

Experimental Study of The Effect of The Apron Installation on Reducing Scour Depth at the Downstream of Stepped Weirs with Labyrinth Sill

Fatemeh Yousefzadeh Podeh¹, Mahdi Esmaeili Varaki^{2*}, Behnam Shafiei Sabet³ and Sahameddin Mahmoudi Kurdistani⁴


1- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran.

2- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran; Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran.

3- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran.

4- Senior Researcher, IA.ING Eng., Lecce, Italy.

* esmaeili@Guilan.ac.ir

Received: 21 June 2022, Accepted: 30 July 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The movement of water flow in rivers and streams of the erodible bed causes the cycle of erosion and sedimentation. Although this is a natural process, it occurs along sections of a river course that conflict with different uses, ranging from agricultural damage to structures built along rivers or riverbeds (Esmaeili Varaki et al., 2021).

Stepped weirs are one of the effective structures in flow energy dissipation. Due to their shape and geometry, these structures reduce the energy and erosive power of water flow and reduce the cost of energy consuming structures that should be built downstream of dam weirs (Chanson, 1995; Khatsuria, 2005). The present study examined the simultaneous effect of creating an apron downstream of a stepped weir and installing sills with different geometries on its stairs on the downstream scour depth under different flow conditions and apron length in a laboratory.

Methodology: The experiments of this research were performed in the hydraulic laboratory and physical-hydraulic models of the Department of Water Engineering of the University of Guilan in a flume of 12.5 meters long, 1.5 meters wide, and 1 meter high with glass walls and metal floors. In order to provide the flow rate, a centrifugal pump was used to provide a flow rate of up to 90 L/s. In this research, two different weir slopes (1:2 and 1:3), aprons with lengths of $P/3$ (0.135 m) and $2P/3$ (0.27 m), and sill with different geometries were examined. In order to supply sediment particles, mineral sand with a uniform diameter of 2.68 mm was prepared and placed in the sediment bed with a length of 2 m, a width of 1.5 m, and a height of 0.3 m at the downstream of the weir. Long term experiment was conducted to find the corresponding time of equilibrium scour depth. Comparison of results showed that after 6 hours, the scour depth reached equilibrium condition, and no noticeable change occurred, so in all experiments, measurements were performed during the mentioned period. After each experiment, the downstream sedimentary bed was leveled after installing the weir, the sills, and aprons. Then, the necessary adjustments were made for the relevant engine speed according to the desired flow. After the flow entered the flume, the flow depth gradually

increased, and by adjusting the downstream tail gate, desired tail water depth was adjusted. In each experiment, instantaneous scour profiles were recorded at 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 270, and 360 minutes from the start of the experiment using a digital camera and then digitized using Grapher9 software. The final scour profile was also measured at the end of each experiment using a laser meter with an accuracy of ± 1 mm.

Results and discussion: Experimental observation showed that by installing sills, nappe thickness increased from $y_c/2$ to y_c , in which y_c is critical flow depth. Furthermore, installing sills reduced the angle of the imping jet to the sedimentary bed from 58 to 34 degree. Considering the length of the falling jet form the last step of weir to the downstream sedimentary bed indicated that by reducing the weir slope from 1:2 to 1:3, the length of falling jet increased. Comparison of the temporal development of scour depth showed that at the low discharge, installation of sill increase temporal scour depth. However, by increasing flow discharge and corresponding flow velocity over steps, installation of sills reduced temporal scour depth. From different geometry of sills and length of apron, weir of $S_2S_{i2}L_{A2}$ have the best performance and decrease d_{se}/p form 0.23 and 0.45 in range of low and high flow discharge to 0.1 and 0.24. by reduction of the weir to 1:3, installation of sill have not positive effect to reduction of the temporal scour depth.

Conclusion: Comparison of the results of the installation of apron with different lengths on the maximum scour depth in the range of minimum and maximum flow discharge, i. e., relative critical depth (y_c/h) from 0.06 to 0.34, showed that stepped weir with and without sill at a slope of 1:2 showed by installation apron of lengths L_{A1} ($P/3$) and L_{A2} ($2P/3$), the relative maximum scour depth (d_{se}/p) reduced from 0.23 to 0.19 and 0.11, respectively. By installation of different sills, the relative maximum scour depth decreased to 0.22 and 0.17, respectively. By reduction of weir slope to 1:3, installation of apron with length of $P/3$ and $2P/3$, reduced the relative scour depth to 0.18 and 0.14. by installation of different sills geometries, d_{se}/p reduced to 0.24 and 0.1, corresponding to the length of aprons $P/3$ and $2P/3$, respectively.

Keywords: Apron, Flow characteristics, Grade control structures, Stepped weirs, Scour



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر نصب کفبند بر کاهش عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی با آب پایه کنگره‌ای

فاطمه یوسف‌زاده پوده^۱، مهدی اسمعیلی ورکی^{۲*}، بهنام شفیعی ثابت^۳ و سهام‌الدین محمودی کردستانی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
 ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
 ۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
 ۴- محقق ارشد موسسه IA.ING، لچه، ایتالیا.

* esmaeili@Guilan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: از جمله راه‌های کنترل فرسایش بستر در رودخانه‌ها، استفاده از سازه‌های کنترل تراز بستر مانند سرریزهای پلکانی می‌باشد. برآورد میزان و حجم آبشستگی و روش‌های کاهش آن از زمینه‌های مهم در طراحی و ایمنی این سازه‌ها است. یکی از راه‌کارهای کاهش عمق آبشستگی در پایین دست سازه‌های ریزشی مانند سرریزهای پلکانی، استفاده از کفبند می‌باشد. در این تحقیق تاثیر نصب کفبند در پایین دست سرریز پلکانی با و بدون آب پایه کنگره‌ای با شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳ بر تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست آن به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها برای دبی‌های مختلف، هندسه آب پایه‌ها و طول کفبند صورت پذیرفت. مقایسه نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ و در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر با افزایش طول کفبند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط بدون آب پایه به ترتیب به میزان ۲۳ و ۳۴ درصد کاهش یافت. مقایسه نتایج گویای آن است که با نصب آب پایه، در بهترین عملکرد آن، میزان عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دبی‌های مختلف به طور میانگین ۵۰ درصد نسبت به شرایط بدون آب پایه کم شد. با تغییر شیب کارگذاری پلکان‌های سرریز به ۱:۳، افزایش طول کفبند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های مختلف و برای شرایط بدون آب پایه به ترتیب به میزان ۳۶ و ۴۳ درصد کاهش داده و با نصب آب پایه بر روی پلکان‌های سرریز، میزان عمق حداکثر نهایی آبشستگی به طور میانگین ۵۲ درصد نسبت به شرایط بدون آب پایه کم شد.

کلیدواژگان: کفبند، رژیم جریان، سازه‌های کنترل تراز بستر، سرریز پلکانی، آبشستگی.

۱- مقدمه

تعرض به روخانه‌ها از نظر کاهش پهنای عبور جریان با ساخت سازه‌های مختلف طولی و عرضی، برداشت شن و ماسه و یا حتی احداث سدهای مخزنی در بالادست، منجر به شکل‌گیری آبشستگی و در نتیجه آن زنجیره‌ای از آسیب و زیان‌های متعدد از منظر ریخت‌شناسی و بوم سامانه رودخانه گرفته تا سازه‌های احداث شده در آن، می‌شود (Kazempour Larsari et al., 2019).

روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش آبشستگی در رودخانه‌ها وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به پوشش سنگ‌چین، سازه‌های توری‌سنگی، آب‌شکن‌ها،

حرکت جریان آب در رودخانه‌ها و آبراهه‌های با بستر فرسایش‌پذیر، منجر به ایجاد چرخه فرسایش و رسوب‌گذاری می‌شود. اگرچه این یک فرایند طبیعی است ولی، رخداد آن در طول بخش‌هایی از مسیر رودخانه که در تعارض با کاربری‌های مختلف است، منجر به رخداد آسیب و زیان‌های مختلف از تخریب اراضی کشاورزی گرفته تا سازه‌های احداث شده در حاشیه یا بستر رودخانه‌ها می‌شود (Esmaeili Varaki et al., 2021). در کنار فرآیندهای طبیعی فرسایش و رسوب‌گذاری،

و سطحی طبقه‌بندی شود. در دبی‌های کم، جریان ریزشی و در دبی‌های بالا جریان سطحی مشاهده می‌شود.

بنابر تجربه‌های مدون شده، استفاده از سرریزهای پلکانی با دبی واحد عرض تا $30 \text{ m}^3/(\text{m.s})$ محدود شده است و دلیل آن آسیب ناشی از حفره‌سازی یا جدارخوردگی در دبی‌های بیشتر است. میزان آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه‌ها متاثر از هیدرولیک جریان عبوری از آن و میزان استهلاک انرژی جریان است. بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سرریزهای پلکانی نشان داده است که رژیم جریان روی سرریزهای پلکانی می‌تواند به صورت‌های ریزشی، انتقالی و سطحی طبقه‌بندی شود. در دبی‌های کم جریان ریزشی می‌باشد و با افزایش دبی در محدوده دبی میانگین رژیم جریان انتقالی شده و در دبی‌های بالا، جریان سطحی مشاهده می‌شود (Khatsuria, 2005).

(Barani et al. (2005) به بررسی هدررفت انرژی بر روی سرریز پلکانی با شکل‌های مختلف پله پرداختند. نتایج نشان داد که استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با انتهای پایه‌دار و شیب‌دار بیشتر از نوع صاف است و با افزایش ضخامت پایه انتهایی یا اندازه شیب پله استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

(Chinnarasri and Wongwises (2006) ویژگی‌های جریان و عامل‌های موثر بر استهلاک انرژی در انواع مختلف تندآب‌های پلکانی را بررسی کردند و رابطه‌هایی را برای برآورد آن در سرریز پلکانی با پله‌های ساده و شیب‌دار ارائه دادند.

(Chinnarasri et al. (2008) سرریزهای پلکانی-گابیونی با شیب‌های مختلف را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. تجزیه و تحلیل نتایج گویای آن است که شیب سرریز بر استهلاک انرژی موثر بوده و نسبت استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی-گابیونی برای شیب‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۰.۷، ۱۰ و ۱۴ درصد بیشتر از سرریزهای همانند پلکانی افقی بود. همچنین مقایسه نتایج نشان داد که اندازه و شکل سنگ‌ها، تاثیر کمی در استهلاک انرژی دارد.

(Pagliara and Palermo (2013) در نتایج بررسی‌های خود بیان داشتند که برتری سرریز پلکانی از نوع گابیونی نسبت

صفحه‌های مستغرق و سازه‌های کنترل تراز بستر اشاره کرد (Hoffmans and Verhij, 1997).

سازه‌های کنترل تراز بستر برای جلوگیری از توسعه آب‌شستگی و کاهش تراز بستر در رودخانه‌ها به کار می‌روند. از جمله برتری‌های احداث این سازه‌ها، تثبیت دیواره و بستر رودخانه به وسیله کاهش شیب و سرعت جریان می‌باشد که در نتیجه میزان و حجم آب‌شستگی کاهش یافته و در پی آن از ناپایداری دیواره‌های رودخانه‌ها و نیز در معرض خطر قرار گرفتن پی سازه‌های احداث شده در رودخانه‌ها جلوگیری به عمل می‌آید.

