


Experimental Study of the Effect of Sidewall Slope Over the Triangular Piano Key Weir

Hossein Sohrabzadeh Anzani^{1*}, Masoud Ghodsian²

1- MSc, Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Water Engineering Research Institute and Faculty of Civil and Environmental Eng, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* Sohrabzadeh@modares.ac.ir

Received: 23 January 2022, Accepted: 4 June 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: One of the critical consequences of climate change is prolonged droughts with floods. In these conditions, maintaining the maximum possible water level without wasting it and high discharge capacity in critical situations is essential to preserving the reservoir's health. The most suitable solution for sending excess water can be considered as creating a proper spillway. According to ICOLD, one-third of dam failures are due to weir disproportion. Unfortunately, due to the designers' lack of experience in using the nonlinear spillway, irreparable accidents sometimes happen. Therefore, choosing the proper spillway with the appropriate discharge have undeniable importance. This paper focuses on a new solution to improve the piano key weir capacity. By correcting the sidewalls of weirs, three goals were pursued simultaneously. In the first step, better performance than conventional Piano key (PK) weirs on the occasion of a flood. The second goal is to store the maximum water level upstream in non-critical situations and use only part of the weir. The ultimate goal is to make this method economical. This research is a continuation of previous research on PK weirs.

Methodology: Fig. 4 shows the rotating flume environment, which experiments were performed in that laboratory at the Tarbiat Modares University of Tehran (dimensions: 10 meters long, 2 meters wide, and 0.9 meters high; Fig. 4). Experiments have been performed on a triangular weir with a zero slope (i.e., Tri-Base model) (Figs. 1 and 2) and 10 degrees in the flow direction (Figs. 1 and 3). In this study, PK weir with horizontal and sloped crest is called Tri-Base and Tri-B1 models. The weir characters used in the laboratory are provided in Table1.

Eqs. (3) and (4) are the dimensional analysis of the (Tri-B1) model, and the (Tri-Base) model, respectively. In the analysis of laboratory data, an effective length (wet length of walls) was defined for the weir. Then for this geometry, Eqs. (5) and (6) were developed to calculate the discharge coefficient, which in addition to the new weir, is used in typical weir (i.e., the Tri-Base model) can also be used with great precision. Fig. 10 shows the comparison of measured and calculated values of triangular PK weir.

Results and discussion: For the Head-Discharge curves, firstly, the discharge-head curves for triangle PK weir with horizontal crest have been plotted and compared with available researchers' results (see Fig. 7). The differences between results are because of the differences in geometric characteristics shown in Table 2. Based on these results, water height in triangle

PK weir with a sloped crest (i.e., the Tri-B1 model) is higher than triangle PK weir with a horizontal crest (i.e., the Tri-Base model), but head height over the (Tri-B1) model is less than the Tri-Base model. On the other hand, for the Tri-Base model, discharge coefficients have been plotted in Figure 8. This figure also compared the results of other researchers' results with this study. Fig. 9 also shows the discharge coefficient for the Tri-B1 model. The discharge coefficient in the Tri-B1 model has increased by an average of 3.8% than the Tri-Base model, with the maximum and average discharge coefficients as shown in Table 3.

Also, about the flowing blade, in the weir of a triangular Piano key weir with a horizontal crest, at $8 \text{ Cm} > H_t > 4 \text{ Cm}$, air penetrates under the blades of the flow, and the flow is vented. At higher values ($12 \text{ Cm} > H_t > 8 \text{ Cm}$), the flow under the blade is connected to the open-air with increasing water head. In this case, fluctuations have been seen in the current blade. At higher values ($H_t > 12 \text{ Cm}$), the flow completely covers the weir (immersion) and passes over the weir. In these conditions, the fluctuations of the flowing blade can be observed. According to Fig. 5 in $Q=40 \text{ lit/sec}$ have seen an air cavity on the weir body. Also, in analyze were seen, the weir of a piano key weir with a sloping crest (i.e., the Tri-B1 model) increased. But with the sinking whole of the weir, the discharge coefficient rate decreases. Also, in connection with the weir blade of the PK weir with a sloped crest (i.e., the Tri-B1 model) in some discharges, all three types of flow blades can be seen on the sidewalls of the weir (i.e., sticky, compressed, and free baled).

Conclusion: In PK weir with slope crest, the level of water behind the weir increases while the head of water on the weir decrease. So, this means that in drought seasons and when the level of water decreases in the reservoir, this spillway can increase the water level. Use this weir's high capacity in the critical season (especially during flood time). On the other hand, this spillway has a high capacity in all situation and increase the discharge coefficient.

Keywords: Flood, Dam failure, Piano key weir, Discharge coefficient, Dam, River.



© 2022 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/>)

مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب تاج دیواره جانبی بر آبگذری سرریز کلید پیانویی مثلثی

حسین سهراب زاده انزانی^{۱*}، مسعود قدسیان^۲

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
۲- استاد، دانشکده عمران و محیط‌زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران

*Sohrabzadeh@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۴، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از پیامدهای مهم تغییرات آب و هوایی را می‌توان خشکسالی‌های طولانی، همراه با سیلاب دانست. در این شرایط حفظ بیشترین آب ممکن، بدون هدر رفت آن، همراه با ظرفیت بالای تخلیه در مواقع بحرانی برای حفظ سلامت مخزن ضروری می‌باشد. مناسب‌ترین راهکار برای تخلیه آب مازاد را می‌توان ایجاد سرریز مناسب دانست. بنابراین انتخاب سرریز مناسب به همراه آبگذری مناسب از اهمیت غیرقابل انکاری برخوردار می‌باشد. در این تحقیق بر روشی برای بهبود ظرفیت سرریز کلید پیانویی تمرکز شده است. در پژوهش حاضر با اصلاح شیب دیواره‌ها و افزایش طول تاج سرریز افزایش بهره‌وری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی متعارف دنبال می‌شود. هدف بعدی از اصلاح دیواره جانبی سرریز کلید پیانویی افزایش تراز آب بالادست سرریز در کانال‌ها و رودخانه‌ها جهت انحراف آب در مواقع کم-آبی می‌باشد. آزمایش‌ها، در یک فلوم چرخشی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران بر روی دو سرریز کلید پیانویی با شیب دیواره‌های جانبی صفر (مدل Tri-Base) و ۱۰ درجه (مدل Tri-B1) انجام شد. در تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مشخص شد که تراز سطح آب بالادست مدل (Tri-B1) نسبت به مدل (Tri-Base)، ۲۹ درصد افزایش یافته است، در حالیکه بار آبی مؤثر روی سرریز در مدل (Tri-B1)، ۳/۸ درصد نسبت به مدل (Tri-Base) کاهش یافته است. همچنین ضریب آبگذری مدل (Tri-B1)، بطور متوسط ۵/۳ درصد نسبت به مدل (Tri-Base) افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: سیلاب، شکست سد، سرریز کلید پیانویی، ضریب آبگذری، سد، رودخانه

۱- مقدمه

راه‌حل به علت محدودیت‌های عوارض یا ناهمواری و هزینه‌ها در همه موارد مناسب و قابل اجرا نمی‌باشد. به‌منظور ذخیره بیشترین حجم از آب، بدون آسیب به سازه‌ها و در عرض ثابت همراه با کمترین هزینه؛ محققان به دنبال راه‌حلی برای بهبود ساختار سرریزها هستند. سرریز کلید پیانویی را می‌توان نسل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای دانست. این نوع سرریزها در طرح و نقشه به شکل‌های مختلف مثلثی، مستطیلی یا دوزنقه‌ای ساخته شده‌اند و قابل بهره‌برداری در شرایط مختلف هستند. عامل‌هایی چون تداخل جریان در کلیدهای خروجی و دیواره‌ها، میزان استغراق روی تاج خروجی و شمار

سدها بر مبنای سیل طرح طراحی می‌شوند. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده توسط مهندسان ارتش ایالات متحده $\frac{1}{3}$ از سدهای جهان امنیت کافی ندارند که $\frac{4}{5}$ از آن‌ها به علت کم بودن ظرفیت سرریزها می‌باشد (Suprpto, 2013). با توجه به این موضوع که سرریزها سازه‌هایی حیاتی برای حفظ پایداری سدها بخصوص در زمان سیلاب می‌باشند، می‌بایست ظرفیت مناسبی داشته باشند تا در مواقع ضروری، مورد بهره‌برداری قرار گیرند. به علت این خطرهای فاجعه‌بار و بالقوه که زندگی انسان‌ها را تهدید می‌کند، محققان توجه ویژه‌ای به آبگذری سرریزها دارند و به افزایش ابعاد سرریزها روی آوردند؛ اما این

است. او همچنین عنوان کرد بدون در نظر گرفتن مقدار $\frac{H_t}{W}$ بهترین میزان برای $\frac{W_i}{W_0}$ در محدوده $\frac{5}{4}$ تا $\frac{3}{4}$ است. Anderson and Tullis (2012) با بررسی و مقایسه سرریزهای کنگره‌ای با سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی به این نتیجه رسیدند که سرریزهای کلیدپیانویی به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. (Kabiri-Samani and Javaheri (2012) به بررسی ویژگی‌های هندسی همچون ارتفاع سرریز، طول کنسول کلیدها و عرض کلیدهای آن بر کارایی سرریز کلید پیانویی نوع A پرداختند. آنان همین‌طور تأثیر استغراق پایین دست سرریز را بر کاهش کارایی سرریز بررسی کردند. Machiels et al. (2013) تأثیر دیواره جان‌پناه بر آبگذری سرریز را بررسی کردند. (Ribeiro et al. (2013) با تقسیم رابطه آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی (مستطیلی و دوزنقه‌ای) بر رابطه آبگذری سرریز لبه تیز، منحنی‌هایی را برای نسبت‌های مختلف $\frac{L}{W}$ و N (شمار کلید) ارائه دادند. Safarzadeh and Noroozi (2014) هیدرولیک سه‌بعدی سرریز کلیدپیانویی انحنادار را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داده است که با افزایش زاویه‌ی مرکزی سرریز، ظرفیت آبگذری سرریز به علت کاهش استغراق موضعی و افزایش سطح کلیدهای ورودی و اصلاح الگوی جریان عبوری افزایش می‌یابد. آنان همچنین گزارش کردند که سرریزهای دوزنقه‌ای شکل، ۲۳ درصد بازده یا کارایی بیشتری نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی دارند. (Mehboudi et al. (2017) به ارزیابی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای پرداختند. (Erpicum et al. (2017) به جهت افزایش آبگذری سرریز سد اوول^۲، به بررسی و ارزیابی بر روی این سد پرداختند و راه‌حل‌های مختلفی را ارائه دادند که یکی از آن‌ها استفاده از سرریز کلیدپیانویی بود. (Belzner et al. (2017) به بررسی و مقایسه‌ی ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی نوع A و C پرداختند. با توجه به نتایج تحقیق آنان سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A ضریب آبگذری بالاتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی نوع C دارد. آنان همچنین تأثیر ارتفاع و عرض‌های مختلف سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و مثلثی را بر روی ضریب آبگذری بررسی کردند. Ahadian and

