

Comparison of Downstream Scour of the Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs

Alireza Mosalman Yazdi ¹, Seyed Abbas Hoseini ², Sohrab Nazari ³, Nosratollah Amanian ⁴


1- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Department of Civil Engineering, Eghlid Branch, Islamic Azad University, Eghlid, Iran.

4- Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.

* abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Received: 20 April 2020, Accepted: 23 June 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Weirs are hydraulic structure commonly used for controlling flow characteristics and water level (Vischer, 1998). Also, weirs are responsible for the controlled release of flood flows from the dam reservoir to the downstream channels. One of the types of weir is piano key weir (PKW). Piano key weirs are also cost-effective and cheap to maintain, increase reservoir storage capacity, and offer better flood control (Ortel, 2018). The main problem at the downstream of hydraulic structures, such as weir, is the scour and movement of bed materials. Scouring in the downstream of weirs is an important issue for weir stability and has been extensively researched. In this study, the geometry of scour holes in the downstream of piano key weirs was investigated by the use of experimental models.

According to previous researches, trapezoidal piano key weirs (TPKW) are more efficient than rectangular piano key weir (RPKW) (Mehboudi, 2016, Mehboudi, 2017). While there are limited studies on scour downstream of RPKWs, the scouring downstream of the trapezoidal piano key have not yet been researched according to the authors' knowledge (Jüstrich, 2016). So, it is important to study their scour, and it is necessary to compare the performance of these two types of PKWs in terms of scouring issues.

Due to the fact that the geometric shape of the weir affects the downstream scour condition, in this study the downstream scour of the piano key weir with trapezoidal geometric shape has been considered and the characteristics of the scour and its rate of was compared to a rectangular geometric shape.

Accordingly, the impact of discharge and the tail water depth on the characteristics of the scour hole at the downstream of the rectangular and trapezoidal piano key weirs and the comparison of these changes in the two models have been considered. Measurements were made to predict the scour characteristics of the rectangular and trapezoidal piano key weirs, including the maximum depth of the scour hole, the distance between maximum scour depth and weir foundation, and the length of the scour hole (Fig. 2).

Methodology: In this study, two experimental models of PKWs with rectangular and

trapezoidal geometry were made and tested in a flume with a length of 6.0 m, a width of 1.0 m and a height of 0.6 m. 2.0 m length with an average thickness of 25 cm was formed from sandy material with median grain size $d_{50} = 7.8$ m (Fig. 3). Three hydraulic conditions in upstream and three different tail water depth considered in downstream and totally 18 experimental runs were conducted.

The range of changes in discharge in this research is between 19 to 33 liters per second. The reason for choosing this range for discharge is to examine the conditions of the scour profile in a wide range of flow rate changes. In addition, the dimensions of the channel and the pump used do not allow the discharge to exceed 33 liters per second.

Results and discussion: Effect of discharge on the scour hole profile downstream of the rectangular and trapezoidal PKW models are shown in Fig. 8. It can be seen that in all models, as discharge and upstream head increase, so do the hole depth and hole length and the distance of maximum scour depth from the weir toe. Previous studies have reported similar findings for linear and nonlinear weirs (Jüstrich, 2016). As shown in Fig. 4, in this study, the arrangement of inlet and outlet keys of weirs was considered different from previous researches. So, it was observed that the maximum depth of downstream scour occurs below the output keys, the reason for this is the external spill jets from the output keys, which cause the scour hole to fall into the downstream through vertex. In Fig. 9 shows that the maximum scour hole depth downstream of the rectangular model is higher than the trapezoidal model. The higher score hole depth in the downstream of the rectangular model than the trapezoidal model in similar hydraulic conditions can be attributed to the fact that, for any given flow rate, upstream-downstream total head difference is greater in the rectangular weir comparison to the trapezoidal weir. As shown in Fig. 11, For both rectangular and trapezoidal models, at a constant flow rate, the depth and length of the scour hole have decreased with the increase of tail water depth. It is due to a decrease in the height of the drop jet and increase in jet speed during impact to downstream flow. To determine the effect of the geometric shape of PKW and the tailwater depth, the scour characteristics in rectangular and trapezoidal models in the range of conducted experiments were examined and compared based on the configuration of Equation $\phi_s/H = aF_{rd}^b(H/h)^c$. Then, the nonlinear regression method was used to determine the coefficients a , b , and c and formulate a number of equations for predicting the maximum scour depth, its location, and the scour hole length for rectangular and trapezoidal PKWs.

Conclusion: The measurement results of the cascade characteristics showed that with increasing the flow rate and decreasing the tail water depth, the geometric characteristics of the score hole increase in both models. Also, the depth of scour in the rectangular model is more than the trapezoidal model. In all discharges, on averagely, get decreases %7 the ratio of dimensionless maximum scour depth of trapezoidal piano key to the rectangular model. However, this difference decreases with increasing flow and total head on the weir, so that when in $F_{rd} > 3.9$ this difference becomes insignificant and there is not a significant difference in the shape of the hole for both models. Using the regression method, several equations with appropriate accuracy were formulated for predicting the maximum scour hole depth, its location, and the scour hole length downstream of the models.

Keywords: Discharge, Piano key weir, Scour, Tail water depth.

© 2020 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/>)

مقایسه آبخستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای و مستطیلی

علیرضا مسلمان یزدی^۱، سید عباس حسینی^{۲*}، سهراب نظری^۳، نصرت‌الله امانیان^۴

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، واحد اقلید، دانشگاه آزاد اسلامی، اقلید، ایران.

۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

* abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳ و وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: از جمله موضوع‌های مهم در پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی، آبخستگی پایین‌دست آن‌هاست. در این تحقیق، آبخستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای مورد توجه بوده و ویژگی‌های آبخستگی و نرخ تغییرپذیری‌های آن با آبخستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانو مستطیلی مقایسه شد. بدین منظور دو مدل آزمایشگاهی از این نوع سرریزها ساخته و در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر و در شرایط دبی‌های مختلف و سه عمق پایاب آزمایش شد و ویژگی‌های هندسی چاله آبخستگی شامل بیشینه عمق چاله آبخستگی، فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه چاله اندازه‌گیری شد. جنس مصالح بستر پایین‌دست، مصالح شنی با دانه‌بندی $d_{50} = 7/8 \text{ mm}$ به ضخامت میانگین ۲۵ سانتی‌متر و طول ۲ متر بود. نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های آبخستگی نشان داد با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب، ویژگی‌های هندسی حفره آبخستگی در دو مدل افزایش می‌یابد. همچنین عمق آبخستگی در مدل مستطیلی بیش از مدل ذوزنقه‌ای بوده به نحوی که در همه دبی‌ها به طور میانگین نسبت بیشینه عمق حفره آبخستگی بی‌بعد سرریز کلید پیانو ذوزنقه‌ای نسبت به مدل مستطیلی ۷ درصد کاهش می‌یابد. ولی این اختلاف با افزایش دبی و هد آب روی سرریز کاهش می‌یابد به نحوی که هنگامی که در $F_{rd} > 3/9$ این اختلاف ناچیز شود تفاوت معناداری در شکل حفره آبخستگی برای دو مدل وجود ندارد. به کمک رابطه‌های رگرسیونی معادله‌هایی با دقت مناسب برای پیش‌بینی بیشینه عمق چاله آبخستگی، موقعیت مکانی آن و طول دهانه چال برای دو مدل به دست آمد که اختلاف بار آب بالادست و پایین‌دست در آنها تعیین‌کننده می‌باشد.

کلید واژگان: آبخستگی، دبی، سرریز کلید پیانویی، عمق پایاب.

۱- مقدمه

یکی از انواع سرریزها، سرریزهای کنگره‌ای هستند. سرریزهای کنگره‌ای، سرریزهای غیرخطی بوده که باعث افزایش طول کل تاج و ظرفیت جریان برای یک عرض مشخص می‌شوند. در دو دهه اخیر نوع خاص و جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای به نام سرریزهای کلید پیانویی مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافته‌اند (Falvey, 2003; Machiels et al., 2011). این سرریزها در طرح شبیه سرریز کنگره‌ای بوده با این تفاوت که در بالادست و پایین‌دست، دیواره‌های سرریز عمودی نبوده، به صورت

سرریزها به منظور رهاسازی دبی اضافی یا مهار جریان سطح مخازن استفاده می‌شوند (Vischer et al., 1998). به کمک سرریزها می‌توان جریان مازاد بر ظرفیت انتقال سدهای انحرافی را عبور و فرسایش در رودخانه‌ها را کاهش داد. همچنین سرریزها در افزایش و تثبیت تراز سطح آب در کانال‌ها مؤثر بوده به عنوان ابزار سنجش دبی در سیستم‌های انتقال آب استفاده می‌شوند (Khatsuria, 2004).

طی سال‌های اخیر، محققان زیادی، بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی متنوعی برای شناخت ویژگی‌های سرریزهای کلید پیانویی و تأثیر هندسه بر رفتار جریان انجام داده‌اند. تحقیقات Lemperiere and Ouamane (2003)، Barcouda et al. (2006) و Hien et al. (2006) و Anderson (2011) نشان داد در سرریزهای کلید پیانویی، برای بارهای پایین، زیاد کردن شمار دهانه‌های سرریز باعث افزایش کارایی سرریز می‌شود (Lempérière et al., 2003; Barcouda et al., 2006; Hien et al., 2011; Anderson et al., 2006). همچنین نتایج بررسی‌های Ouamane and Lemperiere (2006) و Barcouda et al. (2006) نشان داد در سرریزهای کلید پیانو، در صورتی که دهانه ورودی بزرگتر از دهانه خروجی در نظر گرفته شود، دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد (Barcouda et al., 2006; Ouamane et al., 2006).

تحقیق انجام شده روی طول سرریزهای کلید پیانو نشان داد افزایش طول سرریز تأثیر قابل توجهی بر ضریب آبگذری دارد ولی با افزایش بیش از حد آن، تأثیر افزایش طول سرریز بر ضریب آبگذری کاهش می‌یابد (Kabiri-Samani et al., 2012).