هندسه آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر تحت تاثیر عامل‌های مختلفی هستند که از جمله این عامل‌ها می‌توان به ارتفاع ریزش جریان، عمق پایاب، سرعت جت عبوری جریان از سازه، نوع و هندسه سازه کنترل تراز بستر و دانه‌بندی مصالح بستر رسوبی اشاره کرد. مهم‌ترین سازه‌های کنترل تراز بستر بررسی شده تاکنون شامل سطح‌های شیب‌دار سنگی، شیب‌شکن‌های قائم و مایل، سرریزهای پلکانی، آستانه شیب‌دار، پره‌های قلابی شکل، پره عرضی و سرریزهای U و W شکل می‌باشد (Dey and Raikar, 2007).

سرریزهای پلکانی یکی از سازه‌های موثر در استهلاک انرژی جریان می‌باشند. این سازه‌ها با توجه به شکل و هندسه‌ای که دارند، برای کاهش انرژی و قدرت فرسایشی جریان آب و نیز کاهش هزینه‌ی سازه‌های مستهلک کننده‌ی انرژی که باید در پایین‌دست تندآب سرریز سدها ساخته شوند، استفاده می‌شوند (Chanson, 1995; Khatsuria, 2005).

در پروژه‌های مهندسی رودخانه، سرریزهای پلکانی می‌توانند از گابیون نیز ساخته شوند. بنابر نتایج (Peyras et al. (1992) سازه‌های پلکانی از نوع گابیونی دارای ویژگی‌های ارزان قیمت بودن، سازگاری با محیط زیست، ساخت آسان، پایدار و مقاوم بودن در برابر بارهای وارده می‌باشند.

(Peyras et al. (1992) با بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سرریزهای پلکانی-گابیونی بیان کردند که رژیم جریان عبوری از سرریزهای پلکانی می‌تواند به صورت‌های ریزشی

داد، در شرایطی که نسبت عمق بحرانی به فاصله بین آستانه‌ها از یک حد مشخص بیشتر باشد، ظرفیت آب‌شستگی از جمله طول آب‌شستگی کاهش می‌یابد.

Marion and Gaudio (2003) آزمایش‌هایی را در رابطه با توسعه زمانی آب‌شستگی پایین‌دست آستانه انجام و رابطه‌هایی را برای تعیین عمق و طول آب‌شستگی ارائه دادند.

D'Agostino and Ferro (2004) تحلیل فرآیند آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر را توسعه داده و معادله‌هایی را برای پیش‌بینی عمق حداکثر آب‌شستگی پیشنهاد دادند.

Tuna and Emiroglu (2013) نیمرخ‌های آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی را برای سه نوع رژیم جریان ریزشی، سطحی و انتقالی بررسی کردند. ارزیابی نتایج نشان داد که نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی برای عمق حداکثر آب‌شستگی بسیار مهم است و میزان آن در رژیم جریان ریزشی نسبت به رژیم جریان غیرریزشی کمتر است.

Pagliara et al. (2014) آب‌شستگی در شرایط آب زلال در پایین‌دست سرریزهای W شکل را بررسی کردند و معادله‌هایی را برای پیش‌بینی طول و عمق حداکثر آب‌شستگی و تلماسه ارائه دادند.

Aminpour and Farhodi (2017) آب‌شستگی موضعی پایین‌دست حوضچه آرامش سرریز پلکانی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و یک معادله عمومی بی‌بعد برای پیش‌بینی بیشینه پارامترهای هندسی گودال آب‌شستگی و حجم رسوب‌های جابجا شده ارائه دادند. آن‌ها با مقایسه سرریزهای پلکانی و اوجی، در شرایط جریان و عدد فرود همانند، نشان دادند که آب‌شستگی در سرریز پلکانی نسبت به اوجی کمتر است. این موضوع می‌تواند بیانگر این واقعیت باشد که بخش زیادی از انرژی جریان پیش از رسیدن به پایین‌دست سرریز پلکانی مستهلک شده و عمق گودال آب‌شستگی را کاهش می‌دهد.

Kazempour Larsari et al. (2019) تأثیر ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف بر تغییرات عمق آب‌شستگی در

به سرریزهای معمولی دارا بودن ساختار انعطاف‌پذیر و نیز وجود خلل و فرج در توده سنگی درون آن است که به راحتی باعث می‌شود خودشان را با شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف محل که در یک چرخه طبیعی رودخانه رخ دهد، سازگار سازد.

Pagliara and Palermo (2013) در نتایج بررسی‌های خود اظهار داشتند برای نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی بزرگ‌تر از $1/5$ ، رژیم جریان عبوری از سرریز پلکانی، ریزشی می‌باشد. این نسبت برای رژیم جریان انتقالی بین $1/5$ تا $1/1$ و هم‌چنین برای رژیم جریان سطحی کوچک‌تر از $1/1$ گزارش شده است.

Keshavarz Eskandari et al. (2019) تاثیر نصب کنگره با ارتفاع $0.75h$ و $0.5h$ ، فاصله‌های کارگذاری h و $2h$ و طول‌های مختلف بر افت نسبی انرژی در سرریز پلکانی با شیب‌های $1:1$ ، $1:2$ و $1:3$ را بررسی کردند. مقایسه نتایج نشان داد با نصب کنگره در سرریز با شیب‌های $1:1$ ، $1:2$ و $1:3$ میانگین افت نسبی انرژی به ترتیب $8/6$ ، $7/8$ و 3 درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی پارامترهای هیدرولیکی شامل رژیم جریان و هندسه بر استهلاک انرژی جریان موثر است. تحقیقات گویای آن است که شیب سرریز و نصب کنگره باعث کاهش انرژی جریان شده و میزان دبی و نسبت ارتفاع پله به عمق بحرانی نوع رژیم جریان را مشخص می‌کند.

در کنار آگاهی از پارامترهای موثر بر رژیم جریان و افت انرژی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی، اطلاع از عامل‌های موثر بر آب‌شستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی از سرریزها و دیگر سازه‌های کنترل تراز بستر اهمیت زیادی در شناخت فرآیندهای حاکم بر آب‌شستگی دارد.

Rajaratnam and Aderibigbe (1998) تأثیر دانه‌بندی رسوب‌های بستر بر فرسایش ناشی از جت‌های آشفته را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ابعاد حفره آب‌شستگی ایجاد شده در اثر نوع جت‌ها، با افزایش ضریب غیریکنواختی مصالح کاهش می‌یابد.

Marion et al. (2002) فرآیند تداخل آب‌شستگی در پایین‌دست آستانه‌ها را بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان

Gharibi et al. (2021) به بررسی تاثیر همزمان ایجاد کفبند در پایین دست سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ و نصب کنگره با هندسه های مختلف بر روی پلکان های آن بر تغییرات ویژگی های آبشستگی در پایین دست به صورت آزمایشگاهی پرداختند. آزمایش ها برای شرایط مختلف دبی، هندسه کنگره ها و طول کفبند صورت پذیرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در شرایط بدون کنگره و در دامنه دبی های حداقل تا حداکثر، با افزایش طول کفبند به دو سوم ارتفاع سرریز، عمق حداکثر نهایی آبشستگی بطور میانگین به میزان ۶۹ درصد کاهش یافت.

Moayedi et al. (2021) به بررسی تاثیر حضور کفبند با طول های مختلف بر آبشستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار با شیب ۱:۳ در شرایط مختلف هیدرولیکی و اعمال جسم های زبری با چیدمان و اندازه های مختلف پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که ایجاد کفبند رابطه مستقیم با کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی دارد به گونه ای که با نصب کفبند به طول برابر با ارتفاع سازه، عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دبی ها و زبری های حداقل و حداکثر، به طور میانگین ۱۶ درصد نسبت به حالت بدون کفبند کاهش می یابد.

به طور کلی نتایج تحقیقات انجام شده تاکنون نشان می دهد که ایجاد کفبند رابطه مستقیم با کاهش عمق حداکثر در نیم رخ نهایی آبشستگی داشته و هر چه طول کفبند بیشتر باشد، عمق حداکثر نهایی آبشستگی کاهش بیشتری خواهد داشت.

اگرچه سرریز های پلکانی کارایی مناسبی به عنوان سازه کنترل تراز بستر رودخانه دارند، ولی لازم است تمهید و راه کارهای لازم برای سازگاری آن با بوم شناسی رودخانه بویژه ایجاد شرایط مناسب برای مهاجرت ماهیان به بالادست را در آن ها فراهم آورد. یکی از این راهکارها، ایجاد آب پایه بر روی هر پلکان در سرریز پلکانی می باشد تا ضمن ایجاد یک حوضچه، شرایط عبور آبزیان به بالادست را تسهیل نماید. در این تحقیق تاثیر همزمان ایجاد کفبند به عنوان عامل کاهش دهنده عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی و نصب آب پایه با

پایین دست سرریز های پلکانی-کنگره ای را تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت در شیب های کارگذاری پلکان ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ بررسی کردند. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است نصب کنگره ها در بهترین گزینه (کنگره با طول، عرض و فاصله های بین کنگره ای برابر با ارتفاع پلکان و ارتفاع نصف آن)، در شیب سرریز ۱:۱ و عمق پایاب ۲/۵ برابر عمق بحرانی، عمق حداکثر نهایی آبشستگی را به طور میانگین نسبت به حالت بدون کنگره ۳۰ درصد کاهش می دهد. با افزایش عمق پایاب به ۴ برابر عمق بحرانی، این نسبت در بهترین هندسه کنگره (برابر با ارتفاع پلکان، فواصل بین کنگره ای ۲ برابر ارتفاع پلکان و ارتفاع ۰/۷۵ ارتفاع آن)، ۶۵ درصد کاهش می یابد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که در شیب ۱:۲ اعمال هر هندسه از کنگره ها به علت تمرکز تیغه های ریزشی در فضای بین کنگره ها و افزایش سرعت آن، سبب افزایش عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون کنگره آن شده و گزینه ای مناسب نمی باشد. مقایسه نتایج عمق حداکثر آبشستگی در شیب ۱:۳ نشان داد که در بهترین گزینه (آستانه با ارتفاع و طول نصف ارتفاع پلکان)، میزان عمق حداکثر نهایی نسبت به حالت بدون کنگره آن، ۲۵ درصد کاهش می یابد.

یکی از روش های کاهش آبشستگی در پایین دست سازه های کنترل تراز بستر استفاده از کفبند می باشد.

Dey and Sarkar (2006) فرآیند آبشستگی در اثر جت های ریزشی در بستر غیرچسبنده در پایین دست کفبند با اندازه دانه رسوبی مختلف را بررسی کردند. مقایسه نتایج نشان داد با قرار دادن کفبند سنگی در پایین دست کفبند صلب، عمق آبشستگی به طور میانگین ۳۹ درصد کاهش می یابد. نتایج گویای آن بود که با کاهش طول کفبند، عمق تعادل آبشستگی افزایش می یابد.