فراسنجه^۱های زیاد مؤثر بر ضریب آبگذری، رفتار این سازه را پیچیده کرده است. Lempérière and Ouamane (2003) در فرانسه برای بهبود سرریزهای کنگره‌ای، این نوع سرریز را با مقیاسی کوچک‌تر ساختند و در ادامه، با توجه به برتری‌های آن به‌طور چشم‌گیری در بین کشورها گسترش یافت. آنان با بررسی سرریز کلیدپیانویی نوع A پیشنهاد کردند شمار کلیدهای سرریز (N) بین ۴ تا ۷ در نظر گرفته شود. (Lempérière and Jun (2005) بهترین شمار کلیدهای سرریز کلیدپیانویی نوع A را ۵ بیان کرد. همچنین با بررسی سرریز کلیدپیانویی نوع A پیشنهاد کردند تعداد کلیدهای سرریز (N) بین ۴ تا ۷ در نظر گرفته شود. آن‌ها همچنین حداقل شیب کلیدهای سرریز Ouamane and Lempérière (2006) با بررسی سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و B کارایی سرریز نوع B را در حدود ۱۰ درصد بیشتر گزارش کردند. همچنین آنان با بررسی کلیدهای مختلف سرریز کلیدپیانویی اعلام کردند که اگر عرض کلید ورودی بزرگتر از عرض کلید خروجی در نظر گرفته شود، دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد. عرض دهانه خروجی W_i تأثیر زیادی بر دبی خروجی از سرریز دارد و با کاهش این عرض، مقدار دبی عبوری به میزان زیادی کاهش می‌یابد. (Leite Ribeiro et al. (2009) هفت سد بزرگ فرانسه که دارای سرریز کلیدپیانویی بودند را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اعلام کردند در بار آبی کم (به‌طور تقریبی بین ۲ تا ۳ سانتی‌متر روی تاج سرریز)، جت عبوری از روی سرریز تحت مکش قرار می‌گیرد و این امر سبب افزایش عبور دبی عبوری می‌گردد. همچنین در بار آبی کم، سرریز کلیدپیانویی شبیه به سرریز لبه‌تیز عمل می‌کند و با افزایش بار آبی روی سرریز، از کارایی این سرریز کاسته شده و کارایی آن نزدیک به سرریزهای لبه‌پهن می‌شود. (Anderson and Tullis (2011) با بررسی و ارزیابی بر روی نسبت‌های مختلف $\frac{W_i}{W_0}$ ، افزایش نسبت $\frac{W_i}{W_0}$ را باعث افزایش ضریب آبگذری معرفی کرده‌اند. (Machiels (2012) بهترین نسبت $\frac{W_i}{W_0}$ را بزرگ‌تر از ۱ عنوان کرد. برای میزان‌های بالاتر از $\frac{H_t}{W_u} \geq \frac{0.7}{3}$ بیشینه بازده برای $\frac{W_i}{W_0}$ بین اعداد $\frac{5}{4}$ تا $\frac{3}{4}$

کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است. (Kumar et al. (2020) به بررسی و مقایسه تجربی و مدل‌سازی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی شکل پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که کارایی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیش از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی می‌باشد. (Sangsefidi et al. (2021) با بررسی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با نسبت‌های مختلف هندسی، به این نتیجه رسید که در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کوچک‌تر، ضریب آبگذری در سرریز دوزنقه‌ای حدود ۵٪ بیشتر از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی می‌باشد. این میزان افزایش برای سرریز با نسبت کوچک‌تر ۷٪ اعلام شده است.

در پژوهش‌های گذشته تأثیر شیب دیواره‌ی جانبی سرریز کلیدپیانویی مثلثی بررسی و ارزیابی نشده است. از آنجاکه بهره‌برداری از سرریز در سدها متناسب با شرایط مختلف (کم‌آبی و زمان بحرانی مانند سیلاب) با اهمیت می‌باشد، این تحقیق به بررسی راهکاری می‌پردازد که در زمان بحرانی (مانند سیلاب) بتوان، به‌واسطه‌ی افزایش طول سرریز، آبگذری سرریز را نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی بهبود بخشید و در زمان کم‌آبی، تراز آب بالادست سرریز را برای تخصیص حق‌آبه پائین‌دست افزایش داد. از سوی دیگر در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها به‌واسطه‌ی شیب دیواره‌ها و افزایش تراز ارتفاعی آب بالادست سرریز، از این سرریز بتوان برای آبگیری بهره برد، به‌طوری‌که در زمان کم‌آبی تراز جریان رودخانه را جهت آبگیری افزایش داد و کمترین آبگیری انجام شود و در دیگر زمان‌ها به نسبت تراز آب رودخانه بتوان از آن آبگیری کرد. این مهم در رودخانه‌ها که تراز آب نسبت به زمین‌های (کشاورزی) مجاور به‌طور معمول پایین‌تر می‌باشد، برای آبگیری زمین‌های مجاور با اهمیت است.

۲- تحلیل ابعادی

دبی سرریز کلید پیانویی Q با تاج افقی را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به دست آورد:

$$Q = \frac{2}{3} C_w W \sqrt{2gH_t^3} \quad (1)$$

که C_w ضریب آبگذری سرریز، W عرض سرریز، g شتاب

(Afzalian (2017) با استفاده از دیواره سپری شیب‌دار روی دو مدل سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، قابلیت این سرریزها را در انحراف آب در هنگام کم‌آبی و نیز تخلیه جریان در هنگام سیلاب بررسی کردند و نشان دادند مدل هندسی با نسبت کوچک‌تر، در دبی‌های کم توانایی بیشتری برای افزایش سطح آب دارد، درحالی‌که مدل با نسبت هندسی بزرگ‌تر، در دبی‌های بالا توان تخلیه بیشتری دارد. Yarmohammadi and Afzalian (2017) آزمایش‌های خود را بر روی سرریز کلیدپیانویی نوع A مستطیلی با نسبت $\frac{W_i}{W_o} = \frac{3}{2}$ نسبت ارتفاع سرریز به عرض یک سیکل $\frac{P}{W_u} = \frac{1}{2}$ انجام دادند. Sajadi (2017) با بررسی استهلاك انرژی جریان گذرنده از روی سرریز کلیدپیانویی با کلید خروجی مانع‌دار اعلام داشتند که با افزایش دبی، میزان استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. (Poshteh-Shirani et al. (2018) شناور را در پنج هندسه متفاوت سرریز کلیدپیانویی بررسی کرده و نشان دادند در یک‌بار هندسی ثابت، کمترین انسداد مربوط به سرریز با نسبت هندسی $\frac{W_i}{W_o} = \frac{1}{4}$ می‌باشد. Zounemat-Kermani and Mahdavi-Meymand (2019) به بررسی و برآورد ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با استفاده از هوش مصنوعی پرداختند. Rezaei Ahvanooei et al. (2019) با بررسی هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی غیرخطی در طرح و نقشه بیان کردند که افزایش بار آبی بالادست موجب برخورد لایه‌های جریان و استغراق موضعی سرریز شده و ضریب آبگذری به میزان محسوسی کاهش می‌یابد. ایشان همچنین نشان دادند که ایجاد پشت‌بند باعث بهبود کار هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی انحنا دار می‌شود. (Ghodsian and Ehsanifar (2020) به بررسی و مقایسه آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که اختلاف ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مثلثی و مستطیلی ۵٪ می‌باشد. همچنین این دو سرریز نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در حدود ۱۰٪ ضریب آبگذری بیشتری را نشان می‌دهند. (Akbari et al. (2020) با بررسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با نسبت‌های متفاوت $\frac{P}{W_u}$ اعلام نمودند در دبی‌های بالا، بار آبی ایجادشده در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریز

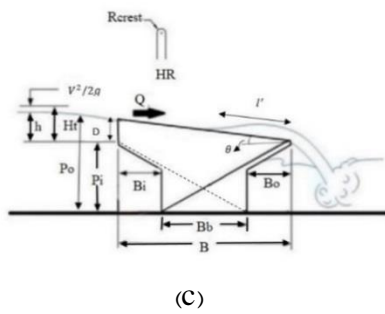


Fig. 1 PKW schematic: (a) in plan, (b) section A-A with horizontal crest; and (c) section A-A with sloped crest
 شکل ۱ سرریز کلیدپیانویی: (a) پلان، (b) مقطع A-A با تاج افقی و (c) مقطع A-A با تاج شیب‌دار

با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه (۲) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$F\left(\frac{Q}{L\sqrt{g}H_t^{3/2}}, \frac{W_i}{W}, \frac{W}{B_0}, \frac{L}{W}, \frac{B_i}{B_0}, \frac{B}{W}, \frac{H_t'}{W}, \frac{P'}{B_i}\right) \quad (3)$$

$$\frac{T_s}{B}, \frac{T_s}{W}, S_0, \frac{L'}{L}, \theta, \alpha, We = 0$$

در رابطه (۳) میزان‌های $\frac{L'}{L}$ و $\frac{B_i}{B_0}$ در همه‌ی آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق برابر ۱ می‌باشد. $\frac{T_s}{B}$ ، $\frac{T_s}{W}$ ، $\frac{W}{B_i}$ نیز در همه‌ی سرریزها و آزمایش‌ها این بخش دارای مقدار ثابتی است. همین‌طور میزان α و θ ثابت و به ترتیب برابر صفر، ۱۴ و ۱۰ (درجه) می‌باشد. علاوه بر این میزان $T_s = 1 \text{ cm}$ و $W = 7.5 \text{ cm}$ بود. از سوی دیگر (Pfister et al. (2013)، Sangsefidi et al (2021) و (2016) سرریزهای کلیدپیانویی اشاره داشتند در $h > 3 \text{ cm}$ می‌توان از اثر کشش سطحی صرف‌نظر کرد. با توجه به این موضوع که شمار آزمایش‌هایی که بار آبی آنها روی سرریز کمتر از ۳ سانتی‌متر باشد ناچیز است (دو داده)، بنابراین

ثقل، H_t بار آب کل $(H_t = h + \frac{v^2}{2g})$ ، سرعت جریان و h ارتفاع جریان روی تاج سرریز می‌باشد.

فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی مثلثی در شکل‌های ۱ تا ۳، نشان داده شده‌اند. فراسنجه‌های مؤثر بر ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مثلثی را می‌توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد.

$$F(W_i, W, B_i, B_0, B, T_s, L, g, P_i, P', H_t', Q, L', \theta, \alpha, S_0, \rho, \sigma) = 0 \quad (2)$$

که در این رابطه W_i عرض کلید ورودی، T_s ضخامت دیواره سرریز، W عرض کل سرریز، ρ جرم مخصوص آب و σ کشش سطحی، B_i طول شیروانی پائین‌دست، B_0 طول شیروانی بالادست، $B = B_i + B_0 + B_b$ طول تاج جانبی سرریز، L طول کل تاج سرریز، P_i ارتفاع سرریز در پائین دست، $P' = \frac{1}{2}(P_i + P_o)$ ارتفاع میانگین سرریز و $P' = \frac{1}{2}(P_i + P_o)$ ارتفاع میانگین سرریز، $H_t' = (H_t - l' \sin \theta)$ نماد تابع می‌باشند. همچنین l' ، H_t' ، l' ، $H_t' = (H_t - l' \sin \theta)$ طول تر شده‌ی یک دیواره جانبی سرریز، θ زاویه شیب تاج دیواره‌ی جانبی سرریز $(\theta = \tan^{-1} \frac{D}{B})$ و D ارتفاع دیواره‌های شیروانی بالادست سرریز می‌باشد.

