریزها استفاده از سنگ‌چین می‌باشد. در این تحقیق پایداری سنگ‌چین براساس قطر نسبی سنگ‌چین‌ها در پایین‌دست دو سرریز جامی ساده و جامی دندان‌ه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی با چهار قطر متفاوت با چگالی ثابت در پنج دبی در آستانه حرکت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد قطر نسبی سنگ‌چین عامل مؤثری در پایداری سنگ‌چین‌ها بوده و در دو سرریز جامی ساده و جامی دندان‌ه‌ای عدد پایداری در آستانه حرکت، با افزایش قطر نسبی سنگ‌چین‌ها کاهش می‌یابد. در کلیه قطرهای نسبی سنگ‌چین، عدد پایداری در پایین‌دست سرریز جامی دندان‌ه‌ای به علت وجود دندانه در انتهای سازه، حدود ۱۱ درصد بیشتر از سرریز جامی ساده بوده است.

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
- ۲- نویسنده مسئول و استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
- ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
- ۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

drmasjedi.2007@yahoo.com

سنگ چین است. معبودی و همکاران [۱۰] نشان دادند در صورتیکه قطر متوسط ذرات تشکیل دهنده سنگ چین به طور مناسب انتخاب نشود و یا طول آن بسیار کم طراحی شود در مقابل آشفستگی های جریان پایداری خود را از دست داده و عملاً تأثیر ی بر کنترل آبشستگی نخواهد داشت.

در مطالعات مربوط به استفاده از سنگ چین جهت محافظت از سازه های هیدرولیکی، روش های مختلف طراحی سنگ چین، تعیین اندازه متوسط سنگ ها، ضخامت لایه سنگ چین، عمق سنگ چین و نحوه استقرار سنگ چین ها و پایداری لایه های سنگ چین انجام شد. پوزی [۱۸] حرکت اولین دانه های سنگ چین را به عنوان معیار تخریب در نظر گرفت. پارولا [۱۵] از سنگ چین سه لایه ای با لایه میانی رنگین استفاده کرد. وی آستانه تخریب سنگ چین را زمانی می داند که لایه رنگ آمیزی شده پس از ۳۰ دقیقه بدون حرکت نمایان شود. چپو [۲] در تحقیقات خود با در نظر گرفتن مدت زمان ۱۵ دقیقه برای مشاهده گسیختگی سنگ چین در اطراف پایه های پل، ناپایداری لایه سنگ چین را به شرایط گسیختگی کامل آن مرتبط نموده است. در واقع از نظر ایشان حرکت چند سنگدانه از لایه سنگ چین برای تخریب آن کافی نیست.

لوچلان و ملویل [۷] عملکرد لایه سنگ چین را قبل از اینکه عمق حفره آبشستگی در آن به ۲۰ درصد، حداکثر عمق آبشستگی، بدون وجود سنگ چین برسد قابل قبول دانستند. یکی دیگر از متغیرهای طراحی سنگ چین، تعیین ضخامت آن و مشخصات لایه فیلتر است. تمایل خروج ذرات ریز موجود در حفره های بستر زیرین سنگ چین منجر به تخریب آن از نوع غربالی می شود. راه حل جلوگیری از این نوع تخریب، افزایش ضخامت لایه سنگ چین و قرار دادن لایه فیلتر بین ریزدانه و سنگ چین است. ورمین [۲۴] در آزمایش های خود نشان داد که اگر ضخامت لایه سنگ چین کافی باشد نیازی به قرار دادن لایه فیلتر زیرین نخواهد بود. ایشان نتیجه گرفت که عملکرد یک سیستم سنگ چین چند لایه ای با دانه بندی های مختلف، با یک لایه منفرد همگن با ضخامت لایه ای کمتر، یکسان خواهد بود. مسجدی و تأییدی [۹] در خصوص بررسی تأثیر زبری بر پایداری سنگ چین در اطراف پایه استوانه ای پل تحقیق انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که پایداری سنگ چین ها در اطراف پایه استوانه ای به دو عامل عدد فرود در آستانه شکست و قطر نسبی سنگ چین ها وابسته است. همچنین در شرایط یکسان، وجود زبری در پایه استوانه ای در قوس باعث افزایش پایداری سنگ چین ها در اطراف پایه استوانه ای می شود.

یون و همکاران [۲۵] با اصلاح و توسعه روش پارولا روشی دقیق تر و جامع تر را برای طراحی سنگ چین دور پایه ارائه دادند. در این روش اثر واسنج های مختلف در پایداری سنگ چین به صورت ضرایب تصحیح در مورد عدد پایداری اعمال می شود. تحقیقات متعددی در مورد قطر سنگ چین پایدار در پایین دست حوضچه های آرامش صورت گرفته و روابط مختلفی برای تعیین قطر سنگ چین ارائه

شده است که از آن جمله می توان به روابط پیتراکا [۱۶]، پیلارزیک [۱۷]، اسکارامیا و می مرکز تحقیقات والینگفورد [۳]، فرهودی و ولیزادگان [۵] اشاره نمود. سیمارو و همکاران [۲۲] تحقیقاتی در مورد تعیین اندازه سنگ چین به منظور حفاظت از پایه های پل در مقابل فرسایش انجام دادند. در این تحقیق اثر هیدرولیک جریان و همچنین فاصله بین پایه ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد فاصله بین پایه های پل تأثیر کمی بر روی اندازه سنگ چین دارد. کیخائی و همکاران [۶] در خصوص الگوی سنگ چین در محل احداث گروه پایه های پل ها تحقیقی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد مساحت محدوده پوشش سنگ چین در گروه پایه ها برای هر پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است. جواد فرهودی و سادات هلبر [۴] تحقیقی درباره طراحی قطر سنگ چین پایدار در پایاب حوضچه های آرامش با استفاده از عدد فرود جریان انجام دادند ران و همکاران [۲۰] به مطالعه شبیه سازی عددی زاویه جهش در قوس سرریزهای جامی پرداختند. مطالعات نشان داد که درجه انحراف سرعت جریان خروجی در جهت جانبی سرریز با زاویه های مختلف متفاوت است و مجموعه ای از معادلات برای تعیین زاویه پراکندگی ارائه شد. ژوو و همکاران [۲۶] نیز به بررسی تأثیر هیدرولیک زاویه شکل سرریز جامی بر الگوی جریان با صفحه پایین جمع شونده پرداختند. سرریزهای جامی شکل با توجه به شکل هندسی از نظر میزان اتلاف انرژی جنبشی عملکرد متفاوتی دارند. همان طور که در مطالب فوق اشاره شد مطالعات گسترده ای بر روی پدیده آبشستگی و سنگ چین انجام شده است ولی تا کنون مطالعات جامعی در مورد اثر دندان در پرتابه جامی شکل و مثلثی شکل بر روی پدیده آبشستگی در پایین دست این نوع سازه انجام نشده است. در این تحقیق هدف بررسی مطالعه آزمایشگاهی بررسی پایداری سنگ چین در پایین دست دو نوع سرریز جامی شکل ساده و جامی دندانه ای است. بدین منظور از دو مدل آزمایشگاهی سرریز جامی شکل ساده و دندانه ای با ابعاد مشخص طبق استاندارد USBR استفاده شد. همچنین به منظور بررسی پایداری سنگ چین در پایین دست سرریز از سنگ چین با چگالی ثابت و چهار اندازه قطر متوسط برای این تحقیق استفاده شد. در این تحقیق از ۵ دبی استفاده شد.