Ali et al. (2014) روابط بین پارامترهای گودال آبشستگی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست کفبند زبر را بررسی نمودند و با استفاده از داده های آزمایشگاهی معادله هایی مبتنی بر تحلیل رگرسونی ارائه دادند.

آب، ρ_s : جرم مخصوص ذرات رسوبی، g : شتاب ثقل، l_s : طول آب پایه، b_{sh} و b_{sl} : عرض آب پایه‌های بلند و کوتاه، h_s : ارتفاع آب پایه، d_{50} : قطر متوسط ذرات رسوبی، l : طول پله، h : ارتفاع پله و L_A : طول کفبند می‌باشد.

با به‌کارگیری فرضیه باکینگهام در تحلیل ابعادی رابطه (۱) به‌صورت رابطه بی بعد (۲) در می‌آید:

$$\frac{d_s}{P} = f_2 \left(\frac{\rho^3 g}{Q^2}, \frac{\Delta y}{P}, \frac{d_{50}}{P}, \frac{B}{P}, \frac{y_t}{P}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{l}{P}, \frac{h}{P}, \frac{l_s}{P}, \frac{b_{sh}}{P}, \frac{b_{sl}}{P}, \frac{h_s}{P}, \frac{L_A}{P} \right) \quad (2)$$

در میحث آب‌شستگی پارامترهای ρ_s و ρ به‌صورت ترکیبی به شکل $\Delta = G_s - 1$ که در آن $G_s = \rho_s / \rho$ است، به‌کار گرفته می‌شود.

اسکورلوک و همکاران (Scurlock et al., 2012) عدد فرود بی‌بعد ذره را برای سازه کنترل تراز بستر که متأثر از هندسه سازه است به‌صورت $F_d = Q / (BP(g(G_s - 1)d_{50})^{0.5})$ ارائه نمودند. بنابراین رابطه (۲) را می‌توان به‌صورت رابطه بی‌بعد زیر ساده کرد:

$$\frac{d_s}{P} = f_3 \left(\eta, \frac{y_t}{P}, \frac{l}{P}, \frac{h}{P}, \frac{l_s}{P}, \frac{b_{sh}}{P}, \frac{b_{sl}}{P}, \frac{h_s}{P}, \frac{L_A}{P} \right) \quad (3)$$

که در آن $\eta = F_d^2 \Delta y / P$ به‌صورت رابطه بی‌بعدی تعریف می‌شود.

هندسه‌های مختلف بر روی پلکان‌های آن بر تغییرات عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز با شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳ در شرایط مختلف دبی و طول کفبند به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی به پارامترهای مختلفی از جمله هندسه سرریزها، شرایط هیدرولیکی جریان و دانه‌بندی مصالح بستر حوضچه آرامش بستگی دارد. پارامترهای اصلی موثر بر عمق آب‌شستگی (d_s) پایین‌دست سرریزهای پلکانی با آب پایه کنگره‌ای را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی زیر نوشت:

$$d_s = f(P, B, Q, y_t, \Delta y, g, d_{50}, \rho, \rho_s, l, h, l_s, b_{sh}, b_{sl}, h_s, L_A) \quad (1)$$

در شکل ۱ برخی از پارامترهای ارائه شده در رابطه فوق آورده شده است. در این رابطه P : ارتفاع سرریز، B : عرض سرریز، Q : دبی جریان، y_t : عمق پایاب، Δy : اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست سرریز، ρ : جرم مخصوص

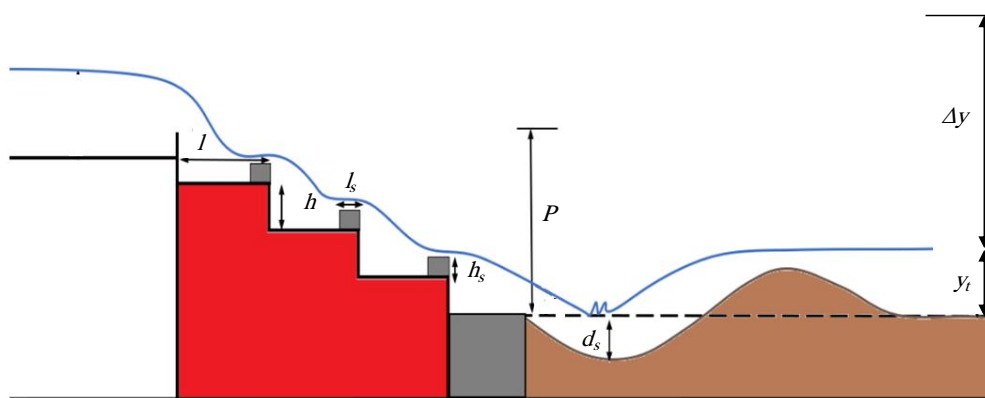


Fig. 1 Some abbreviations of effective parameters on scour at the downstream of stepped weirs

شکل ۱ برخی از نشانه‌های اختصاری پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای پلکانی

پایین‌دست به مخزن بالادست فلوم پمپاژ شده و پس از عبور از یک حوضچه آرام کننده جریان وارد کانال شود. به‌منظور تامین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ که قادر بود دبی جریان را تا ۹۰ لیتر بر ثانیه تامین کند، استفاده گردید. برای اندازه گیری دبی، از دبی‌سنج فراصوتی با دقت $\pm 0.1\%$ لیتر بر ثانیه و برای اندازه‌گیری عمق آب از عمق‌سنج دیجیتال با دقت $\pm 0.1\%$ میلی‌متر استفاده شد.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام

آزمایش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی گروه مهندسی آب 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 انجام شد (شکل ۲). جریان آب در سامانه بسته از مخزن

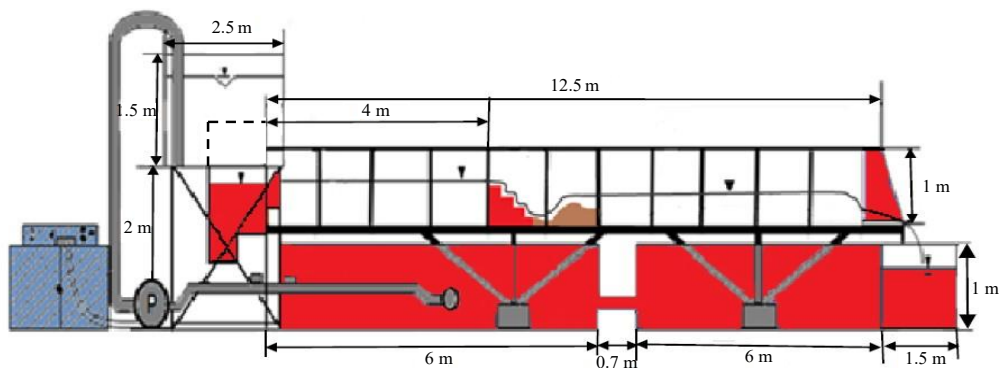


Fig. 2 Sketch of experimental flume

شکل ۲ طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی



Fig. 3 Photos of experimental flume and stepped weirs

شکل ۳ تصویرهایی از فلوم آزمایشگاهی و سرریز پلکانی

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی سرریزهای پلکانی با و بدون آب‌پایه کنگره‌ای مورد بررسی با شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳

Table 1 Geometric characteristic of stepped weirs with and without labyrinth sill with slope of 1:2 and 1:3

Weir number	h (m)	l (m)	(h/l)	l_s (m)	b_{sh} (m)	b_{sl} (m)	(Nb_{sh}) number of b_{sh}	(Nb_{sl}) number of b_{sl}	(h_h) height of sill	(h_l) height of sill	L_A
S_2	0.1	0.2	1:2	—	—	—	—	—	—	—	—
S_2L_{A1}	0.1	0.2	1:2	—	—	—	—	—	—	—	$P/3$
S_2L_{A2}	0.1	0.2	1:2	—	—	—	—	—	—	—	$2P/3$
$S_2 Si_1L_{A1}$	0.1	0.2	1:2	0.05	0.75	0.75	1	1	$h/2$	$h/3$	$P/3$
$S_2 Si_2L_{A1}$	0.1	0.2	1:2	0.05	0.75	0.75	1	1	$2h/3$	$h/2$	$P/3$
$S_2 Si_3L_{A1}$	0.1	0.2	1:2	0.05	0.25	0.25	3	3	$3h/3$	$2h/3$	$P/3$
$S_2 Si_1L_{A2}$	0.1	0.2	1:2	0.05	0.75	0.75	1	1	$h/2$	$h/3$	$2P/3$
$S_2 Si_2L_{A2}$	0.1	0.2	1:2	0.05	0.75	0.75	1	1	$2h/3$	$h/2$	$2P/3$
$S_2 Si_3L_{A2}$	0.1	0.2	1:2	0.05	0.25	0.25	3	3	$3h/3$	$2h/3$	$2P/3$
S_3	0.1	0.3	1:3	—	—	—	—	—	—	—	—
S_3L_{A1}	0.1	0.3	1:3	—	—	—	—	—	—	—	$P/3$
S_3L_{A2}	0.1	0.3	1:3	—	—	—	—	—	—	—	$2P/3$
$S_3 Si_1L_{A1}$	0.1	0.3	1:3	0.05	0.75	0.75	1	1	$h/2$	$h/3$	$P/3$
$S_3 Si_2L_{A1}$	0.1	0.3	1:3	0.05	0.75	0.75	1	1	$2h/3$	$h/2$	$P/3$
$S_3 Si_3L_{A1}$	0.1	0.3	1:3	0.05	0.25	0.25	3	3	$3h/3$	$2h/3$	$P/3$
$S_3 Si_1L_{A2}$	0.1	0.3	1:3	0.05	0.75	0.75	1	1	$h/2$	$h/3$	$2P/3$
$S_3 Si_2L_{A2}$	0.1	0.3	1:3	0.05	0.75	0.75	1	1	$2h/3$	$h/2$	$2P/3$
$S_3 Si_3L_{A2}$	0.1	0.3	1:3	0.05	0.25	0.25	3	3	$3h/3$	$2h/3$	$2P/3$

