

Laboratory Study of Scour Downstream of Stepped-labyrinth Weirs

ZAHRA KAZEMPOUR LARSARI¹, MAHDI ESMAEILI VARAKI^{2*}, AMIR MALKEPOR³

1. MSc Student, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
 2. Associate Professor, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
 3. Assistant Professor, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
- (Received: Nov. 28, 2017- Revised: Apr. 17, 2018- Accepted: Apr. 25, 2018)

ABSTRACT

One of the important issues in rivers planning is the stabilization of erosive reaches. For this purpose, grade control structures that can be made of stone and masonry or concrete materials are used. Stepped weirs are among the grade control structures for modification of rivers bed slopes. Paying attention to the geometry of scour depth at the downstream of these structures is important in order to design structures safely and stably. In the present study, the effects of labyrinths with different geometries on the scour depth variation at downstream of the stepped weirs with slopes of 1:1, 1:2 and 1:3 were investigated experimentally. The experiments were performed for various conditions of discharge, geometry of labyrinths and tail water depths. Analyses of the results showed at the best case of labyrinth geometry for the 1:1 stepped slope, the maximum scour depth corresponding to the minimum and maximum tail water depths reduced 30.1% and 65%, respectively as compared to the flat step. By reducing the steps slope to 1:2, considered geometries of labyrinth did not have significant effect on reduction of the maximum scour depth. Further reduction of the steps slope to 1:3 at the best case of geometry reduced the maximum scour depth corresponding to the minimum and maximum tail water depths, 25.2% and 24.5% respectively, as compared to the flat step.

Key words: Grade control structures with labyrinth plan, Reduction of scour depth, Stepped weir, Tail water depth.

مطالعه‌ی آزمایشگاهی آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای

زهرا کاظم‌پور لارسی^۱، مهدی اسمعیلی ورکی^۲، امیر ملک‌پور^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان،

رشت، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۲/۱۵)

چکیده

یکی از مباحث مهم در ساماندهی رودخانه‌ها، پایدارسازی بازه‌های فرسایشی می‌باشد. برای این منظور از سازه‌های کنترل تراز بستر که می‌توانند با مصالح سنگی، بنایی و یا بتن ساخته شوند، استفاده می‌گردد. از جمله سازه‌های کنترل تراز بستر برای اصلاح شیب بستر رودخانه‌ها، سرریزهای پلکانی می‌باشد. نظر به اهمیت توجه به مقدار عمق آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه‌ها به منظور طراحی ایمن و پایدار آن‌ها، در تحقیق حاضر تأثیر ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف بر تغییرات عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی با شیب ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف دبی، هندسه کنگره‌ها و اعماق پایاب صورت پذیرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد در شیب کارگذاری پلکان‌های ۱:۱ در بهترین حالت هندسه کنگره‌ها، عمق حداکثر آب‌شستگی به طور متوسط نسبت به حالت بدون کنگره در دو عمق پایاب حداقل و حداکثر به ترتیب به میزان ۳۰/۱ و ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. با تغییر شیب کارگذاری پلکان‌ها به ۱:۲، ایجاد هندسه‌های مختلف کنگره‌ها تأثیر معنی‌داری بر کاهش عمق حداکثر آب‌شستگی نداشت. با کاهش شیب کارگذاری پلکان‌ها به ۱:۳ در بهترین هندسه، عمق حداکثر آب‌شستگی به طور متوسط نسبت به حالت بدون کنگره در دو عمق پایاب حداقل و حداکثر به ترتیب ۲۵/۲ و ۲۴/۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سرریز پلکانی، سازه‌های کنترل تراز بستر با پلان کنگره‌ای، عمق پایاب، کاهش آب‌شستگی

مقدمه

جمله مزایای احداث این سازه‌ها، تثبیت جداره و بستر آبراهه به وسیله کاهش شیب و سرعت جریان می‌باشد که در نتیجه مقدار آب‌شستگی کاهش می‌یابد. این سازه‌ها با کنترل فرسایش بستر، مانع از آسیب رسیدن به پی سازه‌های احداث شده در رودخانه‌ها می‌گردد. مهم‌ترین سازه‌های کنترل تراز بستر شامل سطوح شیب‌دار سنگی، شیب‌شکن‌های قائم و مایل، سرریزهای پلکانی، آستانه شیب‌دار، پره قلابی‌شکل، پره عرضی و سرریز W شکل می‌باشد (Dey and Raikar, 2007).

به جهت اهمیت حفاظت از رودخانه‌ها در مقابل فرسایش‌های پیش‌رونده و پایدارسازی بازه‌های آن، تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با انواع سازه‌های کنترل تراز بستر صورت گرفته و عملکرد آن‌ها در کنترل یا کاهش فرسایش بستر بررسی شده است.

سرریزهای پلکانی به جهت تنوع در جنس مصالح به کار رفته در ساخت آن و نیز الگوی‌های ویژه جریان عبوری از پلکان‌های این سرریز، از جمله سازه‌های متداول جهت اصلاح شیب بستر در بازه‌های فرسایشی در رودخانه‌ها می‌باشند (شکل ۱). سرریزهای پلکانی دارای سابقه‌ی بیش از ۳۵۰۰ سال

از جمله اهداف مهمی که در ساماندهی رودخانه‌ها دنبال می‌گردد، کنترل فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه می‌باشد. این اقدامات مستلزم تسلط کامل مهندسان هیدرولیک بر پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها است. به طور کلی آب‌شستگی پدیده‌ای است که با افزایش سرعت جریان نسبت به آستانه حرکت در بسترهای رسوبی ایجاد می‌شود. این پدیده باعث پایین افتادن تراز بستر رودخانه شده و عدم توجه به آن موجب ایجاد خسارت‌های متعددی بر سازه‌های احداث شده در آن و نیز تخریب سواحل و دیواره‌های رودخانه می‌گردد. روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش آب‌شستگی در رودخانه‌ها وجود دارد که از جمله می‌توان به پوشش سنگ‌چین، سازه‌های توری‌سنگی، آب‌شکن‌ها، صفحات مستغرق و سازه‌های کنترل تراز بستر اشاره نمود (Hoffmans and Verhij, 1997).

سازه‌های کنترل تراز بستر برای جلوگیری از توسعه آب‌شستگی و فرسایش بستر در رودخانه‌ها به کار می‌روند. از

و در دبی‌های بالا جریان سطحی مشاهده می‌گردد. Rajaratnam (1990) نتیجه گرفت که در دامنه وسیعی از شیب‌ها، انتقال از رژیم جریان ریزشی به سطحی در نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله تقریباً $0/8$ رخ می‌دهد.

Pegram *et al.* (1999) نتیجه گرفتند که مدل با مقیاس $1:20$ یا بیشتر می‌تواند به خوبی نمایانگر رفتار نمونه اصلی در سرریزهای پلکانی باشد. Ohtsu *et al.* (2001) محدوده نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی برای رژیم جریان انتقالی را بین ۱ تا $1/6$ پیشنهاد دادند. Baylar *et al.* (2003) با مطالعه آزمایشگاهی عملکرد هوادهی در سرریزهای پلکانی اظهار داشتند که سه رژیم جریان شکل گرفته روی سرریزهای پلکانی به ارتفاع پله، زاویه سرریز و دبی واحد عرض بستگی دارند به طوری که با افزایش ارتفاع پله و کاهش زاویه شوت در دبی‌های کم، رژیم جریان به حالت ریزشی متمایل می‌گردد.

Pagliara and Palermo (2013) با انجام آزمایش‌هایی نتیجه گرفتند که برای نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی بزرگ‌تر از $1/5$ ، رژیم جریان روی سرریز پلکانی ریزشی می‌باشد. این نسبت برای رژیم جریان سطحی کوچک‌تر از $1/1$ و هم‌چنین برای رژیم جریان انتقالی بین $1/1$ تا $1/5$ گزارش شد.

استفاده از گابیون به جای بتن در ساخت سرریزهای پلکانی، یکی از روش‌های متداول در پروژه‌های ساماندهی و احیاء رودخانه‌ها می‌باشد. Chinnarasri *et al.* (2008) بیان داشتند که علی‌رغم مطالعات بسیار زیاد صورت گرفته بر روی سرریزهای پلکانی، هیدرولیک جریان عبوری از میان گابیون‌ها به علت پیچیدگی الگو و نیز مقاومت جریان در آن‌ها، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. آن‌ها نشان دادند که جریان روی سرریزهای پلکانی-گابیونی به دو صورت جریان پایه از میان گابیون‌ها و جریان سطحی از روی گابیون‌ها می‌باشد.

Peyras *et al.* (1992) پیشنهاد دادند که سرریزهای پلکانی-گابیونی می‌توانند تا دبی واحد عرض $3m^3/m.s$ را بدون هیچگونه تخریبی تحمل نمایند.