## مواد و روش ها

استفاده از پوشش سنگ چین در پایین دست سرریزها باعث تقویت بستر و بالا بردن مقاومت آن در برابر تنش برشی ناشی از جریان می شود. یکی از پارامترهای مهم برای بررسی مقاومت سنگ چین در برابر تنش ناشی از جریان، پارامتر بدون بعد عدد پایداری است. برای انجام این آزمایش با در نظر گرفتن جریان دائمی و ثابت بودن خصوصیات سیال رابطه (۱) بین پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در حالت تعادل برقرار است:

$$f_1(y_t, v_t, g, d_{50}, \gamma_1, v_1, \gamma_2, v_2, \gamma, v) \quad (1)$$

که در آن عمق ناپایداری سنگ چین، سرعت جریان در شرایط

ناپایداری،  $g$  شتاب ثقل، قطر متوسط سنگ چین، عمق جریان در بالا دست سرریز سرعت جریان در بالادست سرریز، سرعت جریان در عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز، عمق جریان بر روی شیب باکت سرریز، سرعت جریان بر روی شیب باکت سرریز است. با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه فوق به صورت رابطه (۲) بدون بعد می شود:

$$f1 \left( \frac{V_t^2}{gy_t}, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{\Delta E}{E_1}, \frac{V^2}{gy}, SN_t \right) \quad (2)$$

در رابطه فوق عدد فرود در شرایط ناپایداری سنگ چین، قطر نسبی سنگ چین در شرایط ناپایداری سنگ چین، افت نسبی انرژی در سرریز، عدد فرود سرریز است. از ترکیب دو پارامتر عدد فرود و قطر نسبی سنگ چین با چگالی ثابت در رابط فوق عدد پایداری به صورت رابطه (۳) بدست می آید:

$$SN_t = \frac{V}{\sqrt{g(G_s-1)d_{50}}} \quad (3)$$

به منظور بررسی اثر شکل هندسه دندان در انتهای سرریز جامی بر پایداری سنگ چین در پایین دست آن از مدل آزمایشگاهی استفاده شد. جهت انجام این تحقیق، آزمایش ها در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی از جنس پلاکسی گلاس به طول ۱۲ متر در عرض ۵۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر در آزمایشگاه دانشگاه آزاد اهواز انجام شد. سیستم گردش آب فلوم به صورت مدار بسته بود و آب مورد نیاز از طریق مخزن در کنار فلوم تأمین شد. مدل سرریز جامی شکل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۴۰ سانتی متر، طول ۵۳/۴ سانتی متر، شعاع قوس سرریز ۱۶ سانتی متر با طول آستانه ۵/۸ سانتی متر از جنس پلاکسی گلاس ساخته شد. هم چنین به منظور بررسی اثر دندان در انتهای سرریز طبق استاندارد USBR تعداد ۱۶ دندان با طول ۸ سانتی متر، عرض ۲ سانتی متر، با فاصله ۲/۱ سانتی متر بصورت مثلثی در انتهای سرریز جامی ساده نصب شد. سنگ چین های بکار رفته در این تحقیق از مصالح گرد گوشه با یک چگالی ثابت ۲/۱ با اندازه قطر نسبی ۹/۵۲، ۱۱/۲۳، ۱۲/۷ و ۲۳/۱ میلی متر استفاده شد. برای تعیین مساحت سنگ چین در پایین دست سرریز جامی، آزمایش زمان تعادل بدون قرارگیری سنگ چین در پایین دست سرریز جامی ساده و به منظور بررسی حداکثر ابعاد چاله آبشستگی انجام شد. آزمایش زمان تعادل به مدت ۴ ساعت بر روی سرریز بدون سنگ چین در یک لایه از ماسه به ضخامت تقریبی ۲۰ سانتی متر با دبی حداکثر ۱۵ لیتر بر ثانیه در عمق ۱۲ سانتی متر انجام شد. 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 پایین دست سرریز توسط عمق سنج با دقت میلی متر اندازه گیری شد. در انتهای آزمایش، پس از زهکشی کانال محدوده چاله آبشستگی در پایین دست سرریز برای

انجام آزمایش ها بصورت مستطیلی با طول ۵۰ سانتی متر در عرض ۴۶ سانتی متر بدست آمد که در نتیجه شکل سنگ چین در پایین دست سرریز بصورت مستطیلی انتخاب شد. براساس مطالعات ملویل و همکاران شکل چیدمان سنگ چین در پایین دست سرریز به صورت مستطیلی و هم تراز مصالح بستر در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به معیار ارائه شده توسط ملویل و همکاران [۱۱]، ضخامت لایه سنگ چین دو برابر قطر متوسط سنگ چین انتخاب شد (شکل ۱).

