

Scouring Downstream of Triangular and Trapezoidal Piano Weirs

Massoud Ghodsian^{1*}, Chonoor Abdi Choploo², Aram Ghafouri³

1- Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering and Water Engineering Research Center, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Ph.D. Candidate, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- M.Sc. Student, Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* ghods@modares.ac.ir

Received: 20 December 2020, Accepted: 3 May 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: With the increasing demand for water storage in recent years, the need to build structures such as dams has increased, which increases the likelihood of flooding with larger volumes (Anderson et al., 2013). Therefore, in order to increase the safety of dams, the need to build weirs with higher efficiency is of interest (Gonzalez and Chanson, 1995). Labyrinth weirs are hydraulic structures that are used to regulate the water level and control the flow in dam reservoirs. The crest axis of this type of weir is folded and consists of walls attached to each other. The main hypothesis in the design of this type of weir is to increase the weir capacity by increasing their crest length in a constant width.

The Piano key weir is an improved type of Labyrinth weir. In piano key weirs, unlike Labyrinth weirs, the inlet and outlet keys are sloping inwards and outwards. This type of weir requires less space than Labyrinth weirs, and therefore the foundation of this type of weir can have smaller dimensions. This advantage has made it possible to use this type of weir over the concrete dams (Lempérière, 2017). Scour downstream of the weirs can have a direct impact on the stability of the structure. For this reason, predicting the shape and dimensions of the scour hole at the downstream of these structures has been of interest to researchers. In this paper, we compare scouring downstream of triangular and trapezoidal Piano key weirs by changing the discharge and tailwater depth.

Methodology: Experiment were conducted in a rectangular channel having a width of 75 cm, metal bed, glass walls and a height of 80 cm in the hydraulic laboratory of water and hydraulic structural, faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran.

The intended Piano key weir was set up and sealed at a distance of 1 m from the beginning of the channel. All experiments were conducted under free flow conditions. A layer of uniform sediments with an average diameter of 1.64 mm, a geometric standard deviation of 1.24, a height of 42.5 cm, and a length of 2 m was placed downstream of the weir. Type-A triangular and trapezoidal Piano key weirs were made of thermoplastic (common PLA Filament) with a thickness of 1.2 cm. Each weir has 6 keys (3 inlet keys and 3 outlet keys), a width of 75 cm (the same as the channel), and the crest length and a height of 50 and 20 cm, respectively. The

experiments were conducted with discharges 35 and 45 Lit/s and five tailwater depths from 8 to 18 cm.

Results and Discussion: Experimental observations show that there are two dominant currents in Piano key weirs: the inlet key draws the approaching currents which is discharged downward from the inlet crest. The current flowing through the outlet crest, like a jet, is discharged downstream over the sloping section of the key. Also, the outlet current from the inlet key hits the surface of the bed downstream and, due to the existing tailwater depth, appears as surface rotation (at low tailwater depth) and surface turbulence (at high tailwater depth). Part of the outflow also deflects downstream and after colliding with the sediment bed, creates a weak rotational zone under the inlet key. The flow pattern on the output key is much more complex than the input key. In the outlet key, due to interaction of falling jets from the side walls crest with the approaching flow, the water level rises, and when the outflow enters the downstream area, a rotating area created in front of the outlet key. For this reason, sediments in front of the outlet key are washed more often. The scouring begins immediately after the downstream weir wall. Over time, the dimensions of the scour hole become larger, and the water jet in the scour hole becomes a rotational flow that helps to transport most of the sediment down to the downstream.

Conclusion: The results showed that the geometric parameters of the downstream scour hole of the Piano key weirs depend on the characteristics of the sediments, the discharge and tailwater. At lower particle Froude number, the maximum scour depth downstream of the triangular Piano key weir occurred closer to the weir compared to the trapezoidal Piano key weir. However, with increasing the particle Froude number, this trend has changed and the maximum depth of the scour hole and its position reduced in the trapezoidal Piano key weir. In general, as the particle Froude number increases, the maximum values of the scour hole depth, its location, and scour hole length for both the trapezoidal and triangular Piano key weirs increase. It was also observed that, for all discharges and tailwater depths, the maximum distance between the location of maximum scour depth and the the downstream wall weir, and the scour hole length for the triangular Piano key weir are on average 37% and 15.5% less compared to the trapezoidal Piano key weir. Equations with appropriate accuracy were obtained to predict the maximum depth of the scour hole, its location, the length of the scour hole and the scour at the downstream wall of the weir.

Keywords: Experimental study, Scouring, Hydraulic flow conditions, Piano key weir.



© 2021 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/>)

آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای

مسعود قدسیان^{۱*}، چنور عبدی چوپلو^۲، آرام غفوری^۳

- ۱- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
 ۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
 ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

* ghods@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در این تحقیق ویژگی‌های حفره آبشستگی و تغییرپذیری‌های آن در پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و سرریز کلیدپیانویی مثلثی بررسی آزمایشگاهی شد. بدین منظور سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۷۵ و ۸۰ سانتی‌متر با دو میزان دبی (۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه) و عمق پایاب‌های مختلف (۸ الی ۱۸ سانتی‌متر) آزمایش شد. جنس بستر پایین دست سرریز، مصالح ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت، قطر میانگین ۱/۶۴ میلی‌متر، با انحراف معیار هندسی ۱/۲۴ و به ضخامت ۴۲/۵ سانتی‌متر و طول ۲ متر بود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در اعداد فرود ذره رسوب کم، بیشینه عمق حفره آبشستگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در فاصله‌ای نزدیک‌تری از سرریز رخ داده است. اما با افزایش عدد فرود ذره رسوب، این روند تغییر یافته و بیشینه عمق حفره آبشستگی و موقعیت آن در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر و در فاصله‌ی نزدیک‌تری نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی رخ داده است. به طور کلی با افزایش عدد فرود ذره، فراسنجه‌های بیشینه عمق حفره آبشستگی، موقعیت مکانی آن، طول و حجم حفره آبشستگی پایین دست هر دو شکل سرریز افزایش می‌یابند. معادله‌هایی با دقت مناسب برای پیش‌بینی بیشینه عمق حفره آبشستگی، موقعیت مکانی آن، طول حفره آبشستگی، عمق آبشستگی پای دیوار پایین دست سرریز و حجم حفره آبشستگی برای دو شکل سرریز به دست آمد.

کلید واژگان: ارزیابی آزمایشگاهی، آبشستگی، شرایط هیدرولیکی جریان، سرریز کلیدپیانویی مثلثی، سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای.

۱- مقدمه

این نوع سرریز در طرح و نقشه مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و قوسی با تناوب در عرض جریان، تکرار می‌شود. فرضیه اصلی در طرح این نوع سرریز، افزایش ظرفیت آبگذری سرریز با افزایش طول تاج آنها در عرض ثابت و به ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست سرریز است (Lux and Hinchcliff, 1985). سرریز کلیدپیانویی نوع جدیدی از سرریز کنگره‌ای است و به عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور دبی بیشینه با دشواری روبه‌رو هستند، نیز استفاده می‌شوند (Lempérière and Ouamane, 2003). در سرریزهای کلیدپیانویی، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، دهانه‌های سرریز یک در میان، شیب‌دار به سمت مخزن و پایین دست آن است. اجرای این

با افزایش روزافزون تقاضا برای ذخیره آب در سال‌های اخیر نیاز به ساخت سازه‌هایی همچون سدها بیشتر شده است که این امر احتمال رخداد سیل با حجم‌های بزرگتر را بیشتر می‌کند (Anderson et al., 2013). به همین منظور برای افزایش ایمنی سدها نیاز به ساخت سرریزهایی با بازده بالاتر، بیشتر احساس می‌شود (Gonzalez and Chanson, 1995). سرریزهای کنگره‌ای یا زیگزاگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای تنظیم سطح آب و مدیریت و مهار جریان در مخزن‌های سد و همچنین در آبراهه‌ها استفاده می‌شوند. محور تاج این نوع سرریز، نامستقیم و از دیواره‌های چسبیده به هم تشکیل شده است. شکل هندسی

نوع سرریزها نسبت به سرریزهای کنگره‌ای فضای کمتری نیاز داشته و لذا پی این نوع سرریزها می‌تواند ابعاد کوچک‌تری داشته باشد. این برتری باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در روی تاج سدهای بتنی نیز استفاده کرد (Lempérière, 2017). آبشستگی در پایین دست سرریز می‌تواند تأثیر مستقیمی بر پایداری سازه داشته باشد. از سوی دیگر هزینه‌های بسیار زیاد ساخت سازه‌های مستهلک کننده انرژی مانند حوضچه‌های آرامش و حوضچه‌های استغراق باعث شده تا ارزیابی آبشستگی در بستر رودخانه و محافظت آن بیشتر شود. لازم به یادآوری است که در صورت استفاده از انواع حوضچه‌ها و یا کف بند، بررسی و ارزیابی آبشستگی در پایین دست این سازه‌ها نیز باید انجام شود. به همین دلیل، پیش‌بینی شکل و ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست این سازه‌ها مورد توجه پژوهشگران بوده است.

