

## تأثیر شیب کف حوضچه آرامش بر آبشستگی بستر در پایین دست سرریز پلکانی

الناز اقلیدی<sup>۱\*</sup>، غلامعباس بارانی<sup>۲</sup> و کورش قادری<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی؛ استاد بخش مهندسی عمران؛ و استادیار بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۱۳

### چکیده

سرریز پلکانی و حوضچه آرامش از مهم‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی محسوب می‌شوند. با این‌که بخش قابل توجهی از انرژی جریان با این دو سازه مستهلک می‌شود انرژی باقی‌مانده در جریان ورودی به پاشنه سرریز، قادر به تخریب احتمالی آن خواهد بود. در این پژوهش تأثیر شیب حوضچه آرامش بر آبشستگی پایین دست در حضور سرریز پلکانی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان با شش دبی مختلف و پنج شیب کف حوضچه آرامش اجرا شد. پارامترهای مختلف از جمله حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ )، سرعت جریان، عمق آب در سراب و پایاب، عمق آب در انتهای حوضچه آرامش، فاصله وقوع حداکثر عمق آبشستگی و منطقه توسعه حفره آبشستگی تا حوضچه آرامش به ترتیب ( $L_t$  و  $L_s$ )، اندازه‌گیری شد. با مقایسه نتایج به دست آمده با آزمایش شاهد در حالت حوضچه آرامش با شیب کف ۰/۲ و ۰/۲-، متوسط عمق آبشستگی نسبی به ترتیب ۴۷ درصد افزایش و ۵۲/۲ درصد کاهش یافته است. فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی و فاصله انتهایی منطقه توسعه حفره آبشستگی با افزایش عدد فرود ذره افزایش و با افزایش شیب کف حوضچه آرامش این مقادیر افزایش و با کاهش شیب کف حوضچه آرامش کاهش یافتند.

### واژگان کلیدی

حداکثر عمق آبشستگی، حفره آبشستگی، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی

### مقدمه

غیره می‌تواند در توسعه حفره آبشستگی ایجاد شده در پایین دست مؤثر باشند به همین دلیل در پایین دست سرریزهای پلکانی حوضچه آرامش را با طول کمتری احداث می‌کنند. هنگامی که جریان از روی این سازه‌ها عبور می‌کند، بخشی از انرژی جریان بر اثر پله‌های سرریز مستهلک و بخشی دیگر بر اثر جهش هیدرولیکی ایجاد شده روی حوضچه آرامش و تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی تلف می‌شود. به رغم شرایط فوق، هنوز انرژی باقیمانده در جریان قادر به ایجاد حفره آبشستگی در پایین دست سازه خواهد بود (Dey & Sarkar, 2007).

در سرریز پلکانی، پله‌ها همانند المان مخرب باعث

آبشستگی پدیده‌ای است که به دلیل وجود انرژی جنبشی جریان در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به وجود می‌آید (Shafaei-Bejestan, 2006). سرریزهای پلکانی یکی از سازه‌های هیدرولیکی مستهلک‌کننده انرژی هستند که به دلیل فناوری پیشرفته در ساخت سدهای بتن غلتکی (RCC)، پایین بودن نسبی هزینه‌ها، ساخت سریع و بالا بودن استهلاک انرژی در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان طراح و محققان بوده و تحقیقات گسترده‌ای نیز روی آنها شده است (Chanson, 1995, 2001 and 2002). در سرریزهای پلکانی تنوع جریان، پله‌ها، زاویه شوت و

(al., 2014) با بررسی اثر دانه‌بندی ذرات رسوب بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی نشان دادند که در شرایط هیدرولیکی مشابه، هر چه  $D_{50}$  بیشتر شود میزان آبشستگی کمتر و فاصله آن از انتهای سرریز کاهش می‌یابد و عرض گودال آبشستگی کمتر می‌شود. امین‌پور و همکاران (Aminpour et al., 2014a) تشابه بین نیمرخ‌های آبشستگی موضعی را در پایین‌دست سرریز پلکانی بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از برداشت عرضی نیمرخ آبشستگی نشان داد که مقدار آبشستگی در نزدیکی جداره‌ها بیشتر است و در میانه عرضی بستر کمترین مقدار را دارد. امین‌پور و همکاران (Aminpour et al., 2014b) تشابه بین نیمرخ‌های حفره آبشستگی را در پایین‌دست سرریزهای پلکانی بررسی کردند. رابطه ابعاد حفره آبشستگی را به‌صورت تابعی از شیب سرریز پلکانی، طول نسبی حوضچه آرامش و عدد فرود ذره ارائه دادند که با افزایش طول حوضچه آرامش، ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد.

آبشستگی در طراحی انواع مختلف سازه‌های هیدرولیکی اهمیت دارد. هر ساله هزینه‌های سنگینی برای جلوگیری از خرابی‌های ناشی از آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های آبی صرف می‌شود. از این‌رو آبشستگی در سازه‌ها بسیار بااهمیت است و پیش‌بینی آن قبل از ساخت سازه ضروری است. گسترش این پدیده می‌تواند عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار دهد و پایداری آن را به خطر اندازد. هنگام وقوع سیلاب، به‌دلیل بالا بودن انرژی جنبشی، چنانچه برداشت مواد بستری به اندازه‌ای شدت یابد که پی سازه ظاهر گردد، می‌تواند سبب تخریب سازه شود. برای جلوگیری از خراب شدن سازه دو راهکار وجود دارد. یکی اینکه پی سازه چنان عمیق ساخت شود که بزرگ‌ترین سیلاب‌ها نیز نتواند حفره آبشستگی را به کف برساند که این امر مستلزم اطلاعات دقیق از روند توسعه حفره با شرایط جریان و مشخصات ذره رسوبی است. دیگر اینکه با

