

## بررسی آزمایشگاهی اثر توام نصب کفبند و کنگره بر تغییرات عمق آبشستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سرریز پلکانی

سروش غریبی چناری<sup>۱</sup>، مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۲\*</sup>، سهام‌الدین محمودی کردستانی<sup>۳</sup>،  
و امیر ملک‌پور<sup>۴</sup>

۱ و ۲، ۴- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ دانشیار؛ و استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
۳- استادیار موسسه IA.ING ایتالیا  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۳

### چکیده

کنترل فرسایش بستر و به تبع آن دیواره‌های رودخانه، یکی از هدف‌های مهم در پروژه‌های حفاظت از رودخانه‌هاست. برای این منظور از سازه‌های کنترل تراز بستر مختلفی می‌توان استفاده کرد که سرریزهای پلکانی از آن جمله است. با توجه به نقشی که آبشستگی شکل گرفته در پایین دست این سازه‌ها بر ایمنی و پایداری آن‌ها دارد، در تحقیق حاضر تاثیر حضور کفبند بر تغییرات مشخصات آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی با و بدون کنگره به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف دبی، شیب‌های سرریز ۱:۱ و ۱:۲، هندسه کنگره‌ها (طول و عرض برابر با ارتفاع پلکان‌ها و ارتفاع برابر با نیم و دو سوم ارتفاع پلکان‌ها) و کفبند با طول‌های  $\frac{1}{3}$  و  $\frac{2}{3}$  ارتفاع سرریز صورت پذیرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ و در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر، با افزایش طول کفبند به  $\frac{2}{3}$  ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط بدون نصب کنگره به ترتیب به میزان ۷۶ و ۶۳ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با نصب کنگره، در بهترین عملکرد آن، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر به طور متوسط ۱۲ درصد نسبت به شرایط بدون کنگره کم می‌شود. با تغییر شیب کارگذاری پلکان‌های سرریز به ۱:۲، افزایش طول کفبند به  $\frac{2}{3}$  ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر و برای شرایط بدون کنگره به ترتیب به میزان ۵۱ و ۴۶ درصد کاهش می‌دهد و با نصب کنگره روی پلکان‌های سرریز، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی به طور متوسط ۱۲ درصد نسبت به شرایط بدون کنگره کم می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

کفبند، سرریز پلکانی-کنگره‌ای، سازه‌های کنترل تراز بستر، عمق آبشستگی

### مقدمه

یکی از موضوع‌های مهم در مهندسی رودخانه، جلوگیری از افت تراز بستر رودخانه، حفظ پایداری سواحل و نیز جلوگیری از به خطر افتادن سازه‌های احداث شده در آن است و کم‌توجهی به آن به

قالب‌های مستهلک‌کننده انرژی در پروژه‌های احداث سد و انتقال آب و نیز کنترل تراز بستر رودخانه عمل می‌کنند، تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از آن و اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر استهلاک انرژی این نوع از سازه‌ها شده است (Chamani &

Rajaratnam., 1994, Chinnarasri & Wongwiset., 2006, Pagliara & Palermo., 2013). همچنین، به صورت محدود مطالعاتی در زمینه هندسه آبشستگی در پایین‌دست این سازه‌ها صورت گرفته است (Khatsuria., 2005, Aminpour & Farhoudi 2017., Kazempour et al., 2019).

سرریزهای پلکانی به علت اتلاف انرژی بیشتر نسبت به سرریزهای معمولی گزینه مناسب فنی و اقتصادی هستند. با احداث این نوع از سرریزها، طول حوضچه آرامش ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه پروژه ۵ تا ۱۰ درصد کمتر می‌شود (Peyras et al., 1992).

بر اساس تجربیات مدون شده به دلیل کاهش راندمان افت انرژی، استفاده از سرریزهای پلکانی به دبی واحد عرض تا  $30 \text{ m}^3/\text{m.s}$  محدود شده است (Tuna., 2012).

بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سرریزهای پلکانی نشان داده است که رژیم جریان روی سرریزهای پلکانی می‌تواند به صورت‌های ریزشی<sup>۱</sup>، انتقالی<sup>۲</sup> و سطحی<sup>۳</sup> طبقه‌بندی شود (Khatsuria., 2005).

پیرز و همکاران (Peyras et al., 1992) در بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سرریزهای پلکانی-گابیونی می‌گویند که رژیم جریان روی سرریزهای پلکانی می‌تواند به صورت‌های ریزشی (جریان ریزشی مجزا و جریان ریزشی جزئی) و

تحمیل هزینه‌های سنگینی می‌انجامد. این امر مستلزم تسلط کامل مهندسان بر پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری و نیز شناخت پدیده‌های حاکم بر ریخت‌شناسی رودخانه‌هاست (Esmaeili Varaki et al., 2021).

به‌طور کلی آب‌شستگی و فرسایش پدیده‌هایی هستند که با افزایش سرعت جریان نسبت به سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی در بسترهای آب‌رقتی ایجاد می‌شوند. از این میان، موضوع فرسایش موضعی در مجاورت سازه‌های احداث شده در رودخانه‌ها از اهمیت بیشتری در فعالیت‌های حفاظتی در رودخانه‌ها برخوردار است. روش‌های مختلفی برای کنترل یا کاهش آب‌شستگی در رودخانه‌ها وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به پوشش سنگ‌چین، سازه‌های توری‌سنگی، آب‌شکن‌ها، صفحات مستغرق و سازه‌های کنترل تراز بستر اشاره کرد (Hoffmans & Verhij, 1997).

سازه‌های کنترل تراز بستر برای جلوگیری از توسعه آب‌شستگی و فرسایش بستر در رودخانه‌ها به کار می‌روند. این سازه‌ها با کاستن از شیب و سرعت جریان فرسایش را کنترل می‌کنند و از افت تراز بستر و نیز از به خطر افتادن پی سازه‌های احداث شده در رودخانه‌ها جلوگیری خواهند کرد. مهم‌ترین سازه‌های کنترل تراز بستر شامل سطوح شیب‌دار سنگی، شیب‌شکن‌های قائم و مایل، آستانه شیب‌دار، پره قلابی‌شکل، پره عرضی، سرریز  $w$  شکل و سرریزهای پلکانی هستند (Dey & Raikar, 2007).

سرریزهای پلکانی با قدمتی بیش از ۳۵۰۰ سال برای اتلاف انرژی آب، کاهش قدرت فرسایشی آن و کاهش هزینه سازه مستهلک‌کننده انرژی پایین‌دست سرریز به کار می‌روند. از آنجاکه این سازه در

1- Nappe flow  
3- Skimming flow

2- Transition flow

کشاورز اسکندری و اسمعیلی ورکی (Keshavarz Eskandari & Esmaeili Varaki, 2019) تاثیر نصب کنگره با ارتفاع ۰/۵ و ۰/۷۵، ارتفاع پله ( $h$ )، فاصله‌های کارگذاری  $h$  و  $2h$  و طول‌های مختلف بر افت نسبی انرژی در سرریز پلکانی با شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ را بررسی کردند و مقایسه نتایج نشان داد با نصب کنگره روی سرریزهای پلکانی با شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ متوسط افت نسبی انرژی به ترتیب ۸/۶، ۷/۸ و ۳ درصد، نسبت به حالت بدون کنگره، افزایش می‌یابد.

همان طور که اشاره شد، سرریزهای پلکانی علاوه بر نقشی که به عنوان سازه استهلاک انرژی دارند، می‌توانند به عنوان سازه کنترل تراز بستر در رودخانه‌ها نیز به‌کار روند. از این‌رو، در کنار آگاهی از پارامترهای موثر بر رژیم جریان و افت انرژی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی، اطلاع از عوامل موثر بر آب‌شستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی از این سرریزها و دیگر سازه‌های کنترل تراز بستر در شناخت فرآیندهای حاکم بر آب‌شستگی و روش‌های حاکم بر آن اهمیت زیادی دارد.

نتایج بررسی تونا و امیراوغلو (Tuna & Emiroglu, 2011) روی تاثیر عمق پایاب بر آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی نشان داد که عمق حداکثر و مساحت آب‌شستگی به شدت به عمق پایاب بستگی دارد. علاوه‌براین، عمق حداکثر آب‌شستگی به هندسه پلکان، اندازه ذرات رسوبی، و دبی جریان بستگی دارد.

اسکورلوک و همکاران (Scurlock *et al.*, 2012) آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سه بعدی را بررسی کردند و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معادلاتی را برای تخمین عمق حداکثر آب‌شستگی ارائه دادند.

سطحی طبقه‌بندی‌شود. در دبی‌های کم، جریان ریزشی است و در دبی‌های بالا جریان سطحی مشاهده می‌شود. چمنی و راجاراتنام (Chamani & Rajaratnam, 1994) با بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سرریز پلکانی بیان کردند زمانی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله کمتر از تقریباً ۰/۸ باشد، رژیم جریان ریزشی است و اتلاف انرژی قابل توجه خواهد بود.

چینارشری و ونگ‌وایس (Chinnarasri & Wongwiset, 2006) ویژگی‌های جریان و عوامل موثر بر استهلاک انرژی در انواع مختلف تندآب‌های پلکانی را بررسی و روابطی برای برآورد آن در سرریز پلکانی با پله‌های ساده و شیب‌دار ارائه کردند.

سلماسی و همکاران (Salmasi *et al.*, 2011) استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی- گابیونی در شیب ۱:۱ و ۱:۲ را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که استهلاک انرژی در دبی بالا و رژیم جریان غیر ریزشی، به دلیل تفکیک جریان به دو بخش روگذر و درون گذر، بیشتر است.

پالیارا و پالمو (Pagliara & Palermo, 2013) با آزمایش‌هایی نتیجه گرفتند که برای نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی بزرگ‌تر از ۱/۵، رژیم جریان روی سرریز پلکانی از نوع ریزشی است. این نسبت برای رژیم جریان انتقالی بین ۱/۱ تا ۱/۵ و برای رژیم جریان سطحی کوچک‌تر از ۱/۱ گزارش شده‌است. این محققان می‌گویند که مزیت سرریز پلکانی از نوع گابیونی، نسبت به سرریزهای معمولی، دارا بودن ساختار الاستیک و حفظ محدوده طبیعی است که به راحتی خودشان را با شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف محل احداث، که در چرخه طبیعی رودخانه اتفاق می‌افتد، سازگار می‌کنند.

با ارتفاع پله ( $h$ ) و ارتفاع  $(0.5h)$  در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱، عمق حداکثر نهایی آبشستگی به‌طور متوسط نسبت به حالت بدون کنگره ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در شیب پلکان سرریز ۱:۲ اعمال هر هندسه از کنگره‌ها سبب افزایش عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون کنگره آن می‌شود. در شیب پلکان سرریز ۱:۳، از میان گزینه‌های مختلف کنگره و آستانه مورد بررسی، نصب آستانه با عرض و ارتفاع معادل با  $0.5h$  برابر ارتفاع پله ( $h$ )، عمق حداکثر آبشستگی را نسبت به حالت بدون کنگره آن به‌طور متوسط ۲۵ درصد کاهش می‌دهد.

یکی از روش‌های کاهش آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر، استفاده از کف‌بند است. در نشریه (CBIP., 1989)، طول حداقل کف‌بند  $1/5$  برابر عمق حداکثر تعادل گودال آبشستگی توصیه شده است. دی و ویستریچ (Dey & Westrich, 2003) تغییر زمانی آبشستگی و ویژگی‌های جریان را در حالت شبه تعادل آبشستگی با رسوب چسبنده طبیعی برای بازشدگی دریچه، سرعت جت و طول‌های کف‌بند مختلف به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و معادله‌ای برای تغییر زمانی گودال آبشستگی به‌دست آوردند.

سرکار و دی (Sarkar & Dey, 2005) مشخصات گودال آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق در رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت در پایین‌دست کف‌بند را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. مقایسه نتایج مطالعات نشان داد که آبشستگی تابعی از عدد فرود ذره است و با افزایش آن در رسوبات یکنواخت، آبشستگی افزایش می‌یابد.

پالیارا و پالمو (Pagliara & Palermo, 2013) در بررسی هیدرولیک جریان ریزشی از سرریزهای پلکانی می‌گویند رژیم جریان عبوری از سرریز پلکانی بر عمق گودال آبشستگی تاثیر گذار است و به‌طور خاص عمق آبشستگی در جریان سطحی افزایش می‌یابد.

تونا و امیراوغلو (Tuna & Emiroglu, 2013) نیمرخ‌های آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی را برای سه نوع رژیم جریان ریزشی، سطحی و انتقالی بررسی و نشان دادند که نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی برای عمق حداکثر آبشستگی اثرگذار است به‌طوری که عمق حداکثر آبشستگی در رژیم جریان ریزشی نسبت به رژیم جریان غیرریزشی کمتر است.