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

Ahmadi Dehrashid et al. (2016) به بررسی تأثیر دبی و عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی پس از کف‌بند تعبیه شده در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی پرداختند. آنان آزمایش‌هایی بر روی بستری از رسوب‌های یکنواخت با دبی و عمق‌های پایاب مختلف در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر انجام دادند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و افزایش دبی موجب افزایش ابعاد حفره آبشستگی می‌شود. (Jüstrich et al. 2016). بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی مستطیلی شکل پرداختند. آنان تأثیر فراسنجه‌هایی مانند دانه‌بندی رسوب‌های غیرچسبنده، دبی جریان، ارتفاع جت و عمق پایاب بر حفره آبشستگی را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی به ویژگی‌های رسوب، دبی، اختلاف ارتفاع جریان بالادست و پایین دست سرریز و عمق پایاب بستگی دارد و رابطه زیر را برای بیشینه عمق آبشستگی ارائه دادند:

$$\frac{ds, m}{d_{50}} = 0.42 \left(\frac{h_c}{d_{50}} \right)^{1.7} \left(\frac{\Delta H}{h_t} \right)^{0.3} \quad (1)$$

در این رابطه ds, m بیشینه عمق آبشستگی، d_{50} قطر میانگین مصالح بستر، h_c عمق بحرانی روی تاج سرریز، ΔH اختلاف بار آبی در بالادست و پایین دست سرریز و h_t عمق پایاب است.

Ahmadi Dehrashid et al. (2019) با بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پس از کف‌بند تعبیه شده در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی شکل نشان دادند که با افزایش طول مؤثر سرریز، عمق آب روی سرریز کاهش یافته و با کاهش سرعت برخورد جریان با بستر پایین دست، میزان عمق آبشستگی نیز کاهش می‌یابد. افزون بر این، کاهش عمق پایاب موجب افزایش بیشینه عمق آبشستگی و دور شدن محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی از انتهای کف‌بند می‌شود. (Nosedá et al., 2019). بررسی آزمایشگاهی عبور رسوب‌ها و فرسایش بالادست در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی شکل، در سه پیکربندی سرریز، دو قطر رسوب و شش دبی مختلف پرداختند. ایشان نشان دادند که ظرفیت عبور رسوب به شرایط تعادل انتقال رسوب در بالادست سرریز کلیدپیانویی بستگی دارد. (Yazdi et al. 2020). آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی شکل را بررسی کردند. آنان تحقیقات خود را در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر با استفاده دبی‌های مختلف و سه عمق پایاب انجام دادند و ویژگی‌های هندسی حفره آبشستگی شامل بیشینه عمق حفره آبشستگی، فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه حفره را اندازه‌گیری کردند. جنس بستر پایین دست سرریز، مصالح شنی با دانه‌بندی $d_{50}=8.7\text{mm}$ به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و طول ۲ متر بود. نتایج آنان نشان داد با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، ویژگی‌های هندسی حفره آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین عمق آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی بیش از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بود، به گونه‌ای که در همه‌ی دبی‌ها به طور میانگین عمق نسبی حفره آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی ۷ درصد کاهش می‌یابد. ایشان رابطه زیر را برای عمق بیشینه آبشستگی برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ارائه دادند:

$$\frac{ds, m}{\Delta H} = 0.743 (\text{Frd})^{1.028} \left(\frac{\Delta H}{h_t} \right)^{0.278} \quad (2)$$

در این رابطه $\text{Frd} = \frac{q}{\Delta H \sqrt{g d_{50}(s-1)}}$ ، q دبی بر واحد عرض سرریز، g شتاب ثقل و s چگالی نسبی ذرات بستر است.

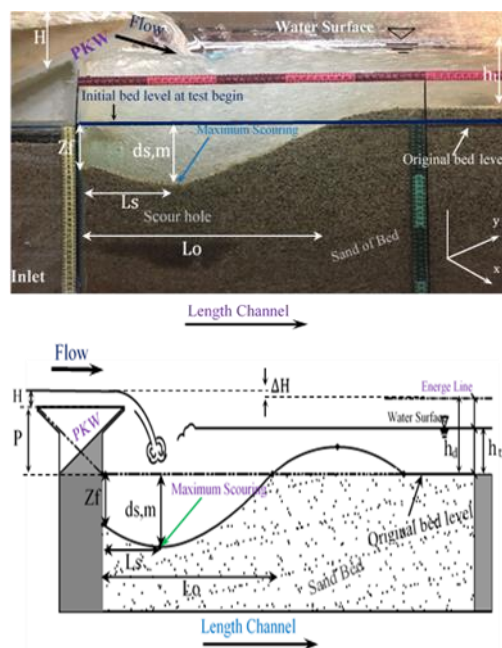


Fig. 1 View of scour hole of weir downstream with scour parameters schematic

شکل ۱ طرح واره‌ای از حفرة آبستگى پایین‌دست سرریز به همراه شکل نمای کلی فراسنجه‌های آبستگى

آب و جرم مخصوص رسوب می‌باشند.

با استفاده از روش باکینگهام و در نظر گرفتن q ، ΔH و ρ_w به عنوان متغیرهای تکراری، عامل‌های بی‌بعد موثر بر آبستگى در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\frac{\phi}{\Delta H} = F_1 \left(\frac{V}{\sqrt{g\Delta H}}, \frac{H}{h_t}, \frac{d_{50}}{\Delta H}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, \frac{Wi}{\Delta H}, \frac{Wo}{\Delta H}, \frac{W}{\Delta H}, \frac{P}{\Delta H}, \frac{B}{\Delta H}, \frac{L}{\Delta H}, \frac{h_t}{\Delta H}, N \right) \quad (4)$$

در این رابطه ϕ معرف ویژگی‌های هندسی حفرة آبستگى $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ ، $\frac{V}{\sqrt{g\Delta H}}$ و $\frac{d_{50}}{\Delta H}$ عدد فرود ذره Frd به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Frd = \frac{V}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \quad (5)$$

با توجه به اینکه در این تحقیق هدف بررسی ویژگی‌های جریان بر روی آبستگى است لذا ارتفاع سرریز، تعداد کلیدهای سرریز، عرض کلیدهای ورودی و خروجی و طول سرریز نیز در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین فراسنجه‌های بدون بعد موثر بر پدیده آبستگى که در این تحقیق استفاده شد به صورت معادله زیر است.

Ghodsian et al. (2020) به بررسی آزمایشگاهی آبستگى پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلی شکل پرداختند. آنان در تحقیق دیگری آبستگى پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای شکل را به صورت آزمایشگاهی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که افزایش ۱۱۲، ۸۹/۵ و ۶۳/۵ درصدی عمق پایاب در دبی‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه، به ترتیب کاهش ۳۷، ۳۵ و ۲۰/۳ درصدی عمق آبستگى را به دنبال دارد. همچنین آنان معادله‌ای برای رخ‌نمای طولی حفرة آبستگى ارائه دادند.

نتایج بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین طی سال‌های گذشته بیانگر این است که بررسی‌های محدودی روی آبستگى پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی انجام شده است و مقایسه آزمایشگاهی آبستگى پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی مثلی و ذوزنقه‌ای شکل در شرایط مختلف دبی و عمق پایاب بررسی نشده است. لذا در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی آبستگى پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی مثلی و ذوزنقه‌ای پرداخته شده است.