آشفته‌گی جریان می‌شوند؛ در این حالت، یک لایه مرزی به‌صورت گردباد ایجاد می‌شود و تا زمان تماس با سطح آب، توسعه می‌یابد، هوا به درون آن نفوذ می‌کند و باعث کاهش انرژی می‌شود (Zhang & Chanson, 2015; Barani & et al., 2016a; 2016b). بارانی و همکاران (2005) با بررسی اتلاف انرژی روی سرریز پلکانی با شکل‌های مختلف پله نشان دادند که استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با انتهای پایه‌دار و شیب معکوس بیشتر است تا در نوع صاف آن و با افزایش ضخامت پایه انتهایی یا اندازه شیب پله، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

فرهودی و اسمیت (Farhoudi & Smith, 1985) در تحقیقات خود گزارش داده‌اند که اگر نیمرخ‌های آبشستگی به‌صورت مناسب بی‌بعد شوند، شکل حفره از نظر هندسه مشابه و مستقل از زمان و اندازه ذرات رسوبی خواهد بود. تونا و امیراگلو (Tuna & Emiroglu, 2011a; b) پروفیل‌های آبشستگی در پایاب سرریزهای پلکانی را برای سه نوع رژیم جریان مختلف بررسی کردند و نشان دادند نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی در بیشینه عمق آبشستگی بسیار مهم است. بدین ترتیب که در رژیم جریان ریزشی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به رژیم جریان غیر ریزشی کمتر است. این محققان به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد فرود جریان باعث افزایش عمق آبشستگی خواهد شد. همچنین، بر اساس پروفیل‌های عرضی برداشت شده، الگوی آبشستگی متقارن نیست و بیشینه عمق آبشستگی در چپ و راست خط طولی مرکزی اتفاق می‌افتد.

تونا و امیراگلو (Tuna & Emiroglu, 2013) تأثیر هندسه پله‌ها را بر آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی بررسی کردند و نشان دادند عمق آبشستگی به هندسه پله‌ها، اندازه ذرات رسوب، دبی جریان، زاویه شوت و عمق آب پایین‌دست بستگی دارد و با افزایش ارتفاع پله عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. رفیعی و همکاران (Rafiei et

پلکانی سد ژاوه و حوضچه آرامش متصل به آن اجرا شد که با مقیاس ۱ به ۴۰ (Novak & Cabelka, 1981) ساخته شده است (شکل ۱). دبی‌های در نظر گرفته شده در پژوهش نیز دبی‌های سیلاب در سد ژاوه است که به مقیاس برده شده و در واحد عرض محاسبه شده است. آزمایش‌ها برای دبی‌های ۵، ۷، ۱۳، ۱۷، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه در واحد عرض و ۵ شیب مختلف (۰/۰۲، ۰/۰۱، صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲-) برای کف حوضچه آرامش اجرا شد. سرریز شامل یک سرریز اوجی آزاد و یک تنداب پلکانی که دارای ۶۱ پله به عرض ۲/۵، ارتفاع ۳ و طول ۴۰ سانتی‌متر طراحی و ساخته، مدل حوضچه آرامش با عرض ۴۰ و طول ۱۳۳ سانتی‌متر با آستانه انتهایی به ارتفاع ۹ سانتی‌متر در انتهای پایین دست حوضچه آرامش تعبیه شد و در سرانجام، یک فلوم به عرض ۰/۵ و طول ۳ متر به حوضچه آرامش متصل گردید که متناسب با ابعاد مدل و محیط آزمایشگاه ساخته شده بود. برای آب‌بندی چسب آکواریوم استفاده شد. در پایین دست حوضچه آرامش یک لایه رسوب به ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر با قطر متوسط ذرات (D<sub>50</sub>) ۱/۵۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و سطح آن با ماله بنایی و تراز کاملاً صاف گردید. منحنی دانه‌بندی رسوبات در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از یک آزمایش بلندمدت ۲۴ ساعته مدت زمان به تعادل رسیدن عمق آبشستگی تعیین و برای تمام آزمایش‌ها ۳ ساعت در نظر گرفته شد. همچنین آزمایش‌ها با شیب کف صفر به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد و تغییرات نسبت به آن بررسی شده‌اند.

ایجاد تغییراتی روی سرریز و یا حوضچه آرامش بتوان استهلاک انرژی را بالا برد که نتیجه آن کاهش عمق حفرة آبشستگی در پایین دست سازه است. بخش عمده تحقیقات پیشین مربوط به ارزیابی هیدرولیکی است و توجه کمتری به آبشستگی پایین دست این سازه شده است، در این پژوهش بر سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی تأکید شده است که تا چه حدی باعث کاهش آبشستگی پایین دست می‌شوند.

تا کنون تحقیقات زیادی روی هوادهی، جریان‌های دو فازی و استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی شده اما روی آبشستگی پایین دست این سرریز مطالعات اندک است در حالی که آبشستگی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مخرب به‌شمار می‌آید. کمبود مراجع و مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه احساس می‌شود و اگر پیش‌بینی لازم نیز صورت نگیرد افزایش آبشستگی می‌تواند پایداری سازه هیدرولیکی را به مخاطره اندازد و اگر شدت آن زیاد باشد سبب تخریب آن شود. در پژوهش حاضر سرریز پلکانی و حوضچه آرامش ارزیابی شده‌اند و طی مطالعات انجام گرفته شده و بررسی سایر پژوهش‌ها، در این مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تغییرات شیب کف حوضچه آرامش بر حفرة آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

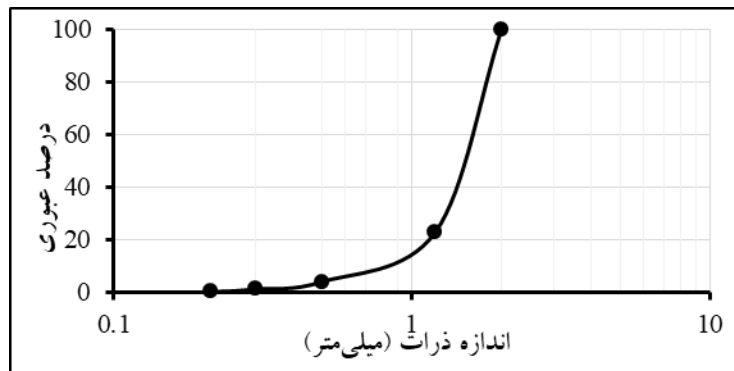
این پژوهش در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان روی مدل فیزیکی سرریز