تحقیق انجام شده روی طول سرریزهای کلید پیانو نشان داد افزایش طول سرریز تأثیر قابل توجهی بر ضریب آبگذری دارد ولی با افزایش بیش از حد آن، تأثیر افزایش طول سرریز بر ضریب آبگذری کاهش می‌یابد (Kabiri-Samani et al., 2012). همچنین نتایج بررسی‌های کنگره‌ای بیشتر می‌باشد همچنین برای طراحی سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای با کارایی زیاد، میزان‌های $\frac{W_i}{W_o} = 1.33$ ، $\frac{B}{P} > 1.6$ ، $\frac{L}{W} > 5$ پیشنهاد نمودند (Mehboudi et al., 2016; Mehboudi et al., 2017). نتایج تحقیقات Mehboudi et al. (2014) نشان داد در یک هد ثابت، ظرفیت آبگذری سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای بیشتر از سرریز کلید پیانو مستطیلی می‌باشد (Mehboudi et al., 2014).

نتایج بررسی‌های Justrich et al., 2016 روی آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی نشان داد

طره‌ای می‌باشند. این سرریزها افزون بر افزایش ظرفیت آبگذری نسبت به سرریزهای کنگره‌ای، دارای زیرساخت کوچک بوده، امکان نصب روی سدهای بتنی موجود را دارند (Schleiss, 2011; Mehboudi et al., 2016; Mehboudi et al., 2017).

این سرریزها در رودخانه‌ها نیز با هدف‌های مختلف، کاربردهای فراوانی دارند. از جمله می‌توان به استفاده از سرریزهای کلید پیانویی در رودخانه به عنوان سازه مهار و یا سازه تنظیم تراز سطح آب و استفاده در بستر رودخانه‌ها به عنوان سدهای انحرافی کوتاه اشاره نمود. سرریزهای کلید پیانو با توجه به زاویه دیواره‌های جانبی، به دو دسته مستطیلی و دوزنقه‌ای تقسیم شده که بنا بر تحقیقات صورت گرفته، سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای دارای کارایی بیشتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی می‌باشند (Mehboudi et al., 2016; Mehboudi et al., 2017).

در شکل ۱، ویژگی‌های هندسی سرریز کلید پیانویی مستطیلی نشان داده شده است که در آن P : ارتفاع قائم، B : طول در جهت جریان، R : ارتفاع دیوار جانبی، T_s : ضخامت دیوار جانبی، W : عرض جانبی است. افزون بر این، زیرنویس i به کلید ورودی اطلاق می‌شود، یعنی کلیدی که هنگامی که سطح آب در مخزن بالادست برابر تاج PKW می‌شود پر از آب است و زیرنویس o به کلید خروجی اطلاق می‌شود. این زیرنویس‌ها برای طول در جهت جریان B ، ارتفاع سرریز P و عرض سرریز W استفاده می‌شوند.

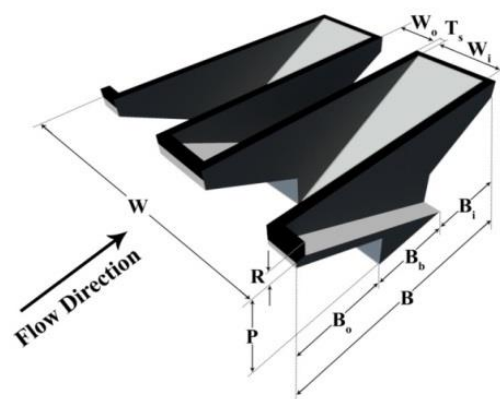


Fig. 1 Geometry of a typical Piano key weir
شکل ۱ هندسه سرریز کلید پیانویی

دست را تشدید می‌کند. از سوی دیگر برتری سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نسبت به مستطیلی به لحاظ دبی عبوری و ضریب دبی، بررسی و مقایسه آبشستگی پایین دست این سرریزها را جهت لحاظ همه برتری‌ها و کمبودها در انتخاب نوع سرریز کلید پیانویی پرهیز ناپذیر می‌سازد. بنابراین در این تحقیق، با در نظر گرفتن دو هندسه مستطیلی و دوزنقه‌ای سرریز کلید پیانویی، تأثیر تغییرپذیری‌های دبی و عمق پایاب بررسی و مقایسه شد. در ادامه با توجه به تجزیه و تحلیل ابعادی انجام شده، رابطه‌هایی به منظور پیش‌بینی، پارامترهای حفره آبشستگی شامل بیشینه عمق چاله، موقعیت مکانی آن و طول دهانه چاله پیشنهاد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجزیه و تحلیل ابعادی

با توجه به نتایج و تحقیقات پیشین در زمینه آبشستگی سرریزهای غیرخطی، عامل‌های مؤثر بر چاله آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی شامل پارامترهای هندسی و هیدرولیکی را می‌توان به صورت زیر نشان داد (Gebhardt et al., 2018; Nosedo et al., 2019).

$$f_1(\theta_s, h, H, P, d_{50}, q, g, \rho, \rho_s, \mu) = 0 \quad (1)$$

در معادله بالا و برابر شکل ۲، θ_s مشخصه‌های هندسی چاله آبشستگی شامل s بیشینه عمق حفره آبشستگی، X_s فاصله بیشینه عمق حفره تا پای سرریز در راستای جریان و X_0 طول دهانه حفره آبشستگی شامل فاصله محل تقاطع حفره آبشستگی با سطح اولیه رسوب تا پای سرریز در راستای جریان می‌باشند.

متغیرهای مستقل در معادله (۱) و برابر شکل ۲ شامل H ، اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست سرریز، q دبی جریان در واحد عرض سرریز، h بار آبی پایین دست، ρ_s ، ρ ، g ، d_{50} به ترتیب جرم مخصوص ماسه، جرم مخصوص آب، شتاب ثقل، اندازه قطر میانگین مواد رسوبی و لزجت دینامیکی می‌باشند.

با استفاده از تئوری باکینگهام، پارامترهای بی بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز تعیین شده و رابطه

ابعاد هندسی چاله آبشستگی به بیشینه عمق چاله آبشستگی وابسته است لذا برآوردی از ویژگی‌های چاله آبشستگی بر مبنای بیشینه عمق چاله آبشستگی پیشنهاد کرد (Jüstrich et al., 2016).

در تحقیقی آبشستگی (Ahmadi Dehrshid et al., 2016)، پایین دست سرریز کلید پیانو مستطیلی را بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد کاهش عمق پایاب موجب افزایش بیشینه عمق آبشستگی و دور شدن محل رخداد آن از انتهای کف بند همچنان گسترش طولی ابعاد حفره آبشستگی در جهت جریان می‌شود (Ahmadi Dehrshid et al., 2016).

Rajaei et al. (2018) در تحقیقی آبشستگی پایین دست سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و دوزنقه‌ای را بررسی کرد. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای در مقایسه با سرریزهای خطی حدود ۱۹ درصد، آبشستگی را به طور مؤثر کاهش می‌دهند در حالی که سرریزهای زیگزاگ مستطیلی در مقایسه با سرریزهای خطی حدود ۱۰ درصد، آبشستگی را کاهش می‌دهند (Rajaei et al., 2018).

عموم بررسی‌های انجام شده برای سرریزها به ویژه سرریزهای کلید پیانو، در زمینه شرایط هیدرولیکی جریان و هندسه سرریزهاست. در حالی که یکی از پارامترهای مهم در زمینه ایمنی و پایداری سدها، آبشستگی پایین دست آن‌ها می‌باشد که تحقیقات کمتری انجام شده است. با توجه به آنکه سرریزهای کلید پیانویی ساخته شده در مقایسه با سرریزهای معمول، جواتر (با بیشینه ساخت کمتر از ده سال) می‌باشند لذا دانش مربوط آنها به ویژه در بخش مربوط به فرسایش و انتقال رسوب محدود است (Gohari and Ahmadi, 2019; Oertel, 2018). بنابراین ضروری است فرآیندهای ممکن برای فرسایش در پایاب این سرریزها ارزیابی و تجزیه تحلیل شود. نتایج مربوط به ساختار و الگوی جریان در پایاب این سازه‌ها نشان می‌دهد فرسایش در مقایسه با سرریزهای معمولی می‌تواند تشدید شود. با احداث سرریز کلید پیانویی، جت‌های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی با ایجاد یک میدان سرعت سه بعدی، توان بالقوه ایجاد فرسایش در پایین

(۲) قابل دستیابی است.

$$f_2 \left(\frac{\phi_s}{H}, \frac{h}{H}, \frac{P}{H}, \frac{d_{50}}{H}, \frac{q}{\sqrt{g \cdot H^3}}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{\mu}{\rho \cdot q} \right) = 0 \quad (2)$$

با توجه به آنکه عدد رینولدز در همه آزمایش‌ها بیشتر از 10^4 بوده و این موضوع بیانگر آشفته بودن جریان می‌باشد لذا تأثیر لزجت در مقایسه با اثر اینرسی کوچک بوده و می‌توان از تأثیر جمله $\frac{\mu}{\rho \cdot q}$ برنتایج تحقیق صرف‌نظر کرد. به عبارت دیگر در جریان کانال‌های باز تأثیر عدد رینولدز در مقایسه با عدد فرود ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. فراسنجه بدون بعد $\frac{q}{\sqrt{g \cdot H^3}}$ معادل عدد فرود جریان روی سرریز می‌باشد. که با ترکیب فراسنجه‌های $\frac{d_{50}}{H}$ و $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ فراسنجه بدون بعد $\frac{q}{H \sqrt{g(s-1)d_{50}}}$ دست می‌آید که معادل عدد فرود ذره یا F_{rd} بوده و S چگالی ذرات می‌باشد. ارتفاع سرریز نیز با توجه به ثابت بودن، از آن چشم‌پوشی می‌شود. بنابراین فراسنجه‌های بدون بعد مؤثر بر پدیده آبشستگی که در این تحقیق استفاده شد به صورت معادله (۳) قابل نمایش است.