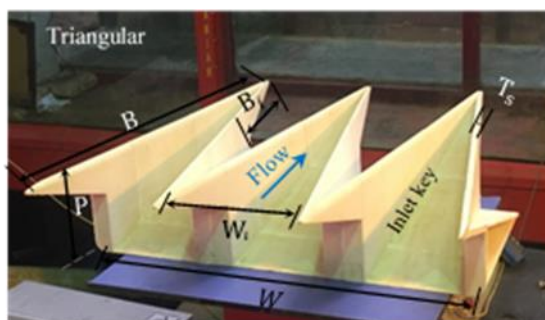
۲- تحلیل ابعادی

عامل‌های مؤثر بر آبستگى در پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی شامل فراسنجه‌های هندسی و هیدرولیکی هستند (Gebhardt et al., 2018; Jüstrich et al., 2016; Ghafouri et al., 2020). شکل ۱ آبستگى پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی و ویژگی‌های آن را نشان می‌دهد. چنانچه ویژگی‌های هندسی حفرة آبستگى شامل بیشینه عمق حفرة آبستگى ds,m ، فاصله محل بیشینه عمق حفرة آبستگى تا پای سرریز Ls ، طول حفرة آبستگى Lo ، عمق آبستگى در پنجه سرریز Zf و حجم حفرة آبستگى Vs باشد. رابطه زیر معرف عامل‌های موثر بر هندسه حفرة آبستگى در جریان آشفته است:

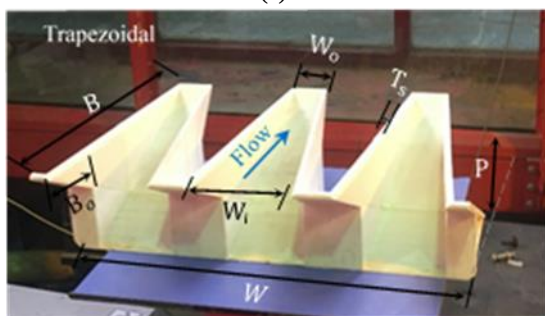
$$ds, m, Ls, Lo, Zf, Vs = f(V, N, Wi, Wo, W, B, L, P, \rho_s, \rho_w, g, d_{50}, h_t, H, \Delta H) \quad (3)$$

متغیرهای مستقل در معادله (۳) شامل سرعت جریان ریزشی از روی سرریز V ، L ، N و P به ترتیب طول سرریز، تعداد کلیدهای سرریز، ارتفاع و طول دیوارهای جانبی سرریز و همچنین Wi و Wo ، عرض دهانه کلیدهای ورودی و خروجی سرریز، W عرض کل سرریز، ρ_s و ρ_w جرم مخصوص

سرریز کلیدپیانویی: به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر، از دو نوع سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی شکل (شکل ۳) استفاده شد که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. مدت زمان انجام آزمایش: پدیده آبشستگی، فرآیندی تابع زمان است و با گذشت زمان گسترش پیدا کرده و به حالت تعادل می‌رسد. به منظور تعیین زمان مناسب در این آزمایش‌ها، دو آزمایش درازمدت به مدت ۱۲ ساعت برای سرریزهای دوزنقه‌ای و مثلثی انجام شد که نتیجه آن در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ روشن است که حفره‌ی آبشستگی پس از حدود ۵ ساعت، طبق معیار Chiew (1992)، به تعادل رسیده است. لذا با انتخاب این زمان تعادل، آزمایش‌های بعدی برای مدت زمان ۵ ساعت انجام شد.



(a)



(b)

Fig. 3 View of the piano key weir: a) Triangular and b) Trapezoidal

شکل ۳ نمایی از سرریز کلیدپیانویی: (a) مثلثی و (b) دوزنقه‌ای

۴- روش انجام آزمایش

پس از آماده کردن فلوم و نصب سرریز درون فلوم آزمایشگاهی و آب‌بندی کامل آن به وسیله چسب آکواریوم، ذرات رسوبی را به طول ۲۰۰ سانتی‌متر و هم تراز با ارتفاع پنجه سرریز در پایین دست سرریز ریخته و به وسیله تسطیح کننده بستر به کلی صاف شد. سپس درحالی که دریچه انتهایی به کلی بسته بود، شیر فلکه دبی ورودی را به میزان

$$\frac{\Phi}{\Delta H} = F_2 \left(\text{Frd}, \frac{H}{h_t} \right) \quad (6)$$

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس، در فلومی به طول ۱۰ متر و عرض ۷۵ سانتی‌متر انجام گرفت. ارتفاع فلوم ۸۰ سانتی‌متر و شیب کف آن ۰/۰۰۱ است. جنس کف فلوم از ورق گالوانیزه و دیواره‌های آن از شیشه نشکن می‌باشد. نمایی از طرح فلوم آزمایشگاهی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

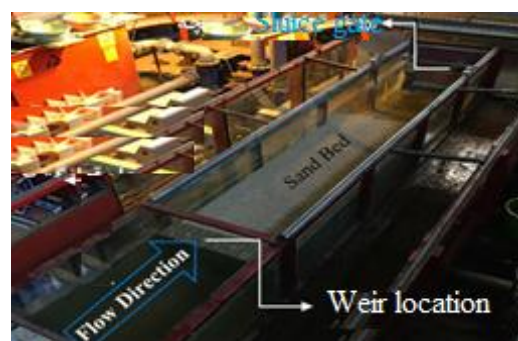


Fig. 2 View of the laboratory channel

شکل ۲ نمایی از فلوم آزمایشگاهی

عمق آب درون فلوم به وسیله دریچه تعبیه شده در انتهای آن کنترل می‌شود. جریان آب از یک مخزن زیر زمینی به وسیله یک پمپ با بیشینه دبی ۸۵ لیتر بر ثانیه تأمین می‌شود. سرریز کلیدپیانویی مورد نظر در فاصله ۲ متری از انتهای تبدیل نصب و آب‌بندی آن انجام شد. همگی آزمایش‌ها با سرریز در شرایط جریان آزاد انجام شد. جریان آب با دستگاه دبی‌سنج فراصوت با دقت صدم لیتر بر ثانیه تنظیم شد. در پایان هر آزمایش پس از زهکشی فلوم، تراز بستر با استفاده از دستگاه لیزری برداشت عوارض بستر، با دقت ۱ میلی‌متر برداشت شد.

ویژگی‌های رسوب: به منظور تعیین میزان آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی، از ماسه یکنواخت با قطر میانگین $d_{50} = 1.64 \text{ mm}$ و انحراف معیار $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$ استفاده شد. در اینجا d84 و d16 به ترتیب قطر ذراتی که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن ریزتر است. طول بستر قابل فرسایش پایین دست سرریز ۲۰۰ سانتی‌متر و عرض و عمق لایه رسوب‌ها به ترتیب ۷۵ و ۴۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد.

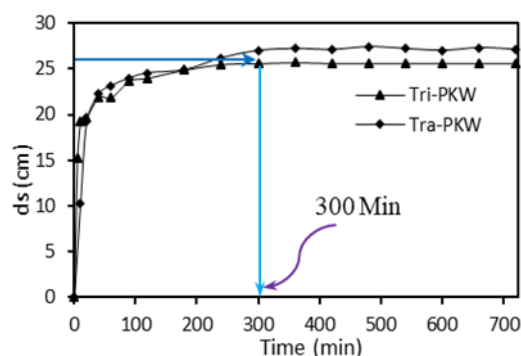


Fig. 4 Temporal evolution curve of the scour depth in 12 hours

شکل ۴ نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی در ۱۲ ساعت

ویژگی‌های آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ آورده شده است. در ادامه متن نیز به منظور بیان هر کدام از آزمایش‌ها از نام اختصاری آورده شده در جدول یادشده استفاده می‌شود. در این جدول Tri معرف سرریز کلیدپیانویی مثلی و Tra معرف سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای است.

جدول ۲ جزئیات آزمایش‌ها

Table 2 Details of experiments

Test No.	Test names	Q (Lit/s)	h_t (cm)	H (cm)	ΔH (cm)
1	Tri1	35	8	4.6	16.6
2	Tri 2	35	13.5	4.4	10.9
3	Tri 3	35	17	4.2	7.2
4	Tri 4	45	10	5.6	15.6
5	Tri 5	45	13.5	5.3	11.8
6	Tri 6	45	18	5.15	7.15
7	Tra1	35	8	4.1	16.1
8	Tra 2	35	13.5	4	10.5
9	Tra 3	35	17	3.8	6.8
10	Tra 4	45	10	4.7	14.7
11	Tra 5	45	13.5	4.7	11.2
12	Tra 6	45	18	4.6	6.6

۵- نتایج و بحث

هدف اصلی این پژوهش، مقایسه آزمایشگاهی آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی مثلی و ذوزنقه‌ای با تغییر در دبی و عمق پایاب می‌باشد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در سرریزهای کلیدپیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد: کلید ورودی، جریان‌های نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی به سمت پایین‌دست تخلیه

جدول ۱ ویژگی‌های سرریزهای کلیدپیانویی مورد استفاده

Table 1 Specifications of used piano key weirs

Parameters	Values	
	Trapezoidal Weir	Triangular Weir
Number of key of the weir, (N)	3	3
Total width of the weir, (W)	75cm	75cm
Width of the inlet key, (Wi)	17.5 cm	23.8cm
Width of the outlet key, (Wo)	5.1cm	-
Sidewall thickness, (Ts)	1.2cm	1.2cm
Laterl length of the weir, (B)	50cm	50cm
Upstream and Downstream overhang length, (Bo) and (Bi)	12.5 cm	12.5cm
Height of the PKW crest, (P)	20cm	20 cm
Slope of the inlet and outlet key, (Si) and (So)	28°	28°
Length of the weir crest, (L')	330cm	300cm
L'/W	4.4	4
Wi/Wo	3.4	-
B/P	2.5	2.5
P/W	0.27	0.27