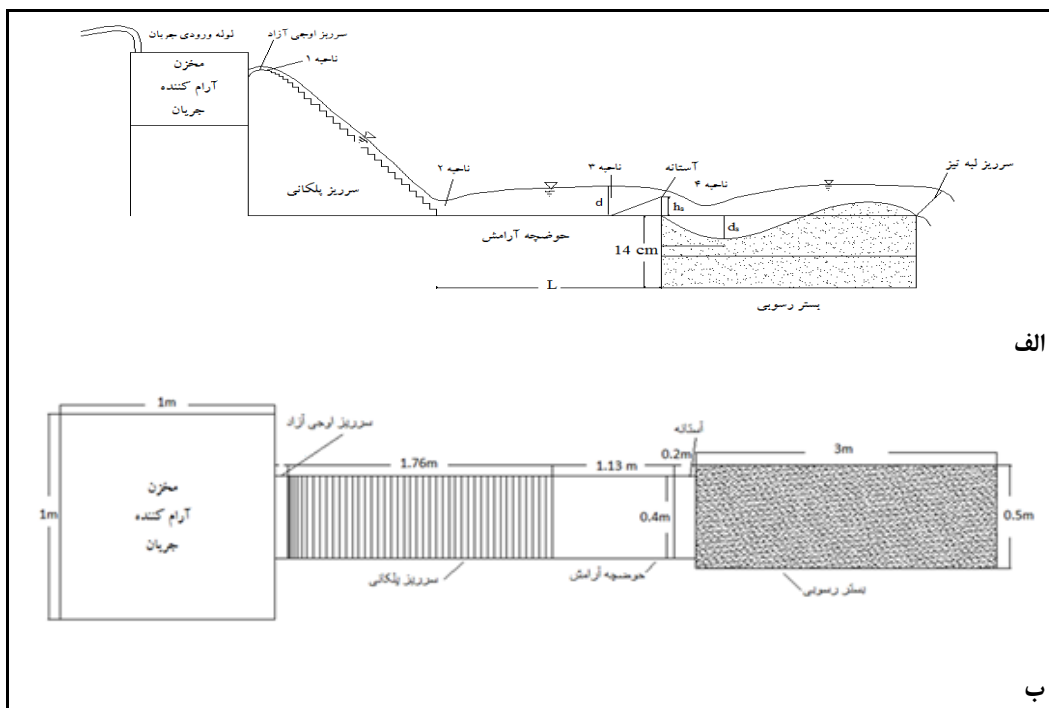
شکل ۱- نمایی از سازه‌های ساخته شده

فاصله‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. در انتهای هر آزمایش جریان آب قطع و توپوگرافی و پارامترهای هندسی حفرة آبستگي برداشت شد. در انتهای هر آزمایش پارامترهایی مانند حداکثر عمق آبستگي ( $d_s$ )، حجم حفرة ایجاد شده در پایین‌دست، فاصله وقوع حداکثر عمق و منطقه توسعه حفرة آبستگي تا حوضچه آرامش به ترتیب ( $L_t$  و  $L_s$ )، اندازه‌گیری شد. نمای جانبی و پلان مدل ساخته شده به صورت شماتیک در شکل ۳ دیده می‌شود.

جریان پس از وارد شدن به مخزن آرام‌کننده با عبور از صفحه فلزی مشبک (که برای کاهش تلاطم جریان ورودی به سرریز در مخزن تعبیه شده بود) روی سرریز جاری و در ادامه وارد حوضچه آرامش شد. پس از آن، جریان روی آستانه حوضچه آرامش سرریز و با بستر رسوبي تماس پیدا کرد که با این کار حفرة آبستگي ایجاد شد. در هر آزمایش مشخصه‌های جریان نظیر عدد فرود، سرعت، عمق آب در سراب و پایاب، عمق آب در انتهای حوضچه آرامش و روی آستانه و غیره در



شکل ۲- منحنی اندازه ذرات رسوب



شکل ۳- الف) نمای جانبی مدل ساخته شده در آزمایشگاه و ب) نمای بالایی مدل ساخته شده در آزمایشگاه

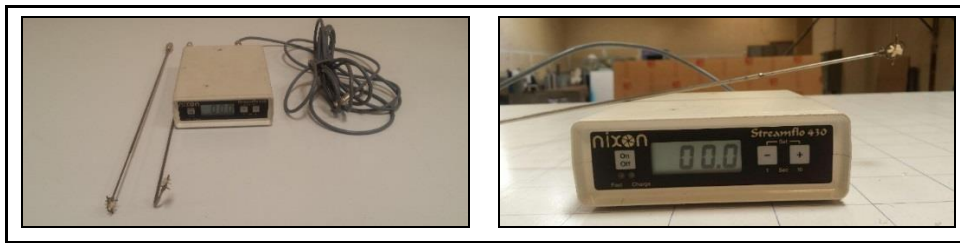
استفاده شد به این صورت که از کف تا سطح آب سرعت در فاصله هر ۲ سانتی متر اندازه گیری شد (Alizadeh, 2009).

$$V_o = \frac{1}{10}(V_s + 3V_{0.2d} + 2V_{0.6d} + 3V_{0.8d} + V_b) \quad (1)$$

که در آن،

$V_o$  = سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)؛  $V_s$  = سرعت در سطح آب (متر بر ثانیه)؛  $V_b$  = سرعت در کف (متر بر ثانیه) و  $d$  = عمق آب (سانتی متر).