امین‌پور و فرهودی (Aminpour, Y. & Farhoudi, J. 2017) آبشستگی در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش در حضور سرریز پلکانی را بررسی و ضمن ارائه روابطی بر پایه تحلیل رگرسیون برای برآورد نیمرخ آبشستگی، بیان کردند که وجود سرریز پلکانی باعث استهلاك انرژی بین ۴۲ تا ۷۵ درصد می‌شود. این امر به دلیل کاهش ابعاد حفره آبشستگی، ایمنی بیشتر سرریز پلکانی را نسبت به سرریز اوجی تحت شرایط مشابه توجیه می‌کند.

کازم‌پور و همکاران (Kazempour et al., 2019) تاثیر نصب کنگره با هندسه‌های مختلف را بر تغییرات عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای، تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت در شیب‌های کارگذاری پلکان ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ بررسی کردند و تجزیه و تحلیل نتایج بررسی‌هایشان نشان داد در بهترین گزینه نصب کنگره‌ها (نصب کنگره با طول، عرض و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر

طرح آزمایشگاهی برای آزمایش یک سازه هیدرولیکی هستند.

مقدار آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی با و بدون کنگره و کفبند متاثر از عوامل متعددی است که هر یک تأثیری متفاوت بر روند آبشستگی دارد و باعث افزایش یا کاهش مقدار آن می شود. مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عمق حداکثر آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی-کنگره‌ای را می توان در قالب رابطه ۱ بیان کرد.

$$f_1 = (B, P, Q, y_t, y_{up}, t, t_e, \rho, \rho_s, g, v, \delta, d_{50}, d_{se}, d_{st}, h, l, L_A, x) \quad (1)$$

در شکل ۱ برخی از پارامترهای ارائه شده در رابطه ۱ آورده شده است.

که در آن،

$B$  = عرض سرریز؛  $P$  = ارتفاع سرریز؛  $Q$  = دبی جریان؛  $y_t$  = عمق پایاب؛  $y_{up}$  = عمق جریان در بالادست سرریز؛  $t$  : زمان از شروع آبشستگی؛  $t_e$  = زمان تعادل آبشستگی؛  $\rho$  = جرم مخصوص آب؛  $\rho_s$  = جرم مخصوص ذرات رسوبی؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $v$  = لزوجت سینماتیکی آب؛  $\delta$  = کشش سطحی؛  $d_{50}$  = قطر متوسط ذرات رسوبی؛  $d_{st}$  = عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی؛  $h$  = ارتفاع پله؛  $l$  = طول پله؛  $L_A$  = طول کفبند؛  $x$  = هندسه کنگره.

با به کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه ۱ به صورت رابطه بی بعد ۲ در می آید.

$$f_2 \left( \frac{B}{P}, \frac{t}{t_e}, \frac{d_{se}}{P}, \frac{d_{st}}{P}, Fr, F_d, \frac{y_{up}}{y_t}, \frac{y_c}{h}, \frac{\Delta h}{y_t}, \frac{\rho_s}{\rho}, Re, We, \frac{h}{l}, \frac{x}{l}, \frac{L_A}{P}, N \right) \quad (2)$$

که در آن،

دی و سرکار (Dey & Sarkar, 2006) فرآیند آبشستگی در اثر جت‌های ریزشی در بستر غیر چسبنده در پایین دست کفبند با اندازه دانه رسوبی مختلف بررسی کردند و نشان دادند با قرار دادن کفبند سنگی در پایین دست کفبند صلب، عمق آبشستگی به طور متوسط ۳۹ درصد کاهش می یابد. این محققان می گویند با کاهش طول کفبند، عمق تعادل آبشستگی افزایش می یابد. علی و همکاران (Ali et al., 2014) روابط بین پارامترهای گودال آبشستگی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست یک کفبند زیر را بررسی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، معادلات رگرسونی ارائه کردند.

همان طور که گفته شد، تحقیقات در زمینه جنبه‌های مختلف هیدرولیکی و هندسی اثرگذار بر عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی به عنوان سازه کنترل تراز بستر محدود است و اثر پارامترهایی مانند دبی جریان، عمق پایاب، هندسه پله و زاویه کارگذاری (شیب) پلکان‌ها بررسی شده است. در تحقیق حاضر، تأثیر هم‌زمان نصب کفبند در پایین دست سازه کنترل تراز سرریز پلکانی و نصب کنگره با هندسه‌های مختلف روی پلکان‌های آن بر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی با شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

### الف) تحلیل ابعادی

درک اصول تشابه و تحلیل ابعادی برای کسب نتایج موفقیت آمیز برنامه تحقیقاتی الزامی است، زیرا اصول مذکور شامل مطالعات بنیادی جریان سیال، همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی و یا

آزمایش‌ها ثابت بودند، از رابطه ۲ حذف می‌شوند. به این ترتیب رابطه ۲ به صورت زیر ساده می‌شود.

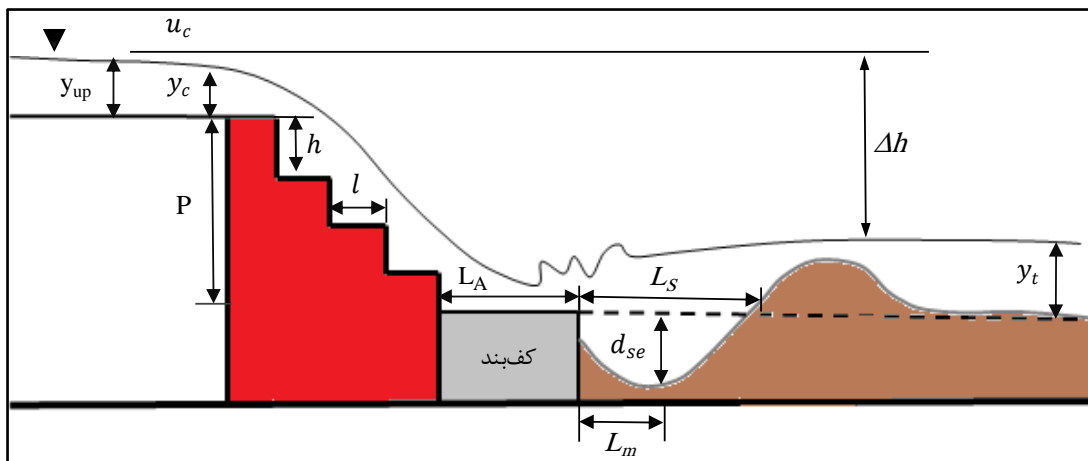
$$\frac{d_{se}}{P} \cdot \frac{d_{st}}{P} = f_2 \left( \frac{t}{t_e} \cdot Fr \cdot \eta \cdot \frac{y_{up}}{y_t} \cdot \frac{y_c}{h} \cdot \frac{\Delta h}{y_t} \cdot \frac{h}{l} \cdot \frac{x}{l} \cdot \frac{L_A}{P} \right) \quad (2)$$

که در آن،

پارامتر  $\eta$  به صورت  $\eta = F_d \Delta h / y_t$  تعریف می‌شود. در این تحقیق برای بررسی تاثیر کفبند بر کاهش آبشستگی از پارامتر راندمان کاهش آبشستگی  $R(\%) = \left| \frac{d_{sen} - d_{se}}{d_{sen}} \right| \times 100$  استفاده شد که در این رابطه  $d_{sen}$ : عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط بدون کفبند و  $d_{se}$ : عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط نصب کفبند است.

$y_c$  = عمق بحرانی؛  $N$  = تعداد پلکان؛ و  $\Delta h$  = اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین دست سرریز.

در مبحث آبشستگی، مناسب‌تر است پارامترهای  $\rho$  و  $\rho_s$  به صورت ترکیبی به شکل  $\Delta = G_s - I$  به کار برده شود که در آن  $G_s = \rho_s / \rho$  است. همچنین در رابطه (۲)،  $F_d$  عدد فرود ذره است و به صورت  $F_d = Q / (BP(g(G_s - I)d_{50})^{0.5})$  تعریف می‌شود و  $Fr$ : عدد فرود جریان است. در تحقیق حاضر، از عدد رینولدز ( $Re$ ) به علت آشفتگی بودن جریان در آزمایش‌ها (مقدار آن بزرگتر از ۸۰۰۰۰ در ورودی سرریز بود) صرف نظر گردید. از کشش سطحی و عدد وبر ( $We$ ) نیز به این دلیل که عمق آب در لبه سرریز همیشه بیشتر از ۲ سانتی‌متر است، می‌توان صرف نظر کرد (Subramanya., 1986). با توجه به اینکه  $B/P$  و  $N$  در سراسر

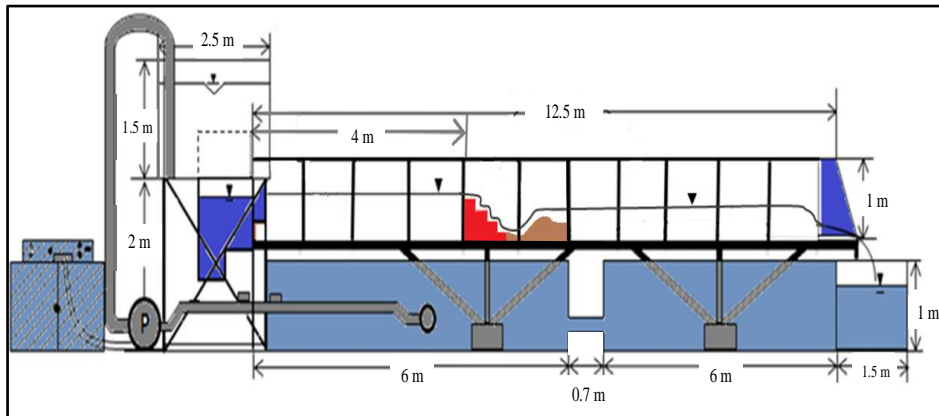


شکل ۱- برخی از نشانه‌های اختصاری پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی

Fig. 1. Some abbreviations of effective parameters on scour at downstream of stepped weirs

دانشگاه گیلان و در فلومی به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۱ متر با جنس دیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی اجرا شد (شکل ۲).

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش‌ها  
آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب



شکل ۲- طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی

Fig. 2. Sketch of experimental flume

جریان آب با پمپ سانتریفیوژ که قادر به تامین دبی تا ۹۰ لیتر بر ثانیه و مجهز به دستگاه کنترل دور موتور بود از مخزن پایین دست، وارد مخزن بالادست و پس از آن وارد مخزن ورودی فلوم شده سپس جریان وارد کانال می گردید. برای کاهش تلاطم جریان ورودی، در ابتدای فلوم از صفحات آرام کننده جریان استفاده شد. برای اندازه گیری دبی جریان، از دبی سنج التراسونیک با دقت  $\pm 0.1\%$  لیتر بر ثانیه و برای اندازه گیری عمق آب از عمق سنج دیجیتال با دقت  $\pm 1$  میلی متر استفاده شد.

سرریزهای مورد بررسی در شیبهای مختلف و در جدول ۱ و شکل ۴ مشخصات هندسی تصویرها نشان داده شده است. در بررسی وضعیت تغییرات آب شستگی در شیبهای مختلف، از کفبند با طولهای  $0.135 P$  و  $0.27 P$  متر و کنگرههایی با طول و عرض برابر با ارتفاع پلکانها و ارتفاع برابر با نیم و دو سوم ارتفاع پلکانها استفاده شد که بر اساس نتایج تحقیق کاظم پور و همکاران (Kazempour *et al.*, 2019) دارای مناسبترین عملکرد در کاهش آب شستگی بودند.