$$\frac{\phi_s}{H} = F \left(F_{rd}, \frac{h}{H} \right) \quad (3)$$

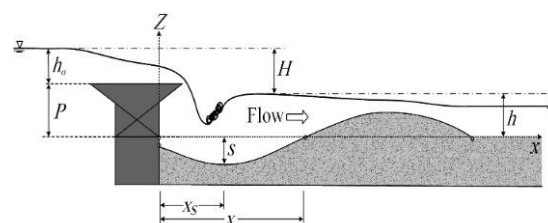


Fig. 2 Descriptive illustration of geometrical and hydraulic parameters

شکل ۲ نمایش فراسنجه‌های هندسی و هیدرولیکی

۲-۲- روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها برابر شکل ۳، از یک مخزن به طول ۲، عرض ۱ و ارتفاع ۱/۲ متر در بالادست سرریز و یک فلوم به طول ۶، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر در پایین دست که روی پایه به ارتفاع ۱/۵ متر از زمین نصب شده است استفاده شد. سازه اصلی فلوم، فلزی و دیواره‌ها و کف، شیشه به ضخامت یک سانتی‌متر می‌باشد. سیستم گردش آب به صورت چرخشی می‌باشد. جریان از منبع زیرزمینی به ابعاد $4 \times 3 \times 2$ متر از طریق لوله‌ای به قطر ۶ اینچ توسط

پمپ وارد مخزن روباز در بالادست سرریز شده تا به همراه شبکه‌های توری از تلاطم و آشفتگی آن کاسته شده و پس از آن از روی سرریز عبور کند. سامانه اندازه‌گیری دبی توسط یک دبی‌سنج مغناطیسی از نوع مگاب (با دقت ± 0.2 تا ± 0.5 درصد) کنترل شده و به منظور کنترل مضاعف دبی در هر آزمایش، از سرریز دوزنقه‌ای شکل واسنجی شده در خروجی فلوم استفاده می‌شود. سرریز دوزنقه‌ای شکل با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر و شیب‌های کناری ۱۴ درجه استاندارد با ورق گالوانیزه به ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد به نحوی که جریان از روی سرریز به صورت لبه‌تیز صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده پیشین، با افزایش زاویه دیوار جانبی سرریز دوزنقه‌ای، کارایی سرریز بیشتر می‌شود (Cicero, 2013) (Safarzadeh et al., 2013). به نحوی که برای طراحی سرریزهای کلید پیانو دوزنقه‌ای با کارایی زیاد، میزان‌های $\frac{W_i}{W_o} = 1.33$ ، $\frac{B}{P} > 1.6$ و $\frac{L}{W} > 5$ پیشنهاد شده است (Mehboudi et al., 2016; Mehboudi et al., 2017) همچنین نتایج تحقیقات Khassaf et al. (2015) نشان داد افزایش زاویه دیواره جانبی سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای تا ۵ درجه باعث افزایش کارایی سرریز می‌شود. لذا در این تحقیق، دو مدل سرریز شامل سرریز کلید پیانویی مستطیلی و سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با زاویه دیواره ۶ درجه با طرح نشان داده شده در شکل ۴ و با ویژگی‌های هندسی در جدول ۱ استفاده شد.

نحوه آرایش کلیدهای ورودی و خروجی برابر شکل (۴) بوده و تغییرپذیری‌های چاله آبشستگی در راستای کلید خروجی بررسی شد. همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود سرریزهای مورد بررسی شامل سه کلید ورودی و دو کلید خروجی به همراه دو نیم کلید در دو طرف می‌باشند که شکلی متقارن دارند.

سرریزها از جنس پلکسی‌گلس به ضخامت ۴ میلی‌متر بوده، بستر رسوبی در پایین دست سرریزها، در طولی برابر ۲ متر و ضخامت ۲۵ سانتی‌متر تنظیم شد. ضخامت بستر رسوبی در آزمایش‌ها به گونه ای تعیین شد که همواره بیش از بیشینه عمق آبشستگی پایین دست سرریز باشد.

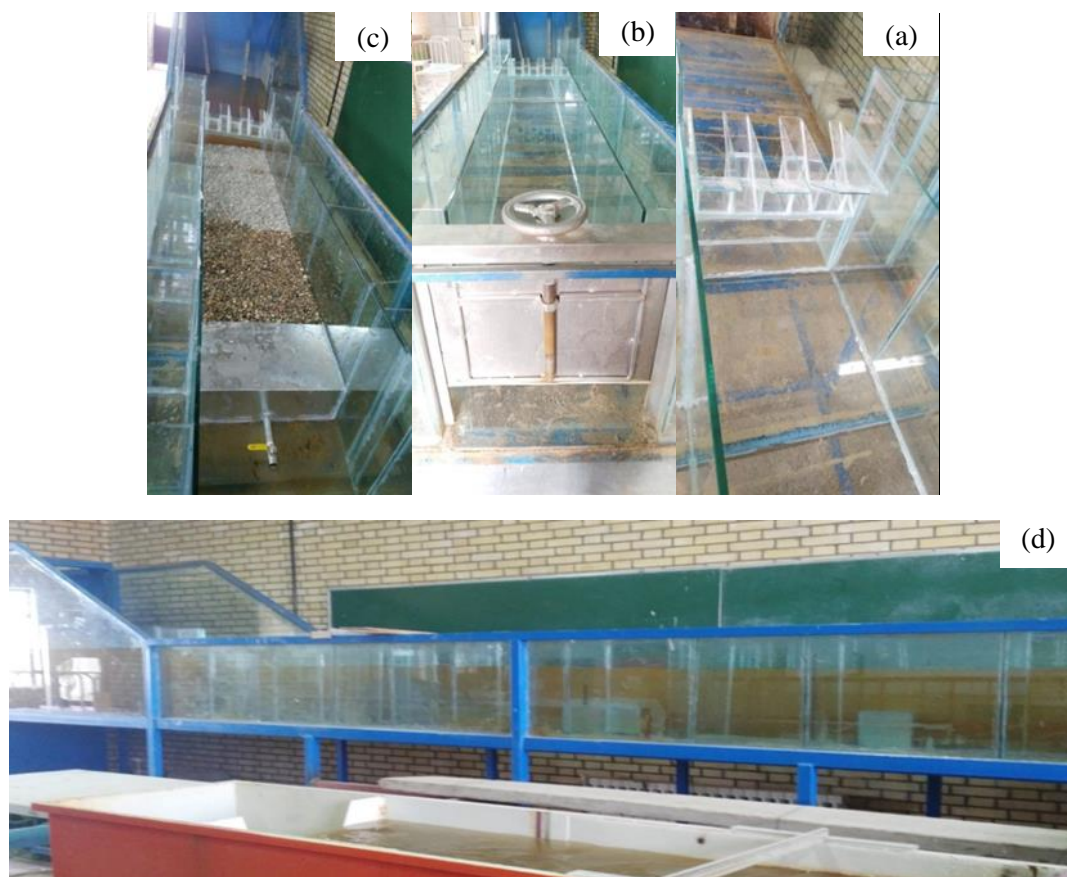


Fig 3 Layout of the flume and Experimental set up. (a) Sedimentary bed, (b) Sluice gate for regulating tailwater depth, (c) Piano key weir's platform, (d) Longitudinal View of Flume

شکل ۳ ویژگی‌های فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی. (a) بستر فرسایشی، (b) دریچه کشویی تنظیم عمق پایاب، (c) سکوی نصب سرریزهای کلید پیانویی، (d) نمای طولی کانال

در کف آن نصب و آب‌بندی شد. برای تنظیم عمق پایاب از یک دریچه کشویی برابر شکل ۳ استفاده شد. در مرحله اول آزمایش‌ها، سرریز کلید پیانو مستطیلی روی سکو نصب و آب‌بندی شد. جریان آب با پمپ از منبع زیرزمینی به مخزن روباز در ابتدای کانال که به همراه شبکه‌های توری آرام‌کننده جریان است هدایت شد. در آغاز، جریان به صورت آزاد در نظر گرفته شد. در هر آزمایش پس از تنظیم جریان با پمپ، که با شیر تنظیم صورت می‌گرفت و پس از تعادل نیمرخ آبشستگی بستر، ضمن خواندن دبی، عمق میانگین جریان در نقطه‌های کنترل مشخص توسط سطح‌سنج نصب شده با دقت ± 1 mm اندازه‌گیری شد. این آزمایش با دو دبی دیگر تکرار شد. در ادامه آزمایش‌ها، با استفاده از دریچه انتهایی، عمق پایاب h_t به ۳ و ۵ سانتی‌متر، تغییر داده شد و آزمایش‌ها با سه دبی متفاوت تکرار شد.

رسوب مورد استفاده در این تحقیق، شن با دانه‌بندی متوسط و چگالی $2/65$ با زاویه اصطکاک داخلی 35 درجه می‌باشد. ویژگی‌های دانه‌بندی رسوب شامل $d_{16} = 5.8 \text{ mm}$ ، $d_{50} = 7.8 \text{ mm}$ و $d_{84} = 10.15 \text{ mm}$ و انحراف معیار هندسی ذرات بستر معادل $\sigma = 1.32 = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ که دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد و از d_{50} به عنوان قطر میانه ذرات استفاده شد. با توجه به اینکه بیشینه آبشستگی در رسوبات با دانه بندی یکنواخت ایجاد می‌شود بنابراین به منظور جلوگیری از تأثیر غیریکنواختی رسوب‌ها بر نتایج، دانه‌بندی مواد رسوبی مورد استفاده در محدوده‌ای انتخاب شدند که در عمل توزیع دانه‌بندی یکنواخت باشند (Shafaei Bajestan, 2015). همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است به منظور نصب سرریزها برای انجام آزمایش‌ها، سکویی به ارتفاع 25 و عرض 15 سانتی‌متر در قسمت ورودی کانال و