کم باز کرده تا جریان آب به آرامی وارد فلوم شود. این عمل تا هنگامی ادامه پیدا می‌کرد که بستر ماسه‌ای به کلی مستغرق شود. سپس دبی را به وسیله شیر ورودی، افزایش داده تا به دبی مطلوب (۳۵ یا ۴۵ لیتر بر ثانیه) برسد. پس از اطمینان از رسیدن به دبی مورد نظر، دریچه پایین‌دست فلوم را به آهستگی باز کرده تا تراز سطح آب کاهش یافته و در عمق پایاب مورد نظر تثبیت شود. پس از تثبیت دبی و عمق پایاب مورد نظر، آزمایش آغاز می‌شود و شرایط آزمایش به مدت ۵ ساعت (زمان تعادل) ثابت نگه داشته می‌شود. هنگامی که آزمایش به پایان رسید در آغاز دریچه انتهایی فلوم را به کلی بسته، آن‌گاه پمپ خاموش و شیر خروجی باز می‌شد تا آب درون فلوم به کلی تخلیه شود و پس از زهکشی کامل بستر رسوبی، رخنمای آبشستگی در یک شبکه‌بندی مربعی شکل در جهت طولی و عرضی فلوم به وسیله متر لیزری با دقت ۱ میلی‌متر برداشت شد. مرحله‌های بالا برای سرریز کلیدپیانویی بعدی نیز انجام شد.

نمونه‌ای از طرح سه بعدی رخ‌نمای بستر در پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای برای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۳/۵ سانتی متر در شکل ۵ نشان داده شده است.

رخ‌نمای‌های طولی آبشستگی در سرریزهای مثلثی و دوزنقه‌ای در شرایط هیدرولیکی یکسان (دبی ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۳/۵ سانتی متر) در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل محور افقی، فاصله‌ی بی بعد شده از انتهای سرریز و محور عمودی، تراز بستر بی بعد شده با ارتفاع ریزش جریان را نشان می‌دهد.

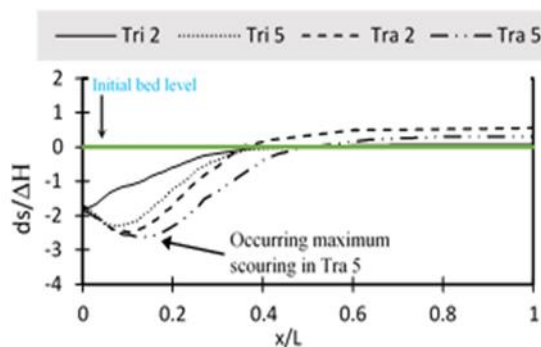


Fig. 6 Sample of longitudinal scouring profiles in a triangular and trapezoidal piano key weir

شکل ۶ نمونه‌ای از رخ‌نمای‌های طولی آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای

با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که روند تغییرپذیری‌های بستر در هر دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای شکل در شرایط هیدرولیکی مختلف، در طول آبراهه تا حدودی یکسان می‌باشند. ولی میزان آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه نسبت به آزمایش‌های دیگر بیشتر و معادل ۲/۶ برابر ارتفاع ریزش جریان می‌باشد که در فاصله ۱۳/۵ درصدی طول پایین دست، از انتهای سرریز رخ داده است. بر مبنای این شکل، کمترین تغییرپذیری عوارض بستر در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی شکل در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در فاصله دورتری از سرریز، نسبت به سرریز مثلثی قرار دارد. افزون بر این، با توجه به شکل ۶ نیز مشاهده شد که محل

می‌شود. الگوی دوم بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد. در این قسمت از سرریز، جریان عبوری از روی تاج خروجی، همانند یک جت به سمت پایین دست بخش شیب دار سرریز، تخلیه می‌شود. همچنین جریان خروجی از کلید ورودی به سطح بستر در پایین دست برخورد کرده و با توجه به عمق پایاب موجود، به صورت چرخش سطحی (در عمق پایاب کم) و اغتشاش سطحی (در عمق پایاب زیاد) ظاهر می‌شود قسمتی از جریان نیز به سمت پایین دست منحرف شده و پس از برخورد با سطح بستر رسوبی، ناحیه چرخشی ضعیفی در زیر کلید ورودی ایجاد می‌کند. الگوی جریان بر روی کلید خروجی سرریز بسیار پیچیده تر از کلید ورودی آن است. در این قسمت از سرریز به خاطر تلاقی جریان ناشی از جریان ریزشی از روی تاج دیوارهای کناری سرریز، با جریان خروجی بالادست، بالادستی سطح آب رخ داده و هنگامی که جریان خروجی وارد ناحیه پایین دست سرریز شود، آشفتگی شدیدی در خروجی کلیدهای سرریز شکل می‌گیرد. به همین دلیل بستر پایین که در برابر کلید خروجی قرار گرفته بیشتر شسته می‌شوند. در پایین دست سرریز، جریان عبوری از روی بستر رسوبی، باعث آبشستگی بستر می‌شود. محل آغاز آبشستگی بی درنگ پس از دیواره سرریز می‌باشد. با گذشت زمان، ابعاد حفره آبشستگی بزرگتر شده و جریان عبوری درون این حفره به صورت جریان چرخشی در می‌آید که با تعلیق بخشی از رسوبها به انتقال آنها به پایین دست کمک می‌کند.

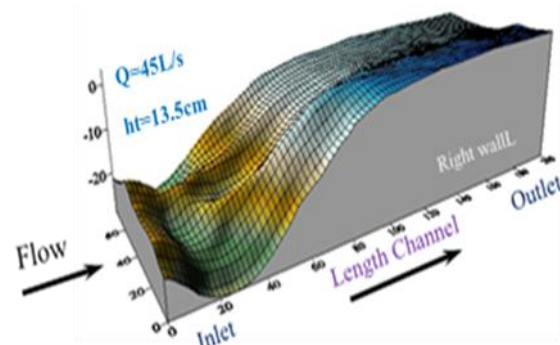


Fig. 5 Sample of a three-dimensional bed profile in downstream of a trapezoidal piano key weir

شکل ۵ نمونه‌ای از رخ‌نمای سه بعدی بستر در پایین دست سرریز سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

میانه‌ی فلوم یعنی در راستای کلید میانی رخ داده است. عملکرد متفاوت کلیدهای ورودی و خروجی سرریز، در دبی‌های مختلف نیز در شکل ۷ مشخص می‌باشد. همچنین بیشترین کاهش تراز بستر، در همه‌ی دبی‌ها در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل رخ داده است. نکته قابل توجه‌ای دیگر این است که در سرریز کلیدپیانویی مثلثی، رسوب‌های بیشتری در میانه‌ی فلوم نسبت به کناره‌ها (دیواره سمت راست و چپ) شسته شده‌است و این امر نیز به دلیل عملکرد متفاوت کلیدهای ورودی و خروجی در دو شکل سرریز می‌باشد.

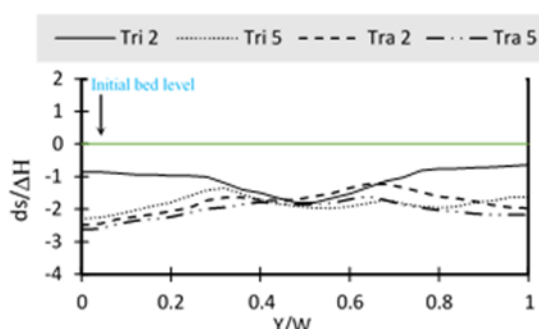


Fig. 7 Sample of transverse scouring profiles in a triangular and trapezoidal piano key weir

شکل ۷ نمونه‌ای از رخ‌نمای‌های عرضی آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای

تأثیر عدد فرود ذرات بر روی رخ‌نمای‌های طولی بستر برای دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای در شکل (۸) مقایسه شده است.

با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در اعداد فرود ذره کمتر از ۳، بیشینه عمق حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در فاصله‌ی نزدیک‌تری از پای سرریز رخ داده است، اما با افزایش عدد فرود ذره، این روند تغییر یافته و بیشینه عمق حفره آبشستگی و موقعیت مکانی آن در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر و در فاصله‌ی نزدیک‌تری از سرریز رخ داده است. به‌طوری‌که دورترین فاصله محل بیشینه عمق آبشستگی، در سرریز کلیدپیانویی مثلثی و برابر ۴۲ سانتی‌متری از پای سرریز می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که گستردگی حفره آبشستگی در جهت طول فلوم در اعداد فرود ذره بزرگتر، بیشتر بوده و در پی آن حجم مصالح شسته شده افزایش یافته و در نتیجه ارتفاع پشته‌ی رسوبی در پایین‌دست سرریز نیز بیشتر می‌شود.