سرریزهای مورد مطالعه در این تحقیق متشکل از چهار پله به عرض  $1/5$  متر، ارتفاع  $0/1$  متر و طول پلکان به ترتیب  $0/1$  و  $0/2$  متر متناسب با دو شیب

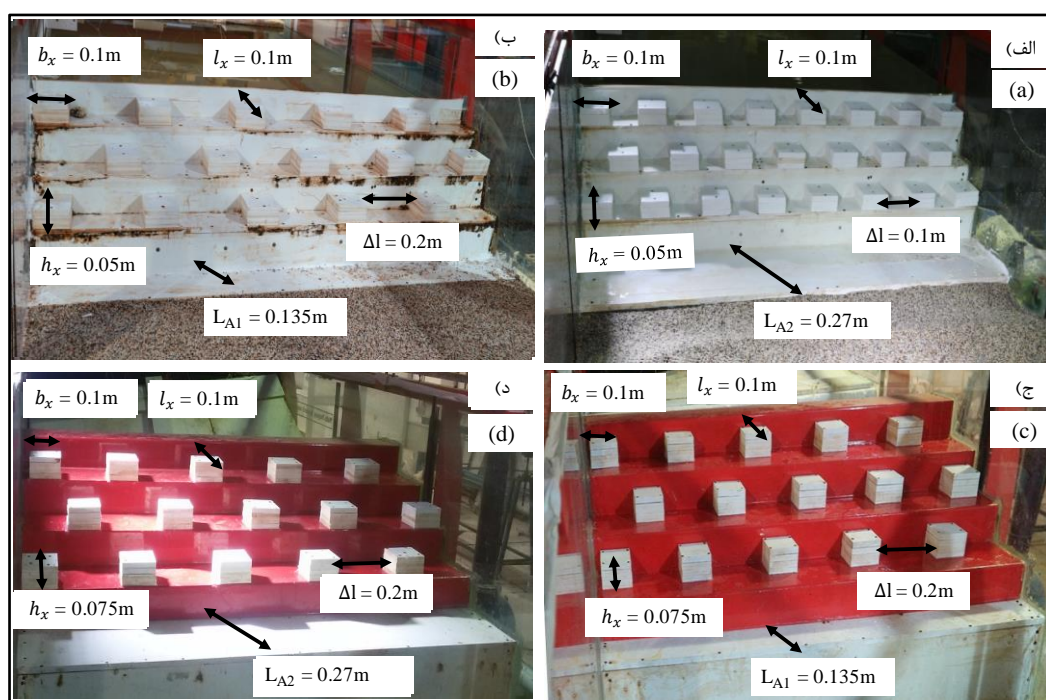


شکل ۳- تصویرهایی از فلوم آزمایشگاهی و سرریز پلکانی

Fig. 3. Photos of experimental flume and stepped weirs

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی مورد بررسی با شیب ۱:۱ و ۱:۲  
with slope of 1:1 and 1:2 Table 1- Geometric characteristic of stepped weirs

شماره سرریز	ارتفاع پله (متر، $h$ )	طول پله (متر، $l$ )	شیب ( $h/l$ )	طول کنگره (متر، $l_x$ )	عرض کنگره (متر، $b_x$ )	ارتفاع کنگره فاصله عرضی کنگره‌ها (متر، $h_x$ )	فاصله عرضی کنگره‌ها (متر، $\Delta l$ )	طول کفبند (متر، $L_A$ )
Weir number	height of step	Length of step	slope	Length of labyrinth	width of labyrinth	height of labyrinth	Space between labyrinth	Length of apron
SL <sub>1</sub>	0.1	0.1	1:1	-	-	-	-	-
SL <sub>1</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.1	1:1	-	-	-	-	P/3
SL <sub>1</sub> L <sub>A2</sub>	0.1	0.1	1:1	-	-	-	-	2P/3
SL <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	0.1	0.1	1:1	0.1	0.1	0.05	0.1	-
SL <sub>1</sub> K <sub>1</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.1	1:1	0.1	0.1	0.05	0.1	P/3
SL <sub>1</sub> K <sub>1</sub> L <sub>A2</sub>	0.1	0.1	1:1	0.1	0.1	0.05	0.1	2P/3
SL <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	0.1	0.1	1:1	0.1	0.1	0.05	0.2	-
SL <sub>1</sub> K <sub>2</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.1	1:1	0.1	0.1	0.05	0.2	P/3
SL <sub>1</sub> K <sub>2</sub> L <sub>A2</sub>	0.1	0.1	1:1	0.1	0.1	0.05	0.2	2P/3
SL <sub>2</sub>	0.1	0.2	1:2	-	-	-	-	-
SL <sub>2</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.2	1:2	-	-	-	-	P/3
SL <sub>2</sub> L <sub>A2</sub>	0.1	0.2	1:2	-	-	-	-	2P/3
SL <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	0.1	0.2	1:2	0.1	0.1	0.075	0.2	-
SL <sub>2</sub> K <sub>3</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.2	1:2	0.1	0.1	0.075	0.2	P/3
SL <sub>2</sub> K <sub>3</sub> L <sub>A2</sub>	0.1	0.2	1:2	0.1	0.1	0.075	0.2	2P/3
SL <sub>2</sub> K <sub>4</sub>	0.1	0.2	1:2	0.1	0.1	0.075	0.2	-
SL <sub>2</sub> K <sub>4</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.2	1:2	0.1	0.1	0.075	0.2	P/3
SL <sub>2</sub> K <sub>4</sub> L <sub>A1</sub>	0.1	0.2	1:2	0.1	0.1	0.075	0.2	2P/3



شکل ۴- تصاویر سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد مطالعه: الف) SL<sub>1</sub>K<sub>1</sub>L<sub>A2</sub>، ب) SL<sub>1</sub>K<sub>2</sub>L<sub>A1</sub>، ج) SL<sub>2</sub>K<sub>3</sub>L<sub>A2</sub> و د) SL<sub>2</sub>K<sub>4</sub>L<sub>A2</sub>  
Fig. 4. Photos of stepped-labyrinth weirs: a) SL<sub>1</sub>K<sub>1</sub>L<sub>A2</sub>, b) SL<sub>1</sub>K<sub>2</sub>L<sub>A1</sub>, c) SL<sub>2</sub>K<sub>3</sub>L<sub>A2</sub> and d) SL<sub>2</sub>K<sub>4</sub>L<sub>A2</sub>



جریان به تدریج وارد فلوم آزمایشگاهی گردید و عمق جریان افزایش می‌یافت. پس از تنظیم دبی جریان، با مانور دریچه انتهایی فلوم آزمایشگاهی، عمق پایاب مورد نظر با استفاده از عمق‌سنج نصب شده با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر تنظیم می‌گردید. در کلیه آزمایش‌ها، توسعه زمانی چاله آب‌شستگی به مدت ۶ ساعت در گام‌های زمانی مختلف با یک دستگاه دوربین دیجیتال تصویربرداری گردید و سپس با استفاده از نرم افزار Grapher9، نیم‌رخ زمانی آب‌شستگی استخراج و در انتهای هر آزمایش نیز نیم‌رخ نهایی آب‌شستگی با استفاده از عمق‌سنج لیزری با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر نصب کفبند بر کاهش عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی-کنگره‌ای، برای هر ۱۸ گزینه هندسی ذکر شده در جدول ۱ تأثیر چهار دبی بررسی و در مجموع ۷۲ آزمایش صورت گرفت. در جدول ۲، دامنه پارامترهای هیدرولیکی مورد آزمایش در این تحقیق نشان داده شده است.

به منظور تأمین ذرات رسوبی بستر فرسایشی، ماسه معدنی با قطر یکنواخت  $2/68$  میلی‌متر تهیه و در بستر رسوبی به طول ۲ متر، عرض  $1/5$  متر و ارتفاع  $0.30$  متر در پایین‌دست سرریز قرار داده شد.

به‌طور کلی، پدیده آب‌شستگی فرآیندی است زمان‌بر و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن اهمیت ویژه‌ای دارد. کیلز و همکاران (Kells et al., 2001) پس از بررسی یک دوره آب‌شستگی با زمان ۹۶ ساعته گزارش داده‌اند که ۹۰ درصد آب‌شستگی در ۲۴ ساعت اول رخ می‌دهد. در این تحقیق برای به‌دست آوردن زمان تعادل آب‌شستگی چندین آزمایش ۲۴ ساعته اجرا شد. بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان داد که پس از گذشت ۶ ساعت از شروع آزمایش، تغییر قابل توجهی در عمق گودال آب‌شستگی مشاهده نمی‌شود. از این‌رو در کلیه آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها برای مدت‌زمان یادشده دنبال شد.

برای هر آزمایش، بعد از نصب سرریز، کنگره‌ها و کفبندهای مورد نظر و آماده‌سازی بستر رسوبی،

جدول ۲- دامنه پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌ها

parameters Table 2- Range of experimental hydraulic

$\eta = F_d \Delta h / y_t$	عمق پایاب ( $y_t$ ) (m) Tail water depth	نسب عمق بحرانی به ارتفاع پله ( $y_c/h$ ) Relative Critical depth to height of step	دبی واحد عرض ( $q$ ) ( $m^3/m.s$ ) Discharge of width
18.7	( $2.5 y_c$ ) 0.086	0.34	0.02
16.5	( $2.5 y_c$ ) 0.104	0.41	0.026
14.9	( $2.5 y_c$ ) 0.12	0.48	0.033
13.6	( $2.5 y_c$ ) 0.136	0.54	0.04

## نتایج و بحث

### الف) الگوی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای

رژیم‌های جریان عبوری از سرریزهای پلکانی مورد مطالعه برای شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ آورده شده است.

شکل تیغه‌های ریزشی از روی سرریزهای پلکانی متأثر از هندسه پلکان‌ها، کنگره‌ها و دبی جریان است که بر فرآیند شکل‌گیری عمق آب‌شستگی اثرگذار خواهد بود.

بر اساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با شیب ۱:۱، رژیم جریان سطحی در محدوده  $y/h > 0.18$  و رژیم جریان انتقالی در محدوده  $0.18 < y/h < 0.54$  و رژیم جریان ریزشی در  $y/h < 0.54$  رخ می‌دهد (Khatsuria., 2005). در سرریزهای پلکانی با شیب ۱:۲، رژیم جریان سطحی در محدوده  $y/h > 0.95$  و رژیم جریان انتقالی در محدوده  $0.95 < y/h < 0.17$  و رژیم ریزشی در  $y/h < 0.17$  رخ می‌دهد (Khatsuria., 2005). با توجه به محدوده  $y/h$  در جدول ۳، رژیم جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با شیب ۱:۱ دامنه انتقالی تا ریزشی و شیب ۱:۲ به صورت ریزشی است.

از این رو، هرچه شیب پلکان‌ها کمتر باشد (طول پلکان‌ها بیشتر باشد)، به دلیل غیریکنواختی تیغه‌های ریزشی، توسعه جریان و در نهایت عمق نهایی آب‌شستگی تغییراتی محسوس می‌کند.

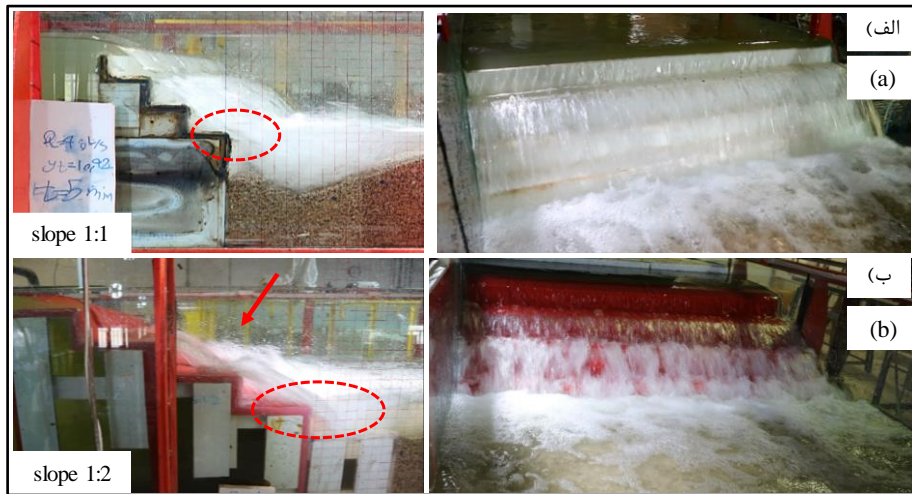
رژیم جریان عبوری از سرریزهای پلکانی به صورت ریزشی (Nappe flow)، انتقالی (Transition flow) و سطحی (Skimming flow) طبقه‌بندی می‌شود. در شکل ۵ و جدول ۳، شکل تیغه ریزشی و

جدول ۳- رژیم‌های جریان روی سرریزهای پلکانی برای شیب‌های ۱:۱، ۱:۲

Table 3- flow Regime on stepped weirs with slope 1:1 and 1:2

رژیم جریان (flow Regime)	$y/h$	$q(m^3/m.s)$	شماره سرریز Weir number
Nappe flow	0.34	0.02	SL <sub>1</sub>
Nappe flow	0.41	0.026	SL <sub>1</sub>
Nappe flow	0.48	0.033	SL <sub>1</sub>
Transition flow	0.54	0.04	SL <sub>1</sub>
Nappe flow	0.34	0.02	SL <sub>2</sub>
Nappe flow	0.41	0.026	SL <sub>2</sub>
Nappe flow	0.48	0.033	SL <sub>2</sub>
Nappe flow	0.54	0.04	SL <sub>2</sub>