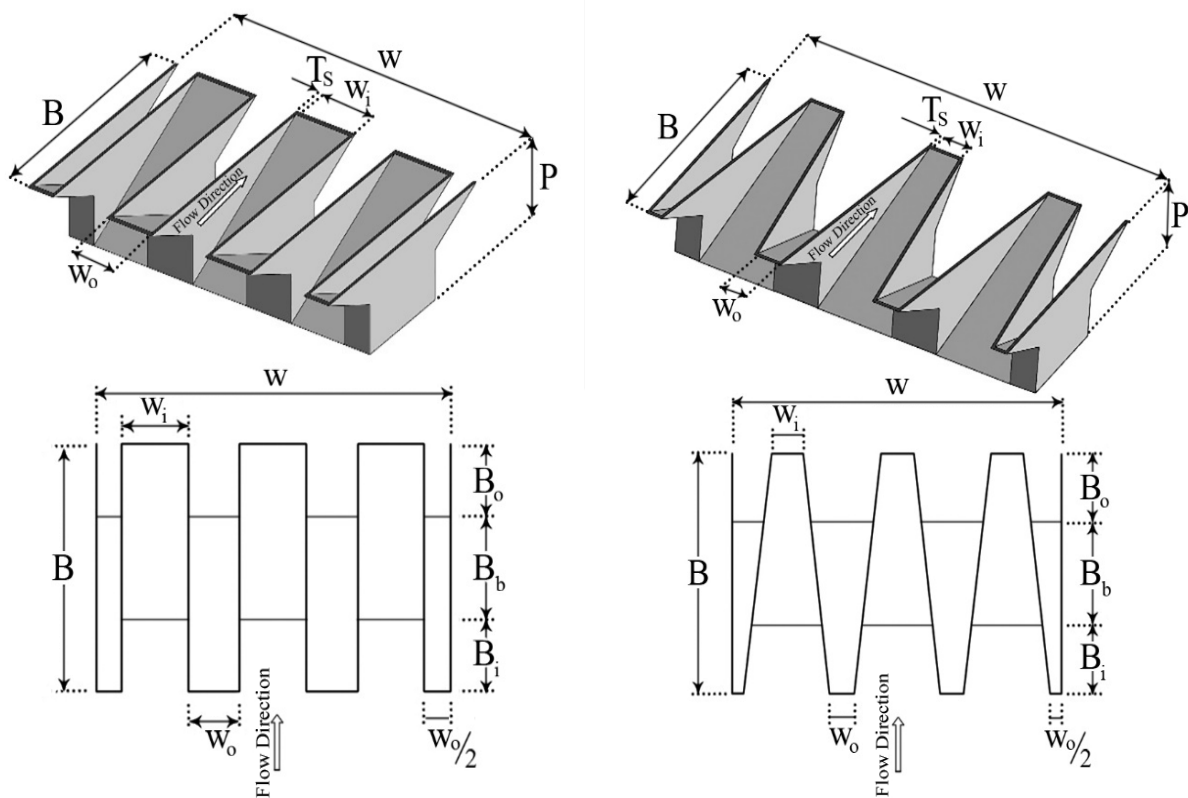


Fig 4. Rectangular and trapezoidal PKW models

شکل ۴ مدل‌های سرریز کلید پیانو مستطیلی و دوزنقه‌ای

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی سرریزهای کلید پیانو مستطیلی و دوزنقه‌ای

Table 1 Geometric specifications of rectangular and trapezoidal PKW models

Parameter	Value	
	RPKW	TPKW
P	15 cm	15 cm
α	0°	6°
W_i	8.75 cm	4.55 cm
W_o	6.58 cm	3.42 cm
W	50 cm	50 cm
T_s	0.4 cm	0.4 cm
B	35 cm	35 cm
B_p	15 cm	15 cm
B_i	10 cm	10 cm
B_o	10 cm	10 cm
L	260 cm	239 cm
W_i/W_o	1.33	1.33
L/W	5.20	4.78

که روی آن متر لیزری با دقت یک میلی‌متر قرار می‌گرفت اندازه‌گیری شد.

پیش از آغاز هر آزمایش، بستر رسوبی پایین‌دست به صورت افقی تراز شد. سطح رسوب‌های پایین‌دست و نزدیک سرریز، در آغاز هر آزمایش (تا پیش از یکنواخت شدن دبی و جریان) با نایلون ضخیم پوشیده شده تا از

در مرحله دوم آزمایش‌ها، سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای نصب شد. برای این سرریز نیز در شرایط عمق پایاب و دبی همسان با دبی عبوری از سرریز مستطیلی آزمایش‌ها انجام گردید. در هر آزمایش، با زهکشی کامل بستر پایین‌دست و چاله ایجاد شده، اندازه‌گیری سطح بستر انجام شد. سطح رسوب‌های کف، توسط یک ارابه دستی

وضعیت نیمرخ آبشستگی در دامنه وسیعی از تغییرپذیری‌های دبی می‌باشد. ضمن آن که ابعاد کانال و فلوم مورد استفاده اجازه دبی بیش از ۳۳ لیتر بر ثانیه را نمی‌دهند. برای اندازه‌گیری دبی افزون بر سرریز مستطیلی واسنجی شده از یک دی‌سنج مغناطیسی استفاده شد.

جدول ۲ شرایط هیدرولیکی اولیه آزمایش‌ها

Table 2 Initial hydraulic conditions of the experiments

M	Test N	Q (m ³ /s)	H (m)	h(m)	F _{rd}	h _t (m)
Rectangular Piano Key Weir						
M ₁	1	0.0195	0.097	0.067	1.142	0
M ₁	2	0.0195	0.075	0.095	1.476	0.03
M ₁	3	0.0195	0.054	0.118	2.047	0.05
M ₁	4	0.0274	0.089	0.083	1.764	0
M ₁	5	0.0274	0.068	0.113	2.307	0.03
M ₁	6	0.0274	0.050	0.134	3.160	0.05
M ₁	7	0.0325	0.086	0.089	2.164	0
M ₁	8	0.0325	0.064	0.123	2.925	0.03
M ₁	9	0.0325	0.048	0.143	3.927	0.05
Trapezoidal Piano Key Weir						
M ₂	10	0.0195	0.090	0.076	1.208	0
M ₂	11	0.0195	0.069	0.106	1.565	0.03
M ₂	12	0.0195	0.052	0.126	2.067	0.05
M ₂	13	0.0274	0.086	0.084	1.763	0
M ₂	14	0.0274	0.064	0.119	2.378	0.03
M ₂	15	0.0274	0.048	0.138	3.147	0.05
M ₂	16	0.0325	0.083	0.094	2.161	0
M ₂	17	0.0325	0.062	0.127	2.895	0.03
M ₂	18	0.0325	0.047	0.146	3.828	0.05

به منظور بررسی تغییرپذیری‌های سطح جریان، عمق میانگین جریان در نقاط کنترل مشخص، توسط سطح‌سنج نصب شده با دقت $1 \pm \text{mm}$ اندازه‌گیری شده است. سطح آب بالادست، در ناحیه‌ای با تراز ثابت، اندازه‌گیری و با h_0 معرفی شد. در آغاز آزمایش، منحنی‌های $Q - H$ برای دو مدل سرریز مستطیلی و دوزنقه‌ای در سه وضعیت عمق پایاب (h_t)، در شرایط آزمایش، برابر شکل ۶ رسم شد. با توجه به مقایسه منحنی دو مدل در شکل ۶ مشاهده شد در دبی‌های همسان، اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست (H) در مدل مستطیلی بیش از مدل دوزنقه‌ای می‌باشد. همچنین با افزایش دبی، اختلاف تراز آب بالادست و پایین‌دست در دو مدل کاهش یافته به نحوی که اختلاف هد آب بالادست و پایین‌دست برای سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای کلید پیانویی برای یک دبی مشخص بسیار به هم نزدیک می‌شود. همچنین با افزایش

تأثیر آبشستگی در آغاز مدل و تا رسیدن جریان به وضعیت ثابت جلوگیری شود.

به منظور بررسی نیمرخ آبشستگی نسبت به زمان، آزمایش‌هایی با سه تکرار در زمان‌های ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ دقیقه انجام شد.

از بین سه آزمایش انجام شده برای هر زمان، میانگین در نظر گرفته شد و مشاهده شد با توجه به نوع مصالح بستر، نوع سرریز و شیب کلیدهای خروجی، تغییرپذیری‌های آبشستگی در زمان‌های ابتدایی زیاد می‌باشد. لیکن تغییرپذیری‌های نیمرخ بستر پس از زمان ۸۰ دقیقه تا حدود ۱۲۰ دقیقه برابر شکل ۵، ناچیز می‌باشد (در حدود یک درصد). لذا با توجه به اینکه تغییرپذیری‌های عمق آبشستگی پس از زمان ۱۲۰ دقیقه بسیار ناچیز بوده به نحوی که بیش از ۹۰ درصد آبشستگی به دست آید بنابراین زمان ۱۲۰ دقیقه برای همه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. به تقریب این زمان در تحقیقات پیشین برای محاسبه عمق آبشستگی در سرریزهای کلید پیانو مستطیلی با دانه‌بندی همانند پیشنهاد استفاده شد (Jüstrich et al., 2016).

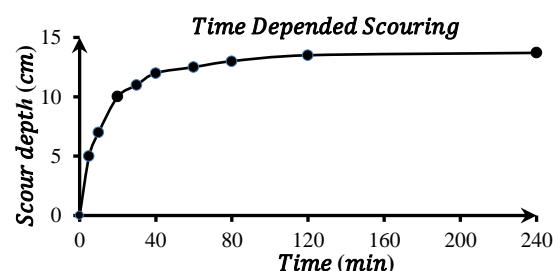


Fig 5 Variations in the scour hole depth over time

شکل ۵ تغییرپذیری‌های زمانی عمق حفره آبشستگی

در جدول ۲ خلاصه‌ای از شرایط اولیه و شمار آزمایش‌ها آورده شده است. آزمایش‌ها صورت گرفته برای سرریز کلید پیانویی مستطیلی، با عنوان M₁ و با آزمون‌های شماره ۱ تا ۹ و آزمایش‌های صورت گرفته برای سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نیز در جدول، با عنوان M₂ و با آزمون‌های شماره ۱۰ تا ۱۸ معرفی شده است. محدوده تغییرپذیری‌های دبی در این تحقیق بین ۱۹ تا ۳۳ لیتر بر ثانیه می‌باشد. علت انتخاب این محدوده از دبی، بررسی

عمق پایاب، اختلاف بار آب بالادست و پایین دست سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای کلید پیانویی برای یک دبی مشخص، کاهش می‌یابد.

۳- بحث

در این تحقیق آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با تغییر در دبی و عمق پایاب (h_t) مد نظر می‌باشد. بر این مبنا در پایان آزمایش‌ها، سطح بستر فرسایش پذیر در محدوده‌ای به طول ۲ متر در جهت طولی (در راستای جریان) و ۰/۳۴ متر در جهت عرضی، در فاصله‌های هر ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد. همچنین ناحیه‌های نزدیک به دیواره‌های کناری به منظور حذف اثر گذاری‌های مدل و دیواره‌ها حذف شد. همچنین با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود با تغییر آرایش کلیدهای ورودی و خروجی، بیشینه عمق حفره آبشستگی در محدوده زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود. علت مشخص این موضوع جت‌های ریزشی از روی کلیدهای خروجی و ایجاد گودال آبشستگی در پایین دست به واسطه ایجاد جریان‌های چرخشی در زیر کلیدهای خروجی می‌باشد. لذا در این تحقیق، با تغییر در دبی و بار آب بالادست و پایین دست، همچنین عمق پایاب، فراسنجه‌های چاله فرسایش برای دو مدل برداشت و نتایج بررسی و مقایسه شد.