Tuna and Emiroglu (2011) با بررسی نیم‌رخ‌های آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی به صورت آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که هندسه پله، سطح آب پایین‌دست و آستانه حوضچه آرامش پارامترهای بسیار مهم تأثیرگذار بر هندسه گودال آب‌شستگی بوده و با کاهش عمق پایاب، مقدار آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

Tuna (2012) اثر زاویه شیب کارگذاری سرریزهای پلکانی بر گودال آب‌شستگی در پایین‌دست آن را مورد بررسی قرار داد. مقایسه نتایج نشان داد با افزایش زاویه از 30 به 50 درجه،

بوده و شکل نیم‌رخ پلکان‌ها تأثیر زیادی بر الگوی جریان عبوری و در نتیجه نرخ اتلاف انرژی و میزان آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه‌ها دارد (Chanson, 2001; Ohtsu *et al.*, 2004).



شکل ۱. نمایی از سازه‌های کنترل تراز بستر سرریزهای پلکانی در رودخانه لیسار استان گیلان

Peyras *et al.* (1992) بیان داشتند که سرریزهای پلکانی به دلیل ارزان بودن، سازگاری با محیط زیست، ساخت آسان و پایدار بودن در برابر بارهای وارده حائز اهمیت می‌باشند. این سازه‌ها هم‌چنین دارای راندمان افت انرژی بالایی بوده که در نتیجه طول حوضچه آرامش پایین‌دست، 10 تا 30 درصد کاهش یافته و به تبع آن هزینه‌های پروژه 5 تا 10 درصد کم‌تر می‌گردد.

بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که استفاده از سرریزهای پلکانی، منجر به کاهش خطر کویتاسیون در طول سرریز و نیز بهبود کیفیت آب می‌شود (Boes and Hager, 2003).

chanson (1994) در بررسی هیدرولیک جریان ریزشی از سرریزهای پلکانی بیان داشت که رژیم جریان روی سرریزهای پلکانی می‌تواند به صورت‌های ریزشی، انتقالی و سطحی طبقه‌بندی گردد. در دبی‌های کم، جریان ریزشی می‌باشد و با افزایش دبی در محدوده دبی متوسط، رژیم جریان انتقالی شده

حداکثر عمق آبشستگی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

Pagliara and Palermo (2013) یک تحلیل جامع بر خصوصیات آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سنگی و سرریزهای پلکانی-گابیونی پیشنهاد داده و روابطی تجربی به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای هندسی اصلی آبشستگی ارائه نمودند.

Pagliara et al. (2014) در بررسی تغییرات عمق حداکثر آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر بیان داشتند که سازه‌های کنترل تراز بستر سنگی و سرریزهای پلکانی-گابیونی برای نسبت استغراق (نسبت عمق پایاب به ارتفاع پله) کوچک‌تر از ۰/۳ روند مشابهی دارند.

Zhang and Chanson (2016) نتیجه گرفتند که اندرکنش بین جریان نفوذی و جریان سطح آزاد منجر به الگوی جریان چرخشی پیچیده و مقاومت کم‌تر جریان روی سرریزهای پلکانی-گابیونی در مقایسه با سرریزهای پلکانی صاف می‌شود، در نتیجه اتلاف انرژی روی سرریزهای پلکانی صاف نسبت به گابیونی بیشتر و عمق آبشستگی در سرریزهای پلکانی صاف کم‌تر است.

Rafiei and Ajdari (2014) اثر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی را مورد مطالعه قرار دادند و بیان داشتند که حداکثر عمق آبشستگی به عمق پایاب وابسته است و با کاهش عمق پایاب، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

Aminpoor and Farhadi (2014) آبشستگی موضعی در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش در حضور سرریز پلکانی را بررسی کردند. مقایسه نتایج آبشستگی در حضور سرریز پلکانی با آبشستگی در حضور سرریز اوجی نشان داد که وجود سرریز پلکانی بین ۴۲ تا ۷۵ درصد باعث استهلاک انرژی می‌شود. این امر به جهت کاهش ابعاد حفره آبشستگی، ایمنی بیشتر سرریز پلکانی نسبت به سرریز اوجی تحت شرایط مشابه را توجیه می‌کند.

همان‌طور که بیان گردید، تاکنون تحقیقات محدودی در رابطه با استفاده از سرریزهای پلکانی به عنوان سازه کنترل تراز بستر و جنبه‌های مختلف هیدرولیکی و هندسی اثرگذار بر عمق آبشستگی در پایین‌دست این نوع از سرریزها شامل هندسه پله، عمق پایاب، زاویه کارگذاری (شیب) پلکان‌ها و دبی جریان صورت گرفته است. برای کاهش عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی و به تبع آن کاهش هزینه‌های حفاظت در مقابل آبشستگی، افزایش میزان استهلاک انرژی و کاهش سرعت جریان در انتهای سرریزهای پلکانی می‌تواند یک

راه‌کار مناسب باشد. یکی از روش‌هایی که می‌توان میزان تلاطم در تیغه‌های ریزشی جریان در سرریزها را بیشتر نمود، کنگره‌ای کردن پلکان سرریز می‌باشد که در نتیجه‌ی آن تداخل تیغه‌های ریزشی افزایش یافته و استهلاک انرژی در جریان بیشتر می‌گردد. در تحقیق حاضر اثر ایجاد کنگره در پله‌های سرریز پلکانی بر تغییرات عمق آبشستگی در پایین‌دست آن برای سه شیب سرریز ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ تحت شرایط مختلف دبی و عمق پایاب به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

مقدار آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی به پارامترهای متعددی بستگی دارد که هر کدام تأثیری خاص و متفاوت بر مکانیزم آبشستگی داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار فرسایش بستر در پایین‌دست آن می‌گردد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگه‌ای را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

(رابطه ۱)

$$f_1(U_0, U_c, t, t_e, d_{se}, d_{st}, \gamma_{up}, \gamma_c, \gamma_0, \Delta\gamma, \rho, \rho_s, g, v, d_{50}, b, h, l, x, \delta, P, N) = 0$$

که در آن، U_0 سرعت جریان در محل ریزش، U_c سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، t زمان از شروع آبشستگی، t_e زمان تعادل آبشستگی، d_{se} عمق حداکثر نهایی آبشستگی، d_{st} عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی، γ_{up} عمق جریان در بالادست سرریز، γ_t عمق پایاب، γ_0 عمق جریان در پای سرریز، γ_c عمق بحرانی، $\Delta\gamma$ اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست سرریز، ρ جرم مخصوص آب، ρ_s جرم مخصوص ذرات رسوبی، g شتاب ثقل، v لزجت سینماتیکی آب، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی، b عرض سرریز، h ارتفاع پله، l طول پله، x هندسه کنگره، δ کشش سطحی، P ارتفاع سرریز و N تعداد پلکان می‌باشد. در شکل (۲) نمایی از علائم اختصاری پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی آورده شده است. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه ۱ را می‌توان به‌صورت رابطه بی‌بعد زیر نوشت:

(رابطه ۲)

$$f_2\left(\frac{U_0}{U_c}, \frac{t}{t_e}, \frac{d_{se}}{P}, \frac{d_{st}}{P}, Fr, F_d, \frac{\gamma_{up}}{\gamma_c}, \frac{\gamma_c}{\gamma_0}, \frac{\Delta\gamma}{\gamma_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, Re, We, \frac{b}{l}, \frac{h}{l}, \frac{x}{l}, \frac{P}{h}, N\right) = 0$$

که در آن Fr عدد فرود بوده که به‌صورت $Fr = U_0 / (g\gamma_0)$ تعریف می‌شود. F_d عدد فرود ذره بوده و به‌صورت $F_d = U_0 / ((g(G_s - 1)d_{50})^{0.5})$ تعریف می‌گردد. در مبحث آبشستگی مناسب‌تر است پارامترهای ρ و ρ_s به‌صورت ترکیبی

مخزن بالادست فلوم پمپاژ شده و پس از عبور از حوضچه آرام‌کننده جریان وارد فلوم می‌گردید. به‌منظور تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی جریان را تا ۹۰ لیتر بر ثانیه تأمین نماید، استفاده گردید. برای اندازه‌گیری دبی جریان، از دبی‌سنج التراسونیک با دقت $\pm 0.1\%$ لیتر بر ثانیه استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری عمق آب در بالادست سرریز از عمق‌سنج دیجیتال با دقت $\pm 0.1\%$ میلی‌متر استفاده گردید.