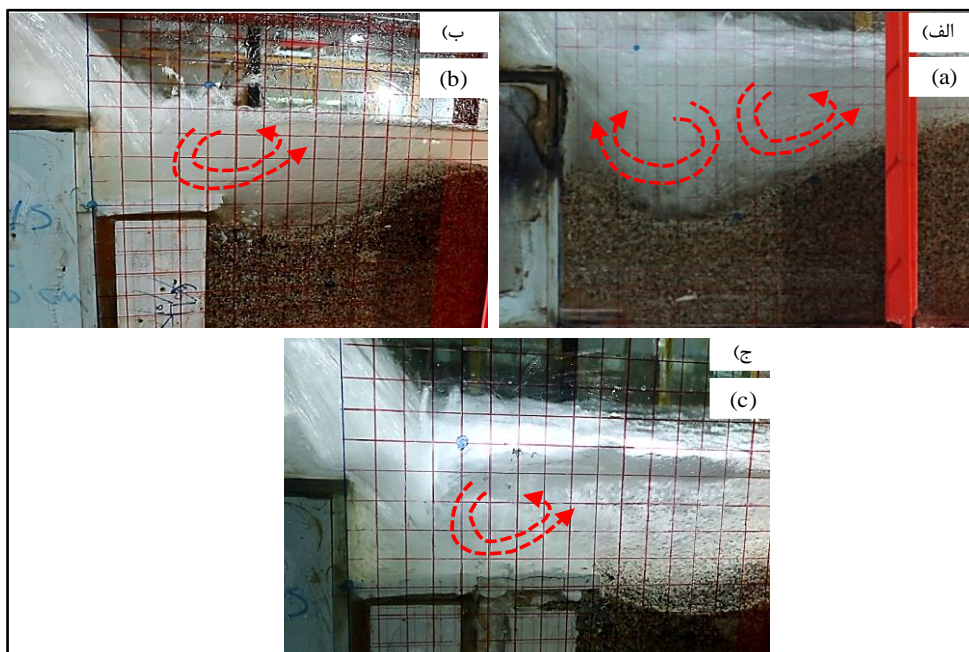
بررسی آزمایشگاهی اثر توام نصب کفبند و کنگره بر تغییرات...



شکل ۵- نمایی از الگوی جریان و الگوی تیغه ریزشی در سرریز پلکانی برای  $y_c/h=0.48$  و  $q=0.033 \text{ m}^3/\text{m.s}$  در شیب‌های: الف) ۱:۱ و ب) ۱:۲

Fig. 5. A View of flow pattern on stepped weir for  $y_c/h = 0.48 \text{ m}^3/\text{m.s}$  ( $q=0.033$ ) on slope: a) 1:1 and b) 1:2

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در حالت بدون کفبند جت ریزشی از سرریز به صورت مستقیم وارد بستر رسوبی می‌شود و گردابه اصلی شکل گرفته در پای سرریز اتفاق می‌افتد ولی با نصب کفبند، گردابه‌های اصلی و بخش غلتابه پرش هیدرولیکی روی آن شکل می‌گیرد (شکل ۶).



شکل ۶- نمایی از گردابه و پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین دست سرریز پلکانی در شرایط:

الف) بدون کفبند، ب) کفبند به طول  $\frac{1}{3}P$  و ج) کفبند به طول  $\frac{2}{3}P$

Fig. 6. A View of vortex and hydraulic jump formed downstream of stepped weir for:

a) Without apron, b) apron with lengths  $\frac{1}{3}P$  and c) apron with lengths  $\frac{2}{3}P$

## ب) تأثیر نصب کف‌بند بر توسعه زمانی نیم‌رخ آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای

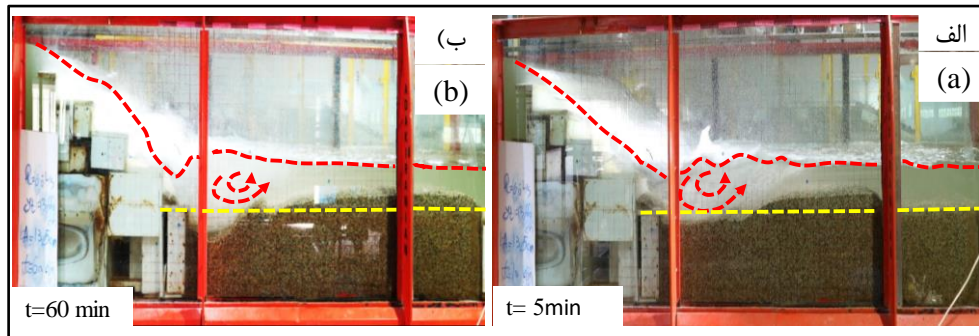
مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در مرحله آغازین و در دقایق اولیه آزمایش‌ها، به دلیل قدرت جت برخوردی ناشی از جریان ریزشی به بستر رسوبی، سرعت تغییرات قائم آب‌شستگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد. در این مرحله، جت خروجی از سرریز پلکانی با ایجاد گردابه‌ای ساعت‌گرد، عمق حداکثر آب‌شستگی را در مجاورت پای سرریز شکل می‌دهد و با گذشت زمان و فعالیت گردابه‌ها، ذرات رسوبی با جریان در جهت پایین‌دست حرکت می‌کنند. به تدریج با گذشت زمان و افزایش عمق گودال آب‌شستگی، نقش گردابه‌های طولی شکل گرفته در داخل گودال آب‌شستگی بر فرآیند آب‌شستگی بیشتر می‌شود و توسعه طولی گودال آب‌شستگی پر رنگ‌تر می‌گردد. با نزدیکی به محدوده زمانی پایانی آزمایش‌ها، تغییرات محسوسی در روند آب‌شستگی مشاهده نشد، گودال به حالت پایدار و تعادلی در می‌آمد به طوری که ذرات رسوبی درون گودال حالت غلتشی داشتند و به ندرت از درون گودال به سمت پایین‌دست منتقل می‌شدند.

مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که ارتفاع پشته در پایین‌دست چاله آب‌شستگی در بازه‌های زمانی ابتدایی و توسعه آب‌شستگی بیشتر

است ولی با گذشت زمان و رسیدن به مرحله تثبیت و تعادل ارتفاع آن کاهش و در جهت طولی به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند (شکل ۷).

مشاهدات آزمایشگاهی همچنین نشان داد که در برخی از آزمایش‌ها فعالیت گردابه‌ها باعث یک چرخه حفاری و پر کردن می‌شود به گونه‌ای که گردابه‌ها جریان خروجی از چاله آب‌شستگی را در طول فاز حفاری به سمت خط‌القعر چاله و در طول فاز پر کردن به سمت سطح آب هدایت می‌کنند. این موضوع را بلاچاندر و همکاران (Balachandar *et al.*, 2000) نیز گزارش داده‌اند.

به طور کلی، نصب کف‌بند در پایین‌دست سرریز سبب می‌شود جت ریزشی جریان پس از برخورد با سطح کف‌بند با زاویه‌ای ملایم نسبت به افق، به بستر رسوبی برخورد کند و گردابه‌های اصلی ایجاد کننده چاله آب‌شستگی روی بستر رسوبی را تضعیف کند. با افزایش طول کف‌بند به دلیل افزایش فاصله بین تیغه‌های ریزشی و بستر رسوبی، گردابه‌ها توانایی کمتری در انتقال رسوبات به سمت پایین‌دست دارند و ابعاد چاله آب‌شستگی کاهش بیشتری می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش طول کف‌بند و به تبع آن کاهش حجم چاله آب‌شستگی، ابعاد پشته رسوبی پایین‌دست آن که توسط رسوبات فرسایش یافته از چاله آب‌شستگی تغذیه می‌شود، کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

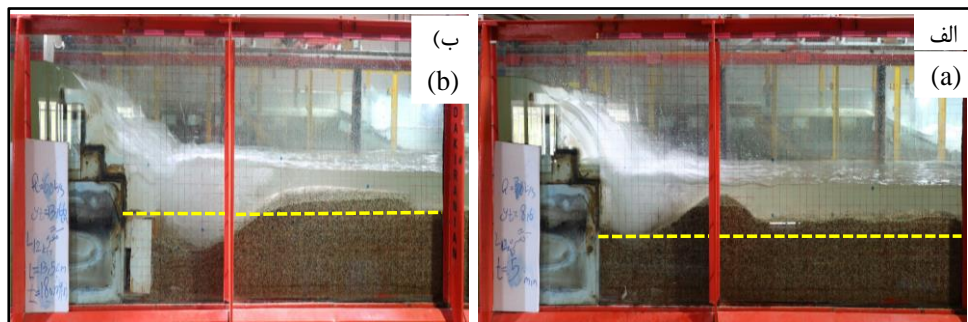


شکل ۷- نمایی از الگوی جریان، تشکیل گردابه و پشته رسوبی در پایین دست سرریز SL2LA1 برای  $y_c/h=0.54$  (الف) و  $y_c/h=0.16$  (ب) در زمان‌های نسبی: الف)  $0.13$  و ب)  $0.16$  ( $\eta = 13/6$  و  $q=0.04m^3/m.s$ )

Fig. 7. A View of flow pattern, vortex formation and sediment ridge downstream of weir SL2LA1 on relative time of: a) 0.013 and b) 0.16

رسوبی صاف نیست و به صورت ناهموار تشکیل می‌شود. با افزایش دبی، مقدر تنش برشی روی پشته رسوبی افزایش می‌یابد و پشته رسوبی با سرعت بیشتری به طرف پایین دست جابه‌جا می‌شود. در این حالت، شکل تاج پشته رسوبی به صورت هموار مشاهده گردید (شکل ۸).

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که دبی تاثیر زیادی بر شکل پشته رسوبی دارد. در دبی‌های کم، به دلیل سرعت پایین جریان روی پشته رسوبی، تنش برشی شکل گرفته روی پشته رسوبی توانایی چندانی برای جابه‌جایی پشته رسوبی ندارد و حرکت آن به طرف پایین دست کند است. در دبی‌های کم، شکل پشته



شکل ۸- نمایی از پشته رسوبی در پایین دست سرریز SL1:

الف)  $y_c/h=0.34$  و  $q=0.02m^3/m.s$  و  $\eta = 18.7$  و ب)  $y_c/h=0.54$  و  $q=0.04m^3/m.s$  و  $\eta = 13.6$

Fig. 8. A View of sediment ridge downstream of weir SL1 on time of:

a)  $y_c/h = 0.34$ ,  $q=0.02m^3/m.s$  and  $\eta = 18.7$  and b)  $y_c/h = 0.54$ ,  $q=0.04m^3/m.s$  and  $\eta = 13.6$

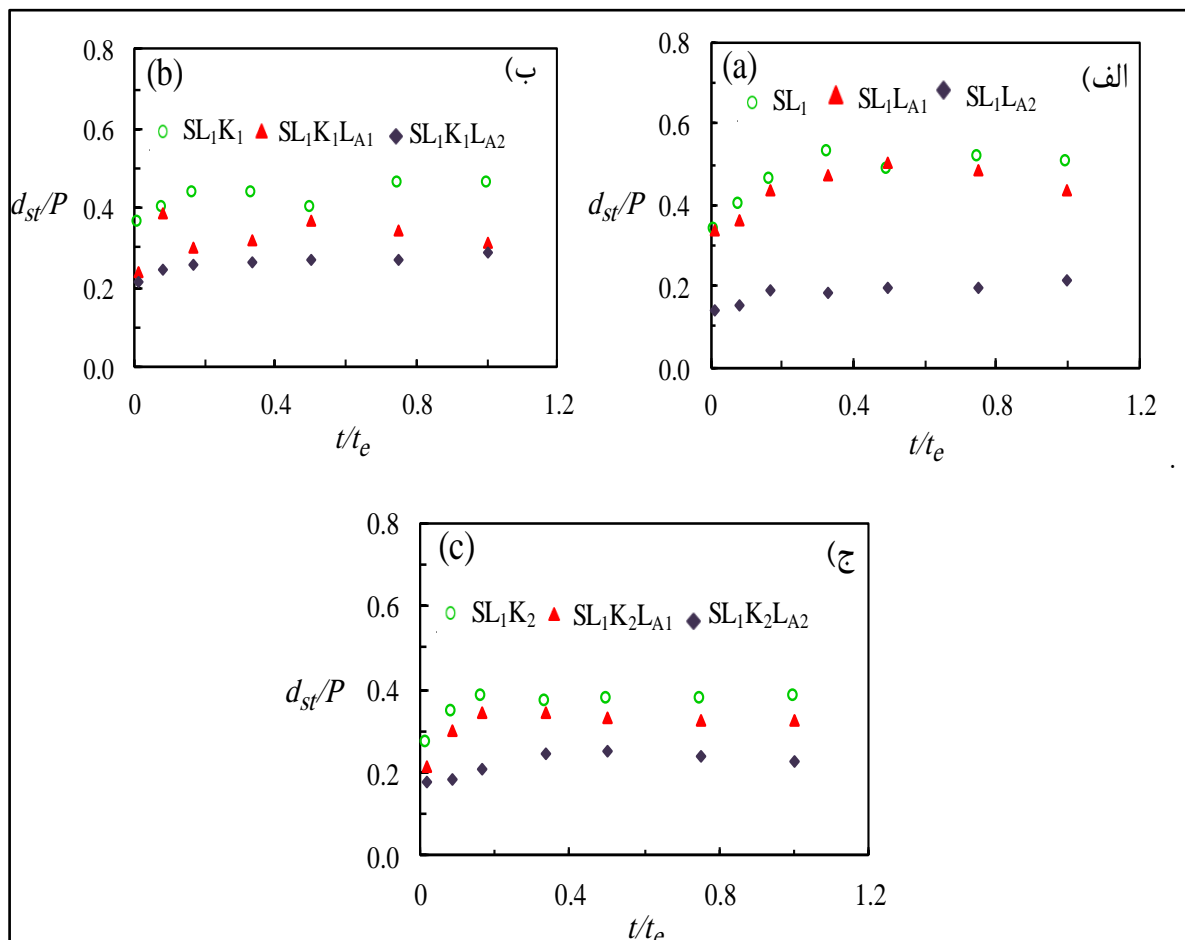
۰/۳۳ به ترتیب ۵ دقیقه و ۱۲۰ دقیقه از شروع آزمایش در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