کلیه آزمایش ها در این تحقیق در ۵ دبی ۷، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. دبی مورد نظر توسط سرریز مثلثی ۶۰ درجه در ابتدای ورودی فلوم اندازه گیری شد. در ابتدای هر آزمایش سرریز مورد نظر در فاصله شش متری از ابتدای فلوم نصب و سپس با استفاده از ارابه متحرک، رسوبات بستر کانال تحت شیب ثابت مسطح شد. سپس سنگ چین مورد نظر با ضخامت و هم تراز با مصالح بستر در پایین دست سرریز قرار داده شد. پیش از راه اندازی پمپ، دریچه انتهایی بسته و سپس آب زلال به آرامی به درون کانال هدایت شد تا از ایجاد ریپل 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 راه اندازی شد و به آرامی توسط شیر فلکه اصلی روی لوله ورودی به حوضچه آرامش، دبی به میزان مورد نظر رسانده شد. پس از تنظیم دبی مورد نظر، عمق جریان توسط دریچه در پایین دست به آهستگی کاهش داده شد تا شرایط جریان برای جابجایی کم ذرات سنگ چین به وجود آید. پس از اطمینان از ثابت بودن عمق جریان در طول فلوم نحوه حرکت ذرات سنگ چین به صورت چشمی بررسی شد. در شرایطی که ذرات سنگ چین به آرامی شروع به حرکت کردند، این شرایط را آستانه حرکت گفته و در این لحظه عمق جریان در پایین دست نیز به عنوان عمق آستانه حرکت اندازه گیری شد. در انتهای هر آزمایش، پمپ خاموش و دریچه انتهایی بسته شد و آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شد تا تأثیری بر روی توپوگرافی بستر ایجاد نشود. در کلیه آزمایش ها به منظور اندازه گیری عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز، پس از تنظیم دبی توسط شیر فلکه، در هر دبی عمق و سرعت جریان در یک متر بالادست سرریزها به دلیل این که از تغییر پروفیل سطح آب در بالادست فاصله داشته باشد، اندازه گیری شد، سپس دریچه پایین دست بسته شد تا عمق آب در پایین دست سرریز افزایش یابد. عمق آب پایین دست تا جایی افزایش می یافت که پرش هیدرولیکی بلافاصله پس از محل برخورد جت به کف فلوم تشکیل شود. هدف از ایجاد این پرش اندازه گیری عمق جریان پس از عبور از پرتابه بود. عمق اولیه پرش به دلیل وجود هوای زیاد در جریان لبه پایین دست پرتابه، بطور مستقیم قابل اندازه گیری نبود. استیئر و همکاران [۲۳] برای اندازه گیری عمق اولیه پرش، چون جریان بعد از پرتابه فوق بحرانی است با تشکیل پرش هیدرولیکی بلافاصله پس از اندازه گیری عمق ثانویه پرش، با فرض ثابت بودن

مومتم در دو طرف پرش و صرف نظر از افت‌های اصطکاکی، عمق اولیه پرش از رابطه اعماق مزدوج پرش بدست آمد. پس از این مرحله انرژی دو طرف سرریز با اندازه‌گیری عمق و سرعت از رابطه برنولی محاسبه و تلفات انرژی در پرتابه‌های مختلف محاسبه شد.

### نتایج

در کلیه آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی، عمق جریان در حالت آستانه حرکت در پایین‌دست سرریزها اندازه‌گیری شد. هم‌چنین قطرهای مختلف مورد استفاده برای ذرات سنگ‌چین، مقادیر عدد پایداری در حالت آستانه حرکت در پایین‌دست دو سرریز جامی ساده و جامی دندان‌های محاسبه شد (جدول ۱).

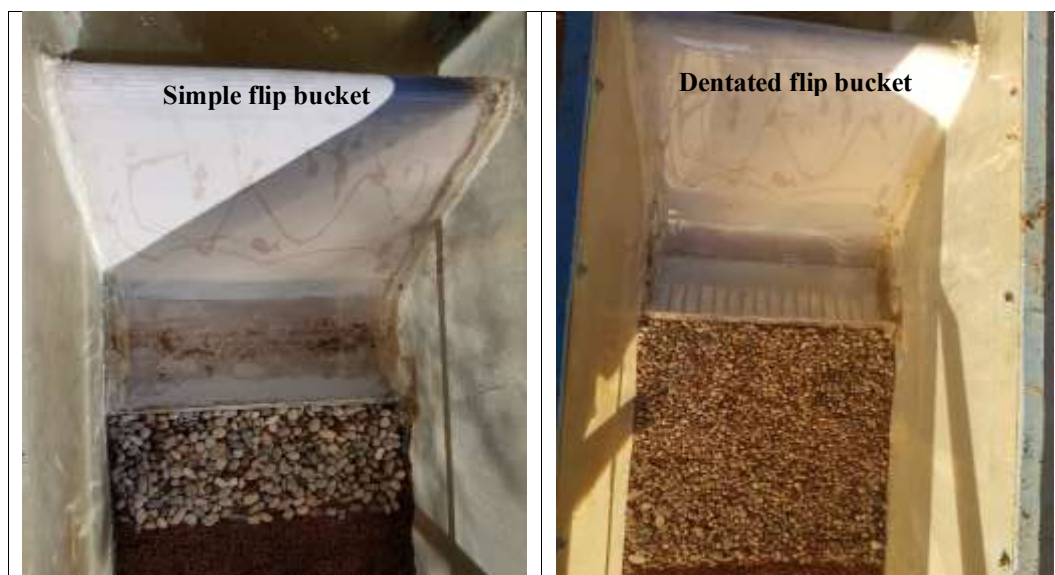
### بررسی پایداری سنگ‌چین براساس عدد فرود ناپایداری در پایین‌دست سرریزها

شکل (۲) نمودار بدون بعد پایداری سنگ‌چین در پایین‌دست سرریز جامی ساده و جامی دندان‌های بر اساس عدد فرود ناپایداری، در پنج دبی ۷، ۸، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه و چهار قطر ۹/۵۲، ۱۱/۲۳، ۱۲/۷ و ۲۳/۱ میلی‌متر نشان داد، عدد فرود ناپایداری در آستانه حرکت عامل مؤثر در پایداری سنگ‌چین‌ها بوده و در یک چگالی ثابت، عدد پایداری در آستانه حرکت در دو سرریز با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود در عمق ناپایداری در آستانه حرکت، افزایش یافته و باعث کاهش پایداری سنگ‌چین‌ها در کلیه قطرهای متوسط سنگ‌چین در هر دو سرریز می‌شود. هم‌چنین مطابق جدول (۱) عدد پایداری در سرریز جامی دندان‌های حدود ۰/۵۶ و عدد پایداری در سرریز جامی ساده حدود ۰/۵۰ محاسبه شد. با توجه به اینکه عدد پایداری وابسته به عمق ناپایداری بوده در کلیه

آزمایش‌ها عمق ناپایداری سنگ‌چین در پایین‌دست سرریز جامی دندان‌های در مقایسه با سرریز جامی ساده، کم‌تر مشاهده شد.