آغاز آبشستگی بلافاصله از دیواره پایین‌دست سرریز می‌باشد. لازم به یادآوری است آبشستگی بستر پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی تابع شرایط جریان، شکل هندسی و ویژگی‌های سرریز و در راستای کلیدهای ورودی و خروجی نیز متفاوت است. این تفاوت‌ها به علت عملکرد متفاوت کلیدهای ورودی و خروجی و شکل سرریز است. زیرا اثرگذاری‌های طول تاج سرریز، عرض کلیدهای ورودی و خروجی، و تغییر سطح مقطع جریان در طول کلیدهای سرریز، بر روی هیدرولیک جریان و در نتیجه بر روی ویژگی‌های جت‌های خروجی از دو سرریز، و در شرایط مختلف جریان، متفاوت است. سازوکار آبشستگی در پایین‌دست این نوع سرریزها بسیار پیچیده است و تاکنون به خوبی بررسی نشده است. به دلیل پیچیدگی جریان در پایین‌دست سرریز و تداخل جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز، بررسی و شناخت دقیق‌تر سازوکار کامل آبشستگی، نیازمند برداشت میدان جریان است که در تحقیقات آتی باید انجام شود.

شکل ۷ نمونه‌ای از رخ‌نمای‌های آبشستگی در عرض فلوم برای سرریزهای کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای برای دبی‌های ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۳/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. در اینجا محور افقی، فاصله‌ی بی‌بعد شده از دیواره سمت راست و محور عمودی، تراز بستر بی‌بعد شده با ارتفاع ریزش جریان را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۷ مشخص است که رخ‌نمای آبشستگی در عرض فلوم نسبت به محور طولی فلوم، به طور کامل متقارن نمی‌باشد، متقارن نبودن رخ‌نمای آبشستگی در عرض فلوم به دلیل عملکرد متفاوت کلیدهای ورودی و خروجی و لندركنش جریان‌های خروجی از این کلیدها می‌باشد. متقارن نبودن رخ‌نمای آبشستگی در عرض فلوم در تحقیقات Ahmadi (2019) و Dehrashid et al. (2019) نیز گزارش شده است. آنان دلیل غیریکنواختی رخ‌نمای آبشستگی در عرض فلوم را به آشفته بودن جریان در پایاب و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت دادند. همچنین بیشترین کاهش موضعی در تراز بستر، در هر دو دبی در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل رخ داده است. نکته قابل توجه دیگر این است که در سرریز کلیدپیانویی مثلثی، کاهش بیشتر تراز بستر در

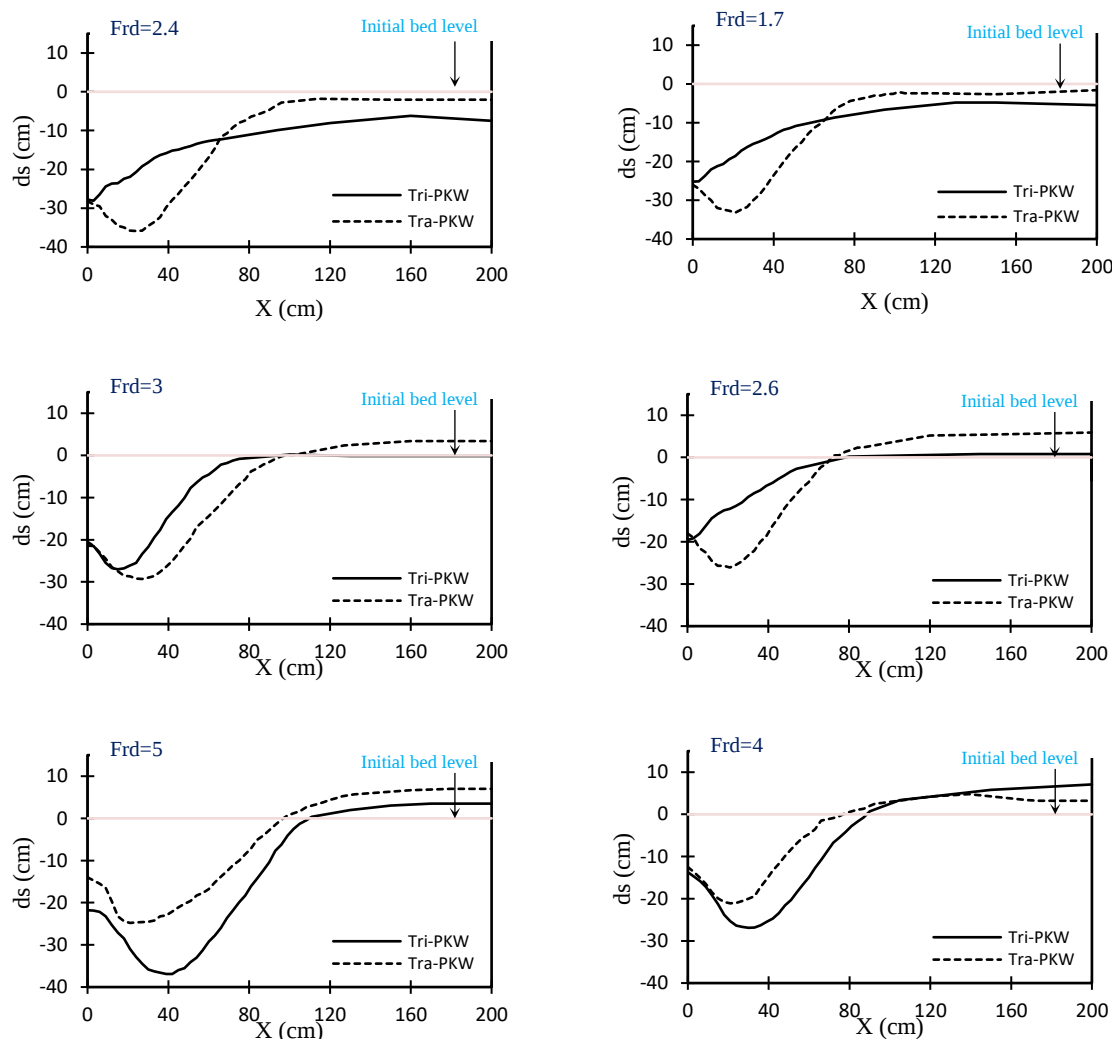


Fig. 8 Comparison of bed longitudinal profiles in downstream of triangular and trapezoidal piano key weirs

شکل ۸ مقایسه رخ‌نمای طولی بستر در پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای

میزان بیشینه عمق نسبی آبشستگی افزایش می‌یابد. روند افزایشی بیشینه عمق آبشستگی با عدد فرود ذره در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل توسط Yazdi et al. (2020) نیز گزارش شد. همچنین با توجه به شکل (۹) می‌توان گفت تغییرپذیری بیشینه عمق آبشستگی نسبی تا عدد فرود حدود ۳، در هر دو سرریز تا حدودی یکسان است. البته سرریز کلیدپیانویی مثلثی در این محدوده از عدد فرود ذره، تغییرپذیری کمتری دارد. اما با افزایش عدد فرود ذره، هر چند روند تغییرپذیری بیشینه آبشستگی نسبی، در هر دو سرریز افزایشی است، اما شاهد میزان‌های بیشتر عمق آبشستگی نسبی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی هستیم. به طور کلی بر مبنای شکل ۹، میانگین میزان‌های بیشینه عمق آبشستگی نسبی در سرریز

به‌طوری‌که بیشترین این میزان، برابر با ۷ سانتی‌متر در عدد فرود ذره برابر با ۴، در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل و در انتهای فلوام رخ داده است. تغییر روند اثرگذاری شکل سرریز بر روی نمای رخ طولی بستر، در اعداد فرود بزرگتر از حدود ۳ نیز در شکل ۸ مشخص است. بنابراین می‌توان گفت ویژگی‌های جریان و شکل هندسی سرریز، روند دو گانه‌ای بر روی آبشستگی دارند.

با استفاده از معادله (۶)، تاثیر عدد فرود ذره (Frd) بر روی فراسنجه‌های هندسی حفره آبشستگی برای هر دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در هر دو سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی، با افزایش عدد فرود ذره،

می‌دهد. بیشینه طول حفره آبشستگی، نشان دهنده فاصله افقی بین ابتدا و انتهای حفره آبشستگی است. پیش‌بینی این طول به طراحان در انتخاب طولی از بستر که به حفاظت نیاز دارد، کمک می‌کند. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در هر دو سرریز کلیدپیانویی، با افزایش عدد فرود ذره، طولی نسبی حفره آبشستگی افزایش می‌یابد.