مقایسه نتایج توسعه زمانی عمق آب‌شستگی برای دبی حداقل در زمان‌های نسبی مشخصه مذکور در سرریز پلکانی با و بدون کنگره با شیب ۱:۱ نشان داد که با نصب کفبند به طول  $L_{AI}$ ، سرریز بدون

نتایج حاصل از مقایسه توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ برای دبی حداکثر در شکل‌های ۹ و ۱۰ و مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی ( $d_{st}$ ) برای دبی حداقل و حداکثر در زمان‌های نسبی مشخصه ۰/۱۳۹ و

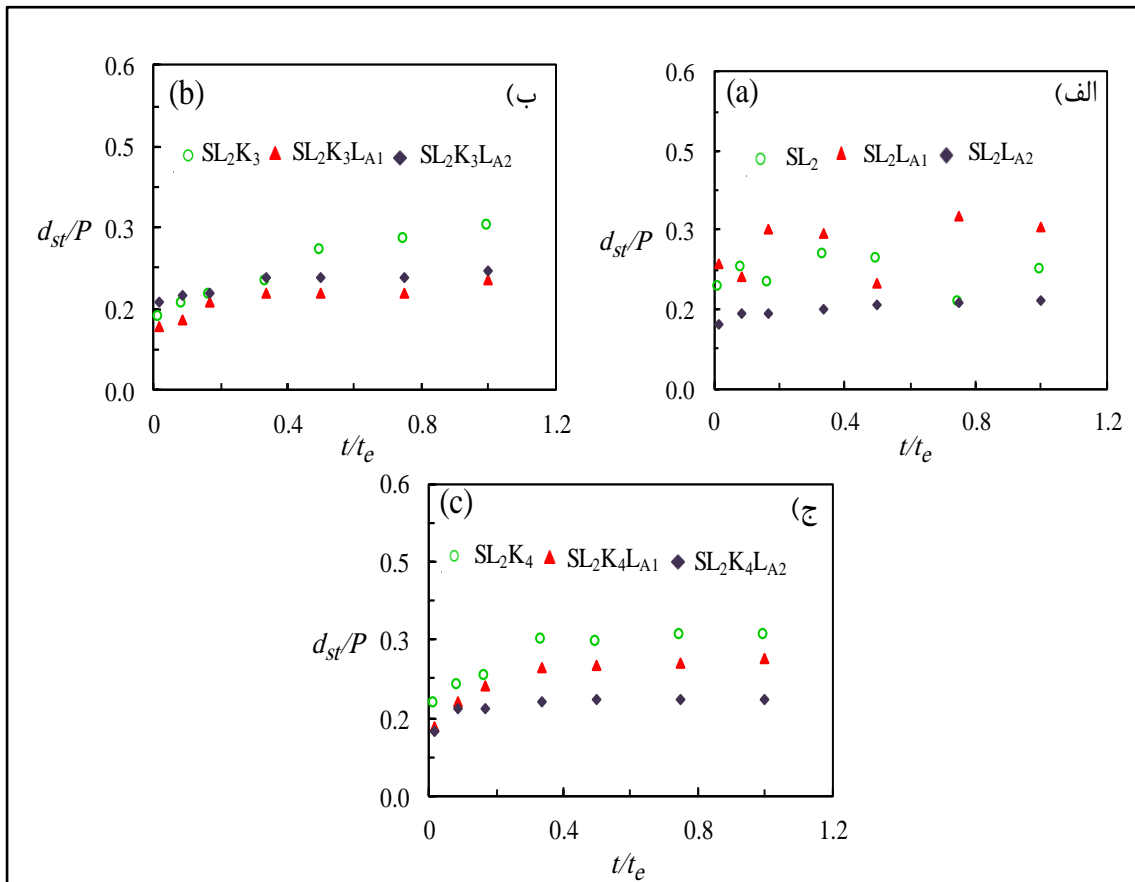
نتایج نشان داد با افزایش دبی به مقدار حداکثر، نصب کفبند به طول  $L_{A1}$  در سرریز کنگره‌ای-پلکانی ( $SL_1K_1$ ) با کاهش متوسط ۳۰ درصد در عمق لحظه‌ای آب‌شستگی، عملکرد مطلوب‌تری داشت. بررسی نتایج همچنین حاکی از آن است با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$ ، سرریز پلکانی بدون کنگره ( $SL_1$ ) با متوسط کاهش ۵۴ درصد عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، بیشترین عملکرد در کاهش آب‌شستگی را دارد.

کنگره ( $SL_1$ ) با متوسط کاهش ۵۳ درصد، در مقایسه با سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای، عملکرد بهتری داشت (شکل ۹). با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$ ، تیغه‌های ریزشی به‌طور کامل روی کفبند ریزش کرده پرش هیدرولیکی پیش از ورود به بستر رسوبی تشکیل می‌گردد. در این شرایط، سرریز پلکانی-کنگره‌ای ( $SL_1K_1$ ) با متوسط ۷۶ درصد کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، بیشترین عملکرد در کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی را دارا بود. بررسی



شکل ۹- تأثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سرریز پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در شیب ۱:۱ (الف: بدون کنگره، ب) کنگره K1 (کنگره با طول، عرض و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر  $h$  و ارتفاع  $0.5h$ ) و ج) کنگره K2 (کنگره با طول و عرض برابر  $h$ ، ارتفاع  $0.5h$  و فاصله‌های بین کنگره‌ای  $2h$ )

Fig. 9. Effect of apron installation on temporal variation of maximum scour depth at downstream stepped and stepped-labyrinth weirs with slope 1:1: a) without labyrinth, b) labyrinth K1 (length, width and internal distances equal to  $h$  and height  $0.5h$ ) and c) labyrinth K2 (length and width equal to  $h$ , height of  $0.5h$  and internal distances equal to  $2h$ )



شکل ۱۰- تأثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در شیب ۱:۲ (الف: بدون کنگره، ب: کنگره K3 (کنگره با طول و عرض برابر h و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر 2h و ارتفاع 0.75h و نصب در لبه پله) و ج: کنگره K4 (کنگره با طول و عرض برابر h و فواصل بین کنگره‌ای برابر 2h و ارتفاع 0.75h و نصب در ابتدای پله)

Fig. 10. Effect of apron installation on temporal variation of maximum scour depth at downstream stepped and stepped-labyrinth weirs with slope 1:2: a) without labyrinth, b) labyrinth K3 (length and width equal to h, internal distances equal to 2h and height 0.75h and installed at the edge of the steps) and c) labyrinth K4 (length and width equal to h, internal distances between labyrinth equal to 2h and height 0.75h and installed at the beginning of the steps)

جدول ۴- مقایسه تأثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در شیب ۱:۱ برای زمان‌های مشخصه  $t/t_e = 0.0139$  و  $t/t_e = 0.33$

Table 4- Effect of apron installation on temporal variation of maximum scour depth on downstream of stepped and stepped-labyrinth weirs with slope 1:1 for specific time of  $t/t_e = 0.0139$  and  $t/t_e = 0.33$

درصد عملکرد $L_{A2}$		درصد عملکرد $L_{A1}$		$y_e/h$	$q (m^3/m.s)$	شماره سرریز Weir number
$t/t_e = 0.33$	$t/t_e = 0.0139$	$t/t_e = 0.33$	$t/t_e = 0.0139$			
75	68	50	56	0.34	0.02	SL <sub>1</sub>
59	50	10	-	0.54	0.04	
75	78	52	52	0.34	0.02	SL <sub>1</sub> K <sub>1</sub>
47	55	26	34	0.54	0.04	
62	70	51	53	0.34	0.02	SL <sub>1</sub> K <sub>2</sub>
33	34	7	20	0.54	0.04	

جدول ۵- مقایسه تأثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سرریز پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در شیب ۱:۲ برای زمان‌های مشخصه  $t/t_e = 0.139$  و  $t/t_e = 0.33$

Table 5- Effect of apron installation on temporal variation of maximum scour depth on downstream of stepped and stepped-labyrinth weirs with slope 1:2 for specific time of  $t/t_e=0.0139$  and  $t/t_e=0.33$

درصد عملکرد $L_{A2}$		درصد عملکرد $L_{A1}$		$y_c/h$	$q (m^3/m.s)$	شماره سرریز Weir number
$t/t_e=0.33$	$t/t_e=0.0139$	$t/t_e=0.33$	$t/t_e=0.0139$			
53	73	-	-	0.34	0.02	SL <sub>2</sub>
39	29	-	-	0.54	0.04	
116	123	21	37	0.34	0.02	SL <sub>2</sub> K <sub>3</sub>
-	-	11	13	0.54	0.04	
81	72	3	38	0.34	0.02	SL <sub>2</sub> K <sub>4</sub>
39	30	17	25	0.54	0.04	

ج) بررسی تأثیر نصب کفبند بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای

مقایسه نتایج تأثیر نصب کفبند با طول‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سرریز پلکانی و پلکانی کنگره‌ای با شیب ۱:۱ نسبت به حالت بدون کفبند آن ( $SL_1K_1$ ,  $SL_1$ ) و  $SL_1K_2$  در جدول (۶) آورده شده است. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که در شرایط بدون کنگره، نصب کفبندهای  $L_{A1}$  ( $P$ ) و  $L_{A2}$  ( $P$ ) مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل  $q=0.102 m^3/m.s$ ,  $y_c/h=0.134$  و  $q=0.104 m^3/m.s$  ( $\eta=11/7$ ) تا حداکثر  $q=0.104 m^3/m.s$  ( $\eta=13/6$  و  $y_c/h=0.154$ ) و ۳۸ و ۶۹ درصد کاهش می‌دهد.

مقایسه نتایج همچنین نشان داد که در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_1K_1$  (کنگره با طول، عرض و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر  $h$  و ارتفاع  $0.15h$ )،

مقایسه نتایج توسعه زمانی عمق حداکثر آب‌شستگی برای دبی حداقل در زمان‌های نسبی مشخصه مذکور در سرریز پلکانی با و بدون کنگره با شیب ۱:۲ نشان داد که با نصب کفبند به طول  $L_{A1}$ ، سرریز پلکانی-کنگره‌ای ( $SL_2K_3$ ) با متوسط کاهش ۲۹ درصد بهترین عملکرد را دارد (شکل ۱۰). با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$  و شکل‌گیری بخش عمده پرش هیدرولیکی و گردابه‌های آن در طول کفبند، سرریز پلکانی-کنگره‌ای ( $SL_2K_3$ ) با متوسط ۱۲۰ درصد کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، بیشترین عملکرد در کاهش آب‌شستگی را داراست. بررسی نتایج نشان داد در دبی حداکثر، با نصب کفبند به طول  $L_{A1}$  سرریز پلکانی-کنگره‌ای ( $SL_2K_4$ ) با متوسط ۲۱ درصد کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، بیشترین عملکرد را در کاهش آب‌شستگی دارد.

همچنین، سرریز پلکانی-کنگره‌ای مذکور در کفبند با طول  $L_{A2}$ ، نیز با متوسط کاهش ۳۴ درصد عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، مطلوب‌ترین عملکرد را داشت.