به دلیل اینکه در این پژوهش شیب کف حوضچه آرامش متغیر آزمایشها است نمی توان از رابطه  $Q=A.V$  استفاده کرد (در این پژوهش دبی در واحد عرض استفاده شده است که از رابطه  $q=L.V$  سرعت محاسبه خواهد شد). بنابراین، سرعت متوسط با دستگاه سرعت سنج محاسبه شد (شکل ۴) به این صورت که روی سرریز، پاشنه سرریز و روی آستانه از روش یک نقطه استفاده شد (به دلیل ارتفاع کم آب) به این صورت که سرعت در مقاطع ۰/۵ و ۰/۷ عمق آب اندازه گیری شد. برای انتهای حوضچه آرامش نیز از روش پنج نقطه



شکل ۴- دستگاه سرعت سنج

از کف تا سطح آب رسم نمودار توزیع سرعت قبل از آستانه است تا تأثیر آستانه و شیب کف حوضچه آرامش بر توزیع سرعت، که در شکل ۵ نشان داده شده است، مشاهده شود. در این شکل مشاهده می شود به دلیل وجود آستانه در انتهای حوضچه توزیع سرعت فرم منظم همیشگی خود را ندارد همچنین با تغییر شیب کف تا اواسط ارتفاع آب میزان رشد سرعت کمتر است و بعد از آن در شیبهای مثبت افزایش سرعت تا سطح آب و در شیبهای منفی کاهش سرعت را داشته ایم.

برای بررسی ابعاد حفرة آبشستگی، مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ )، فاصله حداکثر عمق آبشستگی تا حوضچه آرامش ( $L_s$ ) و فاصله منطقه توسعه آبشستگی (حفرة و پشته) تا حوضچه آرامش ( $L_t$ ) نسبت به طول حوضچه آرامش ( $L$ ) بی بعد شده اند و تغییرات آنها نسبت به عدد فرود ذره در پنج شیب کف حوضچه آرامش

در این پژوهش از عدد فرود ذره به جای عدد فرود جریان استفاده شده است که از رابطه ۲ به دست می آید.

$$Fr_d = \frac{V_o}{\sqrt{gd_{50} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}} \quad (2)$$

که در آن،

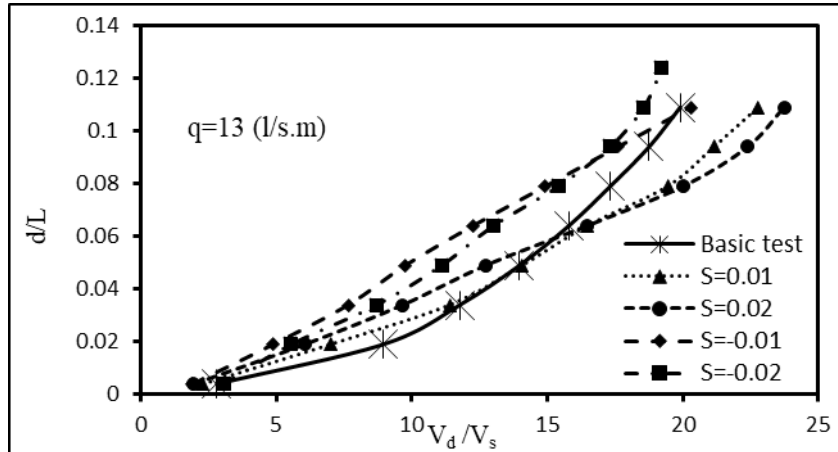
$V_o$  = سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)؛  $g$  = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛  $d_{50}$  = قطر متوسط ذرات (میلی متر)؛  $\rho_s$  = جرم مخصوص رسوب (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $\rho$  = جرم مخصوص سیال (کیلوگرم بر متر مکعب).

## نتایج و بحث

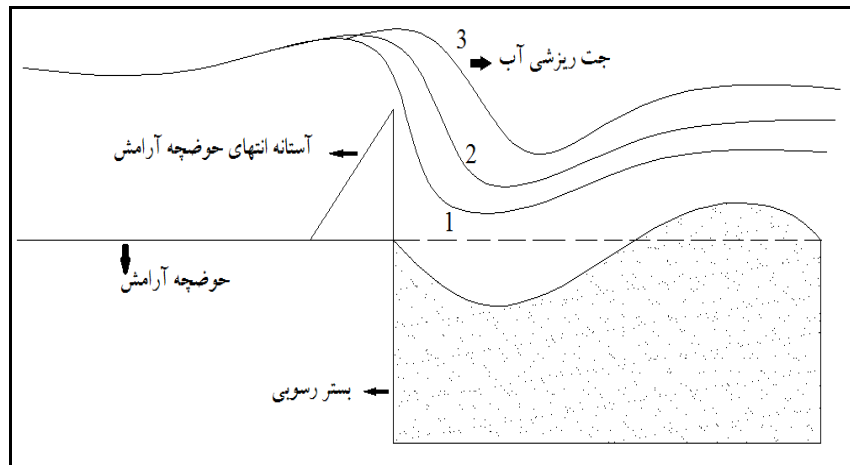
به دلیل وجود آستانه در انتهای حوضچه آرامش و تغییر شیب کف آن، هدف از اندازه گیری سرعت با دستگاه

محدوده محاسبه شد. اما زمانی که بستر رسوبی در معرض برخورد جت جریان قرار می‌گیرد تحت تأثیر دو عامل قرار دارد: عدد فرود و زاویه جت جریان ریزشی از روی آستانه. تونا و امیراگلو (Tuna & Emiroglu, 2011a; b) می‌گویند که با افزایش

عدد فرود حداکثر عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد؛ اما این محققان اثر جت جریان ریزشی را در نظر نگرفته بودند. طبق مشاهدات در آزمایشگاه هنگام برخورد جریان با بستر رسوبی با توجه به دبی جریان و زاویه برخورد سه حالت اتفاق می‌افتد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار توزیع سرعت در انتهای حوضچه آرامش