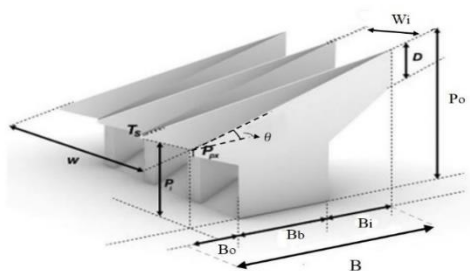
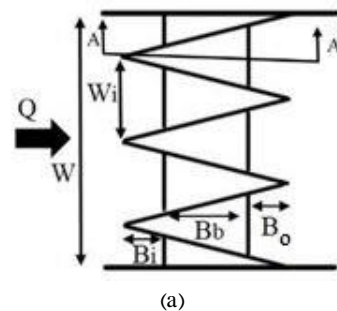


Fig. 2 Geometric parameters of PK weir with sloping crest

شکل ۲ فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار

تابلو کنترل نصب شده در آزمایشگاه، که با تغییر دور موتور پمپها کار می کنند، قابل تنظیم می باشد. برای سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب دار نیز از دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه تا ۱۵۰ لیتر بر ثانیه و با گامهای ۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. ارتفاع سطح آب با عمق سنج نقطه ای و با دقت mm ± 0.1 اندازه گیری شد. برای اندازه گیری طول مؤثر تاج سرریز، از یک خط کش با دقت ± 1 mm در هر آزمایش استفاده شد. مشخصات سرریزهای استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ ویژگی های سرریزهای استفاده شده

Table 1 Specifications of weirs used

Model	θ°	P_o (Cm)	P_i (Cm)	B_b (Cm)	$B_i=B_o$ (Cm)	L (Cm)
Tri-Base	0	20	20	25	12.5	301.8
Tri- B_1	10	28.86	20	25	12.5	306.42

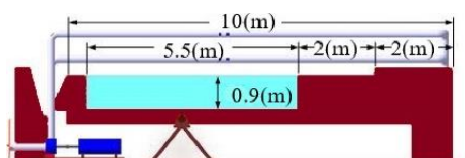
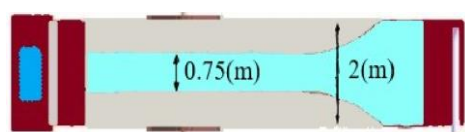
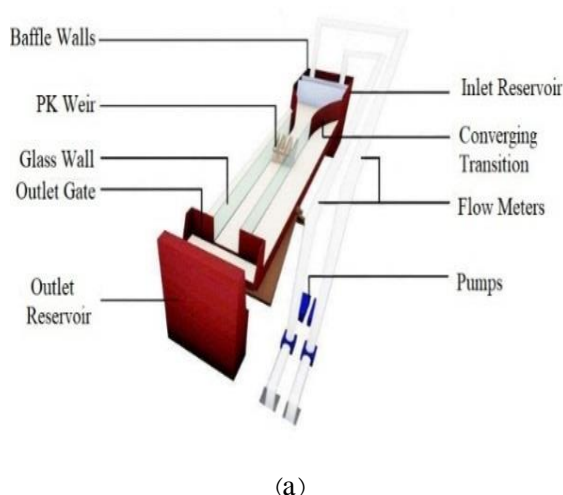


Fig. 4 Overview of implemented test facilities: (a) 3D view form downstream; (b) plan view; (c) side view
شکل ۴ اجزای مختلف فلوم آزمایشگاهی: (a) نمای ۳ بعدی، (b) پلان و (c) مقطع طولی

از اثرگذاری کشش سطحی صرف نظر شده است. با حذف عوامل ثابت بالا رابطه (۳) به شکل زیر نوشته می شود:

$$C_w = \frac{Q}{W\sqrt{gH_t'^{\frac{3}{2}}}} = F\left(\frac{H_t'}{P_i}\right) \quad (4)$$

در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی $H_t' = H_t$ و $P_i = P'$ می باشد. بنابراین معادله (۵) برای سرریز کلید پیانویی با تاج افقی به شکل زیر ظاهر می شود:

$$C_w = \frac{Q}{W\sqrt{gH_t'^{\frac{3}{2}}}} = F\left(\frac{H_t}{P_i}\right) \quad (5)$$

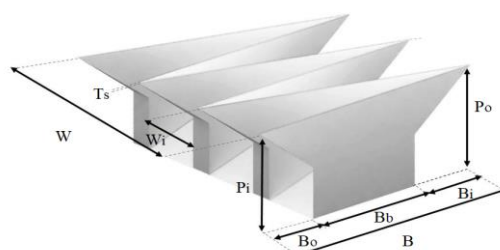


Fig. 3 Geometric parameters of PK weir with horizontal crest

شکل ۳ فراسنجه های هندسی سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران و در فلومی به ابعاد $10 \times \frac{3}{4} \times \frac{9}{11}$ متر انجام شد (شکل ۴). عرض فلوم از ۲ متر، با تبدیلی همگرا به عرض ۷۵ سانتی متر کاهش یافته است. فلوم از یک مخزن زیرزمینی تغذیه شد. دیوارهای فلوم از جنس شیشه چند لایه (لمینت) انتخاب شده است تا بتوان رفتار جریان را مشاهده کرد. جریان در فلوم پس از عبور از روی سرریز وارد مخزن خروجی در پایین دست شده و آنگاه به چاهک زیرزمینی وارد می شود. سرریز کلیدپیانویی مثلثی در فاصله ۴ متری ابتدای فلوم نصب و آب بندی شد که کمترین اغتشاش جریان را شاهد باشیم. دو مدل سرریز کلیدپیانویی با شیب های مختلف استفاده شد. به منظور شیب دار کردن تاج دیوارهای جانبی، عرض و ارتفاع دیوارهای شیروانی بالادست طوری انتخاب شد که شیب های ۱۰ درجه ایجاد شود. دبی مورد نظر، به کمک

گرفته و در نهایت با افزایش بسیار زیاد ارتفاع آب، حالت ریزشی کاملی به خود می‌گیرد. این پدیده توسط Bilhan et al. (2018) نیز برای سرریز کلیدپیانویی مطرح شده است.