الگوی مناسب زاویه جت خروجی از سرریز به بستر رسوبی، شرایطی ایجاد می‌شود که کمترین مقدار آبشستگی رخ دهد (شکل ۱۲).

مقایسه نتایج تأثیر نصب کنگره با هندسه‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ در شرایط یکسان طول کفبند در شکل (۱۱) ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در شرایط یکسان طول کفبند  $L_{A1}$ ، اعمال کنگره با هندسه  $K_1$  (کنگره با طول، عرض و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر  $h$  و ارتفاع  $0.5h$ )، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی را نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_1L_{A1}$ ، در دبی حداقل، ۲۴ درصد افزایش می‌دهد ولی با افزایش دبی به مقدار حداکثر، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی ۲۶ درصد کم می‌شود. مقایسه نتایج نشان همچنین می‌دهد که با تغییر فاصله‌های بین کنگره‌ها از  $h$  به  $2h$  در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_1K_2L_{A1}$  (کنگره با طول و عرض برابر  $h$  ارتفاع  $0.5h$  و فواصل بین کنگره‌ای  $2h$ )، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_1L_{A1}$ ، در دبی حداقل، ۲۴ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش دبی جریان عملکرد کنگره‌ها در کاهش آبشستگی بهبود یافته و در دبی حداکثر، مقدار عمق حداکثر نهایی ۳۲ درصد کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج حاکی از آن است که با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$ ، اعمال کنگره با هندسه  $K_1$  باعث می‌شود مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی

نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_1L_{A2}$ ، در دبی حداقل، ۸ درصد کاهش یابد ولی در دبی حداکثر عملکرد کنگره‌ها کاهش پیدا می‌کند و باعث افزایش

نصب کفبند با طول  $L_{A1}$  ( $\frac{1}{3}P$ ) مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دبی حداقل ۱۶ درصد کاهش می‌دهد ولی در دبی حداکثر، نصب کفبند مذکور تأثیری بر کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی ندارد. با افزایش طول کفبند به  $\frac{2}{3}P$  مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی در سرریز پلکانی-کنگره‌ای با هندسه مذکور، در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند  $(SL_1K_1)$  به ترتیب ۶۱ و ۱۹ درصد کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج نشان می‌دهد با تغییر فاصله‌های بین کنگره‌ها از  $h$  به  $2h$  در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_1K_2$  (کنگره با طول و عرض برابر  $h$  ارتفاع  $0.5h$  و فاصله‌های بین کنگره‌ای  $2h$ )، نصب کفبند با طول  $L_{A1}$  ( $\frac{1}{3}P$ ) مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر، به ترتیب ۳۶ و ۹ درصد نسبت به سرریز بدون کفبند  $(SL_1K_2)$  کم می‌کند. با تغییر طول کفبند  $\frac{1}{3}P$  به  $\frac{2}{3}P$  در سرریز مذکور، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند  $(SL_1K_2)$  به ترتیب ۶۷ و ۳۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سرریزهای  $SL_1L_{A2}$  و  $SL_1K_2L_{A2}$  عملکرد مطلوب‌تری در کاهش آبشستگی دارند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در کفبند با طول  $\frac{2}{3}P$ ، جت ریزشی خروجی از سرریز روی کفبند وارد و در نتیجه گردابه چرخشی اصلی تشکیل دهنده آبشستگی در این ناحیه ایجاد می‌شود. در نتیجه، با نصب کنگره، به دلیل تداخل

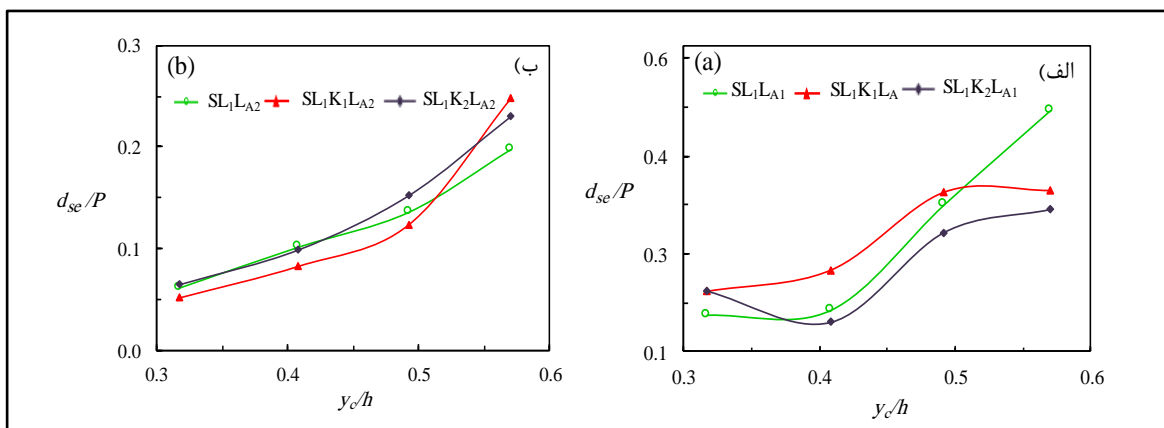
بیشتر تیغه‌های ریزشی در بین کنگره‌ها در سرریز پلکانی-کنگره‌ای، انرژی و سرعت جریان جت خروجی بیشتر کاهش می‌یابد. علاوه بر این با ایجاد

مقدار عمق آب‌شستگی به مقدار ۱۹ درصد می‌شود. تغییر فاصله‌های بین کنگرها از  $h$  به  $2h$  در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_1K_2L_{A2}$  عملکرد مثبتی در کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_1L_{A2}$  داشت. مشاهدات آزمایشگاهی در شیب ۱:۱ حاکی از آن است که در شرایط یکسان طول کفبند، با افزایش دبی جریان و تماس بیشتر جریان با سطوح پلکان‌ها و کنگره‌ها، استهلاک انرژی بیشتری رخ می‌دهد و نقشی که طول کفبند  $\frac{1}{3}P$  در کاهش اثر جت ریزشی از پله آخر دارد افزایش می‌یابد. با تغییر طول کفبند از  $P$  به  $\frac{1}{3}P$  به دلیل آنکه جریان بعد از برخورد به کفبند شتاب می‌گیرد، این اثر معکوس و روند آن کاهش می‌شود.

جدول ۶- تأثیر نصب کفبند بر راندمان تغییرات عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای با شیب ۱:۱

Table 6-. The effect of apron on the efficiency of scour depth variations of stepped and stepped-labyrinth weirs with slope 1:1

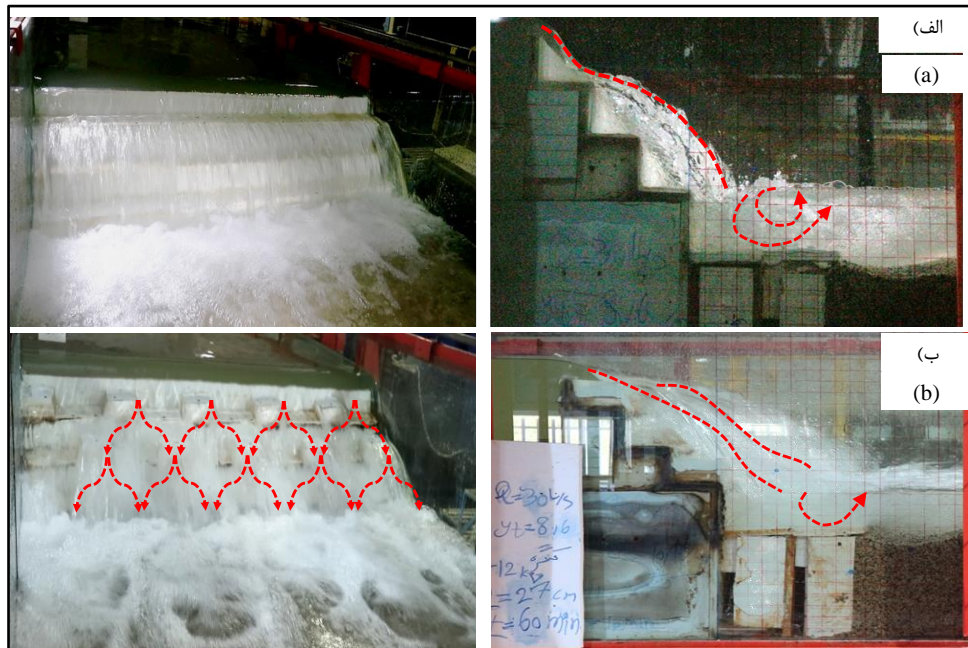
درصد عملکرد طول کفبند در سرریز $SL_1K_2L_{A2}$		درصد عملکرد طول کفبند در سرریز $SL_1K_1L_{A2}$		درصد عملکرد طول کفبند در سرریز $SL_1L_{A2}$		$\eta$	$y_e/h$	$q (m^3/m.s)$
$L_{A2}$	$L_{A1}$	$L_{A2}$	$L_{A1}$	$L_{A2}$	$L_{A1}$			
67	36	61	16	76	62	18.7	0.34	0.02
45	48	55	12	57	45	16.5	0.41	0.026
47	12	51	-	65	28	14.9	0.48	0.033
33	9	19	-	62	15	13.6	0.54	0.04



شکل ۱۱- تأثیر نصب کنگره بر سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ بر تغییرات عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در شرایط یکسان طول کفبند:

الف) کفبند  $LA_1 (\frac{1}{3}P)$  و ب) کفبند  $LA_2 (\frac{2}{3}P)$

Fig. 11. The effect of instalation of labyrinth on stepped weirs with slope of 1:1 on variation of the equilibrium scour depth for: a) apron  $LA_1 (\frac{1}{3}P)$  and b) apron  $LA_2 (\frac{2}{3}P)$



شکل ۱۲- نمایی از الگوی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با و بدون کنگره در شیب ۱:۱

با  $y_c/h = 0.34$  ( $q = 0.02 \text{ m}^3/\text{m.s}$  و  $\eta = 18.7$ ): الف) SL1LA2 و ب) SL1K2LA2

Fig. 12. A View of flow pattern on stepped weir with and without labyrinth with slope 1:1 for  $y_c/h = 0.34$  ( $q=0.02 \text{ m}^3/\text{m.s}$  and  $\eta=18.7$ ): a) SL1LA2 and b) SL1K2LA2

آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند ( $SL_2K_3$ ) به ترتیب ۱۷ و ۱۸ درصد کاهش می‌دهد. با تغییر طول کفبند از  $\frac{1}{3}P$  به  $\frac{2}{3}P$  مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی سرریز پلکانی-کنگره‌ای با هندسه مذکور، در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند ( $SL_2K_3$ ) به ترتیب ۸۱ و ۳۲ درصد کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج حاکی از آن است که با تغییر موقعیت کارگذاری کنگرها از انتها به ابتدای پله در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_2K_4$  (کنگره با طول، عرض برابر  $h$  و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر  $2h$  و ارتفاع  $0.175h$ )، نصب کفبند با طول  $L_{A1}$  مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند ( $SL_2K_4$ ) به ترتیب ۱۴ و ۱۰ درصد کم می‌کند و با

در جدول ۷ تأثیر نصب کفبند با طول‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای با شیب ۱:۲ نسبت به حالت بدون کفبند آن ( $SL_2$ )، نتایج حاکی از آن است در شرایط بدون کنگره نصب کفبند  $L_{A1}$  ( $\frac{1}{3}P$ ) و  $L_{A2}$  ( $\frac{2}{3}P$ )، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل

حداکثر ( $\eta = 18.7$  و  $y_c/h = 0.34$ ،  $q = 0.02 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ) تا

حداکثر ( $\eta = 13.6$  و  $y_c/h = 0.54$ ،  $q = 0.04 \text{ m}^3/\text{m.s}$ )

به ترتیب به‌طور متوسط ۱۰ و ۴۸ درصد کاهش می‌دهد.

مقایسه نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_2K_3$  (کنگره با طول، عرض برابر  $h$  و فواصل بین کنگره‌ای برابر  $2h$  و ارتفاع  $0.175h$ )، نصب کفبند با طول  $L_{A1}$  مقدار عمق حداکثر نهایی

و تقویت را در میان کنگره‌ها خواهند داشت. در نتیجه، کنگره‌ای کردن سرریز در این شیب تاثیر زیادی بر کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی ندارد. از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سرریز  $SL_2K_3LA_2$  به علت کارگذاری کنگره در ابتدای پله که باعث شکستن جت جریان می‌شود و همچنین به دلیل طول کفبند بزرگ‌تر، عملکرد به نسبت بهتری در کنترل آبشستگی در بین سرریزهای مورد بررسی داشته‌است (شکل ۱۴).