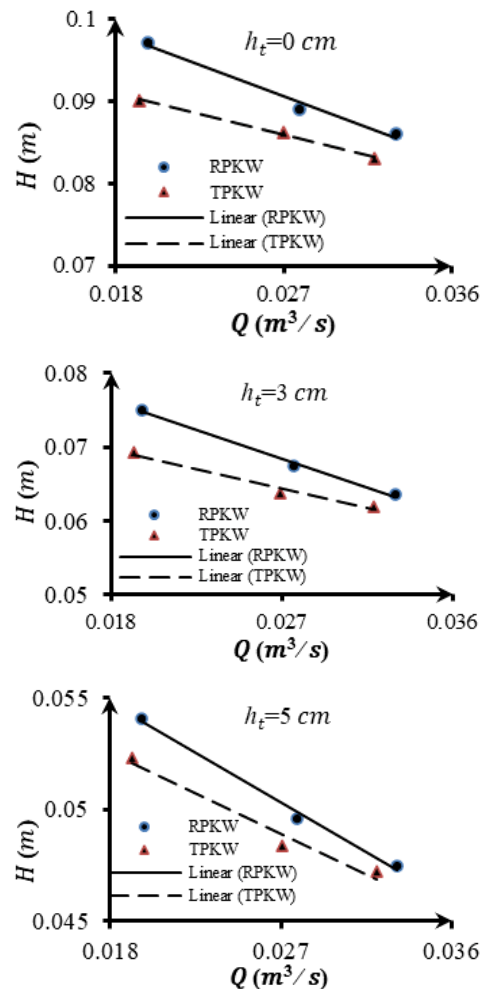


Fig 6 Head difference - discharge rating curve for the rectangular and trapezoidal PKW models

شکل ۶ منحنی تغییرپذیری‌های دبی - اختلاف هد در سرریزهای کلید پیانو مستطیلی و دوزنقه‌ای



Fig 7 Scour profile in the downstream of the rectangular and trapezoidal PKW models

شکل ۷ نیمرخ آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانو مستطیلی و دوزنقه‌ای

یا بار آب بالادست در ویژگی‌های چاله آبشستگی پایین دست دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای در راستای طولی و

با توجه به اینکه بیشینه عمق حفره آبشستگی در زیر کلیدهای خروجی ایجاد می‌شود لذا در شکل ۸، تأثیر دبی

همچنین طول دهانه چاله فرسایش نیز افزایش می‌یابد. رفتار همسانی در تحقیقات پیشین برای سرریزهای خطی و غیرخطی نیز گزارش شده است (Jüstrich et al., 2016).

در زیر کلید خروجی مقایسه شده است. با توجه به شکل ۸، در مدل مستطیلی با هر عمق پایاب، با افزایش دبی و بار آب بالادست، عمق چاله فرسایش افزایش یافته و فاصله بیشینه عمق چاله تا پای سرریز نیز افزایش می‌یابد.

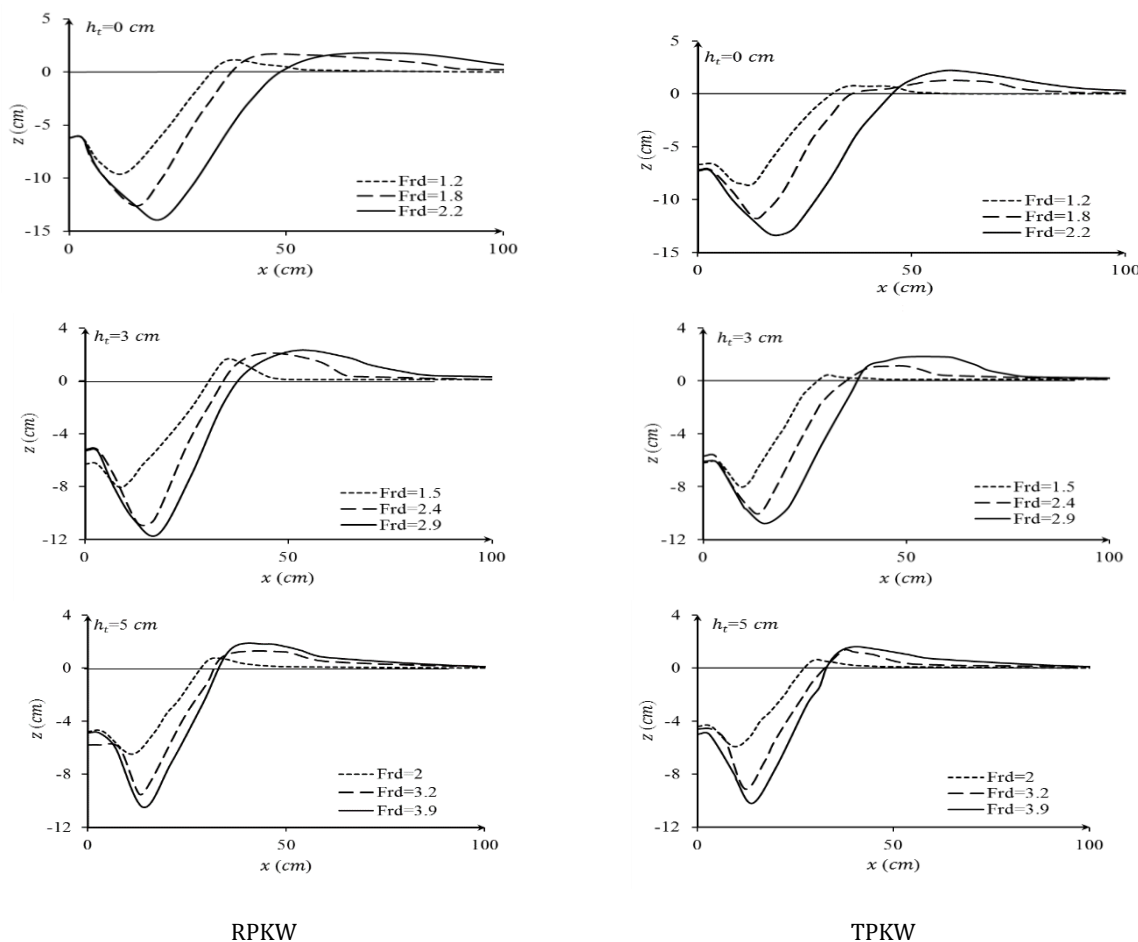


Fig 8 Effect of discharge on the scour hole profile downstream of the rectangular and trapezoidal PKW models
 شکل ۸ تأثیر دبی بر نیمرخ حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای کلید پیکانو مستطیلی و دوزنقه‌ای

مقایسه انجام شده مشاهده می‌شود به طور کلی، بیشینه عمق چاله آبشستگی مدل مستطیلی در مقایسه با مدل دوزنقه‌ای به طور میانگین ۷ درصد بیشتر بوده و با افزایش دبی این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین در همه دبی‌ها و برای هر عمق پایاب، فاصله بیشینه عمق چاله تا پای سرریز و طول دهانه چاله آبشستگی در مدل دوزنقه‌ای به طور میانگین ۱۲ و ۱۰ درصد کمتر از مدل مستطیلی است. همچنین بیشینه ارتفاع تلماسه رسوب‌ها در دو مدل دارای اختلاف کمی است. با توجه به شکل ۹، در عمق پایاب ۵ سانتی‌متر، اختلاف چاله آبشستگی مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای نسبت به وضعیت جریان آزاد

در شکل ۸، برای مدل دوزنقه‌ای نیز مشاهده می‌شود، در هر عمق پایاب، با افزایش دبی و بار آب بالادست، عمق چاله فرسایش افزایش یافته و فاصله بیشینه عمق چاله تا پای سرریز همچنین طول دهانه چاله نیز افزایش می‌یابد. همچنین در هر دو مدل، با افزایش بار آب، بیشینه ارتفاع تلماسه و طول آن افزایش یافته است. بطور کلی افزایش دبی، افزایش اختلاف بار آب بالادست و پایین‌دست را به همراه داشته و انتظار می‌رود در هر دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای افزایش آبشستگی مشاهده شود.

در شکل ۹، ویژگی‌های چاله آبشستگی برای دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای مقایسه شده است. با توجه به

پیانوی مستطیلی نسبت به سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای، بار آب روی سرریز مستطیلی در شرایط دبی و عمق پایاب همانند بیش از سرریز دوزنقه‌ای بوده لذا انرژی و سرعت جت ریزشی از روی کلیدهای خروجی سرریز مستطیلی در هنگام برخورد با بستر رسوبی بیش از سرریز دوزنقه‌ای بوده و سبب افزایش عمق فرسایش می‌شود. لیکن با افزایش دبی به نحوی که $F_{rd} > 3/9$ شود عملکرد سرریزها از نظر نوع هندسه مدل در هدایت جریان و اختلاف بار (H) کاهش یافته و اختلاف نیمرخ چاله آبشستگی کم می‌شود. به نحوی که تفاوت معنی‌داری بین مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای از نظر ابعاد چاله فرسایشی وجود ندارد.

کاهش یافته است همچنین با افزایش دبی عبوری این اختلاف کاهش می‌یابد به نحوی که در عمق پایاب ۵ سانتی‌متر، در $F_{rd} > 3/9$ ، پروفیل آبشستگی دو مدل سرریز کلید پیانو مستطیلی و دوزنقه‌ای تا حدودی مشابه می‌شود.