شکل (۳) مقایسه تلفات انرژی در سرریزهای جامی ساده و جامی دندان‌های را براساس عدد فرود نشان داد، با افزایش عدد فرود درصد تلفات انرژی در هر دو سرریز کاهش می‌یابد. هنگامی که شرایط جریان به گونه‌ای است که امکان تشکیل کامل پرش آزاد وجود دارد، پرش کامل در پایین‌دست تشکیل شده و از این رو امکان اتلاف انرژی بیشتری وجود دارد. زیرا در این حالت عمق اولیه پرش توسعه یافته و جریان به صورت توسعه یافته کامل امتداد می‌یابد. حال با افزایش عدد فرود شرایط پرش بصورت کامل به وقوع نپیوسته و باعث ناپایداری آن گشته و از این رو استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مطابق شکل (۳) بیشترین استهلاک انرژی در سرریز جامی دندان‌های و کم‌ترین استهلاک انرژی در سرریز جامی ساده مشاهده می‌شود. سرریز جامی دندان‌های در زمینه هیدرولیکی و اتلاف انرژی عملکرد بهتری نسبت به سرریز جامی ساده دارد و علت اصلی آن هندسه سرریز و وجود دندان در قسمت انتهایی سرریز بوده که باعث شکسته شدن و فشرده کردن بیشتر خطوط جریان و به تبع آن افزایش سرعت در لحظه پرتاب و در نهایت اتلاف نسبی انرژی بیشتری است.

به منظور مقایسه تأثیر تلفات انرژی براساس عدد فرود در تحقیق حاضر با سایر محققین از نتایج تحقیقات استینر و همکاران [۲۳]، امیدواری نیا و جهرمی [۱۳] استفاده شد. مطابق شکل شماره (۴) میزان تلفات انرژی این تحقیق با نتایج محققین پیشین روندی مشابه دارد. **پایداری سنگ‌چین براساس قطر نسبی سنگدانه‌ها در سرریزها** شکل (۵) پایداری سنگ‌چین براساس قطر نسبی سنگ‌چین در پنج دبی در دو سرریز جامی ساده و جامی دندان‌های، در چگالی



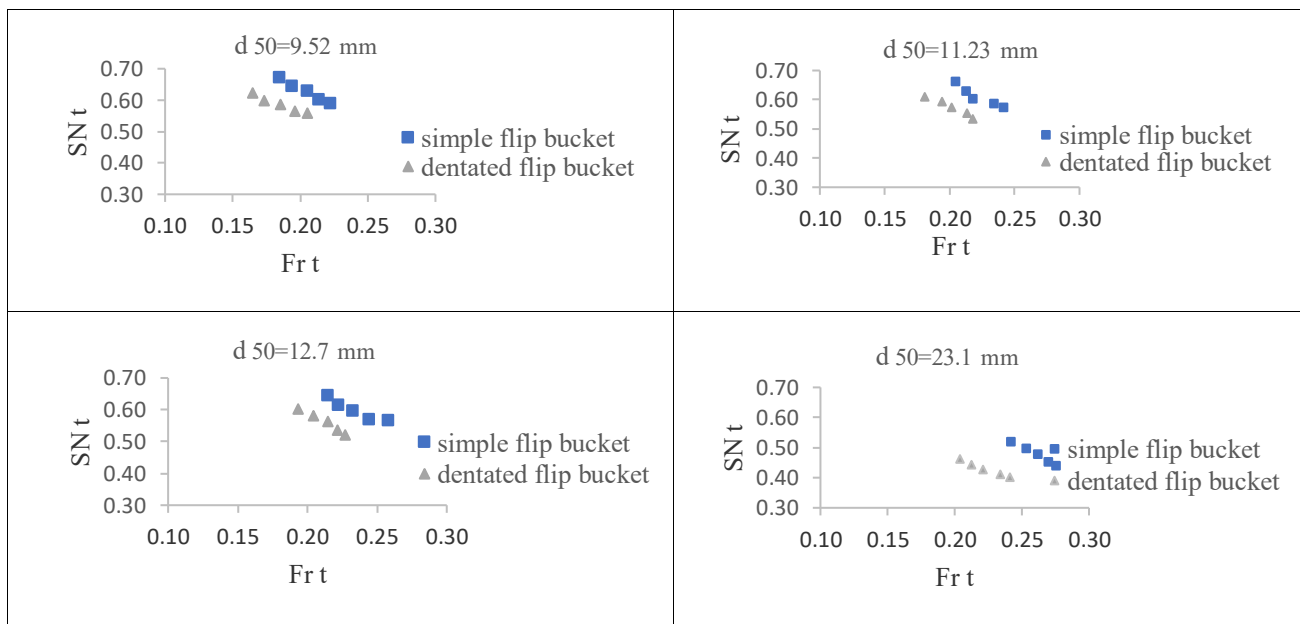
شکل ۱- مشخصات سرریز و سنگ‌چین در پایین‌دست

Fig 1. Characteristics of the flip bucket and riprap in the downstream

جدول ۱ - نتایج حاصل از آزمایش آستانه حرکت سنگ چین

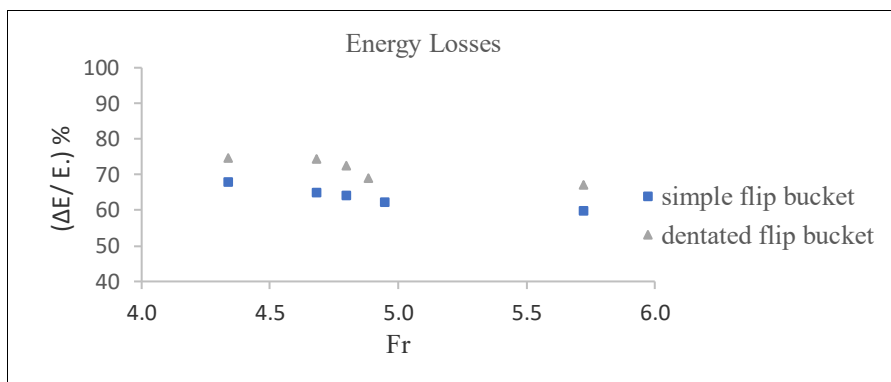
Table 1 - The results of the riprap movement threshold test