سرریزهای مورد مطالعه در این تحقیق متشکل از چهار پله به عرض $1/5$ متر، ارتفاع پلکان 0.1 متر و طول پلکان به‌ترتیب 0.1 ، 0.2 و 0.3 متر متناسب با سه شیب $1:1$ ، $1:2$ و $1:3$ از جنس چوب و پلی‌وود ساخته و در فاصله $5/7$ متری از ورودی کانال نصب گردیدند.

در جدول‌های (۱) و (۲) و نیز شکل‌های (۴) تا (۶)، تصاویر و مشخصات هندسی سرریزهای مورد بررسی در شیب‌های مختلف نشان داده شده است. در شیب $1:1$ کنگره‌های مورد بررسی دارای عرض و طول 0.1 متر و ارتفاع‌های 0.05 و 0.075 متر بودند که با فواصل بین کنگره‌های 0.1 و 0.2 متر نصب شدند. در شیب $1:2$ کنگره‌های نصب شده دارای عرض و طول به‌ترتیب 0.1 و 0.2 متر، ارتفاع‌های 0.05 و 0.075 متر و فواصل بین کنگره‌های 0.1 و 0.2 متر بودند. در شیب $1:3$ روی پله اول، دو کنگره با طول، عرض و فواصل بین کنگره‌های 0.1 متر در انتها و لبه پله به‌صورت یکی در میان با ارتفاع کنگره اول و دوم به‌ترتیب 0.075 و 0.025 متر نصب گردید. همچنین علاوه بر کنگره‌های مذکور، در این شیب تأثیر نصب آستانه با ارتفاع و طول 0.05 متر و عرض $1/5$ متر بر روی پله اول و دوم مورد بررسی قرار گرفت.

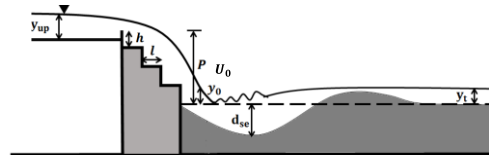
به شکل $\Delta = G_s - 1$ به‌کار برده شود که $G_s = \rho_s / \rho$ می‌باشد. در تحقیق حاضر از عدد رینولدز (Re) به علت آشفتگی بودن جریان در آزمایش‌ها صرف‌نظر گردید. از کشش سطحی و عدد وبر (We) نیز به‌علت این‌که عمق آب در لبه سرریز همیشه بیشتر از 2 سانتی‌متر است، می‌توان صرف‌نظر نمود. با توجه به اینکه تعداد پلکان‌ها در طول آزمایش‌ها ثابت بود، در نتیجه پارامتر N ثابت خواهد ماند. بنابراین رابطه ۲ به‌صورت رابطه زیر ساده می‌شود:

(رابطه ۳)

$$\frac{d_{se}}{P}, \frac{d_{st}}{P} = f_3 \left(\frac{U_0}{U_c}, \frac{t}{t_e}, Fr, \eta, \frac{y_{up}}{y_t}, \frac{y_c}{h}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{b}{l}, \frac{h}{l}, \frac{x}{l}, \frac{P}{h} \right)$$

که در آن پارامتر η به‌صورت $\eta = F_d \Delta y / y_t$ تعریف

می‌شود. در این تحقیق رابطه ۳ به‌عنوان یک رابطه پایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

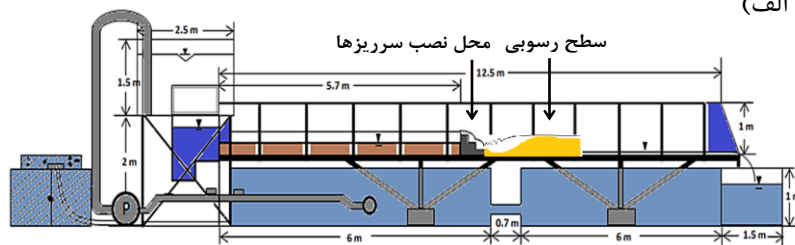


شکل ۲- نمایی از علائم اختصاری پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای پلکانی

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

به‌منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در پژوهش حاضر، مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی در گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در فلومی شیب‌پذیر با سیستم بازچرخانی و به طول 15 متر، عرض $1/5$ متر و عمق 1 متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف فلزی بود، انجام شد (شکل ۳).

جریان آب در سیستم بازچرخانی از مخزن پایین‌دست به (الف)



شکل ۳- الف) طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی و ب) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی و سرریز پلکانی-کنگره‌ای

فرسایش در حفره، هر چند اندک و نامحسوس ادامه می‌یابد و در زمان طولانی نمودار تغییرات آن به‌صورت مجانب‌وار با خط افق امتداد خواهد یافت. در تحقیق حاضر به‌منظور تعیین زمان تعادل، یک آزمایش با مدت زمان ۲۴ ساعت انجام و تغییرات عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع آزمایش، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ابعاد چاله آب‌شستگی رخ نمی‌دهد، بنابراین این زمان به‌عنوان زمان تعادل نهایی در کلیه آزمایش‌ها انتخاب گردید (شکل ۷).

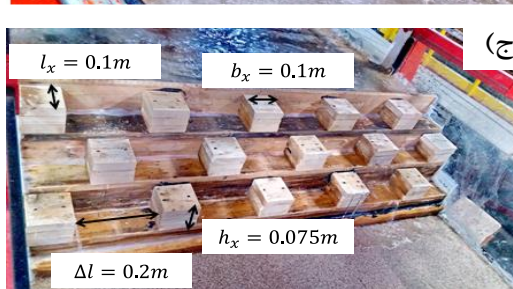
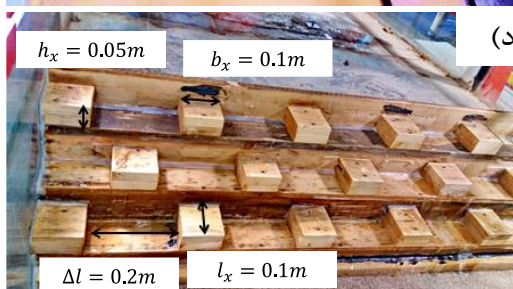
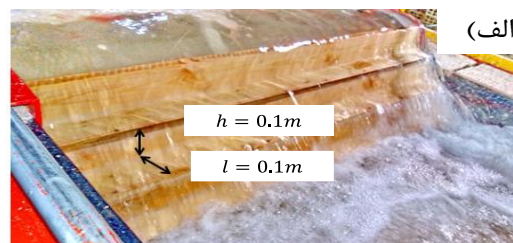
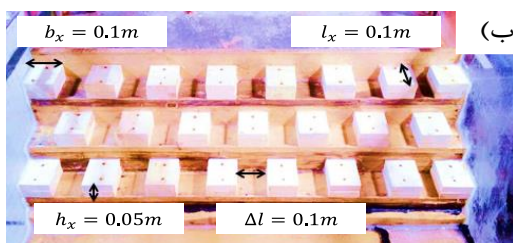
به‌منظور تأمین ذرات رسوبی بستر، ماسه معدنی در دامنه قطرهای ۰/۸۵-۱/۱۸ میلی‌متر تهیه و بعد از الک کردن قطر یکنواخت ۱ میلی‌متر به‌دست آمد و در بستر رسوبی به طول ۱/۶ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۳۲ متر در پایین‌دست سرریز پلکانی قرار داده شد. به‌طور کلی پدیده آب‌شستگی یک فرآیند زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. لازم به‌ذکر است که به‌صورت مطلق، انتهایی برای رسیدن به زمان تعادل نمی‌توان به‌دست آورد چرا که هر اندازه از زمان شروع آب‌شستگی گذشته باشد، باز هم فرآیند