افزایش طول کفبند به  $P$  مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دی‌های حداقل تا حداکثر نسبت سرریز بدون کفبند ( $SL_2K_4$ ) به ترتیب ۶۴ و ۳۸ درصد کاهش می‌یابد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در شیب ۱:۲، طولانی بودن طول پله باعث تقویت جت جریان بین کنگره‌ای می‌شود و نقشی در استهلاک انرژی نخواهد داشت به گونه‌ای که جریان‌های ریزشی پس از برخورد با هر پله، موقعیت مناسب برای شتاب‌گیری

جدول ۷- تاثیر نصب کفبند بر راندمان تغییرات عمق حداکثر نهایی آبشستگی در سرریزهای پلکانی و پلکانی -کنگره‌ای با شیب ۱:۲  
Table 7- The effect of apron on the efficiency of scour depth variations of stepped and stepped-labyrinth weirs in slope 1:2

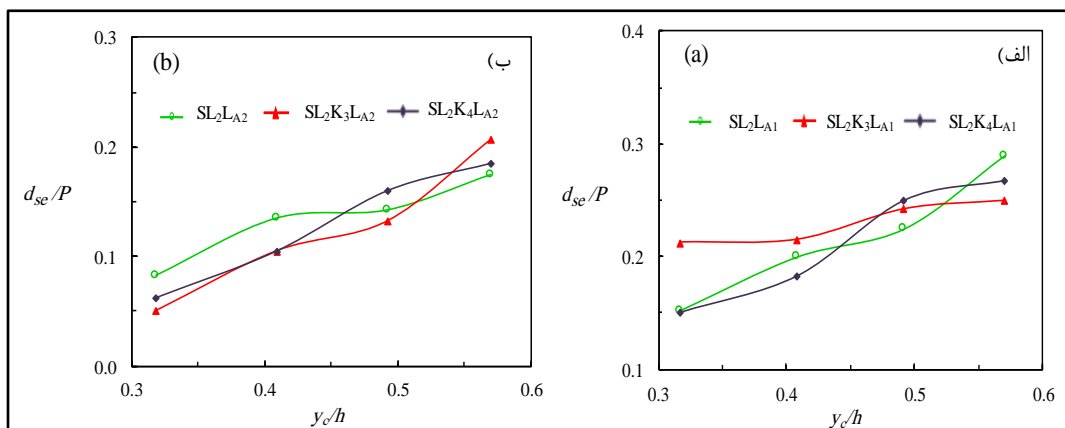
درصد عملکرد طول کفبند		درصد عملکرد طول کفبند		درصد عملکرد طول کفبند		$\eta$	$y/h$	$q (m^3/m.s)$
درصد عملکرد طول کفبند		درصد عملکرد طول کفبند		در				
کفبند در سرریز $SL_2K_4$		در سرریز $SL_2K_3$		سرریز $SL_2$				
$LA_2$	$LA_1$	$LA_2$	$LA_1$	$LA_2$	$LA_1$			
64	14	81	17	51	10	18.7	0.34	0.02
50	13	62	21	34	2	16.5	0.41	0.026
42	9	52	12	42	9	14.9	0.48	0.033
38	10	32	18	46	10	13.6	0.54	0.04

علت کارگذاری کنگره در ابتدای پله که باعث شکستن جت جریان می‌شود و همچنین به دلیل طول کفبند بزرگ‌تر، عملکرد به نسبت بهتری در کنترل آبشستگی در بین سرریزهای مورد بررسی داشت. علاوه بر این، زاویه جت خروجی از سرریز نیز نقش مهمی در تداخل عملکردی در نمودار مذکور دارد به این معنی که با حضور کنگره‌ها، محل فرود تیغه ریزشی و موقعیت آن نسبت به کفبند در دامنه‌ای از دی‌ها، نزدیک‌تر به سرریز فرود آمده به ترتیب محدوده جریان متلاطم و گردابه‌های اصلی تداخل بیشتری با کفبند داشت. با تغییر هندسه کنگره‌ها در همان دی مشابه، زاویه و محل جهت

مقایسه نتایج تاثیر نصب کنگره با هندسه‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی با شیب سرریز ۱:۲ در شرایط یکسان طول کفبند در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در شیب ۱:۲، طولانی بودن طول پله باعث تقویت جت جریان بین کنگره‌ای می‌شود به گونه‌ای که جریان‌های ریزشی پس از برخورد با هر پله، موقعیت مناسب برای شتاب‌گیری و تقویت را در میان کنگره‌ها خواهند داشت. در نتیجه، کنگره‌ای کردن سرریز در این شیب تاثیر چندانی بر کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی نداشت. از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سرریز  $SL_2K_3LA_2$  به

بررسی نتایج نشان داد با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$ ، اعمال کنگره با هندسه  $K_3$  باعث می‌شود مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_2L_{A2}$ ، در دبی حداقل ۳۹ درصد کاهش یابد ولی در دبی حداکثر عملکرد کنگره‌ها کاهش می‌یابد و باعث افزایش مقدار عمق آبشستگی به مقدار ۱۸ درصد می‌شود. بررسی نتایج حاکی از آن است که با تغییر موقعیت کارگذاری کنگره‌ها از انتها به ابتدای پله در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_2K_4L_{A2}$  مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_2L_{A2}$ ، در دبی حداقل ۲۴ درصد کاهش می‌یابد ولی با افزایش دبی به مقدار حداکثر، مقدار عمق آبشستگی به مقدار ۶ درصد بیشتر می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی در شیب ۱:۲ حاکی از آن است که در شرایط یکسان طول کفبند، نصب کفبند با طول بیشتر موجب جلوگیری از شتاب‌گیری جت روی بست‌ر رسوبی می‌شود و عملکرد به نسبت بهتری در کنترل آبشستگی دارد.

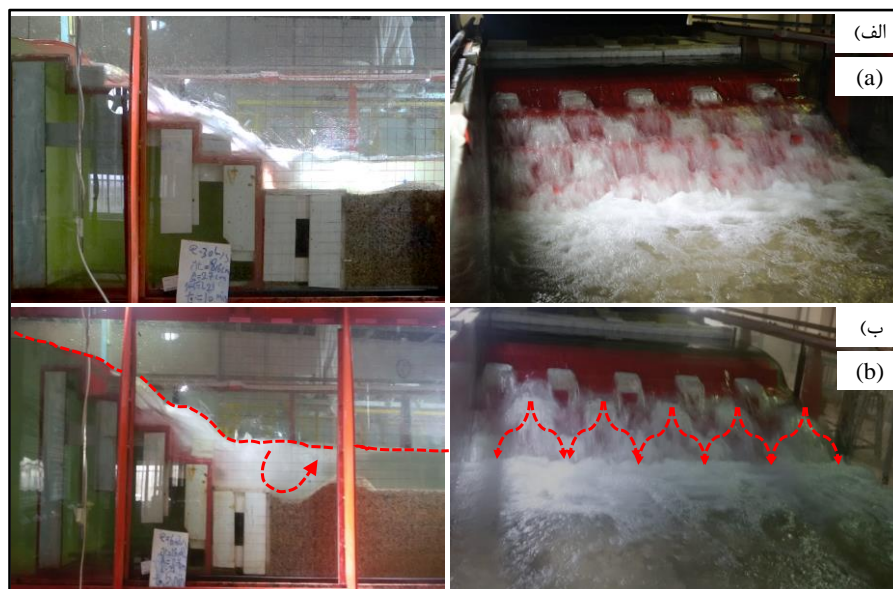
خروجی اثر منفی بر کاهش آب شستگی داشته‌است و باعث افزایش آبشستگی گردید. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در شرایط یکسان طول کفبند  $L_{A1}$ ، اعمال کنگره با هندسه  $K_3$  (کنگره با طول، عرض برابر  $h$  و فاصله‌های بین کنگره‌ای برابر  $2h$  و ارتفاع  $0.75h$ )، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی را نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_2L_{A1}$ ، در دبی حداقل ۳۹ درصد افزایش می‌دهد ولی با افزایش دبی، عملکرد کنگره‌ها در کاهش آبشستگی بهبود می‌یابد و در دبی حداکثر، مقدار عمق حداکثر نهایی ۱۴ درصد کم می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که با تغییر موقعیت کارگذاری کنگره‌ها از انتها به ابتدای پله در سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $SL_2K_4L_{A1}$  (کنگره با طول، عرض برابر  $h$  و فواصل بین کنگره‌ای برابر  $2h$  و ارتفاع  $0.75h$ )، مقدار عمق حداکثر نهایی آبشستگی نسبت به سرریز بدون کنگره  $SL_2L_{A1}$ ، در دبی حداقل و حداکثر به ترتیب ۲ و ۸ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- تأثیر نصب کنگره بر سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ بر تغییرات عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط یکسان طول کفبند:

الف) کفبند  $LA_1$  ( $\frac{1}{3}P$ ) و ب) کفبند  $LA_2$  ( $\frac{2}{3}P$ )

Fig. 13. The effect of instalation of labyrinth on stepped weirs with slope of 1:2 on variation of the equilibrium scour depth for: a) apron  $LA_1$  ( $\frac{1}{3}P$ ) and b) apron  $LA_2$  ( $\frac{2}{3}P$ )



شکل ۱۴- نمایی از الگوی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی-کنکره‌ای در شیب ۱:۲ (الف) SL2K3LA2 ( $q=0.02m^3/m.s$  و  $\eta=18.7$ ) و (ب) SL2K4LA1 ( $q=0.04m^3/m.s$  و  $\eta=13.6$ )

Fig. 14. A View of flow pattern on stepped-labyrinth weirs with slope 1:2: a) SL1K3LA2 ( $q=0.02m^3/m.s$  and  $\eta=18.7$ ) and b) SL1K3LA2 ( $q=0.04m^3/m.s$  and  $\eta=13.6$ )

### نتیجه‌گیری

درصد نسبت به شرایط بدون کنگره و کفبند کم می‌شود. بررسی نتایج حاکی از آن است که با افزایش طول کفبند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی به‌طور متوسط در سرریزهای SL<sub>1</sub>LA<sub>2</sub>، SL<sub>1</sub>K<sub>1</sub>LA<sub>2</sub> و SL<sub>1</sub>K<sub>2</sub>LA<sub>2</sub> بین ۶۳ تا ۶۵ درصد نسبت به شرایط بدون کنگره و کفبند کاهش می‌یابد. بنابراین، در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱، نصب کفبند با طول دو سوم ارتفاع سرریز، ایجاد کنگره با ارتفاع برابر با نصف ارتفاع پلکان‌های سرریز و طول، عرض و فاصله کارگذاری برابر با ارتفاع پلکان‌ها، در دامنه عمق‌های نسبی ( $v_c/h$ ) کمتر از ۰/۵ مناسب‌ترین عملکرد را دارد و منجر به کاهش عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی ( $d_{se}/P$ ) به کمتر از ۰/۱ می‌شود.

در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ نصب کفبند با طول یک سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در سرریزهای با و بدون کنگره

یکی از موضوع‌های مهم در رودخانه‌ها، جلوگیری از پایین افتادن تراز بستر است. برای این کار از سازه‌های مختلفی استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای اشاره کرد. در این تحقیق، تاثیر توام نصب کنگره با ابعاد متفاوت بر سرریز پلکانی با شیب‌های کارگذاری پلکان ۱:۱ و ۱:۲ و ایجاد کفبند با طول‌های مختلف در پایین‌دست آن بر تغییرات عمق آب‌شستگی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد.

مقایسه نتایج عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ نشان داد با نصب کفبند به طول یک سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی به‌طور متوسط ۳۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، در شرایط مشابه و نصب کنگره با ابعاد مختلف در سرریزهای SL<sub>1</sub>K<sub>1</sub>LA<sub>1</sub> و SL<sub>1</sub>K<sub>2</sub>LA<sub>1</sub> عمق حداکثر نهایی به ترتیب ۳۴ و ۴۵

کفبند به طول یک سوم ارتفاع سرریز، سرریزهای  $SL_2K_4L_{A1}$  و  $SL_1K_1L_{A1}$  به ترتیب با ۵۰ و ۳۴ درصد بیشترین و کمترین عملکرد را در کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی نسبت به سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ دارند.

با افزایش طول کفبند به دو سوم ارتفاع سرریز، سرریزهای  $SL_2K_3L_{A2}$  و  $SL_1K_2L_{A2}$  به ترتیب با ۷۲ و ۶۳ درصد کاهش عمق آبشستگی، بیشترین و کمترین عملکرد را نسبت به سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ دارند. اگرچه سرریزهای نصب کف بند و ایجاد کنگره پلکانی با شیب ۱:۲ تاثیر بیشتری بر کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی داشت، ولی با نصب کنگره روی سرریزهای پلکانی با شیب ۱:۱ نیز عملکرد مطلوبی ایجاد کرد. لازم است یادآوری شود نتایج ارائه شده در محدوده تناسب ابعاد هندسی و تعداد پلکان‌های سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق قابلیت تعمیم دارند.