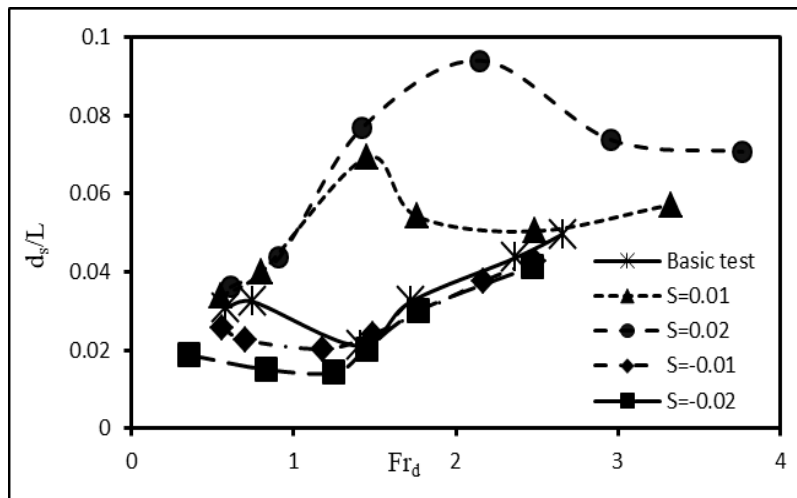
شکل ۶- جت ریزشی آب هنگام برخورد با بستر رسوبی

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با تغییرات دبی جت ریزشی جریان هنگام برخورد با بستر رسوبی سه حالت دارد. در حالت دوم که زاویه جت جریان ریزشی به قائم نزدیک است حداکثر عمق آبشستگی ایجاد می‌شود هرچه به حالت یک و سه نزدیک می‌شود عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در حالت دوم سرعت در جهت مؤلفه  $y$  بیشتر است و جریان آب با حداکثر انرژی با بستر رسوبی برخورد می‌کند در نتیجه بیشترین عمق آبشستگی اتفاق می‌افتد اما در حالت سوم سرعت در جهت مؤلفه  $x$  بیشتر است در نتیجه بیشترین پیشروی اتفاق می‌افتد. شکل ۷ تغییرات عمق آبشستگی نسبی را در شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش نسبت به عدد فرود ذره نشان می‌دهد.

است و جریان آب با حداکثر انرژی با بستر رسوبی برخورد می‌کند در نتیجه بیشترین عمق آبشستگی اتفاق می‌افتد اما در حالت سوم سرعت در جهت مؤلفه  $x$  بیشتر است در نتیجه بیشترین پیشروی اتفاق می‌افتد. شکل ۷ تغییرات عمق آبشستگی نسبی را در شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش نسبت به عدد فرود ذره نشان می‌دهد.

تأثیر شیب کف حوضچه آرامش بر آبشستگی بستر...

تغییرات فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی و تغییرات فاصله منطقه توسعه آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش نسبت به عدد فرود ذره در شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۷- تغییرات عمق آبشستگی نسبی نسبت به عدد فرود ذره در حالت حوضچه آرامش با دیواره‌های موازی در شیب‌های مختلف

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد با افزایش شیب کف حوضچه آرامش (شیب معکوس) بیشترین پرش از روی آستانه انتهایی را داریم، آب با شدت بیشتری با بستر رسوبی برخورد می‌کند و باعث حفر بیشتر بستر می‌شود در حالی که پرش هیدرولیکی با کاهش شیب کف حوضچه اتفاق نمی‌افتد و یا اگر اتفاق افتاد بسیار کوچک است که همین امر باعث کاهش ابعاد حفره آبشستگی می‌شود. حداکثر عمق آبشستگی نسبی و متوسط عمق آبشستگی در یک دبی ثابت، با افزایش شیب کف حوضچه آرامش افزایش و با کاهش شیب کف حوضچه آرامش کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۷ با افزایش عدد فرود ذره افزایش عمق آبشستگی مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر اثر متقابل جت جریان ریزشی (زاویه و سرعت برخورد آن با بستر رسوبی) با عدد فرود ذره است. از شکل ۷ مشخص است که بیشترین تغییرات در عدد فرود ذره ۱/۵ اتفاق افتاده است در این حالت زاویه جت جریان تقریباً قائم است در نتیجه حداکثر سرعت و شدت جریان در جهت عمودی است که این امر باعث ایجاد حداکثر عمق آبشستگی می‌شود. کمترین متوسط عمق آبشستگی در شیب کف ۰/۰۲- و بیشترین متوسط عمق آبشستگی در شیب کف ۰/۰۲+ اتفاق افتاده است (شکل ۸).



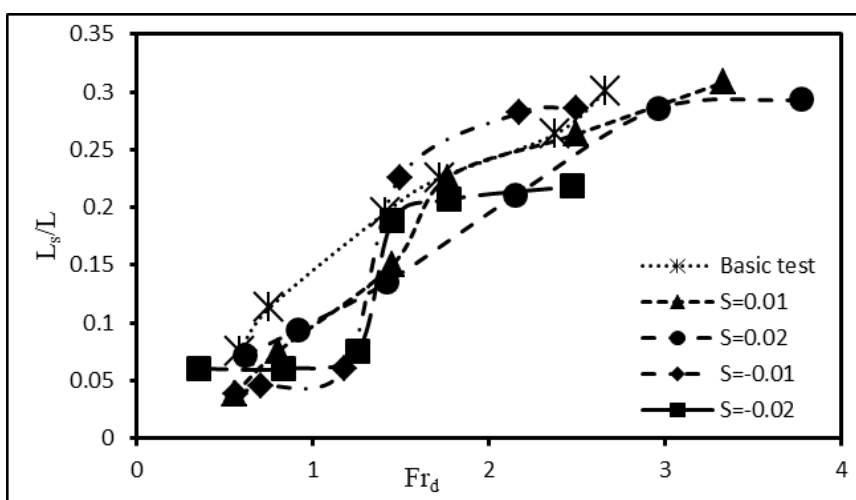
شکل ۸- نیمرخ آبشستگی الف) شیب کف حوضچه آرامش ۰/۰۲ و ب) شیب کف حوضچه آرامش ۰/۰۲-.