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی با شیب ۱:۱ و ۱:۲

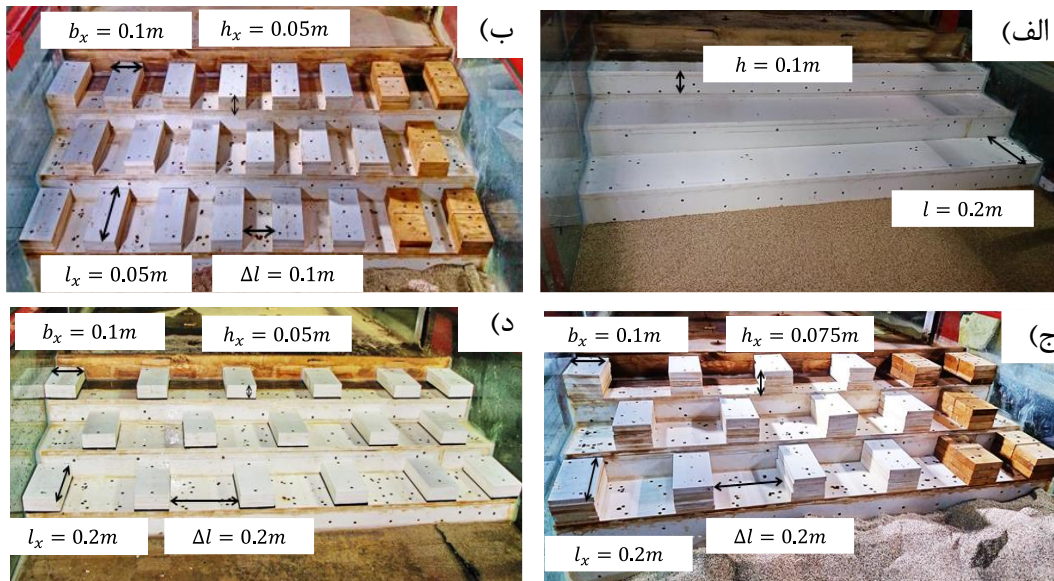
شماره سرریز	ارتفاع پله (متر) (h)	طول پله (متر) (l)	شیب (h/l)	طول کنگره (متر) (l_x)	عرض کنگره (متر) (b_x)	ارتفاع کنگره (متر) (h_x)	فاصله عرضی کنگره‌ها (متر) (Δl)
WL ₁	۰/۱	۰/۱	۱:۱	-	-	-	-
L1 ₁	۰/۱	۰/۱	۱:۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱
L2 ₁	۰/۱	۰/۱	۱:۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۲
L3 ₁	۰/۱	۰/۱	۱:۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲
WL ₂	۰/۱	۰/۲	۱:۲	-	-	-	-
L1 ₂	۰/۱	۰/۲	۱:۲	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱
L2 ₂	۰/۱	۰/۲	۱:۲	۰/۲	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۲
L3 ₂	۰/۱	۰/۲	۱:۲	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲

جدول ۲- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی با شیب ۱:۳

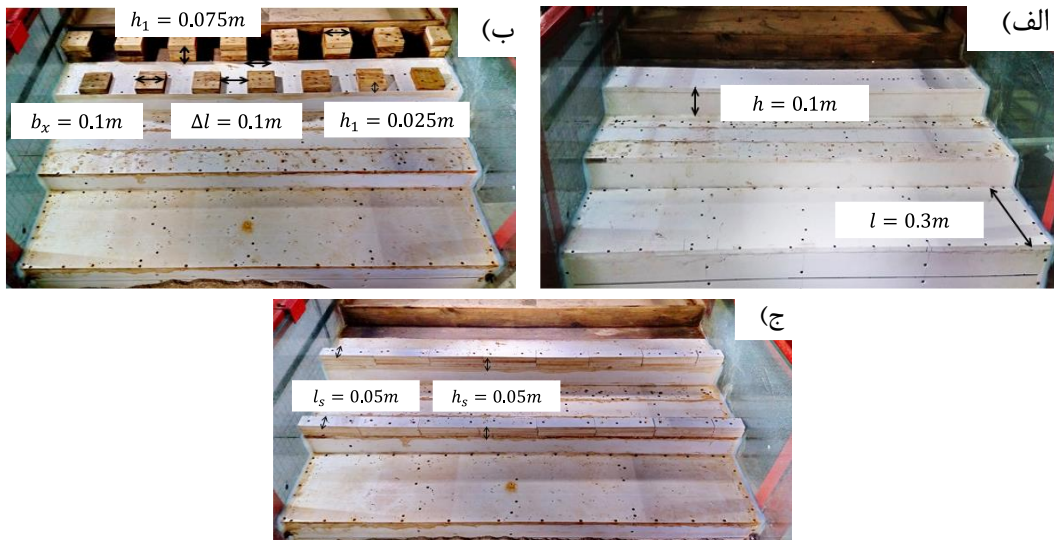
شماره سرریز	ارتفاع پله (متر) (h)	طول پله (متر) (l)	شیب (h/l)	طول کنگره (متر) (l_x)	عرض کنگره (متر) (b_x)	ارتفاع کنگره (متر) (h_x)	فاصله عرضی کنگره‌ها (متر) (Δl)	طول آستانه (متر) (l_g)	ارتفاع آستانه (متر) (h_g)	موقعیت کارگذاری
WL ₃	۰/۱	۰/۳	۱:۳	-	-	-	-	-	-	-
Lb ₃	۰/۱	۰/۳	۱:۳	۰/۱	۰/۱	$h_1=0.075$ $h_2=0.025$	۰/۱	-	-	پله اول
S	۰/۱	۰/۳	۱:۳	-	-	-	-	۰/۰۵	۰/۰۵	پله اول و دوم



شکل ۴- تصاویر و مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب ۱:۱ (الف) WL₁ (ب) L1₁ (ج) L2₁ و (د) L3₁

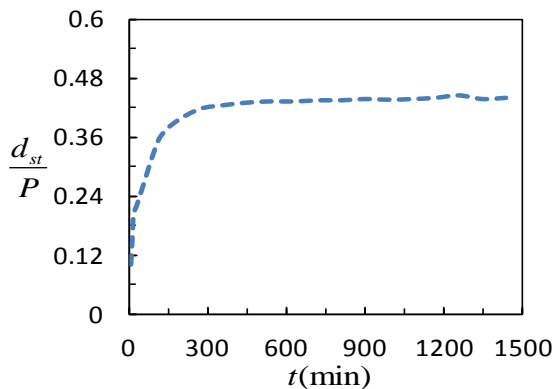


شکل ۵- تصاویر و مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب ۱:۲: (الف) WL_2 ، (ب) $L1_2$ ، (ج) $L2_2$ و (د) $L3_2$



شکل ۶- تصاویر و مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب ۱:۳: (الف) WL_3 ، (ب) Lb_3 و (ج) S

میلی‌متر که مستقر بر روی کالسنکه فلزی با قابلیت حرکات طولی و عرضی بود، برداشت گردید.



شکل ۷- نمودار توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب شستگی در سرریز پلکانی WL_1 ، $q=0.02 m^3/m.s$ و $h_c/h=0.34$ و عمق پایاب $y_c/5$

برای انجام هر آزمایش، بعد از نصب سرریز، کنگره‌های مورد نظر و آماده‌سازی بستر رسوبی، جریان به تدریج وارد فلوم آزمایشگاهی گردیده و به تدریج 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 ± 0.1 میلی‌متر تنظیم می‌گردید.

در کلیه آزمایش‌ها تغییرات عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی به مدت ۶ ساعت در گام‌های زمانی مختلف به وسیله یک دستگاه دوربین، تصویربرداری گردید و سپس با استفاده از نرم افزار Grapher9، آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای رقمی‌سازی شد. پس از اتمام هر آزمایش، ابتدا آب داخل فلوم به طور کامل تخلیه و سپس نیم‌رخ نهایی آب‌شستگی بستر رسوبی با استفاده از متر لیزری با دقت ± 1

جدول (۳) دامنه پارامترهای هیدرولیکی مورد آزمایش در این تحقیق نشان داده شده است.

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی بر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی-کنگره‌ای، در مجموع ۸۸ آزمایش صورت گرفت. در

جدول ۳- دامنه پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌ها

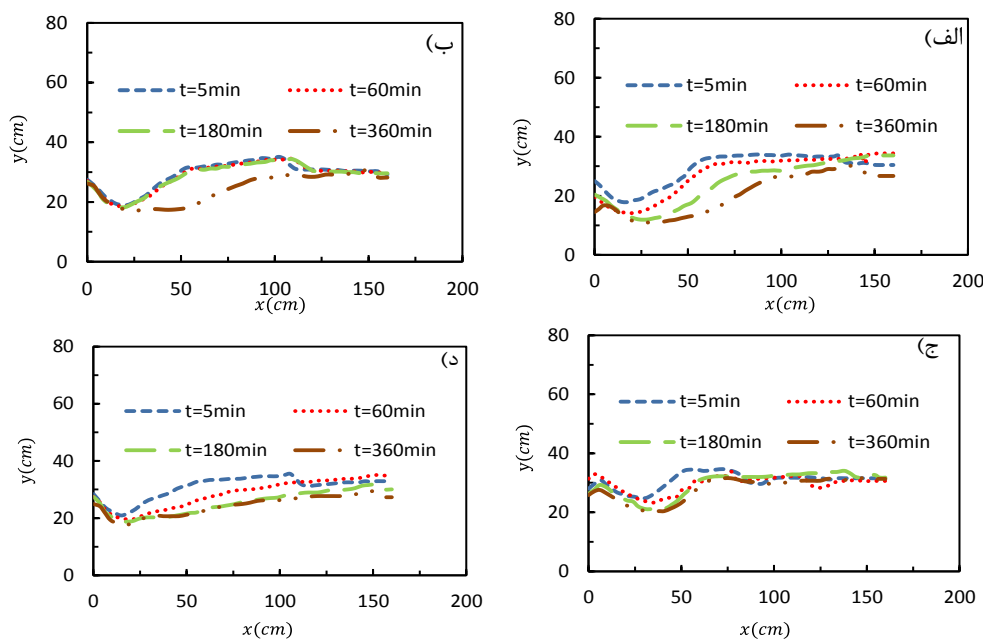
$\eta = F_d \Delta y / y_t$	عمق پایاب (y_t) (m)	نسب عمق بحرانی به ارتفاع پله (y_c/h)	دبی واحد عرض (q) ($m^3/m.s$)
۱۸/۷	$(2/5 y_c) \cdot 0.086$	۰/۳۴	۰/۰۲
۱۰	$(4 y_c) \cdot 0.137$	۰/۴۱	۰/۰۲۶
۱۶/۵	$(2/5 y_c) \cdot 0.104$	۰/۴۸	۰/۰۳۳
۸/۳	$(4 y_c) \cdot 0.167$	۰/۵۴	۰/۰۴
۱۴/۹	$(2/5 y_c) \cdot 0.112$		
۷/۲	$(4 y_c) \cdot 0.193$		
۱۳/۶	$(2/5 y_c) \cdot 0.136$		
۶/۳	$(4 y_c) \cdot 0.218$		