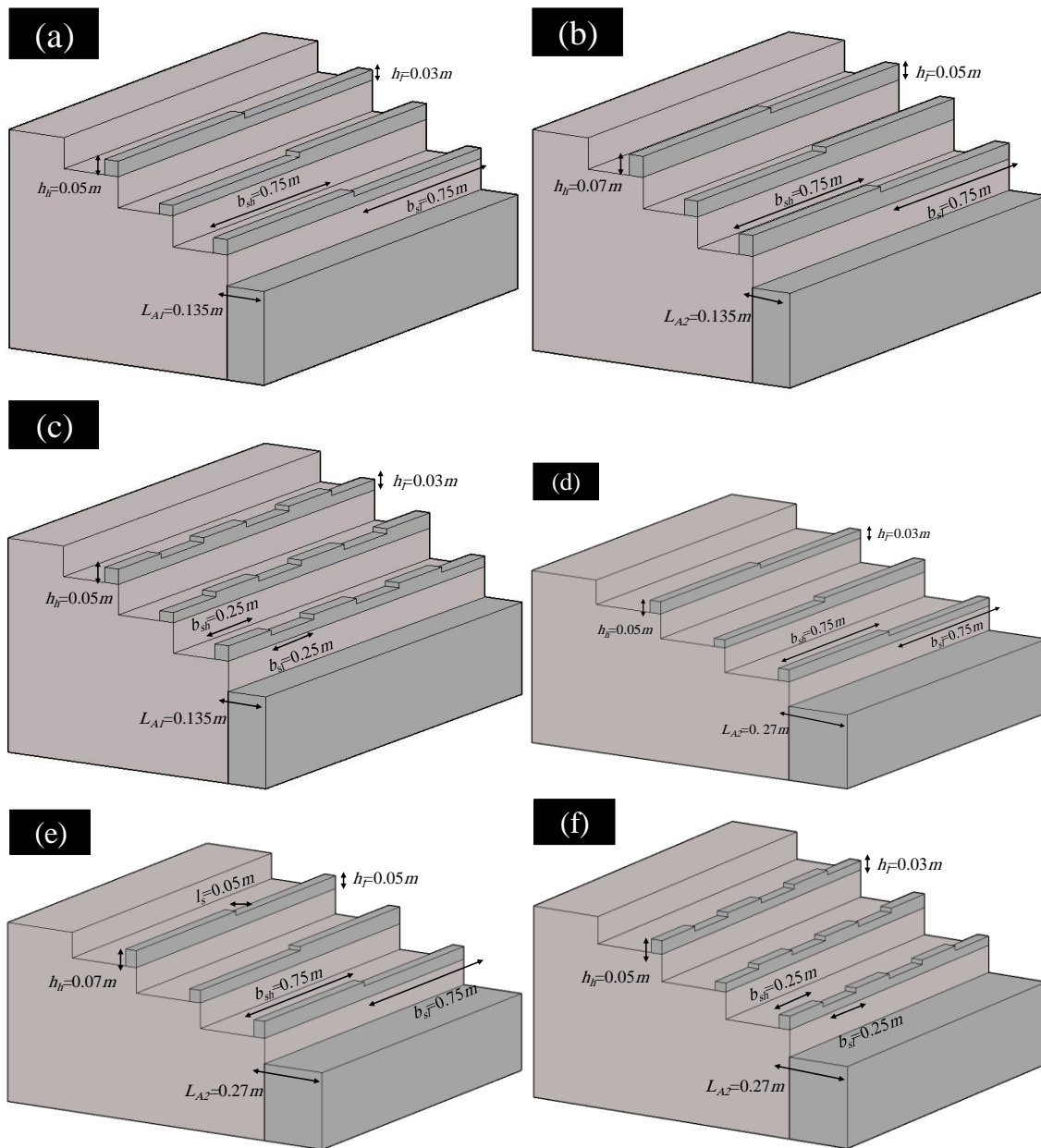


Fig. 4 Photos of stepped weirs with and without labyrinth sill: a) $S_2Si_1LA_1$, b) $S_2Si_2LA_1$, c) $S_2Si_3LA_1$, d) $S_3Si_1LA_2$, e) $S_3Si_2LA_2$ and f) $S_3Si_3LA_2$

شکل ۴ نمایایی از سرریزهای پلکانی با و بدون آب پایه کنگره‌ای: (a) $S_2Si_1LA_1$ (b) $S_2Si_2LA_1$ (c) $S_2Si_3LA_1$ (d) $S_3Si_1LA_2$ (e) $S_3Si_2LA_2$ (f) $S_3Si_3LA_2$

آب‌پایه‌های مورد بررسی که دارای عرض $h/2$ (۰/۰۵ متر) و ارتفاع‌های مختلف بودند، نشان داده شد. به‌منظور تأمین ذرات رسوبی، ماسه معدنی با قطر یکنواخت ۲/۶۸ میلی‌متر تهیه و در بستر رسوبی به طول ۲ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۰/۳ متر در پایین‌دست سرریز قرار داده شد.

سرریزهای پلکانی مورد بررسی در این تحقیق متشکل از چهار پله به عرض ۱/۵ متر، ارتفاع پلکان ۰/۱ متر و طول پلکان به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ متر متناسب با دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ از جنس فلز ساخته و در فاصله ۴ متری از ورودی کانال نصب شد (شکل ۳). در جدول ۱ و نیز شکل ۴، طرح کلی سرریزهای مورد بررسی با شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳، طول کف‌بندهای $P/3$ (۰/۱۳۵ متر) و $2P/3$ (۰/۲۷ متر) و

تنظیم‌های لازم برای دور موتور مربوطه به عمل می‌آمد. پس از ورود جریان اولیه با دبی کم به فلوم و با مانور دریچه انتهایی آن، عمق پایاب مورد نظر در فلوم تثبیت شد. در ادامه با تنظیم دقیق دبی و مانور دریچه انتهایی، شرایط هیدرولیکی لازم برای انجام آزمایش برقرار می‌گردید. در هر آزمایش، از نیمرخ لحظه‌ای آب‌شستگی در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ دقیقه از آغاز آزمایش تصویربرداری شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Grapher9 نیمرخ زمانی آب‌شستگی رقومی سازی شد. همچنین نیمرخ نهایی آب‌شستگی در انتهای هر آزمایش با استفاده از متر لیزری با دقت ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری به عمل می‌آمد. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر کفبند بر کاهش آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای، در مجموع ۹۰ آزمایش صورت گرفت. در جدول ۲ دامنه پارامترهای هیدرولیکی مورد آزمایش در این تحقیق نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای

رژیم جریان عبوری از سرریزهای پلکانی به صورت ریزشی، انتقالی و سطحی طبقه‌بندی می‌شود. در جدول ۳، رژیم‌های جریان عبوری از سرریزهای پلکانی مورد بررسی برای شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳ آورده شده است. بر اساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با شیب ۱:۲، رژیم جریان

به‌طور کلی پدیده آب‌شستگی یک فرآیند زمان‌بر بوده و نمی‌توان انتهای برای رسیدن به زمان تعادل به‌دست آورد زیرا هراندازه از زمان آغاز آب‌شستگی گذشته باشد، بازهم فرآیند فرسایش درحفره، هرچند اندک و نامحسوس، ادامه می‌یابد.

Mason et al. (1985) در نتایج بررسی‌های خود بیان کردند که پدیده آب‌شستگی به‌صورت تابعی از زمان و به شکل تصاعدی با زمان تغییر کرده و هیچ‌گاه به تعادل واقعی نخواهد رسید مگر هنگامی که زمان رخداد پدیده آب‌شستگی بی‌نهایت باشد.

Kells et al. (2001) پس از بررسی یک دوره آب‌شستگی با زمان ۹۶ ساعته بیان کردند، که ۹۰ درصد آب‌شستگی در ۲۴ ساعت اول رخ می‌دهد.

Ranjbar et al. (2007) با بررسی و ارزیابی تغییرات زمانی حفره آب‌شستگی نتیجه گرفتند که حداکثر تغییرات در ابعاد حفره آب‌شستگی در دقیقه‌های اولیه رخ می‌دهد و پس از آن نرخ این تغییرات کاهش می‌یابد به‌نحوی که پس از گذشت ۸۰ دقیقه نزدیک به ۷۰ درصد آب‌شستگی رخ داده است.

در این پژوهش برای به‌دست آوردن زمان تعادل آب‌شستگی چندین آزمایش ۲۴ ساعته انجام شد. بررسی تغییرات زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای نشان داد که پس از گذشت ۶ ساعت، گودال آب‌شستگی به تعادل رسیده و تغییر محسوسی رخ نمی‌دهد، لذا در همه‌ی آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها در مدت‌زمان یاد شده دنبال شد. برای انجام هر آزمایش، بعد از نصب سرریز، آب‌پایه‌ها و کفبند‌های مورد نظر، در آغاز سطح بستر رسوبی در پایین‌دست سرریز تراز می‌گردید. سپس با توجه به دبی مورد نظر

جدول ۲ دامنه پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 2 Range of experimental hydraulic parameters

$q(m^3/m.s)$ Unit discharge	y_c/h Critical depth to height of step	$y_t (m)$ Tail water depth	$\eta = F_d^2 \Delta y / p$
0.02	0.34	(2.5 y_c) 0.086	0.098
0.026	0.41	(2.5 y_c) 0.104	0.173
0.033	0.48	(2.5 y_c) 0.12	0.267
0.04	0.54	(2.5 y_c) 0.136	0.382
0.046	0.6	(2.5 y_c) 0.151	0.520

سطحی در محدوده $y_e/h > 0.95$ ، جریان انتقالی در محدوده $0.7 < y_e/h < 0.95$ و جریان ریزشی در $y_e/h < 0.7$ رخ می‌دهد (Khatsuria, 2005). با توجه به محدوده y_e/h در جدول ۳، رژیم جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳، به صورت ریزشی می‌باشد.

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عمق حداکثر آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی، ضخامت جت ریزشی خروجی از سرریز پلکانی به حوضچه پایین‌دست و زاویه جت نسبت به صفحه افق می‌باشد. بررسی تصویرهای جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با و بدون آب‌پایه نشان می‌دهد نسبت ضخامت جت ریزشی به عمق بحرانی در شیب ۱:۲ برای دبی حداقل (عمق بحرانی نسبی $y_e/h = 0.34$) در حالت بدون آب‌پایه تقریباً برابر با ۰/۷ و برای آب‌پایه با هندسه‌های S_2Si_1 ، S_2Si_2 و S_2Si_3 در محدوده ۰/۹ تا ۱ می‌باشد. با افزایش دبی به مقدار حداکثر (عمق بحرانی نسبی $y_e/h = 0.61$) در حالت بدون آب‌پایه نزدیک به ۰/۵ و آب‌پایه با هندسه‌های مختلف در محدوده ۰/۶ تا ۰/۷ می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش دبی عبوری از سرریزهای مورد مطالعه، سرعت جت ورودی به سطح آب در پایاب بیشتر شده و به تبع آن گردابه‌های شکل گرفته در گودال آب‌شستگی از قدرت بیشتری برخوردار خواهند شد. بررسی تصویرهای آزمایشگاهی در شیب کارگذاری سرریز

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

Table 3 flow patterns on stepped weirs for slope 1:2 and 1:3

Weir number	$q(m^3/m.s)$	y_e/h	(flow pattern)
SL_2	0.02	0.34	Nappe flow
SL_2	0.026	0.41	Nappe flow
SL_2	0.033	0.48	Nappe flow
SL_2	0.04	0.54	Nappe flow
SL_2	0.046	0.6	Nappe flow
SL_3	0.02	0.34	Nappe flow
SL_3	0.026	0.41	Nappe flow
SL_3	0.033	0.48	Nappe flow
SL_3	0.04	0.54	Nappe flow
SL_3	0.046	0.6	Nappe flow

۱:۳ نشان داد که نسبت ضخامت جت ریزشی به عمق بحرانی در دبی حداقل در حالت بدون آب‌پایه ۰/۸ و آب‌پایه با هندسه‌های S_3Si_1 ، S_3Si_2 و S_3Si_3 در محدوده ۰/۹ تا ۱ می‌باشد. با افزایش دبی به میزان حداکثر، نسبت ضخامت جت ریزشی به عمق بحرانی در حالت بدون آب‌پایه ۰/۹ و آب‌پایه با هندسه‌های مختلف، نزدیک به ۱ بدست آمد.