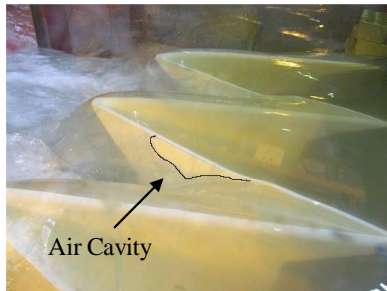


Fig. 5 Air cavity over the weir crest in the Tri-Base model

شکل ۵ ایجاد حفره هوا بر روی تاج در مدل Tri-Base

۵- منحنی آبگذری

تغییرپذیری‌های $Q-H_t$ برای هر دو سرریز استفاده شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

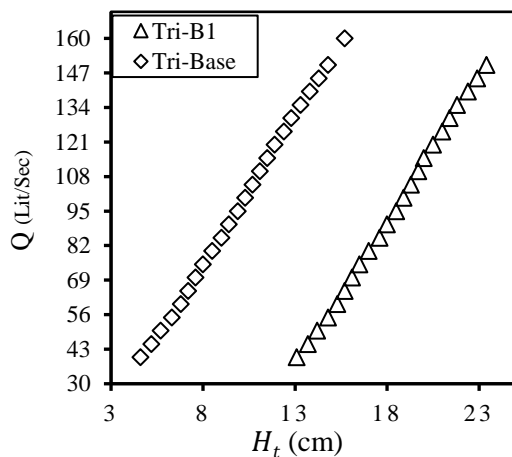


Fig. 6 Q versus H_t

شکل ۶ تغییرپذیری‌های بار آبی در بالادست سرریز

با توجه به شکل ۶ با افزایش شیب تاج دیوار جانبی سرریز از صفر به ۱۰ درجه، بار آبی بالادست سرریز به‌طور میانگین ۴۷/۹ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر وجود دیواره‌های شیب‌دار بر روی سرریز است که بر جریان بالادست تأثیر گذاشته و هد بالادست سرریز را افزایش می‌دهد.

۴- مشاهددهای آزمایشگاهی

۴-۱- افزایش بار آبی بالادست

در مدل (Tri-B1)، عمق آب پشت سرریز (بالادست سرریز) بیش از مدل (Tri-Base) است. همچنین در مدل (Tri-B1)، در یک دبی ثابت، عمق آب روی سرریز در نقطه‌های مختلف تاج متفاوت می‌باشد، در حالی‌که در مدل (Tri-Base) در تمامی نقطه‌های روی تاج سرریز، ثابت می‌باشد.

۴-۲- تیغه جریان

در هر دو مدل سرریز، با افزایش دبی و بار هیدرولیکی، جداشدگی کامل تیغه جریان از بدنه‌ی سرریز صورت گرفته و جریان به صورت آزاد از روی تاج پایین‌دست و تاج جانبی سرریز عبور می‌کند. در این شرایط و با جدا شدن تیغه جریان از بدنه‌ی سرریز، هوا جایگزین آن می‌شود و از میزان نوسان‌های جریان کم می‌شود. با افزایش بیشتر دبی و عمق جریان، هوای زیر آن آغاز به خارج شدن از زیر تیغه‌ی جریان می‌کند. در دبی‌های خیلی بالاتر و در حالت استغراق موضعی سرریز، نوسان‌های سطح جریان افزایش می‌یابد. در این حالت جریان به‌صورت فشرده از روی سرریز عبور می‌کند و میزان هوا در زیر تیغه‌ی جریان به صفر می‌رسد.

۴-۳- تداخل جریان

تداخل جریان عبوری از روی دیواره‌های سرریز، از قسمت انتهایی سرریز آغاز و با افزایش دبی و بار هیدرولیکی، در طول سرریز گسترش یافته و در نهایت در کل سرریز این تداخل ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش بار هیدرولیکی روی سرریز، استغراق موضعی رخ داده و این استغراق موضعی ادامه می‌یابد تا همه سرریز را مستغرق سازد.

۴-۴- ایجاد فشار منفی

در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه تیغه‌ی جریان به بدنه‌ی سرریز چسبیده و ایجاد مکش در سرریز می‌نماید (شکل ۵). اما با افزایش بار آبی تیغه‌ی جریان فشرده‌تر می‌شود. همچنین در بارهای بالا، تیغه‌ی جریان، شکل آزاد یا پرشی به خود

بیشترین تفاوت در دبی با این پژوهش مربوط به معادله‌ی Kumar et al. (2021) با ۱۴۰ درصد و پس از آن به ترتیب مربوط به Akbari et al. (2020) با ۷۷/۶ درصد، Kabiri Samani abd Javaheri (2012) با ۶۹/۴ درصد و Ghodsian and Ehsanifar (2020) با ۵/۶ درصد برای سرریز کلیدپیانویی مثلثی و ۸ درصد برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است. این تفاوت برای تحقیق Anderson and Tullis (2013) تفاوت ۲۸/۲ درصدی را نشان می‌دهد. تفاوت در دبی‌ها را می‌توان به خاطر ویژگی‌های هندسی متفاوت سرریزهای استفاده شده دانست.

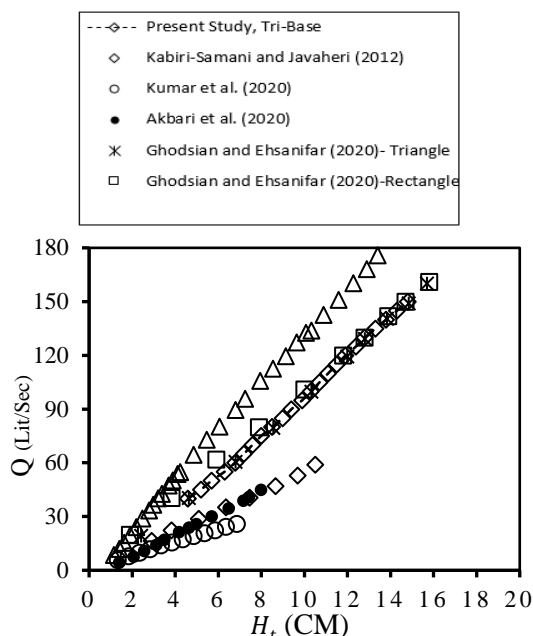


Fig. 7 Q versus H_t in the PKW with horizontal crest
شکل ۷ منحنی $Q-H_t$ در سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی

محاسبه‌ها نشان داده است با شیب‌دار کردن تاج سرریز، بار آبی مؤثر روی سرریز با تاج شیب‌دار که در قسمت تحلیل ابعادی معرفی شده است، نسبت به بار آب روی سرریز با تاج افقی (Tri-Base)، ۳/۸ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به مشاهده‌های آزمایشگاهی، در مدل Tri-Base، در دبی‌هایی با $4\text{ cm} < H_t < 8\text{ cm}$ ، هوا به زیر تیغه‌های جریان نفوذ می‌کند و جریان هواگیری می‌شود. در محدوده $8\text{ cm} < H_t < 12\text{ cm}$ ، با افزایش بار آبی، جریان زیر تیغه به سمت هوای آزاد می‌رود. در این حالت، نوسان‌هایی در تیغه جریان مشاهده شد. در میزان‌های $12\text{ cm} < H_t$ ، جریان به صورت کامل سرریز را در برگرفته (استغراق) و از روی سرریز عبور می‌کند. در این شرایط نیز نوسان‌های تیغه‌ی جریان قابل مشاهده است.

شکل ۷ منحنی تغییرپذیری‌های آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی در این پژوهش و نتایج دیگر محققان را نشان می‌دهد. روند افزایشی دبی با افزایش هد کل، که به صورت خطی است، در همه داده‌های نشان داده شده در این شکل همانند است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص می‌باشد، داده‌های این تحقیق با نتایج Ghodsian and Ehsanifar (2020) همخوانی زیادی دارد. از سویی نزدیکی نتایج Kabiri Samani and Javaheri (2012) با نتایج Akbari et al. (2020) (با ۸/۲ - درصد تفاوت) و با نتایج Kumar et. a. (2021) (با ۷۰ - درصد تفاوت)، مشخص می‌باشد. تفاوت بین دبی سرریزهای استفاده شده توسط محققان اشاره شده در شکل ۷، با دبی در این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ ویژگی‌های هندسی سرریزهای استفاده شده توسط محققان مختلف

Table 2 Geometric characteristics of weirs used by different researchers

Researcher	PK weir Type	W (cm)	B_i/B_o	W_i/W_o	P_i (cm)	N	Q^* (%) ^۱
Kumar et al.(2020)	Rectangular	40	1	1	۱۸	۳/۵	140
Anderson (2013)	Rrectangular	93.7	1	1	19.7	4	28.2
Kabiri-Samani and Javaheri (2012)	Rectangular	40	1	1	20	2	69.4
Akbari et al. (2020)	Rectangular-type D	60	-	1	15	3	77.6
Ghodsian and Ehsanifar (2020)	Rectangular	75	1	1	20	3	8
Ghodsian and Ehsanifar (2020)	Triangular	75	1	1	20	3	5.6
Present Study	Triangular	75	1	1	20	3	0

می‌شود. در میزان‌های $\frac{H_t}{P'} \geq 0.43$ ، شیب کاهشی ضریب آبگذری کمتر شده و به میزان ثابت ۱/۲ میل می‌کند. اگرچه تاج سرریز شیب‌دار بوده و جریان را به‌مانند سرسره‌ای به سمت پائین‌دست هدایت می‌کند، اما تداخل‌های جریان نیز با افزایش بار آبی با شدت بیشتری رخ می‌دهد. به همین علت شیب کاهشی این ضریب بیش از سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی می‌باشد.

جدول ۳ بیشینه میزان ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار برای هر دو مدل در $\frac{H_t}{P'}$ های مختلف را نشان می‌دهد. برابر این جدول میزان میانگین ضریب آبگذری در سرریز با تاج افقی ۱/۴ و برای سرریز با شیب تاج ۱۰ درجه (Tri-B1) برابر ۱/۵ می‌باشد.

ضریب آبگذری مدل Tri-B1 نسبت به مدل Tri-Base، به‌طور میانگین ۵/۳ درصد افزایش ضریب آبگذری را در پی داشته است. این عدد برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه ۱۱/۶ درصد بوده است.

جدول ۳ مقادیر C_w در سرریز کلیدپیانویی مثلثی

Table 3 C_w values in triangular PK weir

Model	θ	H_t/P'	\bar{C}_w	C_{wmax}
Tri-Base	0	0.78-0.23	1.4	1.82
Tri-B ₁	10	0.72-0.14	1.5	2.06

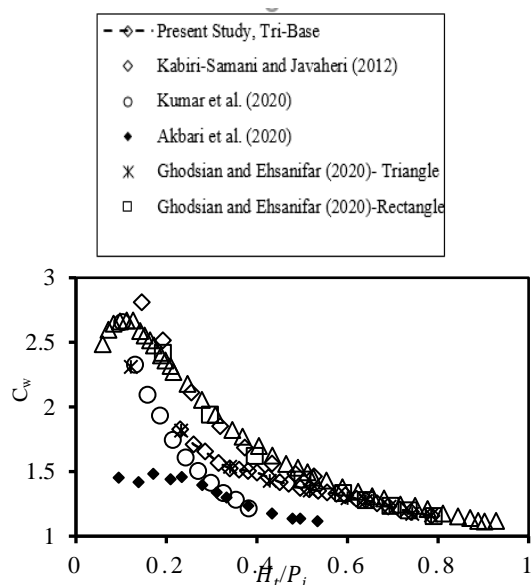


Fig. 8 C_w curve for triangular weir with horizontal crest

شکل ۸ منحنی C_w در سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی

از آنجا که روند منحنی‌های $Q-H_t$ ، در همه تحقیقات روندی خطی را طی می‌کنند، برای محاسبه‌ی اختلاف دبی در بارهای آبی معادل، رابطه‌ی خطی برای منحنی‌ها تعریف شده و آنگاه اختلاف‌ها در شرایط برابر (بار آبی یکسان) سنجیده شده است.