طولی گودال آبشستگی شکل خواهد گرفت. در دقایق انتهایی تغییرات محسوسی در روند آبشستگی مشاهده نشده و گودال به حالت پایدار و تعادلی در خواهد آمد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد شیب پلکان‌ها، هندسه کنگره‌ها، عمق پایاب و دبی جریان از مهمترین عوامل اثرگذار بر الگوی تیغه‌های ریزشی از پلکان‌ها و در نهایت زاویه برخورد تیغه ریزشی به سطح رسوبی بستر می‌باشد. در دقایق ابتدایی آزمایش‌ها، حداکثر آبشستگی در مجاورت پای سرریز رخ داده و با گذشت زمان و فعالیت گردابه‌ها، گودال آبشستگی به پایین دست رشد طولی نموده و تدریجاً گودال آبشستگی توسعه کامل نموده و تغییرات آن ناچیز می‌گردد.

نتایج و بحث

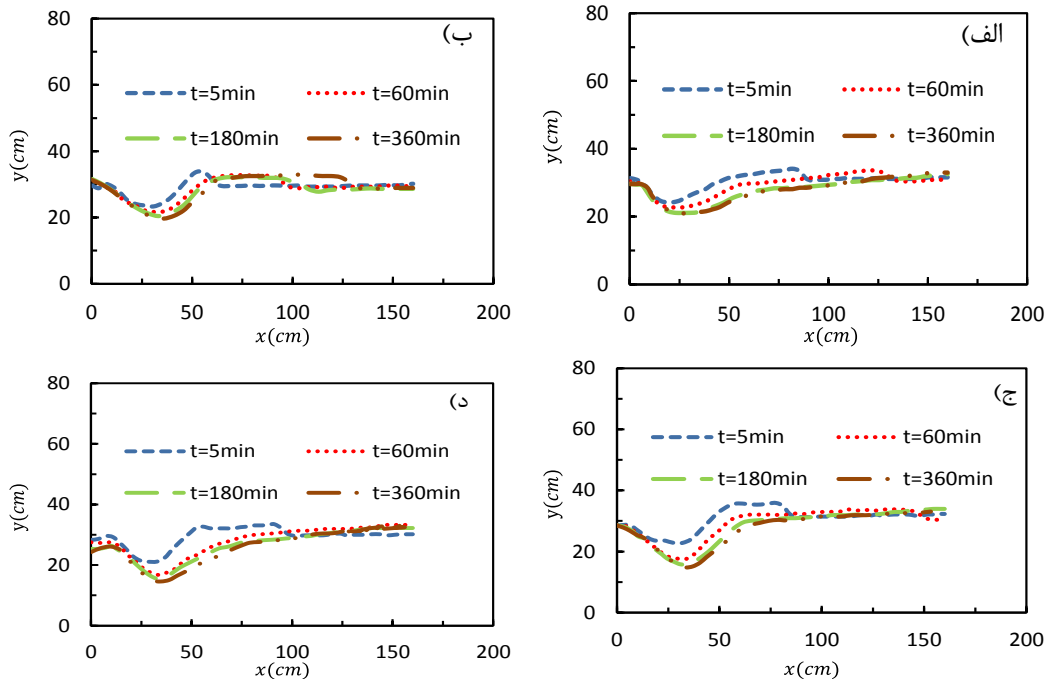
الف) بررسی توسعه زمانی نیم‌رخ آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای نیم‌رخ آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب‌های ۱:۱، ۱:۲، ۱:۳ و در عمق پایاب $2/5 y_c$ به ازای دبی‌های مختلف در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است. به طور کلی فرآیند آبشستگی از چهار مرحله‌ای آغاز، توسعه، تثبیت و تعادل (Hoffmans and Pilarczyk, 1995) تشکیل می‌شود. در مرحله آغازی و در دقایق اولیه نرخ آبشستگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد ولی با گذشت زمان در مرحله توسعه به تدریج از شدت آبشستگی کاسته و توسعه

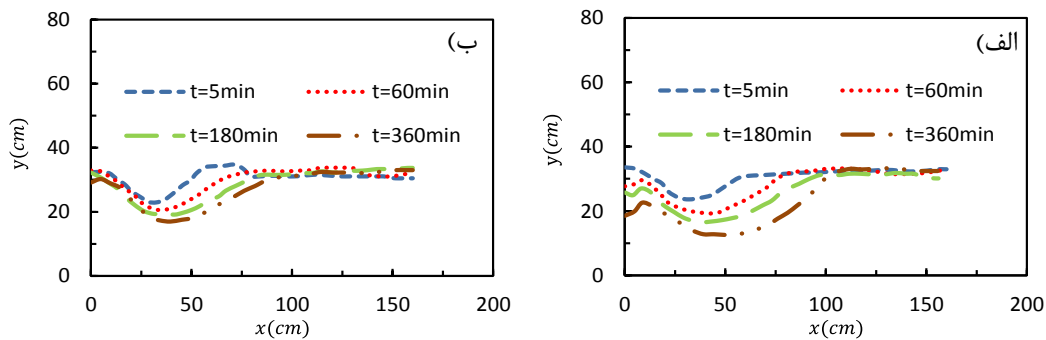


شکل ۸- نیم‌رخ لحظه‌ای آبشستگی برای سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب ۱:۱، $q = 0.033 m^3/m.s$ و $y_t = 2/5 y_c$

الف) WL_1 ، ب) $L1_1$ ، ج) $L2_1$ و د) $L3_1$



شکل ۹- نیم‌رخ لحظه‌ای آب‌شستگی برای سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب ۱:۲، $q=0.02 \text{ m}^3/\text{m.s}$ و $y_c=2/5$: الف) WL_2 ، ب) $L1_2$ ، ج) $L2_2$ و د) $L3_2$



شکل ۱۰- نیم‌رخ لحظه‌ای آب‌شستگی برای سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی در شیب ۱:۳، $q=0.026 \text{ m}^3/\text{m.s}$ و $y_c=2/5$: الف) WL_3 و ب) Lb_3

کارگذاری آن از ۰/۱ به ۰/۲ متر در سرریز $L2_1$ مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی در دبی‌های حداقل و حداکثر نسبت به سرریز بدون کنگره به‌طور متوسط ۱۴/۲ درصد در عمق پایاب $2/5 y_c$ و با افزایش عمق پایاب به $4 y_c$ ، ۶۴ درصد کاهش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد که با تغییر ارتفاع کنگره به ۰/۰۵ متر و فاصله کارگذاری آن به ۰/۲ متر در هندسه کنگره $L3_1$ مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی در دبی حداقل و حداکثر ($q=0.02 \text{ m}^3/\text{m.s}$) و $(q=0.04 \text{ m}^3/\text{m.s})$ به‌طور متوسط ۸ درصد در عمق پایاب حداقل و ۴۳ درصد در نتیجه افزایش عمق پایاب به $4 y_c$ ، کاهش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که در عمق پایاب $2/5 y_c$ ، با افزایش y_c/h از ۰/۳۴ به ۰/۵۴، عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی به‌طور متوسط نسبت به سرریز WL_1 در سرریز $L1_1$ ، ۳۰/۱ درصد، در سرریز $L2_1$ ، ۲۴/۶ درصد و در سرریز $L3_1$