بررسی تصاویر جریان خروجی از پله آخر به حوضچه رسوبی نشان داد که زاویه جت ریزشی جریان در شیب ۱:۲ در دبی حداقل (عمق بحرانی نسبی $y_e/h = 0.34$) در حالت بدون آب‌پایه و آب‌پایه با هندسه‌های S_2Si_1 و S_2Si_2 ، S_2Si_3 به ترتیب ۴۶، ۵۸، ۴۳ و ۴۱ درجه می‌باشد. با افزایش دبی به میزان حداکثر (عمق بحرانی نسبی $y_e/h = 0.61$) زاویه جت ریزشی جریان در حالت بدون آب‌پایه و آب‌پایه با هندسه‌های مختلف، به ترتیب ۳۹، ۴۱، ۳۶ و ۴۰ درجه می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش دبی عبوری، سطح زیرین جت جریان با سطح رویی پلکان‌ها و آب‌پایه‌ها تماس بیشتری پیدا کرده و زاویه جت ریزشی

بررسی تصاویرهای تاثیرگذار بر عمق حداکثر آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی، ضخامت جت ریزشی خروجی از سرریز پلکانی به حوضچه پایین‌دست و زاویه جت نسبت به صفحه افق می‌باشد. بررسی تصویرهای جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با و بدون آب‌پایه نشان می‌دهد نسبت ضخامت جت ریزشی به عمق بحرانی در شیب ۱:۲ برای دبی حداقل (عمق بحرانی نسبی $y_e/h = 0.34$) در حالت بدون آب‌پایه تقریباً برابر با ۰/۷ و برای آب‌پایه با هندسه‌های S_2Si_1 ، S_2Si_2 و S_2Si_3 در محدوده ۰/۹ تا ۱ می‌باشد. با افزایش دبی به مقدار حداکثر (عمق بحرانی نسبی $y_e/h = 0.61$) در حالت بدون آب‌پایه نزدیک به ۰/۵ و آب‌پایه با هندسه‌های مختلف در محدوده ۰/۶ تا ۰/۷ می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش دبی عبوری از سرریزهای مورد مطالعه، سرعت جت ورودی به سطح آب در پایاب بیشتر شده و به تبع آن گردابه‌های شکل گرفته در گودال آب‌شستگی از قدرت بیشتری برخوردار خواهند شد. بررسی تصویرهای آزمایشگاهی در شیب کارگذاری سرریز

L_{A2} ۰/۷ طول کفبند L_{A1} (P/3) و ۰/۳ طول کفبند L_{A2} (2P/3) از لبه پلکان آخر به کفبند برخورد می‌کند. با ایجاد آب‌پایه با هندسه‌های مختلف جت خروجی در فاصله ۰/۷ تا ۰/۸ طول کفبند L_{A1} و ۰/۴ تا ۰/۵ طول کفبند L_{A2} از لبه پلکان آخر به کفبند برخورد می‌کند. با افزایش دبی جریان به میزان حداکثر، برای شرایط بدون آب‌پایه جت خروجی در فاصله ۰/۷ طول کفبند L_{A1} و ۰/۵ طول کفبند L_{A2} از لبه پلکان آخر به کفبند برخورد می‌کند. همچنین با ایجاد آب‌پایه با هندسه‌های مختلف، در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ طول کفبند L_{A1} و ۰/۵ تا ۰/۶ طول کفبند L_{A2} از لبه پلکان به حوضچه پایین‌دست وارد می‌گردد (شکل ۵).

با کاهش شیب کارگذاری سرریز پلکانی به شیب ۱:۳ در دبی حداقل و در شرایط بدون آب‌پایه، جت خروجی در فاصله ۰/۸ طول کفبند L_{A1} و ۰/۳ طول کفبند L_{A2} از لبه پلکان آخر به کفبند برخورد می‌کند. با نصب آب‌پایه با هندسه‌های مختلف در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹ طول کفبند L_{A1} و ۰/۴ تا ۰/۵ طول کفبند L_{A2} از لبه پلکان به کفبند وارد می‌شود. با افزایش دبی جریان به میزان حداکثر، برای

ملایم‌تر می‌شود. با کاهش شیب سرریز پلکانی به ۱:۳، زاویه جت ریزشی جریان در دبی حداقل در حالت بدون آب‌پایه و آب‌پایه با هندسه‌های S_3Si_1 ، S_3Si_2 و S_3Si_3 به ترتیب ۳۸، ۵۲، ۵۳ و ۵۳ درجه می‌باشد. به عبارت دیگر، نصب آب‌پایه منجر به افزایش چشم‌گیر زاویه جت خروجی از سرریزها می‌شود. با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر زاویه جت ریزشی جریان در حالت بدون آب‌پایه و آب‌پایه با هندسه‌های مختلف، به هم نزدیک شده و به ترتیب برابر ۳۷، ۳۴، ۳۶ و ۳۵ درجه می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد با کاهش شیب (افزایش طول پله) جت جریان با زاویه ملایم‌تری وارد بستر رسوبی شده و در نتیجه میزان ممنتوم جت ناشی از ورود آن به حوضچه رسوبی و قدرت گردابه‌های شکل گرفته کاهش می‌یابد.

طول جت خروجی از پلکان آخر اهمیت بالایی بر عملکرد کفبندها بر کاهش عمق آب‌شستگی دارد. بررسی تصویرهای محل برخورد جت ریزشی خروجی به بستر رسوبی نشان داد که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ در دبی حداقل و در وضعیت بدون آب‌پایه جت خروجی در فاصله

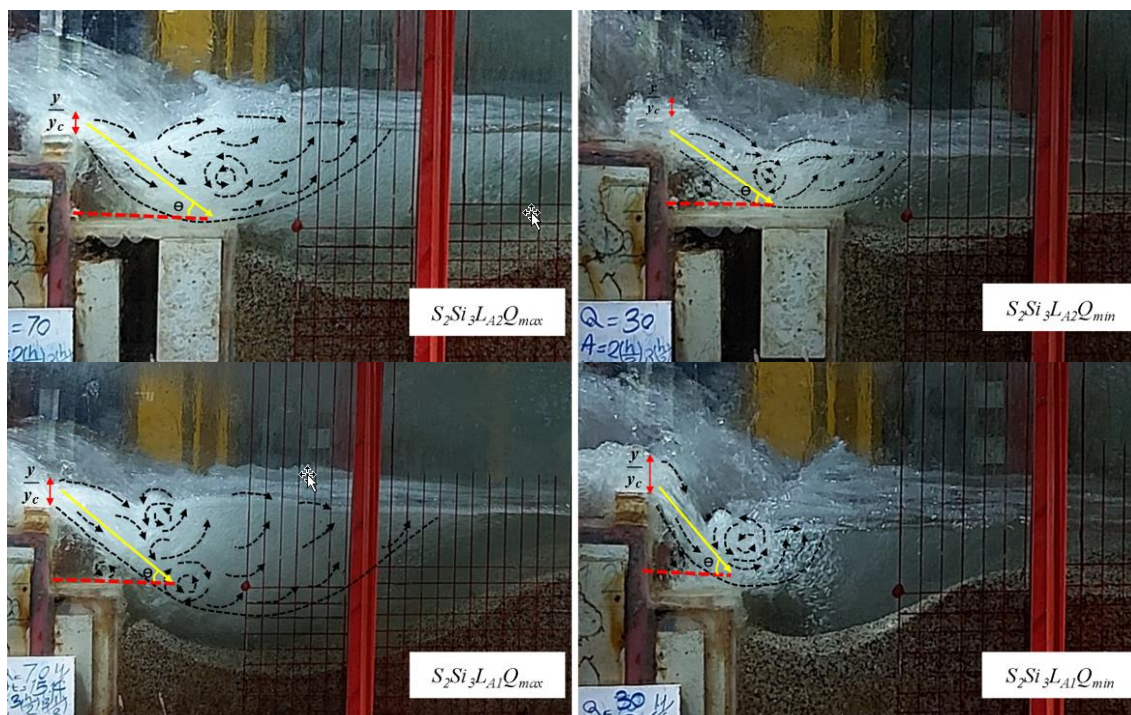


Fig. 5 A View of angle and thickness of the output nappe jet, vortex and hydraulic jump formed in the downstream of stepped weir with slope 1:2

شکل ۵ نمایی از زاویه و ضخامت تیغه جت ریزشی خروجی، گردابه‌ها و پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین‌دست سرریز پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای با شیب ۱:۲

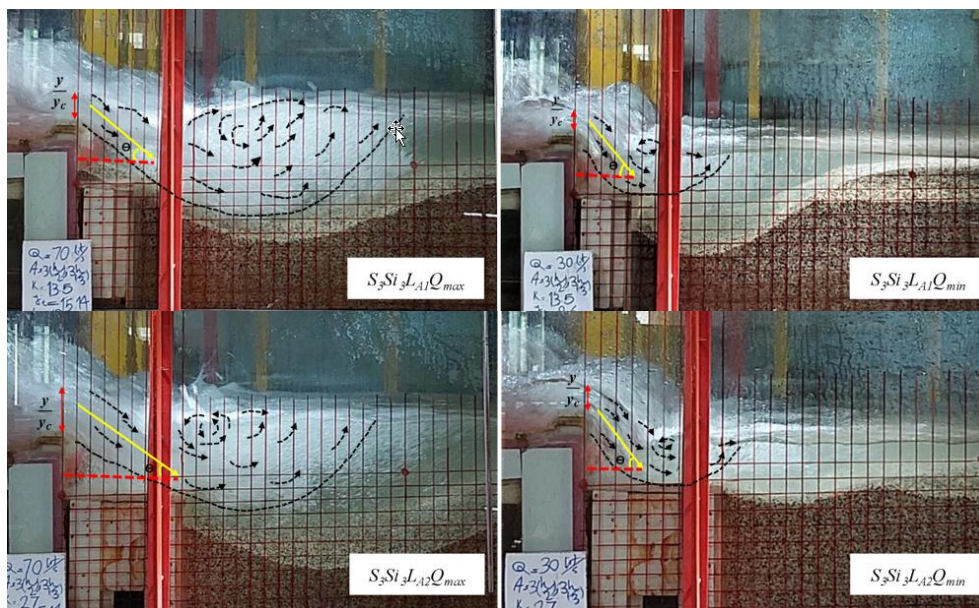


Fig. 6 A View of angle and thickness of the output nappe jet, vortex and hydraulic jump formed in the downstream of stepped weir with slope 1:3

شکل ۶ نمایی از زاویه و ضخامت تیغه جت ریزشی خروجی، گردابه‌ها و پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین‌دست سرریز پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای با شیب ۱:۳

مشاهده‌های آزمایشگاهی گویای آن بود که در دقیقه‌های ابتدایی حداکثر آب‌شستگی در مجاورت پای سرریز رخ داده و با گذشت زمان و فعالیت گردابه‌ها، گودال آب‌شستگی به پایین‌دست رشد طولی نموده و به تدریج گودال آب‌شستگی به‌طور کامل توسعه یافته و تغییرات آن ناچیز می‌شود. همچنین ارتفاع پشته در پایین‌دست چاله آب‌شستگی در بازه‌های زمانی ابتدایی و توسعه آب‌شستگی بیشتر بوده 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).