منطقه توسعه آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش افزایش و با کاهش شیب کف حوضچه آرامش، فاصله منطقه توسعه آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش کاهش می‌یابد.

پروفیل طولی حداکثر عمق آبشستگی نسبی در دبی‌ها و شیب‌های مختلف در شکل ۱۱، توپوگرافی و خطوط کانتور تغییرات حفرة آبشستگی در دبی ثابت ۱۳ لیتر بر ثانیه بر متر (بیشترین تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی در این دبی بوده است) نسبت به شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

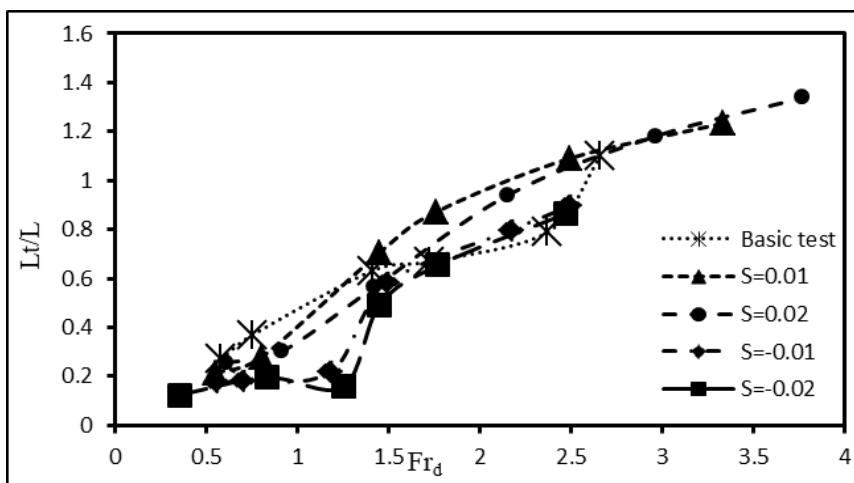
در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود ذره در هر شیب فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش افزایش و در عدد فرود ذره ثابت با کاهش شیب کف حوضچه آرامش فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش کاهش و با افزایش شیب کف حوضچه آرامش فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود ثابت ذره در هر شیب فاصله منطقه توسعه آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش افزایش و با افزایش شیب کف حوضچه آرامش در هر عدد فرود ذره، فاصله



شکل ۹- تغییرات فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش نسبت به عدد فرود ذره در شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش

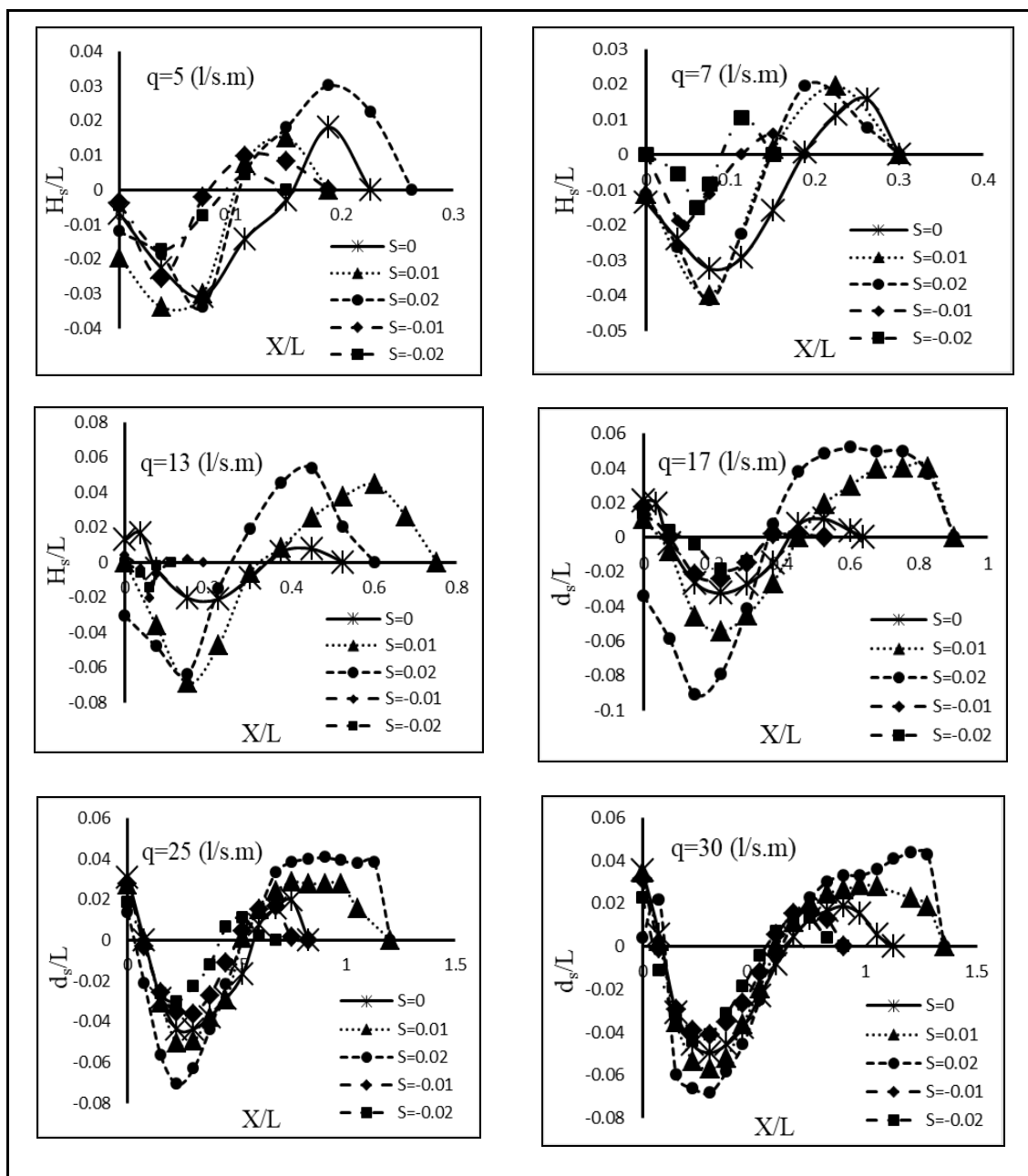




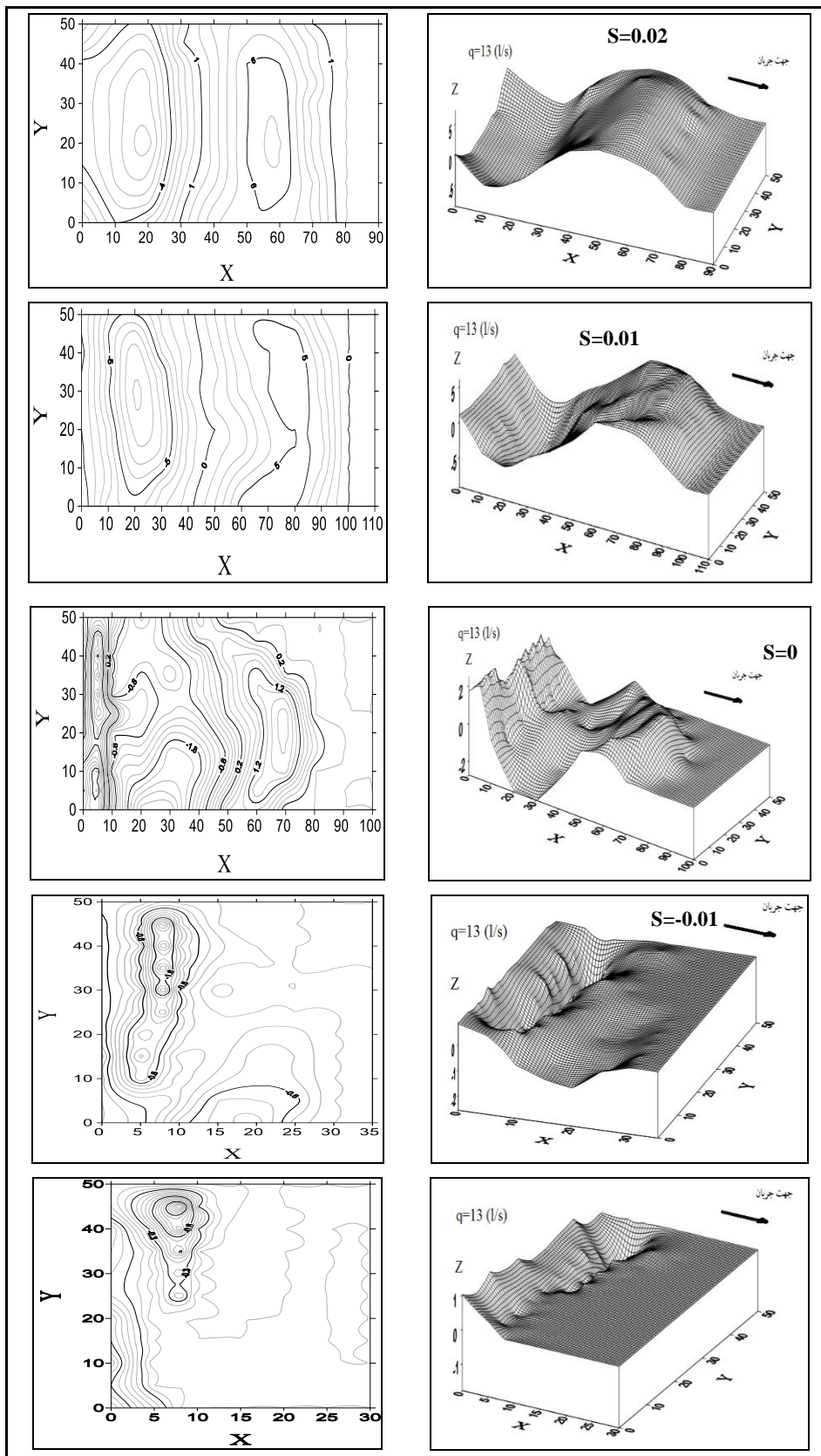
شکل ۱۰- تغییرات فاصله منطقه توسعه آبشستگی نسبی تا حوضچه آرامش نسبت به عدد فرود ذره در شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش

مطابق شکل ۱۲ حفره آبشستگی و پس از آن حداکثر عمق آبشستگی بعد از آستانه حوضچه آرامش به تدریج شکل می‌گیرند و در ادامه آنها مواد رسوبی حاصل از آبشستگی ته‌نشین می‌شود. در تمامی آزمایش‌ها حجم حفره آبشستگی با افزایش شیب کف حوضچه آرامش افزایش و با کاهش شیب کف حوضچه آرامش کاهش می‌یابد.

شکل ۱۱ پروفیل طولی آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در شیب‌های مختلف کف حوضچه آرامش را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش شیب کف حوضچه آرامش بیشترین پیشروی منطقه توسعه حفره رسوبی رخ داده است. عکس این رخداد هنگام کاهش شیب کف حوضچه آرامش دیده می‌شود.



شکل ۱۱- پروفیل طولی حداکثر عمق آبشستگی نسبی در پایین‌دست سرریز پلکانی در دبی‌های مختلف و شیب‌های متفاوت حوضچه آرامش



شکل ۱۲- تغییرات هندسه حفره آبستکی نسبت به تغییرات شیب کف حوضچه آرامش

## نتیجه‌گیری

یافته است.

- فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی و فاصله انتهای منطقه توسعه آبشستگی تا حوضچه آرامش با افزایش عدد فرود ذره افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش شیب کف حوضچه آرامش این مقادیر افزایش و با کاهش شیب کف حوضچه آرامش کاهش می‌یابند.