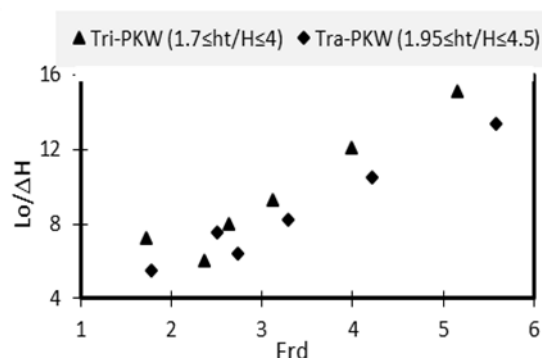


Fig. 11 Changes of scour hole length versus particle Froude number for triangular and trapezoidal weir
 شکل ۱۱ تغییرپذیری‌های طول حفره آبشستگی در برابر عدد فرود ذره در سرریز مثلثی و دوزنقه‌ای

همچنین در یک عدد فرود ثابت، میزان‌های طول نسبی حفره آبشستگی سرریز کلیدپیانویی مثلثی بیش از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای می‌باشد و این افزایش در عدد فرود ذره بزرگتر از ۳ مشهودتر است.

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی تا سرریز و طول حفره آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۷ درصد و ۱۵/۵ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای است.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که عمق نسبی آبشستگی در جلوی دیوار پایین‌دست در هر دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای، با افزایش عدد فرود ذره، افزایش می‌یابد. همچنین روشن است در حالتی که عدد فرود ذره بزرگتر از حدود ۳ است، اثر گذاری عدد فرود بیشتر است و عمق آبشستگی در پای سرریز کلیدپیانویی مثلثی بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای است. به طور کلی، میانگین میزان‌های عمق آبشستگی در پنجه سرریز کلیدپیانویی مثلثی ۱۴/۷۳ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای است.

تغییرپذیری حجم نسبی حفره‌ی آبشستگی Vs در برابر تغییرپذیری عدد فرود ذره برای سرریزهای کلیدپیانویی مثلثی

کلیدپیانویی مثلثی در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای، حدود ۰/۱۸ درصد بیشتر است.

با توجه به شکل ۱۰ روشن است که میزان فاصله محل بیشینه عمق حفره آبشستگی تا پای سرریز کلیدپیانویی مثلثی، در اعداد فرود ذره کمتر از حدود ۳، در همه‌ی آزمایش‌های نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود ذره بیشتر از حدود ۳، این فاصله در هر دو سرریز افزایش می‌یابد.

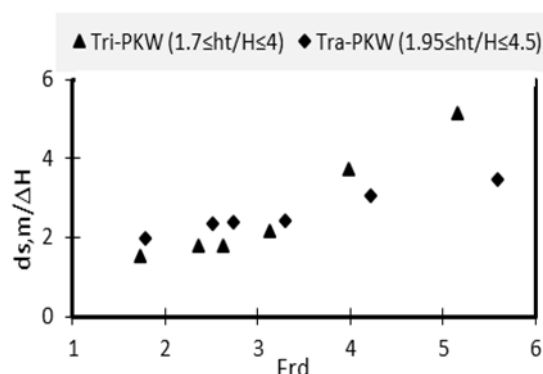


Fig. 9 Changes of maximum scour hole depth versus particle Froude number for triangular and trapezoidal weir

شکل ۹ تغییرپذیری‌های بیشینه عمق حفره آبشستگی در برابر عدد فرود ذره برای سرریزهای مثلثی و دوزنقه‌ای

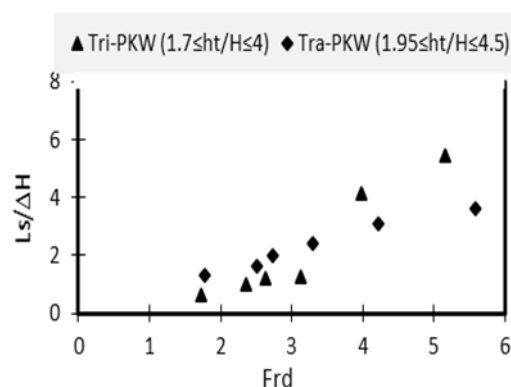


Fig. 10 Maximum distance changes of the hole depth to the weir foot versus particle Froude number for triangular and trapezoidal weir

شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های فاصله بیشینه عمق حفره تا پای سرریز در برابر عدد فرود ذره برای سرریزهای مثلثی و دوزنقه‌ای

شکل ۱۱ تاثیر عدد فرود ذره بر بیشینه طول نسبی حفره آبشستگی در دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای را نشان

با مقایسه شکل‌های ۹ الی ۱۳، مشاهده می‌شود که آبستنگی در هر دو سرریز، در اعداد فرود ذره کمتر از حدود ۳، تغییرپذیری‌های کمتری دارد. به گونه‌ای که بیشینه میزان‌های حفره آبستنگی، در هر دو سرریز تا $Frd \approx 3$ ، تا حدودی نزدیک به هم می‌باشد. در اعداد فرود ذره بزرگتر، توان بالقوه فرسایشی جریان دارای نرخ افزایشی بیشتری است و آبستنگی با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد.

به منظور تامین ایمنی و پایداری سدها و برآورد میزان مصالح لازم برای اجرای لایه سنگ‌چین محافظ برای مقاوم‌سازی بستر پایین دست سرریز، پیش‌بینی ابعاد هندسی حفره آبستنگی اهمیت زیادی دارد. با توجه به روند تغییرپذیری‌های فراسنجه‌های آبستنگی که شرح داده شد و بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی انجام شده، مشخصه‌های هندسی حفره آبستنگی به صورت معادله عمومی زیر نشان داده می‌شود.

$$\frac{\phi}{\Delta H} = a(Frd)^b \left(\frac{H}{h_t}\right)^c \quad (7)$$

در رابطه بالا a ، b و c ثابت‌های تجربی هستند که میزان‌های آنها را با استفاده از داده‌های تجربی می‌توان به دست آورد. برای این کار از شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی CC ^۱، ضریب تعیین R^2 ^۲، شاخص پراکندگی SI ^۳، میانگین مطلق خطا MAE ^۴ و میانگین درصد خطا AAE ^۵ به شرح زیر استفاده شد:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}_i)(C_i - \bar{C}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}_i)^2 \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C}_i)^2}} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i * C_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i)^2 \sum_{i=1}^N (C_i)^2}} \quad (9)$$

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - M_i)^2}{N}} \times 100 \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |C_i - M_i|}{N} \quad (11)$$

^۴ Mean Absolute Error

^۵ Average Absolute Error

و دوزنقه‌ای در شکل ۱۳ ارائه شده است.

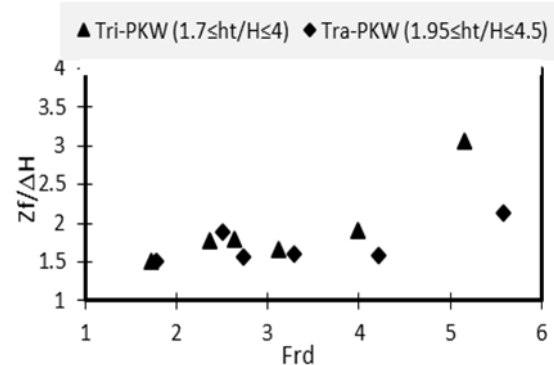


Fig. 12 Changes of weir claw scouring versus particle Froude number for triangular and trapezoidal weir

شکل ۱۲ تغییرپذیری‌های آبستنگی پنجه سرریز در برابر عدد فرود ذره در سرریز مثلثی و دوزنقه‌ای

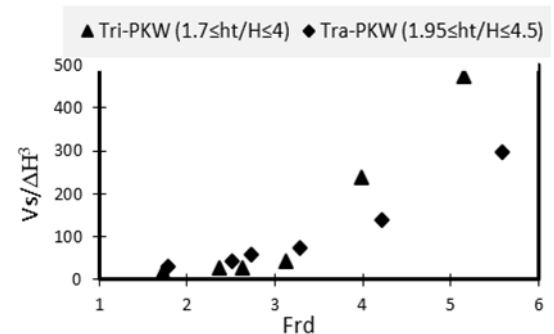


Fig. 13 Changes of scour hole volume versus particle Froude number for triangular and trapezoidal weir

شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های حجم حفره آبستنگی در برابر عدد فرود ذره در سرریز مثلثی و دوزنقه‌ای

این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذره، حجم حفره آبستنگی در هر دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای شکل افزایش می‌یابد. البته افزایش نرخ حجم نسبی حفره آبستنگی در اعداد فرود ذره بزرگتر از ۳، مشهودتر، و روشن است که در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی حجم بیشتری از رسوب بستر شسته شده است. افزون بر این، با افزایش عدد فرود ذره، نرخ افزایش حجم نسبی حفره آبستنگی بیشتر است. به طور کلی، حجم نسبی حفره آبستنگی پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی، ۳/۵ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای می‌باشد.