سرریز جامی ساده The Flip Buckets without dentated					سرریز جامی دندانه‌ای The Flip Buckets with dentated				
D50 (mm)	Q (l/s)	Fr t	D50/Yt	SN t	D50 (mm)	Q (l/s)	Fr t	D50/Yt	SN t
23.1	0.007	0.28	0.36	0.38	23.1	0.007	0.24	0.33	0.42
12.7	0.007	0.26	0.19	0.5	12.7	0.007	0.23	0.17	0.55
11.23	0.007	0.24	0.16	0.52	11.23	0.007	0.22	0.15	0.57
9.52	0.007	0.22	0.13	0.53	9.52	0.007	0.21	0.12	0.58
23.1	0.008	0.27	0.33	0.39	23.1	0.008	0.23	0.3	0.43
12.7	0.008	0.24	0.17	0.51	12.7	0.008	0.22	0.16	0.56
11.23	0.008	0.23	0.14	0.53	11.23	0.008	0.21	0.14	0.58
9.52	0.008	0.21	0.11	0.54	9.52	0.008	0.2	0.11	0.59
23.1	0.01	0.26	0.28	0.41	23.1	0.01	0.22	0.25	0.46
12.7	0.01	0.23	0.14	0.53	12.7	0.01	0.21	0.13	0.58
11.23	0.01	0.22	0.12	0.55	11.23	0.01	0.2	0.11	0.59
9.52	0.01	0.2	0.1	0.56	9.52	0.01	0.19	0.09	0.61
23.1	0.012	0.25	0.24	0.43	23.1	0.012	0.21	0.21	0.47
12.7	0.012	0.22	0.12	0.56	12.7	0.012	0.2	0.11	0.6
11.23	0.012	0.21	0.1	0.57	11.23	0.012	0.19	0.1	0.62
9.52	0.012	0.19	0.08	0.58	9.52	0.012	0.17	0.08	0.63
23.1	0.015	0.24	0.2	0.45	23.1	0.015	0.2	0.18	0.49
12.7	0.015	0.21	0.1	0.57	12.7	0.015	0.19	0.09	0.63
11.23	0.015	0.2	0.09	0.59	11.23	0.015	0.18	0.08	0.64
9.52	0.015	0.18	0.07	0.61	9.52	0.015	0.16	0.06	0.65



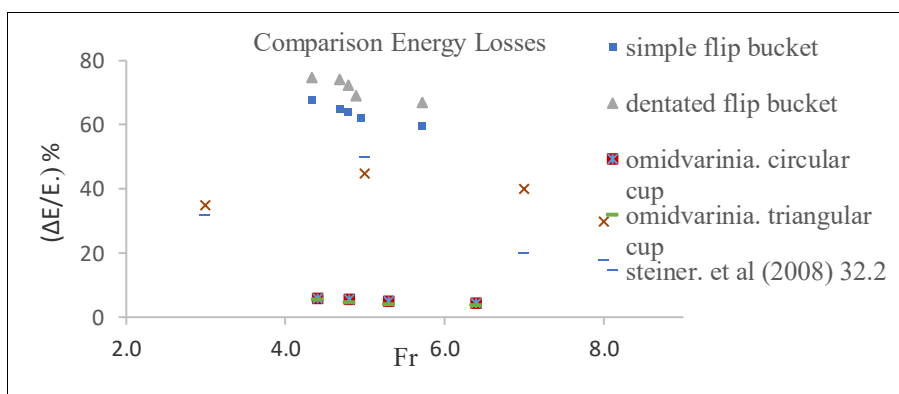
شکل ۲- بررسی پایداری سنگ چین براساس عدد فرود ناپایداری در پایین دست سرریز

Fig 2. Investigating the stability of riprap based on Froude Number of instability in the downstream of the flip buckets



شکل ۳- تلفات نسبی انرژی

Fig 3. Energy losses



شکل ۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق استیز و همکاران

Fig 4. Comparing the results with other studies in Steiner et al.

حرکت بستگی دارد و با افزایش عدد فرود، قطر نسبی سنگدانه‌ها در دو سرریز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در دبی ثابت، افزایش عدد فرود باعث افزایش سرعت برشی جریان و ناپایداری سنگ‌چین‌ها می‌شود.

به منظور تخمین اندازه قطر نسبی سنگ‌چین‌ها در پایین‌دست سرریزها با استفاده از نرم افزار SPSS رابطه بین عدد فرود در آستانه حرکت و قطر نسبی سنگدانه‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی بین ماکزیمم قطر نسبی سنگدانه، چگالی سنگدانه و عدد فرود ناپایداری ایجاد شد. از نتایج حاصل از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی معادله (۴) برای آستانه حرکت استخراج شد.

$$\frac{d_{50}}{y_t} = \frac{a}{(G_s - 1)^b} Fr_t^c \quad (4)$$

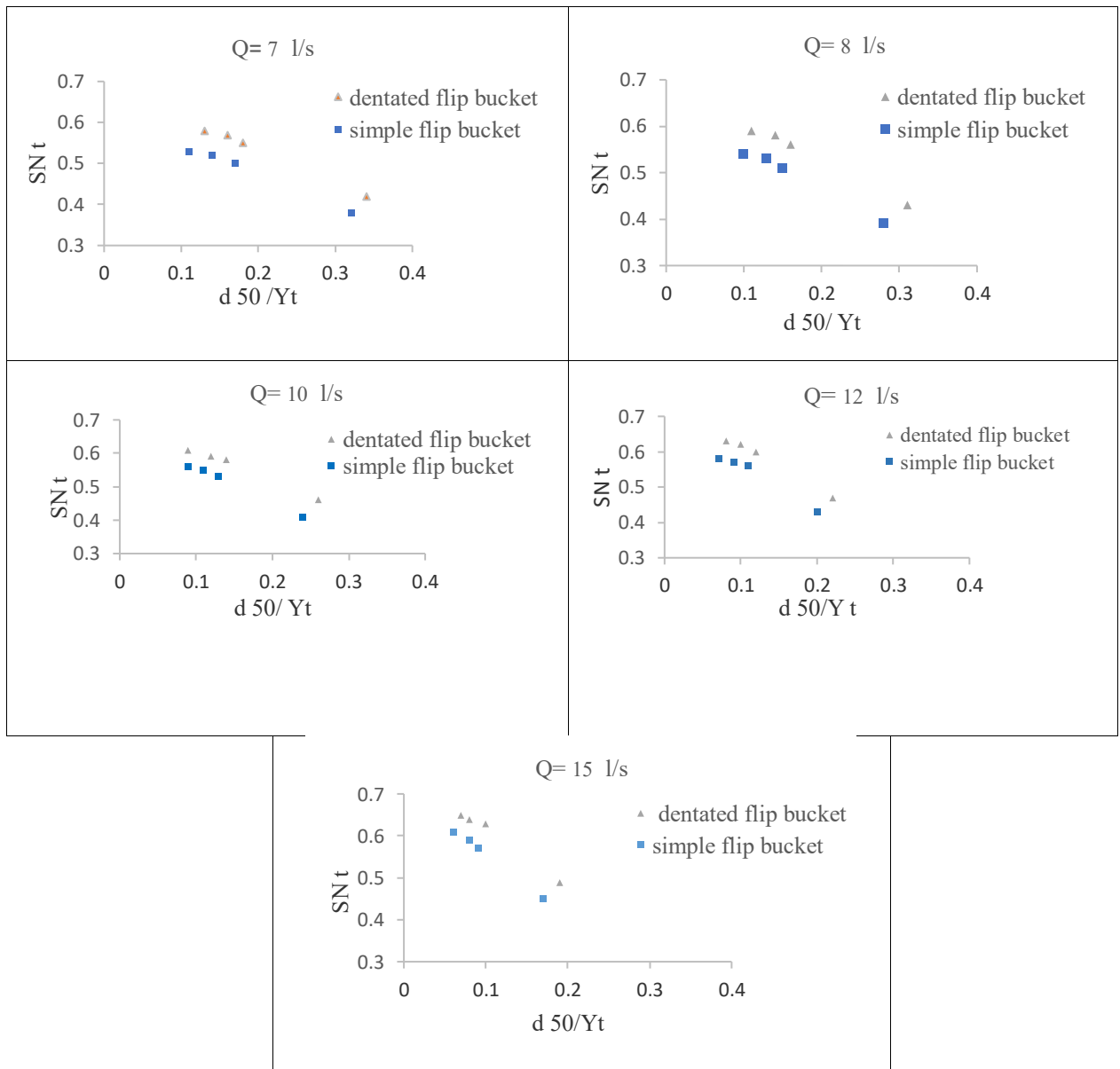
متغیرهای  $a, b, c$  مقادیر تجربی بوده که براساس روش کم‌ترین مربعات محاسبه شد. با وارد کردن داده‌های آزمایشگاهی به نرم‌افزار SPSS و ایجاد رابطه‌ای معنادار بین پارامترهای بدون بعد ضرایب رابطه (۴) برای دو سرریز محاسبه شد که نتایج در جدول (۲) ارائه شد. سپس مدل با ۷۰ درصد داده‌ها ساخته شد و با ۳۰ درصد آن‌ها صحت‌سنجی انجام گرفت. آنالیز آماری مربوط به ارزیابی معادله ارائه شده با ۳۰ درصد داده‌های که در توسعه این مدل‌ها استفاده نشده بودند در جدول (۲) آمده است.