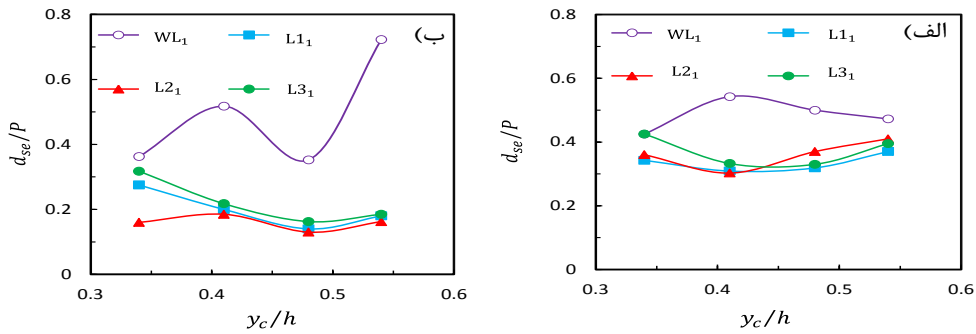
ب) بررسی تأثیر ایجاد کنگره بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی

مقایسه نتایج تأثیر ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف بر عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ نسبت به حالت بدون کنگره آن (WL_1) در شکل (۱۱) و جدول (۴) نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که با ایجاد کنگره با هندسه $L1_1$ (کنگره با طول، عرض و فواصل بین کنگره‌ای ۰/۱ متر و ارتفاع ۰/۰۵ متر)، مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی در دبی‌های حداقل ($q=0.02 \text{ m}^3/\text{m.s}$)، $y_c/h=0.34$ و $\eta=18/7$) و حداکثر ($q=0.04 \text{ m}^3/\text{m.s}$)، $y_c/h=0.54$ و $\eta=13/6$) در عمق پایاب $2/5 y_c$ ، به‌طور متوسط ۲۰/۵ درصد و با افزایش عمق پایاب به $4 y_c$ (تغییر η از ۱۰ به ۶/۳، ۴۸/۶ درصد کاهش می‌یابد.

با تغییر ارتفاع کنگره از ۰/۰۵ به ۰/۰۷۵ متر و فاصله

تیغه‌های ریزشی در بین کنگره‌ها، ترکیب آن‌ها منجر به تقویت جت‌های ریزشی بین کنگره‌ای به شدت سایر هندسه‌ها نمی‌گردد. در نتیجه این هندسه از سرریز پلکانی-کنگره‌ای با کاهش بیشتر انرژی و سرعت جریان جت خروجی و نیز ایجاد الگوی مناسب زاویه جت ریزشی به بستر رسوبی، شرایطی را ایجاد نموده است که کم‌ترین مقدار آب‌شستگی رخ دهد (شکل ۱۲).

۲۲/۱ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین در عمق پایاب حداقل $(2/5y_c)$ هندسه کنگره سرریز $L1_1$ عملکرد مطلوب‌تری در کاهش آب‌شستگی از میان هندسه کنگره‌های مورد بررسی در شیب ۱:۱ دارد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در این سرریز با فاصله بین کنگره‌های هم عرض طول پله که مقدار آن نسبت به سایر هندسه کنگره‌ها، کم‌تر می‌باشد در عین تداخل



شکل ۱۱- تأثیر ایجاد کنگره بر تغییرات عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای با شیب ۱:۱ در عمق‌های پایاب مختلف: الف) $2/5y_c$ و ب) $4y_c$

جدول ۴- تأثیر هندسه کنگره سرریزهای پلکانی مورد بررسی در شیب ۱:۱ بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی نسبت به سرریز WL_1

سرریز $L3_1$	سرریز $L2_1$	سرریز $L1_1$	$y_t(m)$	η	y_c/h	$q (m^3/m.s)$
بی تأثیر	۱۵/۳	۱۹/۴	$2/5y_c$	۱۸/۷	۰/۳۴	۰/۰۲
۱۲/۴	۵۵/۸	۲۴/۱	$4y_c$	۱۰		
۳۸/۴	۴۴/۲	۴۳	$2/5y_c$	۱۶/۵	۰/۴۱	۰/۰۲۶
۵۸	۶۴/۲	۶۱/۳	$4y_c$	۸/۳		
۳۳/۷	۲۶	۳۶/۲	$2/5y_c$	۱۴/۹	۰/۴۸	۰/۰۳۳
۵۴	۶۳/۱	۶۰/۲	$4y_c$	۷/۲		
۱۶/۴	۱۳/۲	۲۱/۷	$2/5y_c$	۱۳/۶	۰/۵۴	۰/۰۴
۷۴/۳	۷۷/۵	۷۵	$4y_c$	۶/۳		



شکل ۱۲- نمایی از الگوی جریان در عمق پایاب $2/5y_c$ و $y_c/h=0/34$ و $q=0/02m^3/m.s$ و $\eta=10$ روی سرریزهای:

الف) WL_1 و ب) $L1_1$

سایر هندسه کنگره‌ها و کاهش سرعت برخورد جت ریزشی به بستر رسوبی در نتیجه افزایش عمق پایاب، منجر به اصلاح زاویه جت ریزشی خروجی جریان به گونه‌ای می‌شود که برخورد کامل و مناسب با پله سوم را داشته و سبب اتلاف بیشتر انرژی جت ریزشی از این سرریز و در نتیجه کاهش آب شستگی می‌گردد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- الگوی جریان عبوری از سرریز پلکانی-کنگره‌ای L21 در $y_c/h=0/54$ و $q=0/04 m^3/m.s$ و $\eta=6/3$ و عمق پایاب $4y_c$

مقایسه نتایج نشان داد که با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، عمق حداکثر نهایی آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز پلکانی WL_1 ، ۵۵ درصد در سرریز پلکانی-کنگره‌ای L11، ۶۵ درصد در سرریز پلکانی-کنگره‌ای L21 و ۴۹ درصد در سرریز پلکانی-کنگره‌ای L31 کاهش یافت. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در سرریز پلکانی-کنگره‌ای L21، ارتفاع بیشتر کنگره‌های این سرریز نسبت به

سرریز بدون کنگره آن به طور متوسط ۶۵/۶ درصد در عمق پایاب حداقل افزایش یافته و با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، مقدار عمق حداکثر آب شستگی نسبت به حالت بدون کنگره ۳۱/۵ درصد کاهش می‌یابد.

بنابراین در عمق پایاب $2/5y_c$ بر خلاف انتظار به کار بردن کنگره‌ها باعث افزایش عمق آب شستگی نسبت به حالت بدون کنگره می‌گردد. به طوری که با افزایش y_c/h از ۰/۳۴ به ۰/۵۴، عمق حداکثر نهایی آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL_2 ، در سرریز L12، ۵۲/۷ درصد، در سرریز L22، ۱۴۴/۵ درصد و در سرریز L32، ۱۵۴/۸ درصد افزایش می‌یابد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که اعمال هر هندسه‌ای از کنگره در شیب ۱:۲ به علت طولانی بودن طول پله، باعث تقویت جت جریان بین کنگره‌ای شده و نقشی در استهلاك انرژی نخواهد داشت به گونه‌ای که جریان‌های ریزشی پس از برخورد با هر پله، موقعیت مناسب برای شتاب‌گیری و تقویت را در میان کنگره‌ها خواهند داشت (شکل ۱۵). از این میان سرریز L12 به علت دارا بودن فواصل بین کنگره‌ای کمتر از سایر هندسه کنگره‌ها عملکرد نسبتاً بهتری در کنترل آب شستگی در بین کنگره‌های مورد بررسی داشت.

همچنین با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، عمق حداکثر نهایی آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL_2 ، ۱۲۲/۵ درصد در سرریز L12، ۹۰/۴۵ درصد در سرریز L22 و ۱۲۶/۲