افزایش عمق چاله فرسایش در مدل مستطیلی در مقایسه با مدل دوزنقه‌ای در شرایط هیدرولیکی همانند، به دلیل آن است که برابر شکل ۶ به ازای یک دبی مشخص، اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست سرریز مستطیلی بیشتر از دوزنقه‌ای می‌باشد. با توجه به رابطه (۳) و تأثیر مستقیم اختلاف بار بالادست و پایین دست سرریز، عمق آبشستگی در مدل مستطیلی بیش از مدل دوزنقه‌ای می‌شود. با توجه به کمتر بودن ضریب آگذری سرریز کلید

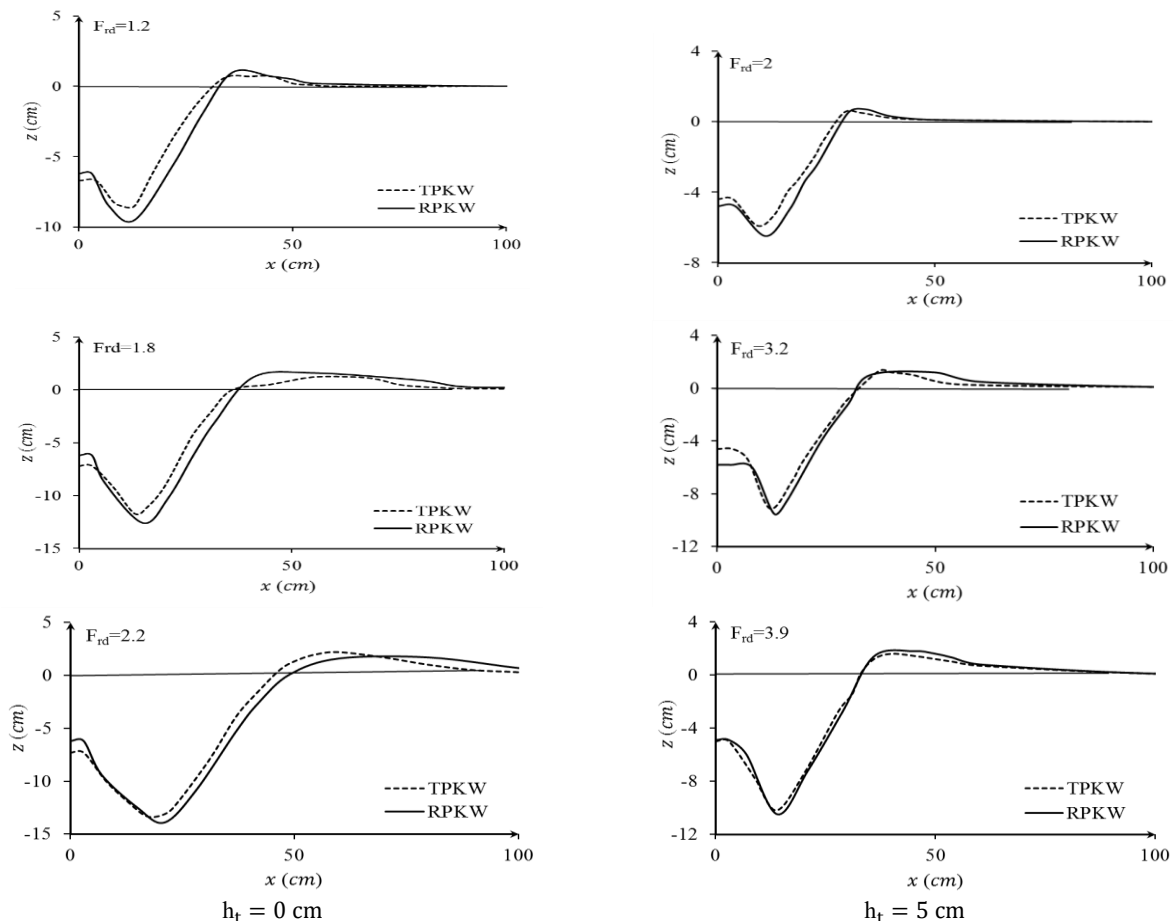


Fig 9 Comparison of scour hole profiles downstream of the rectangular and trapezoidal PKWs
شکل ۹ مقایسه نیمرخ‌های حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانو مستطیلی و دوزنقه‌ای

حسب پارامترهای هندسی چاله آبشستگی به صورت بی‌بعد، در عمق پایاب‌های متفاوت، در شکل ۱۰ نشان

با توجه به معادله (۳)، تأثیر دبی بر ویژگی‌های چاله آبشستگی به صورت نمودارهایی از عدد فرود ذره (F_{rd}) بر

در شکل ۱۱، تأثیر عمق پایاب در مشخصات چاله آبستگي برای هر دو مدل مستطیلی و ذوزنقه‌ای نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ مشخص است در هر دو مدل مستطیلی و ذوزنقه‌ای در یک دبی ثابت، با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق چاله و فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه چاله فرسایش کاهش می‌یابد.

همچنین در شکل ۱۱ طول تلماسه کاهش یافته ولی ارتفاع تلماسه در هر سه وضعیت عمق پایاب، تا حدودی یکسان است. همچنین در هر دو مدل، با افزایش دبی در عمق‌های پایاب همسان، بیشینه عمق چاله فرسایش و فاصله آن تا پای سرریز افزایش می‌یابد. در حقیقت عمق پایاب مانند یک بالشتک کشسانی عمل کرده که نقش زیادی در مستهلک کردن انرژی جت‌هایی که از کلیدهای خروجی خارج می‌شوند دارند. لذا با افزایش عمق پایاب، عمق آبستگي کاهش می‌یابد. اما تأثیر عمق پایاب بر

داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، در هر دو مدل سرریز کلید پیانویی مستطیلی و ذوزنقه‌ای، با افزایش عدد فرود ذره، پارامترهای هندسی چاله آبستگي شامل بیشینه عمق چاله، فاصله آن تا پای سرریز و طول دهانه چاله افزایش می‌یابد. همچنین در یک عدد فرود ثابت، مقادیر پارامترهای هندسی چاله آبستگي سرریز مدل مستطیلی بیش از مدل ذوزنقه‌ای می‌باشد که با افزایش دبی، اختلاف میزان پارامترهای هندسی چاله آبستگي در دو مدل کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۱۰، بیشینه عمق چاله آبستگي دو مدل سرریز در دبی کمتری نسبت به موقعیت مکانی عمق بیشینه و طول دهانه چاله تا حدودی همانند می‌شود. به نحوی که بیشینه عمق چاله آبستگي دو مدل در $F_{rd} > 3$ و موقعیت مکانی بیشینه عمق چاله و طول دهانه چاله در $F_{rd} > 3/9$ تا حدودی یکسان می‌باشد.

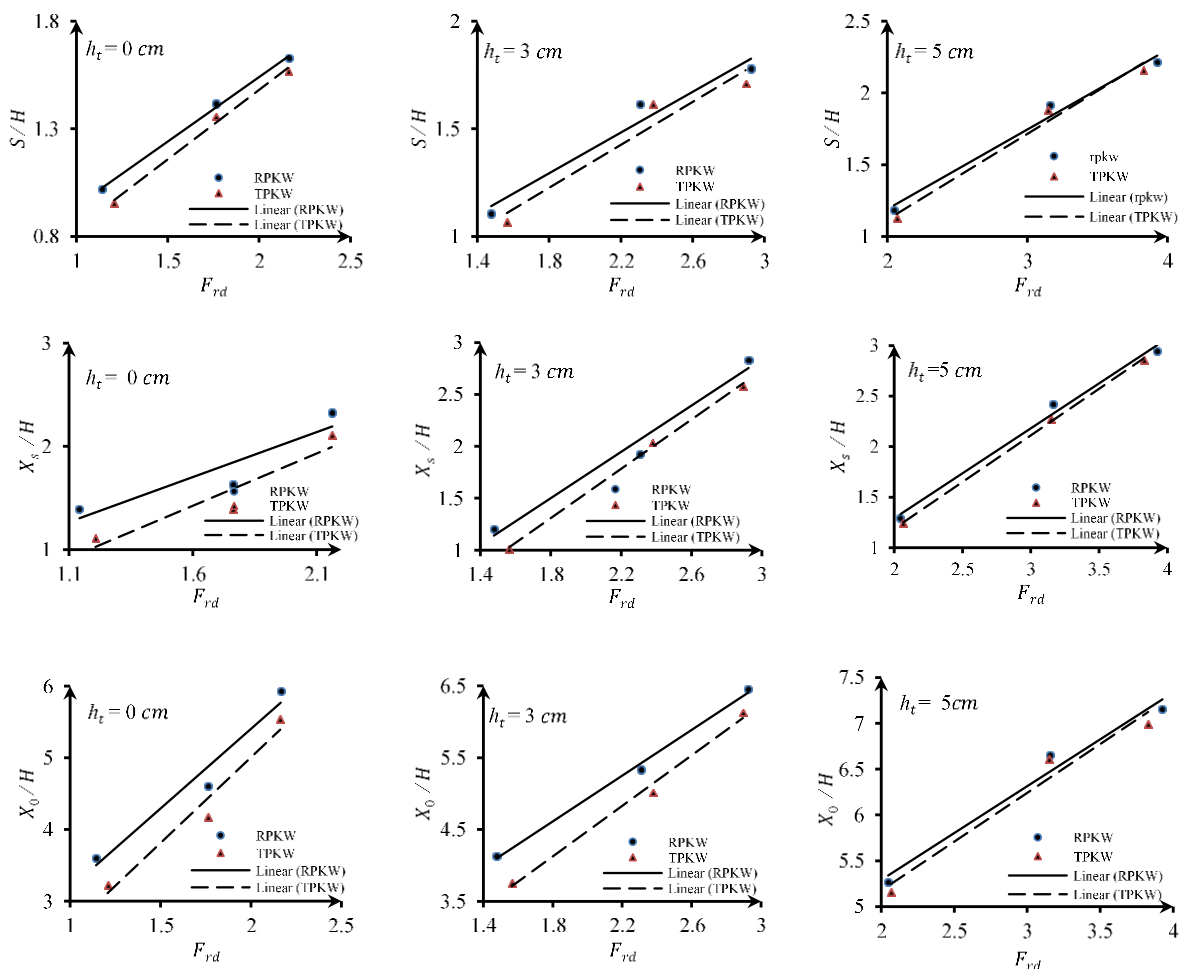


Fig 10 Comparison of scour hole geometric parameters downstream of the rectangular and trapezoidal PKW models
 شکل ۱۰ مقایسه پارامترهای هندسی حفره آبستگي در پایین دست سرریزهای کلید پیانو مستطیلی و ذوزنقه‌ای