ثابت در حالت آستانه حرکت نشان داد، قطر نسبی سنگ‌چین‌ها نیز عامل مؤثر در پایداری سنگ‌چین‌ها بوده و عدد پایداری در آستانه حرکت در دو سرریز با افزایش قطر نسبی سنگدانه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش اندازه سنگدانه‌ها، اثر درگیری آن‌ها نسبت به هم کاسته شده و در نتیجه پایداری آن‌ها کاهش می‌یابد. هم‌چنین در کلیه قطرهای نسبی سنگدانه، عدد پایداری در سرریز جامی دندان‌های به مراتب بیشتر از سرریز جامی ساده مشاهده شد. سرریز جامی دندان‌های دارای استهلاك انرژی بالایی نسبت به سرریز جامی ساده داشته و باعث تشکیل عمق ناپایداری کم‌تر و پایداری بیشتر در سنگ‌چین پایین‌دست ایجاد می‌شود.

به منظور مقایسه تأثیر قطر نسبی سنگدانه‌ها بر پایداری سنگ‌چین در تحقیق حاضر با سایر محققین، از نتایج تحقیقات امیدواری نیا و جهرمی [۱۳]، مسجدی و تاییدی [۹]، یون و همکاران [۲۵]، کوزی و پترسون [۱۹] استفاده شد. با توجه به شکل (۶) عدد پایداری اندازه‌گیری شده برای قطرهای نسبی مختلف این تحقیق با نتایج سایر محققین دیگر همسو است.

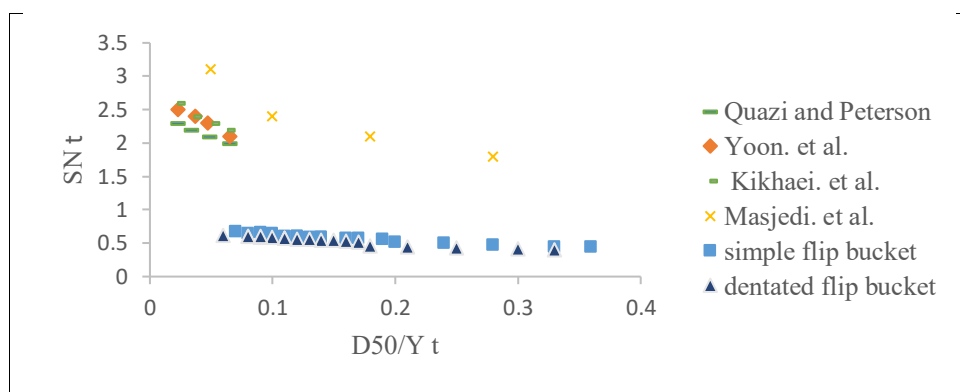
#### بررسی تأثیر عدد فرود بر قطر نسبی سنگدانه

شکل (۷) تأثیر عدد فرود در آستانه حرکت در قطر نسبی سنگدانه در پنج دبی با چگالی ثابت در سرریز را نشان می‌دهد. نتایج نمودارها نشان داد، عملکرد قطر نسبی سنگدانه‌ها به عدد فرود در حالت آستانه



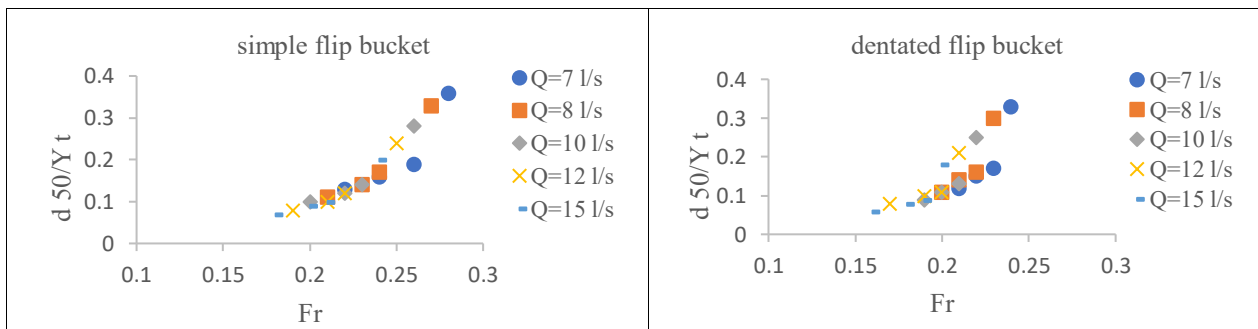
شکل ۵- بررسی پایداری سنگ‌چین براساس قطر نسبی