¹ Coefficient of Correlation

² Coefficient of Determination

³ Scatter Index

عمق آبشستگی در پنجه سرریز:

$$\frac{Zf}{\Delta H} = k(\text{Frd})^{1.026} \left(\frac{H}{h_t}\right)^{0.687} \quad (16)$$

حجم حفره آبشستگی:

$$\frac{Vs}{\Delta H^3} = k(\text{Frd})^{2.996} \left(\frac{H}{h_t}\right)^{0.053} \quad (17)$$

در این رابطه‌ها k ضریب شکل سرریز است و میزان‌های آن برای سرریزهای کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای در جدول ۳ ارائه شده است. شاخص‌های ضریب همبستگی، ضریب تعیین، شاخص پراکندگی، میانگین مطلق خطا و میانگین درصد خطا ناشی از معادله‌های (۱۳ تا ۱۷) نیز محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۱۴ مقایسه‌ی بین میزان‌های اندازه‌گیری شده و میزان‌های به دست آمده فراسنجه‌های حفره آبشستگی با استفاده از رابطه‌های (۱۳-۱۷) را نشان می‌دهد. میزان‌های شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۳ و شکل ۱۴ نشان دهنده دقت خوب روابط به دست آمده در این تحقیق می‌باشد. به منظور ارزیابی رابطه‌های تجربی به دست آمده در این تحقیق، با روابط Jüstrich et al., (2016) و Yazdi et al., (2020)، میزان‌های عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی (رابطه ۱) و در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی

$$AAE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{C_i - M_i}{M_i} \right| \quad (12)$$

در اینجا C_i و M_i به ترتیب میزان‌های مشاهده شده و محاسبه شده فراسنجه‌های آبشستگی را نشان می‌دهند. N تعداد داده‌ها و $\bar{C}_i$ و $\bar{M}_i$ نیز به ترتیب میزان‌های میانگین پارامترهای مشاهده شده آبشستگی و محاسبه شده آن را نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، فراسنجه‌های هندسی حفره آبشستگی شامل بیشینه عمق آبشستگی، فاصله محل بیشینه عمق آبشستگی تا سرریز، طول حفره آبشستگی، عمق آبشستگی در پنجه سرریز و حجم حفره آبشستگی بررسی و رابطه‌های زیر برای هر دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای به دست آمد:

بیشینه عمق آبشستگی:

$$\frac{ds, m}{\Delta H} = k(\text{Frd})^{0.938} \left(\frac{H}{h_t}\right)^{0.078} \quad (13)$$

فاصله محل بیشینه عمق آبشستگی تا پای سرریز:

$$\frac{Ls}{\Delta H} = k(\text{Frd})^{1.437} \left(\frac{H}{h_t}\right)^{0.017} \quad (14)$$

طول حفره آبشستگی:

$$\frac{Lo}{\Delta H} = k(\text{Frd})^{1.057} \left(\frac{H}{h_t}\right)^{0.105} \quad (15)$$

جدول ۳ شاخص‌های آماری معادله‌های (۱-۲) و (۱۳-۱۷)

Table 3 Statistics indices due to Eq. (1-2) and (13-17)

Equation No.	model Weir	K	CC	R ²	SI (%)	MAE	MREP (%)
1	-	-	0.44	0.95	22.06	0.03	7
2	-	-	0.30	0.96	21.65	0.025	10
13	Triangular	1.044	0.97	0.98	17.7	0.1	2.09
	Trapezoidal	0.886	0.98	0.99	13.2	0.09	1.59
14	Triangular	0.475	0.96	0.97	29.4	0.2	5.22
	Trapezoidal	0.372	0.98	0.98	17.5	0.1	2.53
15	Triangular	3.132	0.96	0.99	9.5	0.1	1.40
	Trapezoidal	2.642	0.99	0.99	7.7	0.1	1.15
16	Triangular	1.219	0.88	0.99	11.5	0.002	1.28
	Trapezoidal	1.066	0.86	0.99	12.9	0.04	1.55
17	Triangular	3.730	0.99	0.99	17.8	2.9	4.27
	Trapezoidal	1.958	0.97	0.98	5.7	1.35	1.84

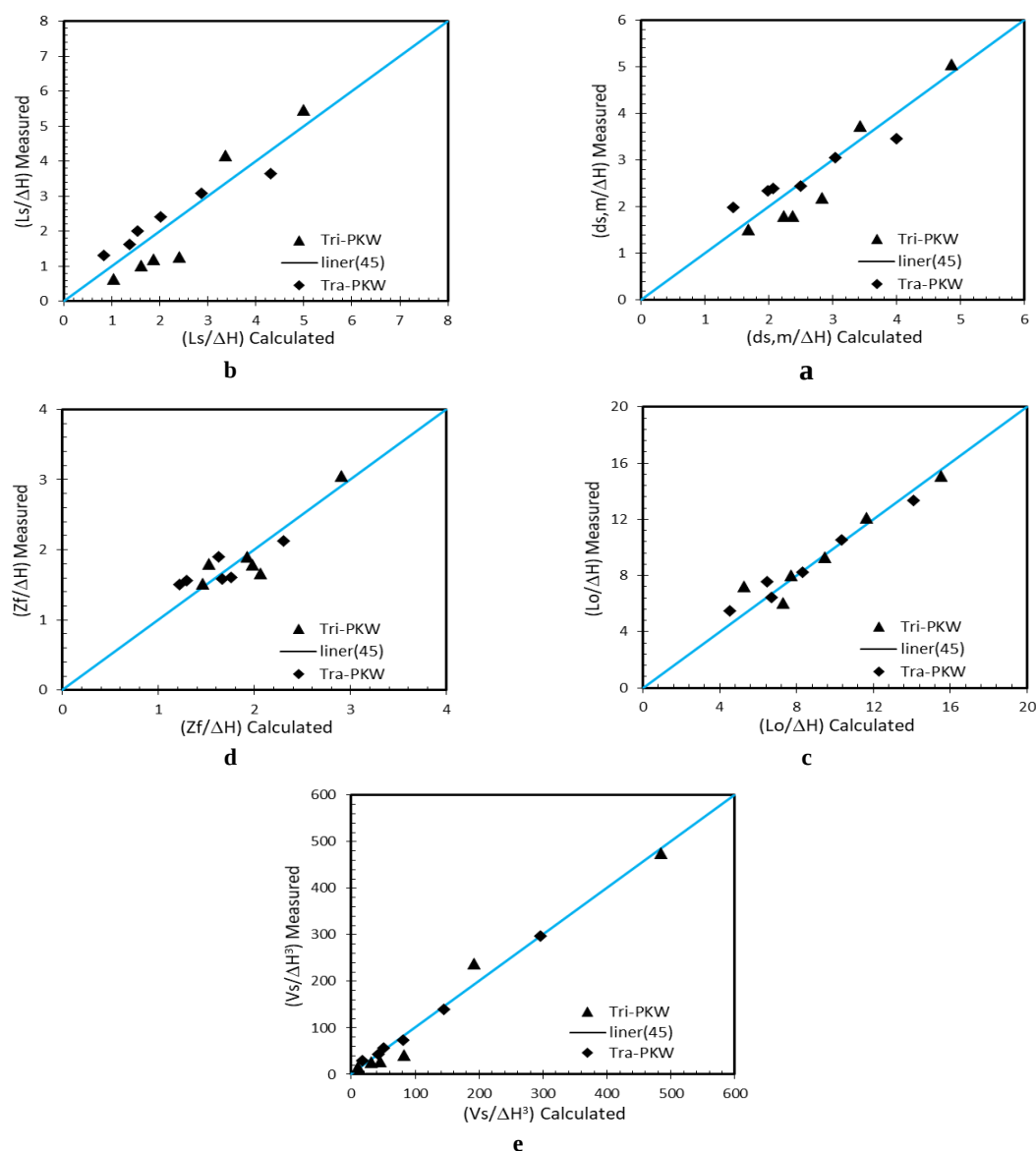


Fig. 14 Comparison between measured and computed parameters a) maximum scour hole depth b) horizontal distance of the maximum hole depth to the weir foot, c) scour hole length, d) weir claw scouring depth and e) scour hole volume according to the proposed relationships

شکل ۱۴ مقایسه فراسنجه‌های (a) بیشینه عمق حفره آبشستگی، (b) فاصله افقی محل بیشینه عمق آبشستگی تا پای سرریز، (c) طول حفره آبشستگی، (d) عمق آبشستگی در پنجه سرریز و (e) حجم حفره آبشستگی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌ای با رابطه‌های پیشنهادی

و برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای (رابطه ۱۳) برابر ۱/۵۹ است. علت این اختلاف، به خاطر ویژگی‌های و تفاوت شکل سرریزها می‌باشد. بنابراین با توجه به جدول ۳ و شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان گفت رابطه‌های ارائه شده در این تحقیق نسبت به رابطه‌های قبلی از دقت مناسبی برخوردار است.