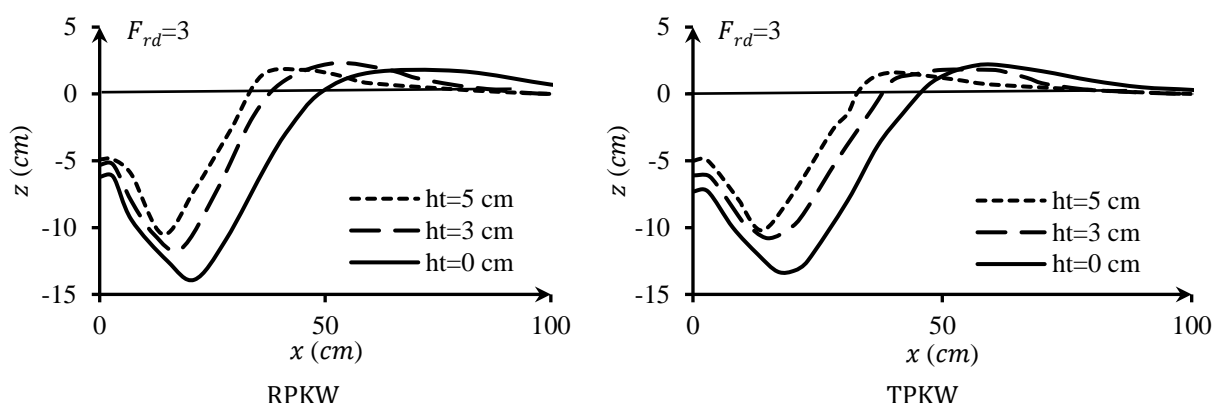


Fig 11 Effect of tailwater depth on the scour hole profile

شکل ۱۱ تأثیر عمق پایاب بر شکل حفره آبخستگی

(RMSE)، انحراف معیار (S.D.) برای رابطه‌های ارائه شده نیز محاسبه شده است.

با توجه به رابطه‌های پیشنهادی در جدول ۳ مشاهده می‌شود برای برآورد ویژگی‌های هندسی چاله (حفره) آبخستگی برای سرریز کلید پیانو دوزنقه‌ای، در مقایسه با مدل مستطیلی دارای ضریب‌های ثابت متفاوتی بوده و امکان استفاده از یک رابطه واحد برای تعیین طول چاله آبخستگی در این دو نوع سرریز وجود نداشته و برای هر کدام از این نوع سرریزها باید رابطه‌های مستقلی استفاده گردد. به عبارت دیگر محدوده و موقعیت مکانی بیشینه عمق چاله آبخستگی در این دو نوع سرریز به دلیل تغییر در اختلاف هد بالادست و پایین دست و تغییر محل برخورد جت خروجی متفاوت می‌باشد.

با توجه به محدود بودن تحقیقات انجام شده در زمینه آبخستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی، در ادامه این مقاله، مقادیر اندازه‌گیری شده، با روابط پیشنهادی Justrich et al. (2016) که به منظور پیش‌بینی آبخستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانو مستطیلی برابر جدول (۴) ارائه گردیده است مقایسه شد.

در شکل (۱۳)، روابط مندرج در جدول (۴) با نتایج آزمایشگاهی این تحقیق مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان داد بیشینه عمق چاله آبخستگی، موقعیت مکانی بیشینه عمق چاله تا پای سرریز و طول دهانه چاله، حاصل از رابطه‌های پیشنهادی (Justrich et al. (2016) به ترتیب، ۸، ۱ و ۶ درصد، بیش از نتایج حاصل از معادله‌های

ارتفاع تلماسه رسوبها ناچیز بوده که علت آن قطر ذرات رسوبی و تمایل آن به ته نشینی بواسطه وزن ذرات، بی‌درنگ پس از خروج از چاله آبخستگی می‌باشد.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی پارامترهای هندسی چاله آبخستگی به منظور تأمین ایمنی سدها و برآورد میزان مصالح لازم جهت اجرای Riprap در این تحقیق می‌توان بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی انجام شده، مشخصه‌های هندسی آبخستگی از جمله بیشترین عمق آبخستگی، موقعیت آن در جهت جریان و طول دهانه چاله آبخستگی را به صورت معادله با شکل عمومی $\frac{\theta_s}{H} = aF_{rd}^b \left(\frac{H}{h}\right)^c$ بیان کرد.

در رابطه بالا، پارامترهای هندسی چاله آبخستگی (θ_s)، شامل: s بیشینه عمق حفره آبخستگی، X_s فاصله افقی بیشینه عمق تا پای سرریز و X_0 طول دهانه چاله آبخستگی می‌باشد که با H ، اختلاف بار تراز آب بالادست و پایین دست سرریز بی‌بعد شد و توسط تابعی از عدد فرود ذره F_{rd} و اختلاف بار نسبی $\frac{H}{h}$ ارائه شد. لذا با توجه به شکل عمومی معادله، پارامترهای هندسی چاله آبخستگی در دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای بررسی و مقایسه شده و به کمک رگرسیون غیرخطی، ضریب‌های a ، b و c تعیین و رابطه‌هایی به منظور پیش‌بینی حدود ۹۰ درصد بیشینه عمق آبخستگی، موقعیت مکانی آن و دهانه چاله آبخستگی برای مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای، بر مبنای رابطه‌های ارائه شده در جدول ۳ و شکل ۱۲ ارائه شد. همچنین در جدول ۳، جذر مربع میانگین خطاهای

جدول ۳ رابطه‌های پیشنهادی برای برآورد ویژگی‌های حفره آبستنگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای

Table 3 Proposed equations for the estimation of scour hole characteristics downstream of rectangular and trapezoidal PKWs

Proposed equation	R ²	RMSE	S. D.
Rectangular Piano Key Weir			
$\frac{s}{H} = 0.794 (F_{rd})^{0.962} \left(\frac{H}{h}\right)^{0.27}$	0.976	0.0582	0.3697
$\frac{X_s}{H} = 0.778 (F_{rd})^{1.466} \left(\frac{H}{h}\right)^{0.579}$	0.941	0.1524	0.6122
$\frac{X_0}{H} = 3.344 (F_{rd})^{0.651} \left(\frac{H}{h}\right)^{0.084}$	0.958	0.2327	1.0935
Trapezoidal Piano Key Weir			
$\frac{s}{H} = 0.743 (F_{rd})^{1.028} \left(\frac{H}{h}\right)^{0.278}$	0.971	0.0637	0.3720
$\frac{X_s}{H} = 0.677 (F_{rd})^{1.544} \left(\frac{H}{h}\right)^{0.525}$	0.954	0.1363	0.6219
$\frac{X_0}{H} = 2.958 (F_{rd})^{0.696} \left(\frac{H}{h}\right)^{0.028}$	0.943	0.2908	1.1619

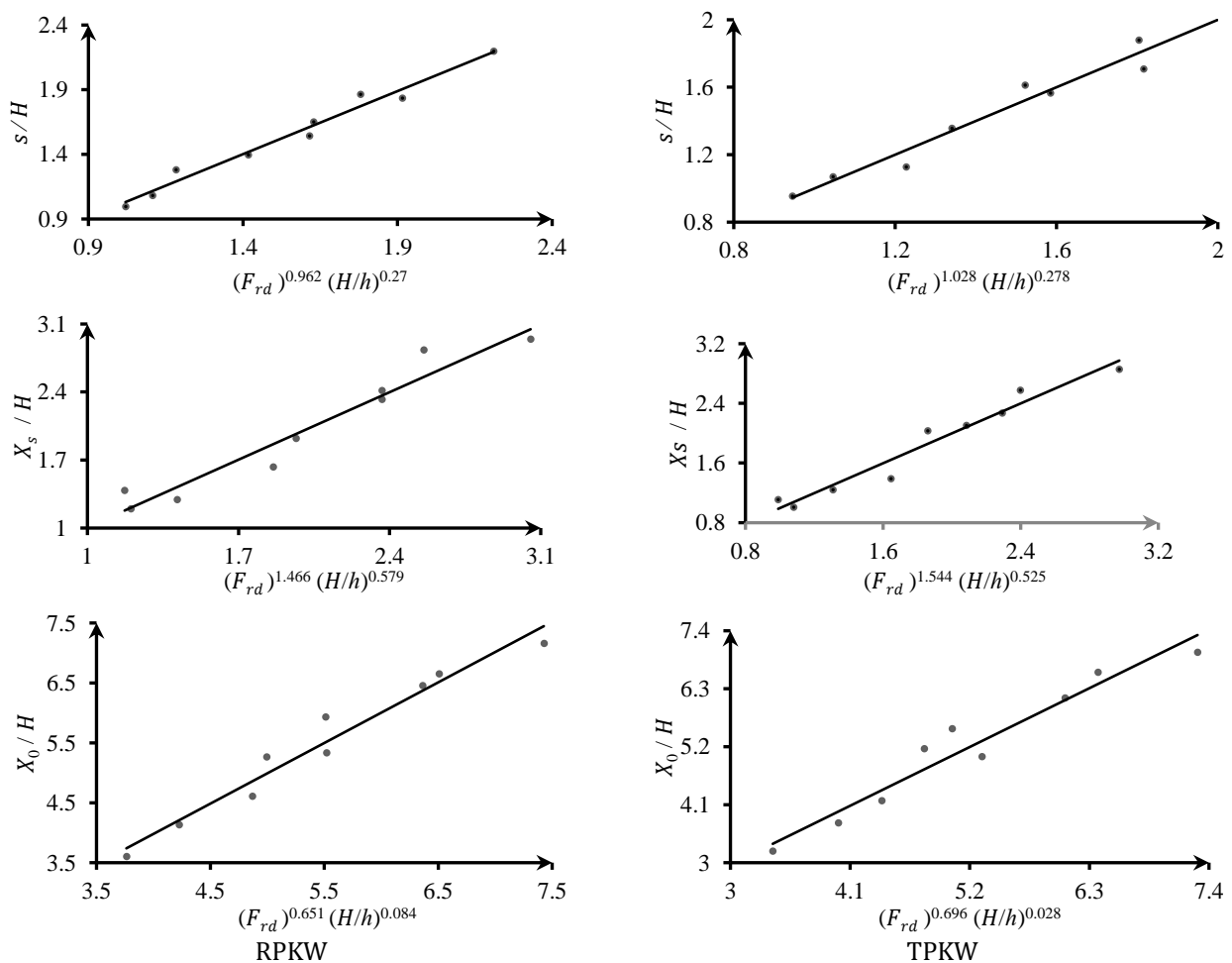


Fig 12 Comparison between measurement and computed scour hole parameters according to the proposed relationships