مشاهده‌های 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 بر روی پشته رسوبی توانایی زیادی برای جابه‌جایی ذرات رسوبی روی پشته را نداشته و حرکت آن به طرف پایین‌دست به کندی صورت می‌گیرد. با افزایش دبی جریان، میزان تنش برشی بر روی پشته رسوبی افزایش یافته و جابه‌جایی پشته رسوبی با نرخ بیشتری به طرف پایین‌دست انجام شد. در این حالت شکل تاج پشته رسوبی بصورت هموار مشاهده شد (شکل ۸).

وضعیت بدون آب‌پایه جت خروجی در فاصله ۱/۳ طول کف‌بند L_{A1} و ۰/۷ طول کف‌بند L_{A2} و با نصب آب‌پایه با هندسه‌های مختلف در محدوده ۱/۴ تا ۱/۵ برابر طول کف‌بند L_{A1} و ۰/۸ تا ۰/۹ طول کف‌بند L_{A2} از لبه پلکان به سطح حوضچه پایین‌دست وارد می‌شود (شکل ۶).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شرایط نصب سرریز با شیب ۱:۳، طول جت خروجی از سرریز بیشتر شده و در نتیجه عملکرد کف‌بندها در کاهش میزان آب‌شستگی بیشتر تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

۳-۲- تأثیر نصب کف‌بند بر توسعه زمانی نیم‌رخ آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد که نرخ آب‌شستگی عمودی در مرحله آغازین و در دقیقه‌های اولیه از انجام آزمایش، با شدت بیشتری رخ می‌دهد. با گذشت زمان به تدریج از شدت آب‌شستگی کاسته و توسعه طولی گودال آب‌شستگی شکل می‌گیرد. با نزدیک شدن به دقیقه‌های پایانی، تغییرات محسوسی در روند آب‌شستگی مشاهده نشده و گودال به حالت پایدار و تعادلی در می‌آید.

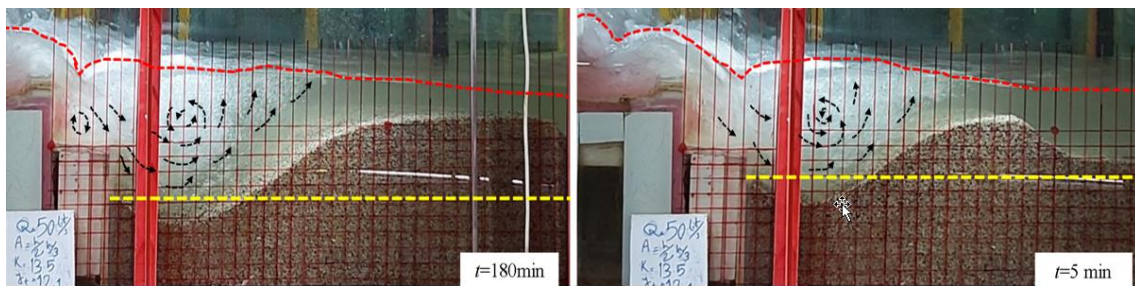


Fig. 7 A View of flow pattern, vortex formation and sediment ridge at the downstream of weir $S_3Si_1LA_1$ for $y_c/h=0.48$ ($q=0.033m^3/m.s$ and $\eta=0.267$)

شکل ۷ نمایی از الگوی جریان، تشکیل گردابه و پشته رسوبی در پایین دست سرریز $S_3Si_1LA_1$

برای $y_c/h=0.48$ ($q=0.033m^3/m.s$ و $\eta=0.267$)



Fig. 8 A View of sediment ridge at the downstream of weir SL_2 : a) $y_c/h=0.34$, $q=0.02m^3/m.s$ and $\eta=0.098$ and b) $y_c/h=0.61$, $q=0.046m^3/m.s$ and $\eta=0.52$

شکل ۸ نمایی از پشته رسوبی در پایین دست سرریز SL_2 : a) $y_c/h=0.34$ و $q=0.02m^3/m.s$ و $\eta=0.098$

(b) $y_c/h=0.61$ و $q=0.046m^3/m.s$ و $\eta=0.52$

بررسی نتایج نشان داد با افزایش دبی به میزان حداکثر، نصب کفبند به طول L_{A1} در سرریز پلکانی با آبپایه کنگره‌ای S_2Si_2 با کاهش میانگین ۲۵ درصد در عمق لحظه‌ای آبشستگی، عملکرد مطلوب‌تری داشت. با افزایش طول کفبند به L_{A2} ، از میان سرریزهای مورد مطالعه در این شیب، سرریز پلکانی با آبپایه کنگره‌ای S_2Si_2 با میانگین کاهش ۵۰ درصد عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی، بهترین عملکرد در کاهش آبشستگی را داشت.

مقایسه نتایج حاصل از توسعه زمانی عمق آبشستگی برای دبی حداقل در زمان‌های نسبی مذکور در سرریز پلکانی با و بدون آبپایه کنگره‌ای با شیب ۱:۳ نشان داد که با نصب کفبند به طول L_{A1} ، سرریز پلکانی با آبپایه کنگره‌ای (S_3Si_1) با متوسط کاهش ۱۶ درصد عملکرد بهتری در کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی داشت (شکل ۱۰). با افزایش طول کفبند به L_{A2} و شکل‌گیری بخش عمده پرش هیدرولیکی و گردابه‌های آن

نتایج بدست آمده از مقایسه توسعه زمانی عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای مورد بررسی در شیب‌های ۱:۲ و ۱:۳ برای دبی‌های حداقل و حداکثر در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مقایسه نتایج توسعه زمانی عمق آبشستگی برای دبی حداقل در در زمان‌های نسبی مشخصه ۰/۲۵ و ۰/۵ به ترتیب ۹۰ دقیقه و ۱۸۰ دقیقه از آغاز آزمایش در سرریز پلکانی با و بدون آبپایه کنگره‌ای با شیب ۱:۲ نشان داد که با نصب کفبند به طول L_{A1} ، سرریز بدون آبپایه (S_2) با متوسط کاهش ۱۴ درصد عملکرد بهتری در مقایسه با سرریزهای پلکانی با آبپایه کنگره‌ای داشت (شکل ۹). با افزایش طول کفبند به L_{A2} ، تیغه‌های ریزشی به‌طور کامل روی کفبند وارد شده و پرش هیدرولیکی پیش از ورود به بستر رسوبی تشکیل می‌شد. در این شرایط، سرریز پلکانی با آبپایه کنگره‌ای (S_2Si_2) با میانگین ۵۷ درصد کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی، بیشترین عملکرد را در کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی داشت.

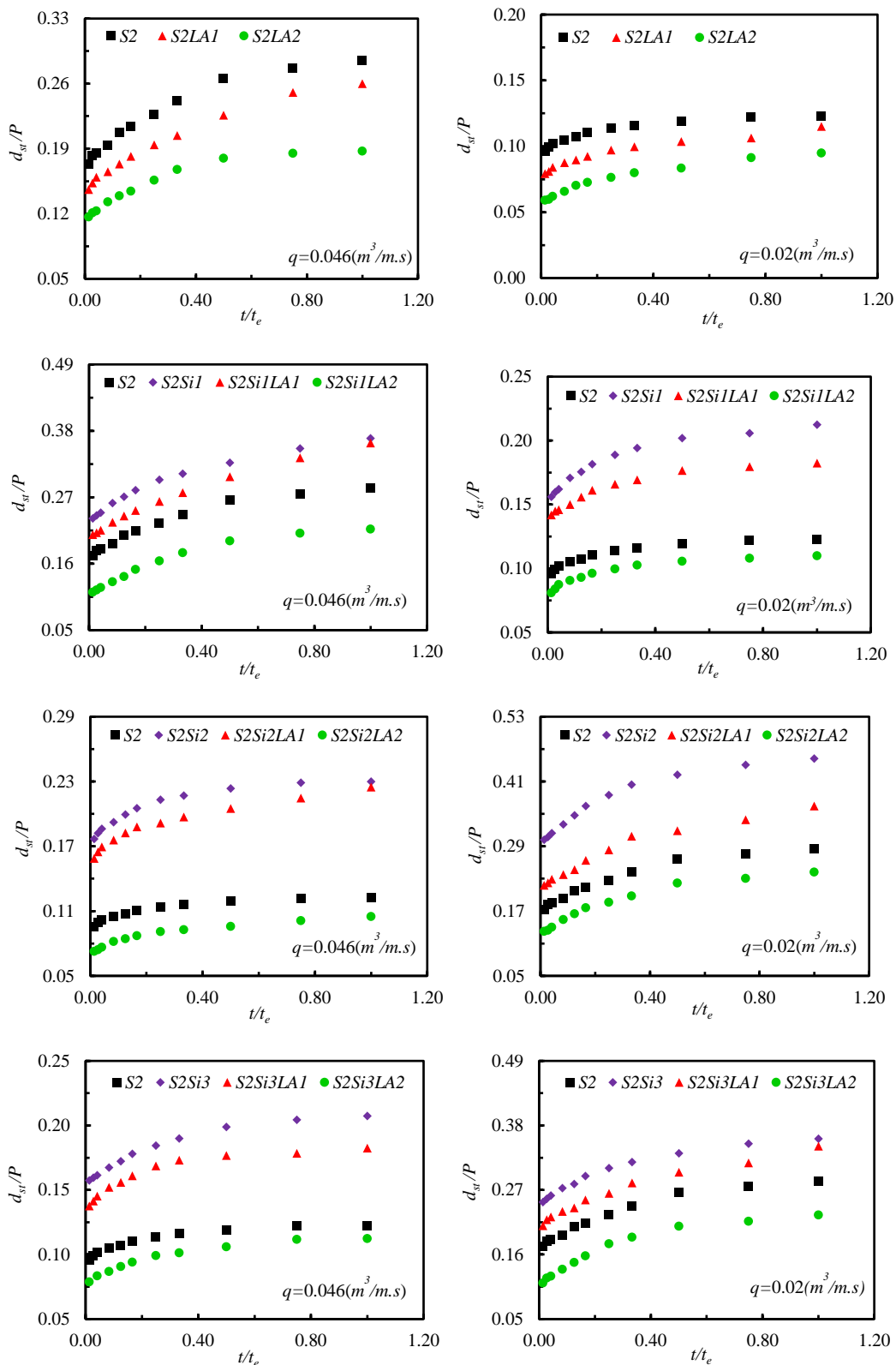


Fig. 9 Effect of the apron installation on temporal variation of maximum scour depth at the downstream of stepped weir with and without labyrinth sill in slope 1:2

شکل ۹ تاثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی با و بدون آب‌پایه کنگره‌ای در دامنه دبی حداقل و حداکثر در شیب ۱:۲