$SL_2L_{A1}$ ،  $SL_2K_3L_{A1}$  و  $SL_2K_4L_{A1}$  به ترتیب ۸، ۱ و ۱۰ درصد کاهش داد. با افزایش طول کفبند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی بین ۴۴ تا ۵۰ درصد کاهش یافت. بنابراین، در سرریز پلکانی با شیب مذکور، نصب کفبند با طول دو سوم ارتفاع سرریز و ایجاد کنگره با ارتفاع برابر با دو سوم ارتفاع پلکان‌های سرریز، طول و عرض برابر با ارتفاع پلکان‌ها و نصب آن با فاصله کارگذاری دو برابر ارتفاع پلکان‌ها که به صورت هم‌لبه با وجه پایین‌دست پلکان‌های سرریز نصب شده‌اند، در دامنه عمق‌های نسبی ( $y_c/h$ ) کمتر از ۰/۵ عملکرد مطلوبی داشته محدود عمق نسبی حداکثر نهایی آبشستگی ( $d_{se}/P$ ) به مقدار کمتر از ۰/۱ رساند.

مقایسه نتایج تغییرات عمق حداکثر نهایی آبشستگی نشان داد از میان سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره ای با شیب‌های ۱:۱ به ۱:۲ با نصب

## مراجع

- Ali, H. M., El Gendy, M. M., Mirdan, A. M. H., Ali, A. A. M., and Abdelhaleem, F. S. F. (2014). Minimizing downstream scour due to submerged hydraulic jump using corrugated aprons. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4), 1059-1069.
- Aminpour, Y. and Farhoudi, J. (2017). Similarity of Local Scour Profiles Downstream of Stepped Spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 15(5), 763-74.
- Balachandar, R., Kells, J. A., and Thiessen, R. J. (2000). The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(1), 138-150
- CBIP. (1989). River behavior management and training, CBIP Rep, Central Board Irrigation power, New Dehli, India.
- Chamani, M. R., and Rajaratnam, N. (1994). Jet flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(2), 254-259.
- Chanson, H. 2002. The hydraulics of stepped chute and spillways. Blakma ed., ISBN 90 5809352 2.
- Chinnarasri, C., and Wongwises, S. (2006). Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(1), 70-76.
- Dey, S., & Raikar, R. V. (2007). Scour below a high vertical drop. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), 564-568.
- Dey, S., and Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 246-257.

- Dey, S., and Westrich, B. (2003). Hydraulics of submerged jet subject to change in cohesive bed geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 44-53
- Esmaeili Varaki, M., Mahmoudi Kurdistani, S., and Noormohammadi, G. (2021). Scour morphology downstream of submerged block ramps. *Journal of Applied Water Engineering and Research* 10.1080/23249676.2021.1908918.
- Kazempour Larsari, Z., Esmaeili Varaki, M., and Malekpour, A. (2019). Laboratory Study of Scour Downstream of Stepped-labyrinth Weirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(6), 1227-1241.
- Kells, J. A., Balachandar, R., and Hagel, K. P. (2001). Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 440-451.
- Keshavarz Eskandari, M., & Esmaeili-Varaki, M. (2019). Experimental investigation of energy dissipation over stepped-Labyrinth weirs. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20(74), 59-74.
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of spillways and energy Dissipaters*. Marcel Dekker, New York.
- Nik Hassan, N. M. K., and Narayanan, R. (1985). Local scour downstream of an apron. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(11), 1371-1384.
- Pagliara, S., and Palermo, M. (2013). Rock grade control structures and stepped gabion weirs: Scour analysis and flow features. *Acta Geophysica*, 61(1), 126-150.
- Peyras, L. A., Royet, P., and Degoutte, G. (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of hydraulic Engineering*, 118(5), 707-717.
- Salmasi, F., Farsadizade, D., and Mohit, H. (2011). Experimental Evaluation of Energy Dissipation over Gabion Stepped Spillway. *Water and Soil Science*, 21(4), 152-164.
- Sarkar, A., and Dey, S. (2005). Scour downstream of aprons caused by sluices. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 158(2): 55-64.
- Scurlock, S. M., Thornton, C. I., and Abt, S. R. (2012). Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 167-176
- Sorensen, R. M. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.
- Subramanya, K. (1986). *Flow in Open Channel*. Second Edition, Tata McGraw-Hill New Delhi.
- Tuna, M. C., and Emiroglu, M. E. (2011). Scour profiles at downstream of cascades. *Scientia Iranica*, 18(3), 338-347.
- Tuna, M. C. 2012. Effect of offtake channel base angle of stepped spillway on scour hole. *IJST, Transactions of Civil Eng.* 36(C2): 239-251.
- Tuna, M. C., and Emiroglu, M. E. (2013). Effect of step geometry on local scour downstream of stepped chutes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3), 579-588.



## Experimental Investigation of Effect of Labyrinth and Apron on Local Scour Downstream of Stepped Weirs

S. Gharibi, M. Esmaeili -Varaki, S. Mahmoudi - Kurdistani and A. Malekpour

\* Corresponding Author: Associate Professor, Dept. of Water and Environmental Engineering, Caspian basin research centre, university of Guilan. Tel./Fax: +98 131 6690456; P. O. Box: 41635-1314. E-mail: esmaeili.varaki@yahoo.com

Received: 1 September 2021, Accepted: 4 December 2021

### Intorduction

Control of river bed erosion and consequently river banks is one of the important goals in river training projects. Instream grade-control structures [i.e. cross-vane, J-Hook vane, W-weir, log vane, block ramps, sills, etc.] are commonly used to stabilize the riverbed keeping the river slope in an equilibrium condition. When the steep river is wide, the mentioned instream structures are not the appropriate solutions. River engineers during the last decades, focused on local scour downstream of grade-control structures as an interesting topic for river restoration. Stepped weirs are a type of spillways that creating a nappe flow over the steps, along with a high energy dissipation, lead to a reduction of downstream scour depth. Stepped weirs also can be employed as grade-control structures in the case of wide rivers. Scour depth and energy dissipation downstream of stepped weirs depend on the flow pattern over steps which depends on the weirs slope (i.e. ratio of the height to the length of the step), number of steps, constructing material and downstream hydraulic conditions (Chanson, 2002). Due to the role of scour formed at the downstream of these structures on their safety and stability, in the present study, effect of the installation of apron on variation of scour characteristics at the downstream of stepped weirs with and without labyrinths was investigated experimentally.

### Experimental Setup and procedure

Experiments were performed for different flow conditions and weirs slopes of 1: 1 and 1: 2. The experimental measurements were conducted in the physical hydraulics modelling laboratory of the University of Guilan, Iran, in a flume with a rectangular cross-section that was 1.5 m width, 1 m depth and 12.5 m length. A centrifugal pump supplied the required flow rate up to 90 L/s. The flow discharge was measured by ultrasonic flowmeter installed on the suction pipe with an accuracy of  $\pm 0.1$  l/s. The water surface profiles were measured using a point gauge of reading accuracy of  $\pm 0.1$  mm. A downstream butterfly gate controlled the tailwater depth. In order to supply sediment particles for the sedimentary bed, sand with a uniform diameter of 2.68 mm was prepared and placed at the recess box with length of 2 m, width of 1.5 m and height of 0.30 m at downstream of weirs. In all experiments, the temporal development of the scour depth for 6 hours at different time steps was taken by a digital camera and then digitizing using *Grapher9* software. At the end of each test run, the final scour profile was measured using a Laser scanner Leica with  $\pm 1$  mm accuracy.

The stepped weirs with slope of 1:1 and 1:2 consisted of five steps made of sheet metal panels. Aprons length are 0.135 (1/3P) and 0.27 (2/3P) meters. The labyrinths geometries was based on the results of research by Kazempour et al., (2019) that had the most suitable performance on reducing scour depth, was chosen. Primarily experiments indicating that the equilibrium bed condition was reached at 6 hours' test duration. Therefore, in all experiments, measurements were followed for the mentioned period of time. For each experiment, after installing the weir, labyrinths and aprons and adjusting sedimentary bed, the flow gradually entered into the laboratory flume and the flow depth gradually was raised. After adjusting the flow discharge, by regulating the downstream butterfly gate, the desired downstream depth was obtained. For all

experiments, the temporal development of the scour depth for 6 hours at different time steps was taken by a digital camera and then digitizing using *Grapher9* software. Final scour depth at the end of tests was measured using the Laser scanner Leica.

### **Results and discussion**

Comparison of the temporal scour depth development downstream of the stepped weir with and without labyrinths at slope of 1:1 showed that for low discharge by installing apron along  $L_{A1}$ ,  $SL_1L_{A1}$  weir reduced by average reduction of 53% of temporal scour depth had the best performance in comparison with stepped-labyrinth weirs. By increasing the length of the apron to  $L_{A2}$ , the stepped-labyrinth weir  $SL_1K_1L_{A2}$  by reduction an average of 76% of temporal scour depth had the best performance on reducing the maximum temporal scour depth. The results showed that by increasing the discharge to maximum value, installation of the apron  $L_{A1}$  at downstream of the stepped-labyrinth weirs  $SL_1K_1L_{A1}$  with an average 30% reduction of the temporal maximum scour depth had the best performance. The results indicate that by increasing the apron length to  $L_{A2}$ , the  $SL_1L_{A2}$  weir with an average of 54% reduction of the maximum temporal scour depth had the highest performance.

By reduction of stepped weir to 1:2 and installing apron length of  $L_{A1}$ , stepped-labyrinth weir of  $SL_2K_3L_{A1}$  with an average reduction of 29% had the best performance. By increasing the length of the apron to  $L_{A2}$  and formation of the major part of the hydraulic jump and its vortices along the apron, the stepped-labyrinth weir of  $SL_2K_3L_{A2}$  with an average reduction of 120% reduction had the highest performance of reduction of scour depth. The results showed that the maximum flow discharge, by the installation of apron length of  $L_{A1}$  stepped-labyrinth weirs  $SL_2K_4L_{A1}$  with an average reduction of 21% had the best performance on reduction of temporal scour depth. Also by increasing apron length to  $L_{A2}$  length, the stepped-labyrinth weirs of  $SL_2K_4L_{A2}$  had the most desirable performance with an average reduction of 34% on temporal scour depth.

### **Conclusion**

Comparison of the results of the equilibrium scour depth of the  $y_c/h$  range from 0.34 to 0.54 for stepped weir with slope of 1:1 showed that by installation of apron length of  $L_{A1}$ , the equilibrium scour depth at the downstream of  $SL_1L_{A2}$ ,  $SL_1K_1L_{A2}$  and  $SL_1K_2L_{A2}$  weirs reduced 38%, 34% and 45%, respectively, compared to  $SL_1$  weir. By increasing the apron length to  $L_{A2}$ , the equilibrium scour depth at the downstream of  $SL_1L_{A2}$ ,  $SL_1K_1L_{A2}$  and  $SL_1K_2L_{A2}$  decreased by 65, 65 and 63%, respectively in comparison with  $SL_1$ . Therefore  $SL_1L_{A2}$  and  $SL_1K_1L_{A2}$  weirs had the best performance in stepped weir with slope of 1:1.

At a stepped weir with slope of 1:2, that by installation of apron length of  $L_{A1}$  the equilibrium scour depth of  $SL_2L_{A1}$ ,  $SL_2K_3L_{A1}$  and  $SL_2K_4L_{A1}$  weirs was reduced 8, 1 and 10%, respectively, compared to  $SL_2$  weir. By increasing the apron length to  $L_{A2}$ , the equilibrium scour depth downstream of  $SL_2L_{A2}$ ,  $SL_2K_3L_{A2}$  and  $SL_2K_4L_{A2}$  weirs decreased 44, 50 and 48% on compared to  $SL_2$  weir, respectively. Therefore,  $SL_2K_3L_{A2}$  had the best performance in stepped weir with slope of 1:2.

Comparison of the results showed that among the stepped and stepped- labyrinths weirs with slopes of 1:1 to 1:2, with the installation of apron along  $L_{A1}$ ,  $SL_2K_4L_{A1}$  and  $SL_1K_1L_{A1}$  weirs with 50 and 34% reduction of scour, respectively, had high and low performance in reduction of scour depth compared to the  $SL_1$ . By increasing the apron length to  $L_{A2}$ ,  $SL_2K_3L_{A2}$  and  $SL_1K_2L_{A2}$  weirs had the highest and lowest performance compared to  $SL_1$  stepped weir with 72% and 63% reduction of scour depth, respectively.

**Keyword:** Apron, stepped-labyrinth weirs, Grade control structure, scour depth.