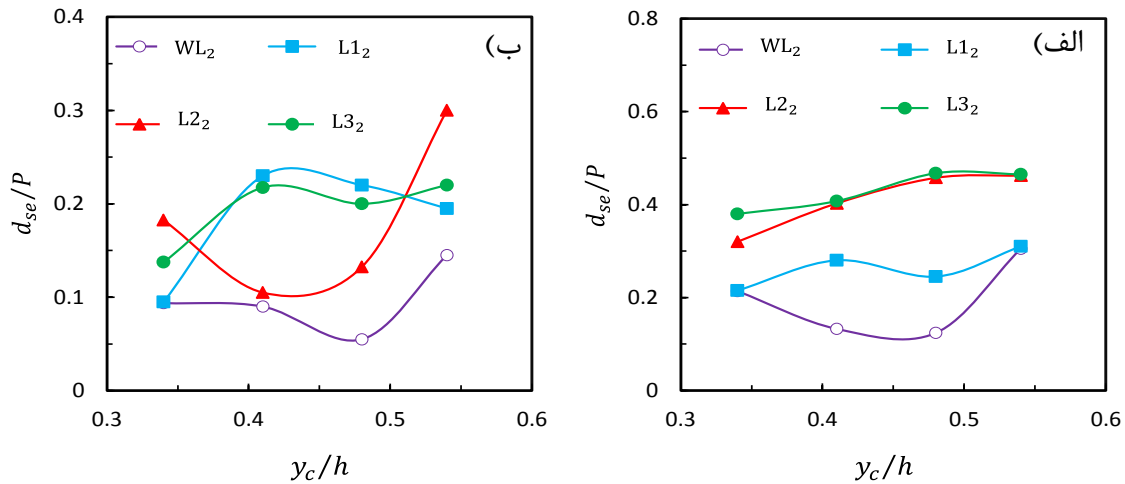
در شکل (۱۴) و جدول (۵) تأثیر ایجاد هندسه کنگره‌های مورد بررسی در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب شستگی نسبت به حالت بدون کنگره آن (WL_2) ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که ایجاد کنگره با هندسه $L12$ (کنگره با طول ۰/۲ متر، عرض و فواصل بین کنگره‌ای ۰/۱ متر و ارتفاع ۰/۰۵ متر)، بر کاهش مقدار عمق حداکثر آب شستگی در دبی‌های حداقل و حداکثر ($q=0/02 m^3/m.s$ ، $y_c/h=0/34$ و $\eta=18/7$) و حداکثر ($q=0/04 m^3/m.s$ ، $y_c/h=0/54$ و $\eta=13/6$) در عمق پایاب $2/5y_c$ نسبت به حالت بدون کنگره آن بی‌تأثیر بوده ولی با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، (تغییر η از ۱۰ به ۶/۳) مقدار عمق حداکثر آب شستگی ۴۵/۶ درصد کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج نشان داد که با تغییر ارتفاع کنگره از ۰/۰۵ به ۰/۰۷۵ متر و فاصله کارگذاری آن از ۰/۱ به ۰/۲ متر در سرریز $L22$ ، مقدار عمق حداکثر آب شستگی در دبی‌های حداقل و حداکثر نسبت به سرریز بدون کنگره بر خلاف انتظار به طور متوسط ۵۱ درصد افزایش یافته و با افزایش عمق پایاب، ۷/۸ درصد کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج نشان داد که با تغییر ارتفاع کنگره به ۰/۰۵ متر و فاصله کارگذاری آن به ۰/۲ متر در هندسه کنگره $L32$ ، مقدار عمق حداکثر آب شستگی در دبی حداقل و حداکثر ($q=0/02 m^3/m.s$) و حداکثر ($q=0/04 m^3/m.s$) نسبت به

نسبت به سرریز WL_2 نداشت. از این میان سرریز $L2_2$ با ارتفاع کنگره‌های بیشتر نسبت به سایر هندسه‌ها، عملکرد نسبتاً بهتری در بین کنگره‌های مورد بررسی در این شیب داشت.

درصد در سرریز $L3_2$ ، افزایش می‌یابد. بنابراین در عمق پایاب حداکثر نیز به کار بردن کنگره به دلیل زیاد بودن طول پله و تقویت جت جریان بین کنگره‌ای تأثیری در کاهش آب‌شستگی



شکل ۱۴- تأثیر ایجاد کنگره بر تغییرات عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی-کنگروه‌ای با شیب ۱:۲ در عمق‌های پایاب مختلف: الف) $2/5 y_c$ و ب) $4/5 y_c$



شکل ۱۵- الگوی جریان عبوری در عمق پایاب $2/5 y_c$ و $4/5 y_c$ ($q=0.33 m^3/m.s$ و $\eta=14/9$) در سرریزهای: الف) WL_2 ، ب) $L1_2$ ، ج) $L2_2$ و د) $L3_2$

جدول ۵- تأثیر هندسه کنگره سرریزهای پلکانی مورد بررسی در شیب ۱:۲ بر عمق حداکثر نهایی آب شستگی نسبت به سرریز WL₂

درصد افزایش در			$y_t(m)$	η	y_c/h	$q (m^3/m.s)$
سرریز L32	سرریز L22	سرریز L12				
۷۸/۸	۵۰/۵	بی تأثیر	$2/5y_c$	۱۸/۷	۰/۳۴	۰/۰۲
۴۸/۶	۹۷/۲	بی تأثیر	$4y_c$	۱۰	۰/۴۱	۰/۰۲۶
۲۰۷	۲۰۳	۱۱۱	$2/5y_c$	۱۶/۵	۰/۴۸	۰/۰۳۳
۱۴۱/۶	۱۶/۶	۱۵۵	$4y_c$	۸/۳	۰/۵۴	۰/۰۴
۲۸۱	۲۷۳	۱۰۰	$2/5y_c$	۱۴/۹		
۲۶۳	۱۴۱	۳۰۰	$4y_c$	۷/۲		
۵۲/۴	۵۱/۶	بی تأثیر	$2/5y_c$	۱۳/۶		
۵۱/۷	۱۰۷	۳۴/۴	$4y_c$	۶/۳		

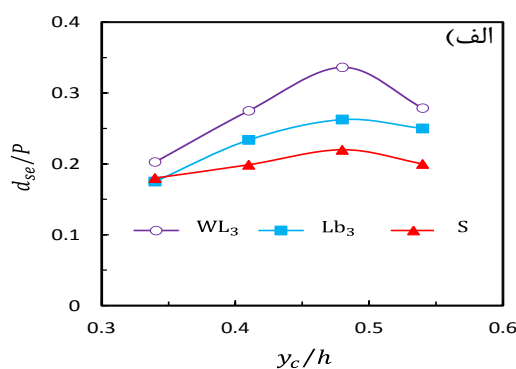
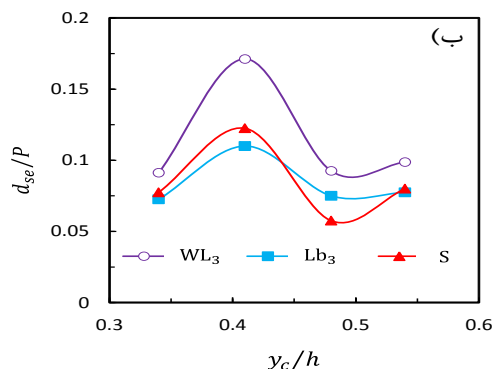
به‌طور متوسط نسبت به سرریز WL₃، در سرریز Lb₃، ۱۵ درصد و در سرریز S، ۲۵/۲ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین در این حالت سرریز S بهترین عملکرد را در کنترل آب شستگی از میان هندسه‌های مورد بررسی در شیب ۱:۳ داراست. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در این هندسه با قرار دادن آستانه در لبه پله اول، از شتاب گرفتن جت جریان روی آن که مشکل اساسی سرریز WL₃ بود، جلوگیری به‌عمل آمد. هم‌چنین قرارگیری آستانه در لبه پله دوم سبب شکل‌گیری پرش هیدرولیکی به‌طور کامل روی این پله شده و نقشی مؤثر در استهلاک انرژی و به تبع آن کاهش آب شستگی داشت.

با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، عمق حداکثر نهایی آب شستگی به‌طور متوسط نسبت به سرریز WL₃، در سرریز Lb₃، ۲۳/۳ درصد، در سرریز S، ۲۴/۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین سرریز S بنا بر دلایلی که ذکر شد یعنی عدم شتاب‌گیری جریان روی پله اول و تشکیل پرش هیدرولیکی روی پله دوم، با افزایش عمق پایاب نیز بهترین عملکرد را در کنترل آب شستگی از میان سرریزهای مورد بررسی در شیب ۱:۳ داشت (شکل ۱۷).

در شکل (۱۶) و جدول (۶) تأثیر هندسه کنگره‌های مورد بررسی در شیب ۱:۳ بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب شستگی نسبت به سرریز WL₃ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که با ایجاد کنگره با هندسه Lb₃ (دو کنگره در انتها و لبه پله با طول، عرض و فواصل بین کنگره‌های ۰/۱ متر و ارتفاع‌های ۰/۰۷۵ و ۰/۰۲۵ متر)، مقدار عمق حداکثر آب شستگی در دبی‌های حداقل ($q=0.02 m^3/m.s$)، $y_c/h=0.34$ و $\eta=18/7$ و حداکثر ($q=0.04 m^3/m.s$)، $y_c/h=0.54$ و $\eta=13/6$ در عمق پایاب $2/5y_c$ ، به‌طور متوسط ۱۱/۷ درصد کاهش یافته و با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ (تغییر η از ۱۰ به ۶/۳)، مقدار کاهش عمق آب شستگی به ۶۸ درصد رسید.