Fig 5. Investigating the stability of riprap based on the relative diameter



شکل ۶- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققین

Fig 6. Comparing the results with other researchers



شکل ۷- تأثیر قطر نسبی سنگ چین بر اساس عدد فرود

Fig 7. The effect of the relative diameter of the riprap based on the Froude Number

جدول ۲- برآورد پارامترهای رابطه ۴ در سرریزهای جامی ساده و جامی دندانه‌ای

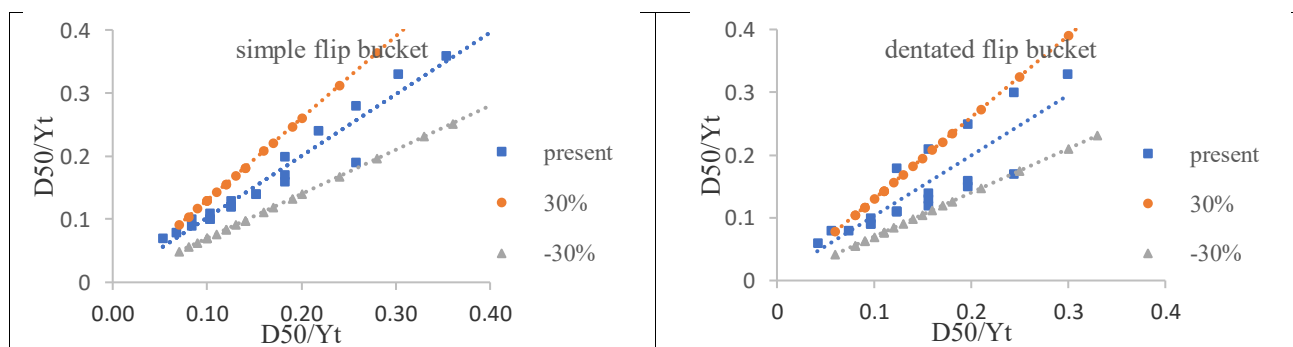
Table 2. Estimating the parameters of Eq. 4 in the flip buckets without dentated and the flip buckets with dentated

پارامتر parameter	تخمینی Estimate	خطای استاندارد St. Error	حداقل Min	حداکثر Max	
A	1.671	1.47E+07	-3.11E+07	3.11E+07	جامی ساده
B	-41.029	5.84E+07	-1.23E+08	1.23E+08	The flip buckets without dentated
C	4.292	0.293	-4.911	-3.673	
A	1.446	3.45E+07	-7.28E+07	7.28E+07	جامی دندانه‌ای
B	-56.518	9.36E+07	-1.98E+08	1.98E+08	The flip buckets with dentated
C	4.878	0.773	3.248	6.508	

جدول ۳- آنالیز آماری رابطه‌های پیشنهادی برای تخمین قطر نسبی سنگدانه‌ها

Table 3. The statistical analysis of the relations proposed for estimating

% Error	R <sup>2</sup>	RMSE	Relation	
0.214	0.872	0.0316	1	جامی ساده The flip buckets without dentated
0.173	0.564	0.0447	1	جامی دندانه‌ای The flip buckets with dentated



شکل ۸- همبستگی میان مقادیر قطر نسبی سنگدانه‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده

Fig 8. Correlation between the relative diameter values of the measured and the calculated values



Table 4. Comparison of the results of the present research with the results of other researchers

تحقیق ارائه شده Research presented	RMSE آستانه حرکت Movement threshold
تحقیق حاضر جامی شکل The current study is flip buckets without dentated	0.032
تحقیق حاضر جامی دندانه‌ای The current study is flip buckets with dentated	0.045
ناصریان و مسجدی (۱۳۹۶) Naserian and Masjedi (2016)	0.034
منصوری-شفاعی بجهستانی (۱۳۹۰) Mansoiri-Shafe Bejestani (2018)	0.008
سازمان حمل و نقل و ترافیک نیوزلند (۱۹۹۴) New Zealand transport and traffic authority (1994)	0.017
سایمون و لويس (۱۹۷۱) Simon and Lois (19710)	0.033
پاگان- ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای) Pagan-Ortiz (1991) (Support with circular tip wall)	0.046
پاگان- ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره عمودی) Pagan-Ortiz (1991) (Support with vertical wall)	0.07

پایداری سنگ‌چین‌ها بوده و عدد پایداری در آستانه حرکت در دو سرریز با افزایش قطر نسبی سنگدانه کاهش می‌یابد. عملکرد قطر نسبی سنگدانه‌ها به عدد فرود در حالت آستانه حرکت بستگی دارد و با افزایش عدد فرود، قطر نسبی سنگدانه‌ها در دو سرریز افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر در دبی ثابت افزایش عدد فرود باعث افزایش سرعت برشی جریان و ناپایداری سنگ‌چین‌ها می‌شود. همچنین رابطه‌ای جهت تخمین قطر نسبی سنگ‌چین ارائه شد که ضریب همبستگی نتایج حاصل از این معادله با نتایج آزمایشگاهی برای سرریز جامی ساده حدود ۰/۹ و سرریز جامی دندانه‌ای حدود ۰/۶ است.

#### منابع

- Bhavan, M and Shahzafar marge B (2010) Bureau of Indian Standards. Central for Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators. Second Revision. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- Chiew, YM. 1995. Mechanics of riprap failure, J Hydr Eng ASCE 121(9), 635-643.
- Escaramaia, M. and May, RWP. 1992. Channel protection downstream of structures. HR Wallingford Report SR 313
- Farhoudi, J. and Sadast H, SM. 2009. Design of Stable Riprap Downstream of Stilling Basins Using Froud Number. J soil and

به منظور همبستگی میان مقادیر قطر نسبی سنگدانه‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده در رابطه (۴)، نمودار شکل (۸) برای ۳۰ درصد باقی مانده داده‌ها، نشان داده شد و دو خط چین +۳۰ و -۳۰ درصد معرف انحراف نسبی نسبت به خط ۴۵ درجه بوده است. نتایج آماری تحقیق حاضر در شرایط آستانه حرکت (RMSE) و مقایسه مجموع خطاها با نتایج سایر محققین در جدول (۴) داده شده است ناصریان و مسجدی [۱۲]. مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج ارائه شده توسط محققین پیشین نشان داد که نتایج بدست آمده به دلیل درصد خطای کم‌تر، مطابقت بسیار خوبی با نتایج بدست آمده در این تحقیق داشت و می‌توان با در نظر گرفتن ضریب تصحیح برای معادله (۴) استفاده شود.

#### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها به منظور بررسی پایداری سنگ‌چین در پایین‌دست دو سرریز جامی ساده و جامی دندانه‌ای در پنج دبی ۷، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر ثانیه با چهار قطر نسبی ۹/۵۲، ۱۱/۲۳، ۱۲/۷ و ۲۳/۱ میلی‌متر در آستانه حرکت مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مؤثر در این تحقیق دبی و قطر نسبی سنگ‌چین‌ها بود. نتایج این تحقیق نشان داد وجود دندانه در انتهای سرریز مثالی باعث افزایش پایداری سنگ‌چین در پایین‌دست سرریز در حدود ۱۱ درصد می‌شود. هم‌چنین قطر نسبی سنگ‌چین‌ها نیز عامل مؤثر در

15. Parola, AC. 1993. Stability of riprap at bridge piers, J Hydr Eng ASCE 119(10), 1080-1093.
16. Peterka, AJ. 1968. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators engineering monograph No. 25. USBR. USA.
17. Pilarczyk, KW. 1990. Stabiuty criteriisi for revetments, proc. of 1990 National Conf. on Hydraulics Eng, Am Soc Civ Eng. (eds.) HH Chang and JC Hill, San Diego, USA. 15-26.
18. Posey, CJ. 1974. Tests of scour protection for bridge piers, J Hydr Div ASCE 100(12), 17731783.
19. Quazi, M. E. and Peterson, A.W. 1973. A method for bridge pier riprap design. Pro. First Can. Hydraul. Conf., CSCE, Edmonton, AB, pp: 96-106.
20. Ran, Y.B. Liu, C. Deng, J. Wei, W.R. and Long, Q. 2023. Numerical simulation study on spread angle in oblique cut flip bucket. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 17(1): 2236673.
21. Raudkivi, A.J. 1998. Loose boundary hydraulics. AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
22. Simarro, G. Chreties, Ch. and Teixeira, L. 2011. Riprap sizing for pile group. Journal of Hydraulic Engineering, 137(12), 1676-1679.
23. Steiner, R. Heler, V. Hager, W.H. and Minor, H.E. 2008. Deflector Ski Jump Hydraulics, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134. No.5. pp. 571-562.
24. Worman, A. 1989. Riprap protection without filter layers, J Hydr Eng ASCE 115(12), 1615- 1630.
25. Yoon, T. H. Yoon, S. B. and Yoon, K. S. 1995. Design of riprap for scour protection around bridge piers. 26th IAHR Congress, UK, 1: 105-110.
26. Zhou, M., Zhang, J. Xu, W. & Li, X. (2022). Hydraulics of Wedge-shaped Flip Bucket to Investigate Flow Pattern with Retracted Bottom Plate. KSCE Journal of Civil Engineering, 26(11), 4552-4562.
- water Vol (19) No1
5. Farhoudi, J. and Valizadegan, E. 2004. Bed protection criterion downstream of stilling basins. ISRS. Yichang. China.
6. Kikhaei, M. Hyderpour, M. and Mousavi, S.F. .2009. investigation of riprap covering pattern in the place of construction of cylindrical foundations in bridges, Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 13(49): 13-29. (In Persian)
7. Lauchlan, CS. Melville, BW. 2001. Riprap protection at bridge piers, ASCE J Hydr Eng 127: 5.30-38.
8. Magela Pereira, G. (2020). Spillway Design - Step by Step (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367816902>.
9. Masjidi, A. and Taeidi, A. 2017. Investigating the effect of roughness on the stability of stone slabs around the cylindrical foundation of the bridge in the river arch, Journal of Water Engineering/Year 10/Spring 10(32), 1-12. (In Persian).
10. Mehboodi, A. and Attari, J. and Majdzadeh Tabatabai, M.R., 2010, Laboratory study of scouring control caused by submerged horizontal jet using rock picker, 5th National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Iran.
11. Melville, B.W. Van Ballegoov, S. Coleman, S.E. and Barkdoll, B. 2007. Riprap size selectin at wing-wall abutments. ASCE.J. Hydraul. Eng. 133(11): 1265-1269.
12. Naserian, M. and Masjidi, A. (2018). Investigating the size of the stone diameter around the bridge support in the 180-degree arc of the river. Journal of Water and Soil Sciences, 21(4), 229-241. (In Persian).
13. Omidvarinia, M. and Mousavi Jahromi, S.H., 2014. Comparison of energy losses in circular and triangular cup launchers. Scientific Journal of Agriculture, Volume 37, Number 1, Spring. 133-142. (In Persian).
14. Panahi, S. and Farsadzadeh, D. and Hosseinzadeh Delir, A. and Karimi, J., 2011, Effect of flow characteristics on downstream scour of a submerged cup-launching structure, 6th National Civil Engineering Congress, Semnan, Iran.

## Investigating the Effect of the Flip Buckets with Dentated for Stability of Riprap at Downstream of the Structure

M. Niroubakhsh<sup>1</sup>, A.R Masjedi<sup>2</sup>, M. Haidarnejad<sup>3</sup> and A. Bordbar<sup>4</sup>

Received: 24.11.2022

Accepted: 27.08.2023

### Abstract

Spillway is among the most economical energy dissipating structures used in dams to dissipate flow at the end of the structure. Scouring is a phenomenon that occurs next to the hydraulic structures, leading to their deterioration and even collapse. One of the methods to control scouring downstream of a dam is using riprap. In this study, the stability of riprap based on relative particle diameter (RPD) downstream of spillways of two different categories of energy dissipators: simple and dentated flip bucket was investigated. The experiments were performed in a rectangular test flume. Ripraps of the same density and of four different diameters were investigated at five discharges at the movement threshold. Results suggested that the RPD was an important factor in stability of the riprap. Besides, in both of the examined spillways, the stability number at the movement threshold was found to decrease with increase in the RPD. For all of the RPDs studied, the stability number downstream of the dentated flip bucket was found to be 11 percent greater than that of the simple flip bucket, which may be ascribed to the presence of dentate in the former. Likewise, dentated flip bucket offered a higher level of energy dissipation.

**Keywords:** *Froud number, Riprap, Stability number, Flip bucket.*

- 
1. Phd Student, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
  2. Corresponding Author and Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. drmasjedi.2007@yahoo.com
  3. Associate Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
  4. Assistance Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.