شکل ۱۲ مقایسه پارامترهای حفره آبستنگی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌ای برابر رابطه‌های پیشنهادی

جدول ۴ معادله‌های موجود برای برآورد پارامترهای هندسی حفره آبخستگی

Table 4 Existing equations for predicting the geometrical characteristics of scour holes

Author	Proposed Equations
Justrich et.al. (2016)	$\frac{s}{d_{50}} = 0.42 \left(\frac{h_c}{d_{50}} \right)^{1.7} \left(\frac{H}{h} \right)^{0.3}$ $X_s = 1.2 s + \frac{W_i}{2}$ $X_0 = 2.7 s + B_1$

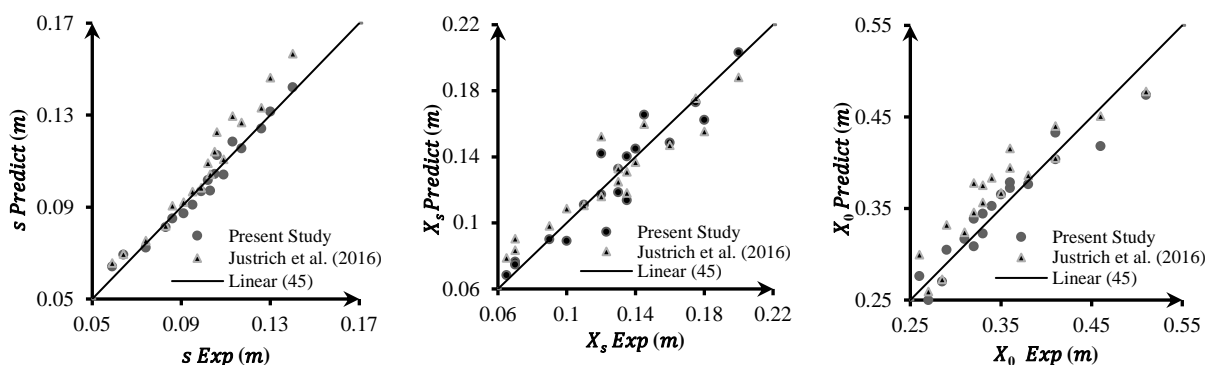


Fig 13 Comparison of scour hole measurements with existing experimental equations

شکل ۱۳ مقایسه ویژگی‌های حفره آبخستگی اندازه‌گیری شده با معادله‌های تجربی موجود

افزایش دبی و بار آب بالادست، بیشینه عمق چاله فرسایش و فاصله آن تا پای سرریز همچنین طول دهانه چاله آبخستگی افزایش می‌یابد.

در شرایط دبی و عمق پایاب اولیه همسان، بیشینه عمق چاله آبخستگی، فاصله عمق بیشینه تا پای سرریز و طول دهانه چاله در مدل مستطیلی در مقایسه با مدل دوزنقه ای، بیشتر می‌باشد که با افزایش دبی این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین در همه دبی‌ها و برای هر عمق پایاب، بیشینه عمق چاله آبخستگی، فاصله بیشینه عمق چاله تا پای سرریز و طول دهانه چاله آبخستگی در مدل دوزنقه‌ای به طور میانگین ۷، ۱۲ و ۱۰ درصد کمتر از مدل مستطیلی است. در شرایطی که $F_{rd} > 3/9$ گردد عملکرد سرریزها از نظر نوع هندسه مدل در هدایت جریان و اختلاف بار (H) کاهش یافته و اختلاف نیمرخ چاله آبخستگی کم می‌شود. به نحوی که تفاوت معنی‌داری بین مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای از نظر ابعاد چاله فرسایشی وجود ندارد.

پیشنهادی تحقیق حاضر می‌باشد که به دلیل تغییر در زاویه دیواره جانبی مدل آزمایشی و تفاوت در شمار سیکل‌ها و عرض سرریز مدل‌های دو تحقیق همچنین ویژگی‌های رسوب‌های بستر پایین دست می‌باشد.

۴- نتایج

یکی از مسئله‌های مهم در پایداری سرریزها، آبخستگی پایین دست آن‌ها می‌باشد. در این تحقیق، هندسه چاله آبخستگی پایین دست سرریزهای کلید پیاپویی به کمک مدل آزمایشگاهی بررسی شده و برای این منظور دو مدل سرریز با طرح مستطیلی و دوزنقه‌ای با یکدیگر مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد ویژگی‌های آبخستگی تابع نوع هندسه سرریز، دبی، عمق پایاب می‌باشد. همچنین در زمینه مقایسه رفتار آبخستگی در پایین دست این دو نوع سرریز نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد.

در هر دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای، بیشینه عمق آبخستگی در زیر کلیدهای خروجی می‌باشد. همچنین با

T_s	ضخامت دیواره سرریز (m)
W	عرض سرریز (m)
W_i	عرض کلید ورودی (m)
W_o	عرض کلید خروجی (m)
X_0	طول دهانه چاله آبشستگی (m)
X_s	فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا سرریز (m)
ρ_s	جرم مخصوص رسوبات (kgm^{-3})
ρ	جرم مخصوص آب (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
σ	انحراف معیار هندسی ذرات (-)

۶- منابعها

Ahmadi Dehrshid, F. and S. Gohari (2016). Investigating the effect of discharge and subsurface depth on the dimensions of the lower cascade cavity. International Conference on Civil Engineering. (In Persian)

Anderson, R. and B. Tullis (2011). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering. 138(4), 358-361.

Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C. and Vigny, J. (2006). Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or PK Weirs, in proceedings of 22nd ICOLD Congress. CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain Q. 86(R3).

Cicero, G., Delisle, J., Lefebvre, V. and Vermeulen, J. (2013). Experimental and numerical study of the hydraulic performance of a trapezoidal Piano Key weir. In: Labyrinth and Piano Key Weirs II (October 17, 2013). 265-272.

Falvey, H.T. (2003). Hydraulic design of labyrinth weirs. ASCE Press (American Society of Civil Engineers) Reston, VA .

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.

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

Hien, T.C., Son, H. T. and Khanh, M.H.T. (2006). Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam. Proc. of the 22nd Congress of ICOLD, Barcelona, Spain.

- بیشینه عمق چاله آبشستگی دو مدل سرریز در دبی کمتری نسبت به موقعیت مکانی عمق بیشینه و طول دهانه چاله، تا حدودی همسان می‌شود. به نحوی که بیشینه عمق چاله آبشستگی دو مدل سرریز کلید پیاپویی در $F_{rd} > 3$ و موقعیت مکانی بیشینه عمق چاله و طول دهانه چاله در $F_{rd} > 3/9$ تا حدودی یکسان می‌باشد.

- در دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای در یک دبی ثابت، با افزایش عمق پایاب، عمق و دهانه چاله فرسایشی کاهش یافته، طول تلماسه افزایش ولی ارتفاع تلماسه بدون تغییر می‌باشد. همچنین با افزایش عمق پایاب، اختلاف عمق چاله آبشستگی در دو مدل مستطیلی و دوزنقه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش در عمق‌های پایاب ۳ و ۵ سانتی‌متر، با روشنی بیشتری قابل مشاهده است.

- پارامترهای هندسی حفره آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیاپو به هندسه مدل، دبی و عمق پایاب بستگی دارد.

لازم به توضیح است برای دستیابی به نتایج کاربردی و عمومیت بخشیدن به نتایج تحقیق بایستی آزمایش‌های همانندی برای ذرات با دانه بندی غیر یکنواخت و قطرهای مختلف نیز انجام و مقایسه‌های تکمیلی در زمینه آنها نیز صورت پذیرد.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	طول سرریز (m)
d_{50}	قطر متوسط ذرات رسوبی (m)
F_{rd}	عدد فرود ذره (-)
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
h	هد پایاب (m)
H	اختلاف هد بالادست و پایین‌دست (m)
h_0	هد روی سرریز (m)
h_t	عمق پایاب اولیه (m)
L	طول گسترده سرریز (m)
P	ارتفاع سرریز (m)
Q	دبی (m^3s^{-1})
q	دبی در واحد عرض (m^2s^{-1})
R^2	ضریب همبستگی (-)
S	بیشینه عمق آبشستگی (m)

- Nosedá, M., Stojnic, I., Pfister, M. and Schleiss, A. J. (2019). Upstream Erosion and Sediment Passage at Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(8), 04019029.
- Oertel, M. (2018). Piano key weir research: State-of-the-art and future challenges. *International Symposium on Hydraulic Structures -ISHS2018*, Aachen, Germany.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. (2006). Design of a new economic shape of weir. *Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century*.
- Rajaei, A., M. Esmacili Varaki and B. Shafei Sabet (2018). Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 1-11.
- Safarzadeh, A. and Noroozi, B. (2013). Three-dimensional hydrodynamic overflow Curved piano key In the plan. *Journal of Hydraulics*, 9(3), 61-79. (In Persian)
- Schleiss, A. (2011). From labyrinth to piano key weirs: A historical review. *Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B*.
- Shafaei Bajestan, M. (2015). Theoretical and practical foundations of hydraulic sediment transfer. *Shahid Chamran University of Ahvaz*, 4, 152.
- Vischer, D.L. and Hager, W.H. (1998). *Dam Hydraulics*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, 328 p.
- Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A.J. (2016). Mobile riverbed scour downstream of a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*. 142(11), 40-46.
- Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 114-120.
- Khassaf, S.I. and Al-Baghdadi, M.B. (2015). Experimental study of non-rectangular piano key weir discharge coefficient. *Journal homepage: www. IJEE. IEEFoundation. Org.*, 6(5), 425-436.
- Khatsuria, R.M. (2004). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. CRC Press .
- Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P. and Pirotton, M. (2011). Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 359-366.
- Mehboudi, A., Attari, J., Hosseini, S. and Jalili Ghazizadeh, M.R. (2014). Laboratory Study Comparison of Piano Keyboard Weir with Labyrinth and Linear Weirs, 13th Iranian Hydraulic Conference, Tabriz. (In Persian)
- Mehboudi, A., Attari, J. and Hosseini, A. (2017). Flow regimes over trapezoidal piano key weirs. *Labyrinth and Piano Key Weirs III: Proceedings of the 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2017)*, February 22-24, 2017, Qui Nhon, Vietnam, CRC Press.
- Mehboudi, A., Attari, J. and Hosseini, S. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, 65-72.