از طرفی با ایجاد آستانه با ارتفاع و طول ۰/۰۵ متر و عرض ۱/۵ متر در سرریز S، مقدار عمق حداکثر آب شستگی در دبی حداقل و حداکثر به‌طور متوسط ۱۹/۵ درصد در عمق پایاب $2/5y_c$ و در نتیجه افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، ۶۶/۴ درصد کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج نشان داد که در عمق پایاب $2/5y_c$ ، با افزایش y_c/h از ۰/۳۴ به ۰/۵۴، عمق حداکثر نهایی آب شستگی



شکل ۱۶- تأثیر ایجاد کنگره بر تغییرات عمق حداکثر نهایی آب شستگی برای سرریزهای پلکانی-کنگروه‌ای با شیب ۱:۳ در اعماق پایاب مختلف: الف) $2/5y_c$ و ب) $4y_c$

جدول ۶ تأثیر هندسه کنگره سرریزهای مورد بررسی در شیب ۱:۳ بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی نسبت به سرریز WL₃

درصد کاهش در درصد کاهش در		$y_t(m)$	η	y_c/h	$q (m^3/m.s)$
S سرریز	Lb ₃ سرریز				
۱۱/۱	۱۳/۵	$2/5 y_c$	۱۸/۷	۰/۳۴	۰/۰۲
۱۳/۸	۱۶/۷	$4 y_c$	۱۰		
۲۷/۲	۱۵	$2/5 y_c$	۱۶/۵	۰/۴۱	۰/۰۲۶
۲۶/۴	۳۵	$4 y_c$	۸/۳		
۳۴/۳	۲۱/۶	$2/5 y_c$	۱۴/۹	۰/۴۸	۰/۰۳۳
۳۷/۸	۱۹	$4 y_c$	۷/۲		
۲۸	۱۰	$2/5 y_c$	۱۳/۶	۰/۵۴	۰/۰۴
۲۰	۲۲/۵	$4 y_c$	۶/۳		

نتیجه گیری

ارتفاع ۰/۰۵ متر)، ۳۰/۱ درصد کاهش می یابد. با افزایش عمق پایاب به $4 y_c$ ، عمق حداکثر آبشستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL₁، در بهترین هندسه کنگره (در سرریز L₂، کنگره با طول و عرض ۰/۱ متر و فواصل بین کنگره های ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۰۷۵ متر)، ۶۵ درصد کاهش می یابد. بنابراین گزینه کنگره ای نمودن سرریزهای پلکانی در شیب ۱:۱ در کاهش عمق آبشستگی در پایین دست این سرریزها به ویژه در مناطقی که به علت محدودیت در فضای احداث پروژه، ایجاد ساختمان سرریز با شیب ملایم تر مقدور نباشد، گزینه ای مناسب می باشد.

در این تحقیق تأثیر کنگره ای نمودن پله های سرریزهای پلکانی بر تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست آن تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت در شیب های کارگذاری پلکان ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از به کار بردن کنگره ها با هندسه های مختلف در شیب سرریز ۱:۱ نشان داد که در عمق پایاب $2/5 y_c$ ، با افزایش y_c/h از ۰/۳۴ به ۰/۵۴، عمق حداکثر نهایی آبشستگی به طور متوسط نسبت به سرریز بدون کنگره WL₁، در بهترین گزینه هندسه کنگره ها (سرریز L₁، کنگره با طول، عرض و فواصل بین کنگره ای ۰/۱ متر و



شکل ۱۷- الگوی جریان عبوری در عمق پایاب $4 y_c$ و $y_c/h=0/48$ و $q=0/022 m^3/m.s$ و $\eta=7/2$ در سرریزهای:

(الف) WL₃، (ب) Lb₃ و (ج) S

و تشکیل پرش هیدرولیکی روی پله دوم بهترین عملکرد را کنترل آب شستگی از میان سرریزهای مورد بررسی در این شیب داراست.

مقایسه نتایج نشان داد که در عمق پایاب حداقل، با افزایش y_c/h از ۰/۳۴ به ۰/۵۴، با تغییر شیب کارگذاری سرریز پلکانی از ۱:۱ به ۱:۲ و ۱:۳ عمق حداکثر آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL_1 ، به ترتیب در سرریز WL_2 ، ۵۸/۹ درصد و در سرریز WL_3 ، ۴۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ نیز، عمق حداکثر آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL_1 ، در سرریز WL_2 ، ۸۰/۲ درصد و در سرریز WL_3 ، ۷۵/۴ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین شیب کارگذاری پلکان‌های ۱:۲ مناسب‌ترین عملکرد را در کاهش عمق حداکثر آب شستگی داشت.

مقایسه مقادیر حداکثر عمق آب شستگی نشان داد که در شیب ۱:۲ اعمال هر هندسه از کنگره‌ها به علت تمرکز تیغه‌های ریزشی در فضای بین کنگره‌ها و افزایش سرعت آن، سبب افزایش عمق آب شستگی نسبت به حالت بدون کنگره آن (WL_2) شده و گزینه‌ای مناسب نمی‌باشد.

نتایج حداکثر عمق آب شستگی در شیب ۱:۳ نشان داد که در عمق پایاب $2/5y_c$ ، با افزایش y_c/h از ۰/۳۴ به ۰/۵۴، عمق حداکثر نهایی آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL_3 ، در بهترین گزینه (سرریز S، آستانه با ارتفاع و طول ۰/۰۵ متر و عرض ۱/۵ متر)، ۲۵/۲ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پایاب به $4y_c$ ، عمق حداکثر آب شستگی به طور متوسط نسبت به سرریز WL_3 ، در مطلوب‌ترین گزینه (سرریز S)، ۲۴/۵ درصد کاهش می‌یابد. در نتیجه در شیب ۱:۳ سرریز S در هر دو عمق پایاب به دلیل جلوگیری از شتاب‌گیری جت جریان روی پله اول

REFERENCES

- Aminipor, y., J. Farhoudi, and R. Roshan. (2014). Study scour downstream of stilling basin of stepped weir. *Iranian journal of hydraulic*, 9(4), 25-38.
- Baylar, A., M. E. Emiroglu and T. Bagatur. (2003). An experimental investigation of aeration performance in stepped spillways. *Water and Environment Journal*, 20 (1), 35-42.
- Boes, R. M., W. H. Hager. (2003). Hydraulic design of stepped spillways. *J. Hydraul. Eng.* 129(9), 671–679.
- Chanson, H. (1994). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *J. Hydraul. Res.*, 32(3), 445-460.
- Chanson, H. (2001). The hydraulic of stepped chutes and spillways. Balkema, Rotterdam, Netherland. P, 350.
- Chinnarasri, C., S. Donjadee and U. Israngkura. (2008). Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. *J. Hydraul. Eng.* 134(8), 1147-1152.
- Dey, S. and Raikar, R.V. (2007). Scour below a high vertical drop. *J. Hydraul. Eng.* 133(5), 564-568.
- Hoffmans, G. J. C. M. and Verhij, H.J. (1997). Scour manual. A. A Balkema. Rotterdam. Brookfield.
- Hoffmans, G.J.C.M. and K.W. Pilarczyk. (1995). Local scour downstream of hydraulic structure. *J. Hydraul. Eng.* 121(4), 326-339.
- Ohtsu, I., Y. Yasuda and M. Takahashi. (2001). Discussion of “Onset of skimming flow on stepped spillways” by M.R. Chamani and N. Rajaratnam, *J. Hydraul. Eng.* 127(6), 522-524.
- Ohtsu, I., Y. Yasuda and M. Takahashi. (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *J. Hydraul. Eng.* 130(9), 860–869.
- Pagliara, S and M. Palermo. (2013). Rock grade control structures and stepped gabion weirs: Scour analysis and flow features. *Acta Geophys*, 61(1), 126–150.
- Pagliara, S., M. Palermo, S. Mahmoudi Kurdistani and L. Sagvand Hassanabadi. (2014). Erosive and hydrodynamic processes downstream of low-head control structures. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 3(2), 122-131.
- Pegram, G., A. Officer and S. Mottram. (1999). Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways, *J. Hydraul. Eng.* 125(5), 500-510.
- Peyras, L., P. Royet and G. Degoutte. (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *J. Hydraul. Eng.* 118(5), 707–717.
- Rafiei, A. Kh. Ajdari and S. Emamgholizadeh. (2014). Effect of tail water depth on maximum scour depth at downstream of stepped weirs. 13th Iranian hydraulic conference. Tabriz. Iran.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. *J. Hydraul. Eng.* 116 (44), 587-591.
- Tuna, M. C and M. E Emiroglu. (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.
- Zhang, G. and H. Chanson. (2016). Gabion Stepped Spillway: Interactions between Free-Surface, Cavity, and Seepage Flows. *J. Hydraul. Eng.* 142(5), 06016002-1-5.