۶- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان نتایج بدست آمده از بررسی آزمایشگاهی مقایسه آبشستگی پایین دست سرریزهای کلیدپیانویی مثلی و

دوزنقه‌ای (رابطه ۲) نیز محاسبه و در شکل ۱۵ با میزان‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق مقایسه شده است. با توجه به این شکل روشن است که پراکندگی داده‌های این تحقیق در مقایسه با نتایج پیشین کمتر است که نشان از دقت بیشتر روابط به دست آمده در این تحقیق است. همچنین شاخص‌های آماری به دست آمده با استفاده از رابطه‌های (۱ و ۲) نیز در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳، درصد خطای نسبی بیشینه عمق حفره آبشستگی برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی (رابطه ۱) برابر ۷، برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای (رابطه ۲) برابر ۱۰

دوزنقه‌ای، در اعداد فرود ذره کمتر از حدود ۳، تغییرپذیری‌های کمتری دارد. بیشینه میزان‌های حفره آبشستگی، در هر دو سرریز تا $Frd \approx 3$ ، تا حدودی نزدیک به هم می‌باشد.

- در اعداد فرود ذره بزرگتر، طول حفره آبشستگی بیشتر بوده و در پی آن حجم مواد شسته شده افزایش یافته و در نتیجه ارتفاع پشته‌ی رسوبی بیشتر می‌شود. افزایش پشته‌ی رسوبی، در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل مشهودتر می‌باشد.
- فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی تا پای سرریز و طول حفره آبشستگی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۷ درصد و ۱۵/۵ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای است.
- میانگین میزان‌های عمق آبشستگی در پنجه سرریز کلیدپیانویی مثلثی ۱۴/۷۳ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای است.
- حجم حفره آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی، ۳/۵ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل می‌باشد.
- به دلیل پیچیدگی جریان در پایین دست سرریز و تداخل جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز، بررسی دقیق‌تر سازوکار آبشستگی نیازمند برداشت میدان جریان است که در تحقیقات آتی باید انجام شود.

۷- فهرست نشانه‌ها

h_t	عمق پایاب (m)
h_d	بار آبی پایین‌دست (m)
ΔH	اختلاف بار آبی در بالادست و پایین‌دست (m)
L_i	طول دیوارهای جانبی سرریز (m)
L_o	طول حفره آبشستگی (m)
L_s	فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا سرریز (m)
B	طول جانبی سرریز (m)
B_i	طول بیرون زدگی‌های ورودی سرریز (m)
B_o	طول بیرون زدگی‌های خروجی سرریز (m)
Si	شیب کلید ورودی سرریز (deg)

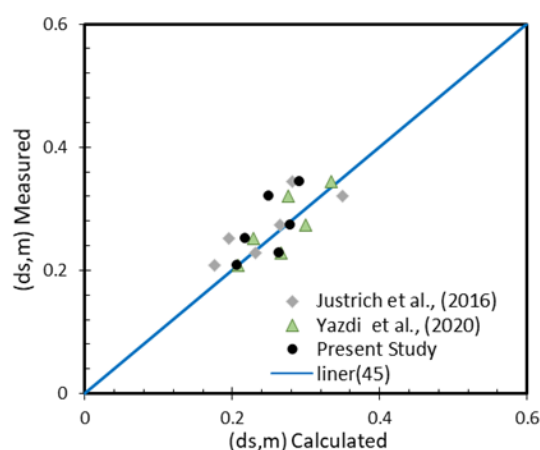


Fig. 15 Comparison of measured scour hole depth with existing experimental equations

شکل ۱۵ مقایسه عمق حفره آبشستگی اندازه‌گیری شده با معادله‌های تجربی موجود

دوزنقه‌ای در این تحقیق را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- با افزایش عدد فرود ذره، میزان ویژگی‌های هندسی حفره آبشستگی در پایین‌دست هر دو سرریز کلیدپیانویی افزایش می‌یابد.
- به‌طور کلی میانگین میزان‌های بیشینه عمق آبشستگی سرریز کلیدپیانویی مثلثی در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای، حدود ۰/۱۸ بیشتر است.
- در اعداد فرود ذره کمتر از حدود ۳، بیشینه عمق حفره آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در فاصله‌ای نزدیک‌تری از سرریز رخ می‌دهد. اما با افزایش عدد فرود ذره، این روند تغییر یافته و بیشینه عمق حفره آبشستگی و فاصله آن تا سرریز، در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر شده و در فاصله‌ی نزدیک‌تری نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی رخ داده است.
- با افزایش عدد فرود ذره، بیشینه عمق آبشستگی نسبی افزایش یافته، محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی از سرریز دور شده، طول حفره آبشستگی افزایش یافته و در پی آن حجم مواد شسته شده نیز افزایش یافته است.
- آبشستگی در هر دو سرریز کلیدپیانویی مثلثی و

Chiew, Y.M. (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1260-1269.

Gebhardt, M., Herbst, J., Merkel, J. and Belzner, F. (2018). Sedimentation at labyrinth weirs—an experimental study of the self-cleaning process. *Journal of Hydraulic Research*, 57(4), 1-12.

Ghafouri, A., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, Ch. (2020). Experimental Study on the Effect of Discharge and Tailwater Depth on Bed Topography Downstream of a trapezoidal Piano Key Weir, *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics*, 15(3), 107-122. (In Persian)

Ghodsian, M., Ghafouri, A. and Abdi Chooplou, Ch. (2020). Experimental investigation of scour downstream of a triangular Piano Key Weir, 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management, Iran, Tehran. (In Persian)

Gonzalez, C.A. and Chanson, H. (1995). Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways, *Dam Engineering*, 17(4), 223-244.

Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A.J. (2016). Mobile riverbed scours downstream of a piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), 04016043.

Lempérière, F. (2017). Dams and Floods. *Journal of Engineering*, 3(1), 144-149.

Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower and Dams*, 5, 144-149.

Lux, F.L. and Hinchcliff, D. (1985). Design and Construction of Labyrinth Spillways. In *Proceedings of the 15th International Congress on Large Dams*, International Commission on Large Dams, Paris, France, 4(15), 249-274.

Yazdi, A.R., Hoseini, S.A., Nazari, S. and Amanian, N. (2020). Comparison of Downstream Scour of the Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs, *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics*, 15(2), 95-102. (In Persian)

So	شیب کلید خروجی سرریز (deg)
ds,m	بیشینه عمق آبشستگی (m)
H	ارتفاع آب بر روی تاج سرریز (m)
N	شمار کلیدهای سرریز (-)
P	ارتفاع سرریز (m)
Q	دبی جریان (m^3s^{-1})
q	دبی در واحد عرض (m^2s^{-1})
Tri	مدل سرریز مثلثی شکل
Tra	مدل سرریز دوزنقه‌ای شکل
Ts	ضخامت دیواره جانبی سرریز (m)
W	عرض کل سرریز (m)
w	عرض هر چرخه از سرریز (m)
Wi	عرض کلیدهای ورودی سرریز (m)
Wo	عرض کلیدهای خروجی سرریز (m)
Frd	عدد فرود ذره (-)
V	سرعت ریزش جریان (ms^{-1})
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
ρw	جرم مخصوص آب (Kgm^{-3})
ρs	جرم مخصوص رسوب (Kgm^{-3})
μ	لزجت پویایی ($Kgm^{-1}s^{-1}$)
x	فاصله طولی از دیوار پایین دست سرریز (m)
y	فاصله عرضی از دیوار سمت راست فلوم (m)
s	چگالی ذرات رسوب (-)
d_{50}	قطر میانگین ذرات رسوبی (m)
σ_g	انحراف معیار هندسی ذرات (-)

۸- منبع ها

Ahmadi Dehrashid, F. and Gohari, S. (2016). Investigating the effect of discharge and tailwater depth on the dimensions of score hole downstream of a Piano Key Weir. *International Conference on Civil Engineering*, Tehran. (In Persian)

Ahmadi Dehrashid, F. and Gohari, S. (2019). Experimental Study of Downstream Scour of Piano Keys Weirs, *J. of Water and Soil Conservation*, 26(1), 91-109. (In Persian)

Anderson, R.M., and Tullis, B.P. (2013). Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3), 246-253.