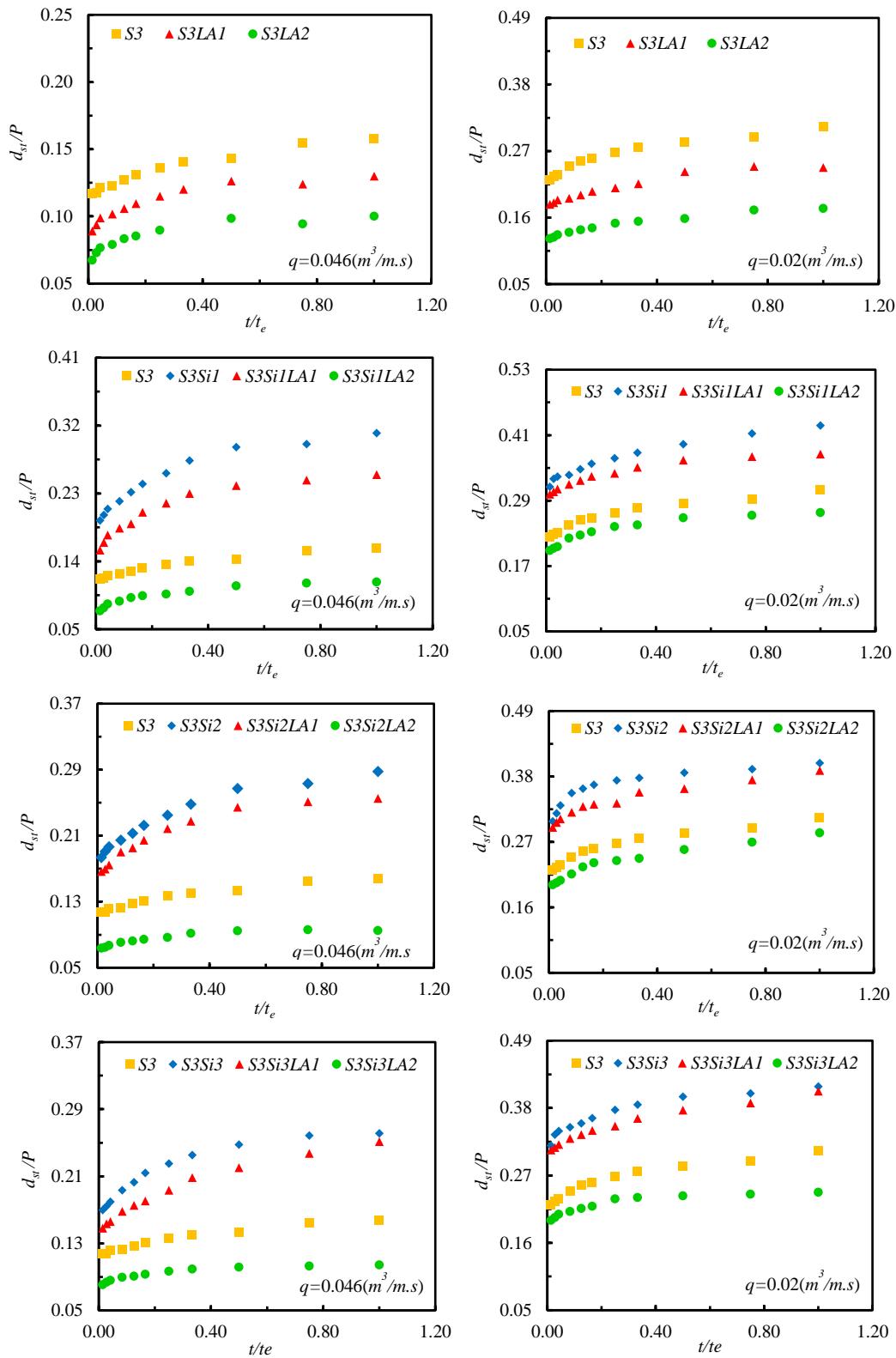


Fig. 10 Effect of the apron installation on temporal variation of maximum scour depth at the downstream of stepped weir with and without labyrinth sill in slope 1:3

شکل ۱۰ تاثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی با و بدون آب پایه کنگره‌ای در دامنه دبی حداقل و حداکثر در شیب ۱:۳

بررسی نتایج گویای آن است که در سرریز S_2Si_2 (آب پایه با عرض‌های برابر 0.75 متر و ارتفاع‌های 0.5 و 0.7 متر)، نصب کفبند با طول L_{A1} میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه مورد بررسی، به ترتیب ۲ و ۱۹ درصد نسبت به سرریز بدون کفبند (S_2Si_2) کم می‌کند. با افزایش طول کفبند از L_{A1} به L_{A2} در سرریز یادشده، میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند (S_2Si_2) به ترتیب ۵۴ و ۴۶ درصد کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی با آب پایه کنگره‌ای S_2Si_3 (آب پایه با عرض‌های برابر 0.25 متر و ارتفاع‌های 0.3 و 0.5 متر)، نصب کفبند با طول L_{A1} میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر میزان به ترتیب ۱۲ و ۳ درصد کاهش می‌دهد. با تغییر طول کفبند از L_{A1} به L_{A2} در سرریز یادشده، میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند (S_2Si_3) به ترتیب ۴۶ و ۳۶ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سرریز $S_2Si_2L_{A2}$ عملکرد مطلوب‌تری در کاهش آب‌شستگی داشته و میزان عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی ($d_{s/p}$) را از میزان 0.23 و 0.45 در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر در حالت بدون کفبند، به 0.1 و 0.24 کم می‌نماید.

با نصب کفبند با طول L_{A2} ، جت ریزشی خروجی از سرریز در محدوده $0.5-0.4$ طول کفبند به حوضچه پایین دست وارد شده و در نتیجه بخش اصلی پرش هیدرولیکی و گردابه چرخشی اصلی تشکیل دهنده آب‌شستگی، روی آن ایجاد می‌شود. همچنین با نصب آب پایه تداخل بین تیغه‌های ریزشی بیشتر شده و انرژی و سرعت جریان جت خروجی بیشتر کاهش می‌یابد، به این ترتیب عملکرد تجمیعی سازه و کفبند در کاهش عمق آب‌شستگی بیشتر می‌شود.

نتایج تأثیر نصب کفبند با طول‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سرریز پلکانی و پلکانی با آب پایه کنگره‌ای با شیب $1:3$ نسبت به حالت

در طول کفبند، سرریز پلکانی با آب پایه کنگره‌ای (S_3Si_2) با میانگین ۶۴ درصد کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، بهترین عملکرد را در کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی داشت. بررسی نتایج نشان داد با افزایش دبی به میزان حداکثر، نصب کفبند به طول L_{A1} در سرریز پلکانی بدون آب پایه (S_3) با کاهش میانگین ۲۰ درصد در عمق لحظه‌ای آب‌شستگی، عملکرد مطلوب‌تری داشت. با افزایش طول کفبند به L_{A2} از میان سرریزهای مورد بررسی در این شیب، سرریز پلکانی بدون آب پایه (S_3) با میانگین کاهش ۴۵ درصد عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، بهترین عملکرد را در کاهش آب‌شستگی داشت.

۳-۳- بررسی تأثیر نصب کفبند بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست

سرریزهای پلکانی و پلکانی با آب پایه کنگره‌ای

مقایسه نتایج تأثیر ایجاد کفبند با طول‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سرریز پلکانی با شیب $1:2$ نسبت به حالت بدون کفبند آن (S_2Si_1 ، S_2Si_2 ، S_2Si_3) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

بررسی نتایج گویای آن است در شرایط بدون آب پایه، نصب کفبند‌های L_{A1} و L_{A2} مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل $q=0.02 m^3/m.s$ ، $q=0.046 m^3/m.s$ تا حداکثر ($\eta=0.098$ و $y/h=0.34$) به ترتیب به طور میانگین 7 و 29 درصد کاهش می‌دهد.

مقایسه نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی با آب پایه کنگره‌ای S_2Si_1 (آب پایه با عرض‌های برابر 0.75 متر و ارتفاع‌های 0.3 و 0.5 متر)، نصب کفبند با طول L_{A1} میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۱۴ و ۲ درصد کاهش می‌دهد. با تغییر طول کفبند از L_{A1} به L_{A2} در سرریز مذکور، میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند (S_2Si_1) به ترتیب ۴۸ و ۴۱ درصد کاهش می‌یابد.

دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند (S_3Si_1) به ترتیب ۶۴ و ۳۸ درصد کاهش می‌یابد. بررسی نتایج گویای آن است که در سرریز پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای S_3Si_2 (آب‌پایه با عرض‌های برابر ۰/۷۵ متر و ارتفاع‌های ۰/۰۵ و ۰/۰۷ متر)، نصب کفبند با طول L_{A1} میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر، به ترتیب ۱۱ و ۳ درصد نسبت به سرریز بدون کفبند (S_3Si_2) کم می‌کند. با افزایش طول کفبند از $P/3$ به $2P/3$ در سرریز یادشده، میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند (S_3Si_2) به ترتیب ۶۶ و ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای S_3Si_3 (آب‌پایه با عرض‌های برابر ۰/۲۵ متر و

بدون کفبند آن ($S_3Si_3, S_3Si_2, S_3Si_1, S_3$) در شکل ۱۲ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج گویای آن است در شرایط بدون آب‌پایه، نصب کفبندهای L_{A1} و L_{A2} میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل ($\eta=0/098$ و $y/h=0/34$ ، $q=0/02m^3/m.s$) تا حداکثر ($\eta=0/52$ و $y/h=0/61$ ، $q=0/046m^3/m.s$) به ترتیب به‌طور متوسط ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. مقایسه نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی با آب‌پایه کنگره‌ای S_3Si_1 (آب‌پایه با عرض‌های برابر ۰/۷۵ متر و ارتفاع‌های ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر)، نصب کفبند با طول L_{A1} میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر میزان به ترتیب ۳ و ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. با تغییر طول کفبند از $P/3$ به $2P/3$ در سرریز یادشده، میزان عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در

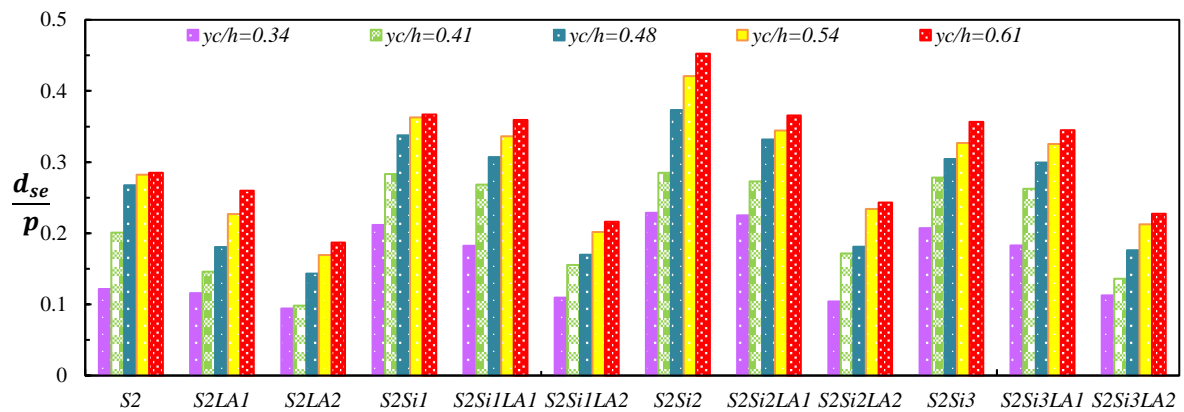


Fig. 11 Effect of the apron installation on reducing the maximum scour depth at the stepped weirs with slope of 1:2