- بیشترین فاصله حداکثر عمق آبشستگی نسبی و فاصله انتهای منطقه توسعه حفره آبشستگی تا حوضچه آرامش در شیب کف ۰/۰۱ و ۰/۰۲ به ترتیب ۲/۳ و ۱۸ درصد افزایش یافته است.

- طی آزمایش‌ها مشخص شد که حوضچه آرامش با شیب منفی کف بسیار مناسب‌تر است و کمترین حفره آبشستگی در این حالت اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش حفره آبشستگی ایجاد شده در پایین‌دست سرریز پلکانی و تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبت به شیب کف حوضچه آرامش بررسی شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که شیب کف منفی حوضچه آرامش تا حد زیادی باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی نسبی می‌شود.

- زمانی که جریان با بستر رسوبی برخورد می‌کند بستر رسوبی تحت تأثیر دو عامل قرار خواهد گرفت: عدد فرود و زاویه جت جریان ریزشی از روی آستانه. بحرانی‌ترین حالت در حوضچه آرامش با شیب کف ۰/۰۲ و بهترین حالت در شیب کف ۰/۰۲- اتفاق افتاد که متوسط عمق آبشستگی نسبی به ترتیب ۴۷ درصد افزایش و ۵۲/۲ درصد کاهش

## مراجع

- Alizadeh, A. 2009. Principles of Applied Hydrology. (Ed.) Astan Quds Razavi Pub. (in Persian)
- Aminpour, Y., Farhoudi, J. and Roshan, R. 2014a. Investigation of local scouring in downstream of stilling basins in presence of stepped spillway. J. Hydraul. 9(4): 25-38. (in Persian)
- Aminpour, Y., Farhoudi, J. and Roshan, R. 2014b. Investigation of local scouring in downstream of stepped spillway. Proceedings of the 13<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Tabriz University. Tabriz, Iran. (21/08/1393). (in Persian)
- Barani, Gh. A., Rahnema, M. B. and Bagheri, H. 2005. Optimization of stepped spillway dimensions and investigation of flow energy dissipation over a physical model. J. Appl. Sci. 5(5): 878-882.
- Chanson, H. 1995. Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways. Pergamon, Oxford, UK.
- Chanson, H. 2001. The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways, Balkema, Lisse, The Netherlands.
- Chanson, H. 2002. Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways. CRC Press.
- Dey, S. and Sarkar, A. 2007. Effect of upward This is a scour and flow downstream of an apron due to submerged jets. J. Hydraul. Eng. 133(1): 59-69.
- Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. J. Hydraul. Res. 23(4): 343-358.
- Novak, P. and Cabelka, J. 1981. Models in Hydraulic Engineering. Pitman Advanced Publishing Qian.
- Rafiei, A., Ajdari, K. and Emamgholizade, S. 2014. The effect of bed materials on maximum scour depth in the downstream of stepped spillway. Proceedings of the National Conference of Architecture, Civil and Modern Urban Development of Tabriz. Tabriz, Iran. (31/02/1393) (in Persian)

- Shafaei-Bejestan, M. 2006. Determine the maximum depth of downstream scour of stepped spillway in nappe flow conditions. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference of River Engineering. (24/11/1385). (in Persian)
- Tuna, M. C. M. and Emiroglu, E. 2011a. Scour profiles at downstream of cascades. *Sci. Iranica*. 18(3): 338-347.
- Tuna, M. C. M. and Emiroglu, E. 2011b. The effect of tailwater depth on the local scour downstream of stepped chutes. *KSCE J. Civil Eng.* 19(5): 907-915.
- Tuna, M. C. M. and Emiroglu, E. 2013. Effect of step geometry on local scour downstream of stepped chutes. *Arab. J. Sci. Eng.* 38, 579-588.
- Zhang, G. and Chanson, H. 2015. Hydraulics of the developing flow region of stepped cascades: an experimental investigation. *Hydraul. Model Rep. CH97/15*, School of Civil Engineering, Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, 76.
- Zhang, G. and H, Chanson. 2016a. Hydraulics of the developing flow region of stepped spillways. I: physical modeling and boundary layer development. *J. Hydraul. Eng.* 142(7):04016015. Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001138.
- Zhang, G. and H, Chanson. 2016b. Hydraulics of the developing flow region of stepped spillways. II. pressure and velocity fields. *J. Hydraul. Eng.* 142(7):04016016. Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001136.



## **The Effect of Stilling Basin Slope of Bed Scour at Downstream of Stepped Spillway**

**E. Eghlidi\*, Gh. A. Barani and K. Qaderi**

\*Corresponding Author: M. Sc. of Hydraulic Structure, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid-Bahonar University of Kerman (UK), Kerman, Iran. Email: [elnazeghlidi70@gmail.com](mailto:elnazeghlidi70@gmail.com)

Received: 31 December 2017, Accepted: 4 July 2018

Stepped spillways and stilling basins are the most important energy dissipation structures. Even though most part of energy would be dissipated by these two structure, the remaining part of energy of flow may be capable to grave the bed scour and to create the scour hole downstream of them. Structures could be destroyed if this part of energy is high. In this study, the effects of stilling basin slopes on bed scour at downstream of stepped spillway were investigated experimentally. Experiments were conducted in the laboratory of hydraulic structures at University of Kerman with six different discharges and five various stilling basin slopes. The following parameters were measured: maximum scour depth ( $d_s$ ), flow velocity (in three point), water depth in upstream and downstream stepped spillway and stilling basin, the distance from where the maximum scour depth happened to sill ( $L_s$ ), and the geometry of scour hole. Results showed 47 percent increase and 52.2 percent decrease in average of maximum relative scour depth when stilling basin slopes were 0.02 and -0.02, respectively. Also, it was shown that the distance between the point where maximum scour depth had happened to the end of stilling basin increased when Froude number increased and decreased when stilling basin slope decreased.

**Keywords:** Energy Dissipation Structures, Maximum Depth of Scour, Scour Hole