شکل ۱۱ تاثیر نصب کفبند بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی مورد بررسی با شیب ۱:۲

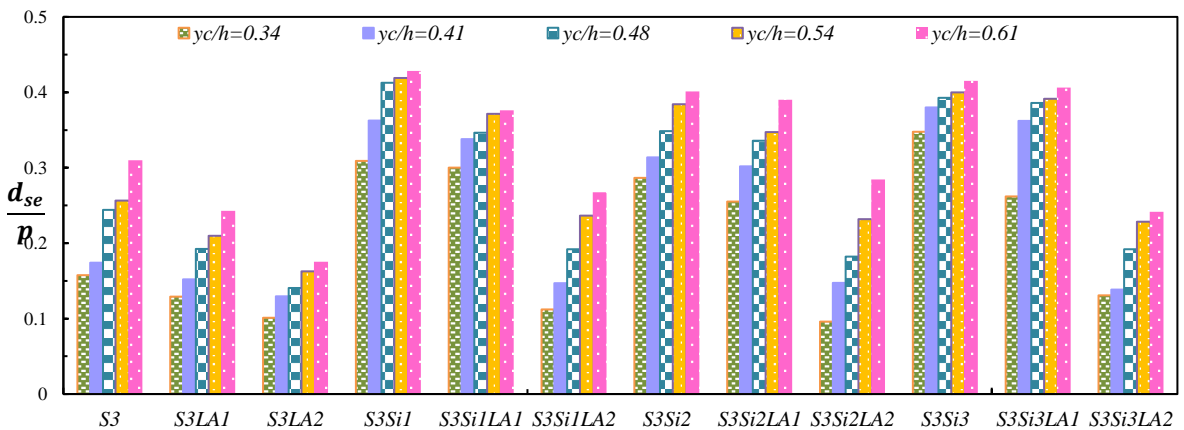


Fig. 12 Effect of the apron installation on reducing the maximum scour depth at the stepped weirs with slope of 1:3

شکل ۱۲ تاثیر نصب کفبند بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سرریزهای پلکانی مورد بررسی با شیب ۱:۳

آخر به حوضچه رسوبی در شیب ۱:۲ نشان داد که با نصب آبپایه با هندسه‌های مختلف در دبی‌های حداقل و حداکثر، زاویه جت ریزشی جریان نسبت به حالت بدون آبپایه تغییر چندانی نداشت. در شیب ۱:۳ نصب آبپایه با هندسه‌های مختلف در دبی حداقل موجب افزایش زاویه جت ریزشی جریان نسبت به حالت بدون آبپایه شده اما در دبی حداکثر نصب آبپایه تأثیری بر زاویه جت ریزشی نداشت.

مقایسه نتایج بدست آمده از تأثیر نصب کفبند با طول‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه عمق نسبی (y_e/h) ۰/۰۶ تا ۰/۳۴ در پایین‌دست سرریز پلکانی با و بدون آبپایه در شیب ۱:۲ نشان داد با نصب کفبند با طول‌های $(P/3) L_{A1}$ و $(2P/3) L_{A2}$ ، میزان عمق نسبی حداکثر نهایی آبشستگی (d_{se}/p) در شرایط بدون آبپایه در سرریز S_2 از ۰/۲۳ به ترتیب به ۰/۱۹ و ۰/۱۱ کاهش یافت. در سرریزهای پلکانی با آبپایه کنگره‌ای، میزان پارامتر d_{se}/p با نصب کفبندهای یادشده بطور میانگین ۰/۲۲ و ۰/۱۷ تقلیل یافت.

مقایسه نتایج به‌دست آمده گویای آن است که با کاهش شیب کارگذاری سازه به ۱:۳، نصب کفبند به طول‌های L_{A1} و L_{A2} در دامنه عمق‌های نسبی حداقل تا حداکثر، میزان عمق نسبی حداکثر نهایی آبشستگی در شرایط بدون آبپایه در سرریز S_3 به ۰/۱۸ و ۰/۱۴ کاهش داده و در سرریزهای پلکانی با آبپایه کنگره‌ای، نصب کفبندهای یادشده میزان عمق نسبی حداکثر نهایی آبشستگی را در محدوده ۰/۲۴ و ۰/۱ کاهش پیدا کرد.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	عرض سرریز (m)
B_{sh}	عرض آبپایه بلند (m)
B_{sl}	عرض آبپایه کوتاه (m)
d_{50}	قطر میانگین ذرات رسوبی (m)
F_d	عدد فرود ذره
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h	ارتفاع پله (m)
h_s	ارتفاع آبپایه (m)
l	طول پله (m)

ارتفاع‌های ۰/۰۳ و ۰/۰۵ (متر)، نصب کفبند با طول L_{A1} ، میزان عمق حداکثر نهایی آبشستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر میزان به ترتیب ۲۵ و ۲ درصد کاهش می‌دهد. با تغییر طول کفبند از $P/3$ به $2P/3$ در سرریز یادشده، میزان عمق حداکثر نهایی آبشستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به سرریز بدون کفبند (S_3Si_3) به ترتیب ۶۲ و ۴۲ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سرریز $S_3Si_3L_{A2}$ عملکرد بهتری در کنترل آبشستگی داشته و میزان عمق نسبی حداکثر نهایی آبشستگی (d_{se}/p) را از میزان ۰/۳۵ و ۰/۴۲ در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر در حالت بدون کفبند، به ۰/۱۳ و ۰/۲۴ متر کم می‌نماید.

همان‌طور که اشاره شد، نصب کفبند با طول $2P/3$ ، موجب جلوگیری از شتاب‌گیری جت روی بستر رسوبی شده و جت در محدوده ۰/۵-۰/۴ طول کفبند به حوضچه پایین‌دست وارد می‌شود و پرش هیدرولیکی و گردابه چرخشی تشکیل دهنده آبشستگی، بر روی کفبند ایجاد می‌شود. در نتیجه این هندسه از آبپایه کنگره‌ای با کاهش بیشتر انرژی و سرعت جریان جت خروجی و نیز ایجاد الگوی مناسب زاویه جت ریزشی به بستر رسوبی، شرایطی را ایجاد کرده که کمترین میزان آبشستگی رخ دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر همزمان ایجاد کفبند در پایین‌دست سرریز پلکانی و نصب آبپایه با هندسه‌های مختلف بر روی پلکان‌های آن بر عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز، تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت در شیب‌های کارگذاری پلکان ۱:۲ و ۱:۳ به صورت آزمایشگاهی بررسی شد.

بررسی تصویرهای جریان عبوری از سرریزهای پلکانی با و بدون آبپایه در شیب ۱:۲ و ۱:۳ نشان داد نصب آبپایه با هندسه‌های مختلف در دبی‌های حداقل و حداکثر موجب افزایش ضخامت تیغه ریزشی نسبت به حالت بدون آبپایه می‌شود. همچنین بررسی تصویرهای جریان خروجی از پله

Applied Water Engineering and Research, 19(72), 51-68. (In Persian)

Gharibi, S., Esmaili Varaki, M., Mahmodi Kordestani, S. and Malekpour, A. (2021). Experimental investigation of effect of apron length on local scour downstream of stepped-labyrinth weirs. Proc. of 19th Iranian Hydraulic Conference, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)

Hoffmans, G.J.C.M. and Verhij, H.J. (1997). Scour Manual. A.A Balkema. Rotterdam, 384 p.

Kazempour Larsari, Z., Esmaili Varaki, M. and Malekpour, A. (2019). Laboratory study of scour downstream of stepped-labyrinth weirs. J. Soil and Water Research, 49(6), 1227-1241. (In Persian)

Kells, J., Balachandar, R. and Hagel, K. (2001). Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. Canadian Journal of Civil Eng., 28(3), 440-451.

Keshavarz Eskandari, M. and Esmaili Varaki, M. (2019). Experimental investigation of energy dissipation over stepped-labyrinth weirs. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 20(74), 59-74. (In Persian)

Khatsuria, R.M. (2005). Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York: Marcel Dekker. USA, 649 p.

Marion, A., Lenzi, M. and Comiti, F. (2002). Interference processes on scouring at bed sills. John Wiley, New York.

Marion, A. and Gaudio, R. (2003). Time evolution of scouring downstream of bed sills. J. Hydraulic Res., 41(3), 271-284.

Mason, P.J. and Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip bucket. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(2), 220-235.

Moayedi, M., Esmaili Varaki, M., Shafiei Sabet, B. and Mahmodi Kordestani, S. (2021). Experimental investigation of the apron length effect on local scour downstream of block ramp. Proc. of 19th Iranian Hydraulic Conference, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)

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.

Pagliara, S., Kurdistani, S.M. and Cammarata, L. (2014). Scour of clear water rocks w-weirs in

l_s طول آب پایه (m)

L_A طول کفبند (m)

p ارتفاع سرریز (m)

y_t عمق پایاب (m)

Δy اختلاف تراز سطح آب بالا دست و پایین دست (m)

ρ جرم مخصوص آب (kgm^{-3})

ρ_s جرم مخصوص ذرات رسوبی (kgm^{-3})

۶- منبع‌ها

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. Int. Civil Eng., 15(5), 763-774.

Barani, G.A., Rahnema, M.B. and Bagheri, H. (2005). Optimization of stepped spillway dimensions and investigation of flow energy dissipation over a physical model. Journal of Applied Science, 5(5), 878-882.

Chanson, H. (1995). Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. Pergamon. Oxford, 292 p.

Chinnarasri, C., Donjadee, S. and Israngkura, U. (2008). Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. J. Hydraul Eng., 134(8), 871-872.

Chinnarasri, C. and Wongwises, S. (2006). Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. J. Irrigation and Drainage Eng. 132(1), 70-76.

D'Agostino, V. and Ferro, V. (2004). Scour on alluvial bed downstream of grade control structures. J. Hydraulic Eng., 130(1), 24-37.

Dey, S. and Raikar, R.V. (2007). Characteristics of loose rough boundary streams at near-threshold. J. Hydraulic Eng. 133(3), 288-304.

Dey, S. and Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. J. Hydraulic Eng., 132(3), 264.

Esmaili Varaki, M., Mahmoudi Kurdistani, S. and Noormohammadi, G. (2021). Scour morphology downstream of submerged block ramps. Journal of

Conference. Shahid Chamran University, Ahvaz. (In Persian)

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.

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.

straight rivers. *J. Hydraulic Eng.*, 140(4), 4002-4007.

Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G. (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *J. Hydraulic Eng.*, 118(5), 707–717.

Rajaratnam, N. and Aderibigbe, O. (1998). Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets. *J. Hydraulic Eng.*, 124(10), 1034-1042.

Ranjbar, H., Salamatian, A. Ghodsian, M. (2007). Effects of time on scour down stream of free jets. *Proc. of 7th International River Engineering*