۶- ضریب آبگذری

برای محاسبه‌ی ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی از رابطه‌ی (۶) استفاده شده است:

$$C_w = \frac{Q}{\frac{2}{3}W\sqrt{2g}(H_t)^{1.5}} \quad (6)$$

اما برای سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار با توجه به این موضوع که ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز متفاوت می‌باشد لذا برای محاسبه‌ی ضریب آبگذری از رابطه اصلاح شده زیر استفاده می‌شود:

$$C_w = \frac{Q}{\frac{2}{3}W\sqrt{2g}(H_t')^{1.5}} \quad (7)$$

ضریب آبگذری برای سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی (Tri-Base) و تاج شیب‌دار (Tri-B1) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه شده است. برای سرریز با تاج افقی که در شکل ۸ نشان داده شده است، بیشترین میزان C_w در $\frac{H_t}{P_i} = 0.23$ مشاهده می‌شود (میزان عددی برابر ۱/۸) و در بارهای بیشتر، این ضریب کاهش یافته تا به میزان ثابت ۱/۱۵ میل کند. با توجه به آنچه در قسمت مشاهده‌های آزمایشگاهی بیان شده است، افزایش بار آبی تداخل‌های جریان از تاج پائینی سرریز به سمت تاج بالایی را در پی داشته است. به همین علت روند کاهشی در این تحقیق و پژوهش‌های دیگر محققان مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۹ مشخص می‌باشد، در سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار (Tri-B1)، با افزایش بار آبی ضریب آبگذری روندی کاهشی داشته و پس از آن به میزان ثابتی میل می‌کند. با توجه به شکل یادشده، C_w سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار تا پیش از $\frac{H_t}{P'} \leq 0.43$ با شیب زیادی کاهش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر تداخل‌ها بر روی سرریز از شیب کاهشی آن کاسته

از ۰/۹۷ می‌باشند. در این رابطه‌ها H_t بار کل روی سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی، H'_t بار کل موثر روی سرریز کلیدپیانویی با تاج شیبدار، P_i و P' به ترتیب ارتفاع پایین دست سرریز و ارتفاع میانگین سرریز می‌باشد.

محاسبه‌ی درصد خطای میانگین E با استفاده از رابطه‌ی (۸)، محاسبه و برای سرریزهای Tri-Base و Tri-B1، به ترتیب برابر $1/1 \pm$ و $0/5 \pm$ درصد می‌باشد.

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_{wcal} - C_{wexp}}{C_{wcal}} \right| \frac{100}{n'} \quad (8)$$

در این رابطه C_{wcal} و C_{wexp} به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مقادیر واقعی ضریب آگذری و n' تعداد داده‌ها است. شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ضریب آگذری را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که معادله پیشنهادی، ضریب آگذری را با دقت بالا نسبت به مقادیر آزمایشگاهی محاسبه می‌نماید. محدوده‌ی داده‌های مورد استفاده از رابطه‌های (۹) و (۱۰) مطابق جدول ۳ می‌باشد.

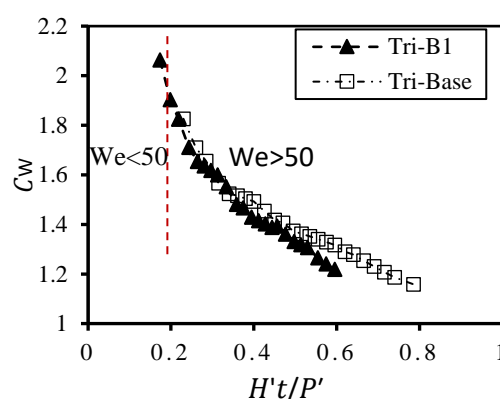
۸- نتایج

۱- در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با افزایش شیب دیواره‌های جانبی از صفر به ۱۰ درجه در جهت جریان، ضریب آگذری ۳/۸ درصد افزایش یافته است. در بارهای آبی بالا، ضریب آگذری در هر دو مدل سرریز با تاج جانبی شیبدار و افقی به میزان ثابتی میل خواهد کرد. این عدد برای سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و شیبدار به ترتیب، ۱/۱۵ و ۱/۲ می‌باشد.

۲- بیشترین ضریب آگذری در سرریز با تاج شیبدار در هدهای پایین رخ داده است و با افزایش بار از این میزان کاسته می‌شود. بیشترین مقدار ضریب آگذری در این حالت ۲/۰۶ می‌باشد.

۳- رابطه‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب برای محاسبه‌ی ضریب آگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و شیبدار ارائه شده است.

۴- در بارهای پایین، تیغه‌ی جریان به بدنه‌ی سرریز می‌چسبد. با افزایش بار تیغه‌ی جریان فشرده‌تر می‌شود. همچنین در بارهای بالا، تیغه‌ی جریان شکل پرشی به خود می‌گیرد و در نهایت با افزایش بیشتر ارتفاع آب، جریان



شکل ۹ منحنی C_w در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج شیبدار

در بار آبی کم، یکی از فراسنجه‌هایی که بر ضریب آگذری مؤثر می‌باشد، کشش سطحی می‌باشد. برای بررسی این فراسنجه از فراسنجه بی‌بعد عدد وبر (We) استفاده می‌شود (Akbari et al., 2020). در شکل (۹) در $\frac{H'_t}{P'} < 0/2$ کشش سطحی عامل مؤثری بر ضریب آگذری می‌باشد.

(Machiels (2012) و Erpicum et al. (2013) در تحقیقات خود به این موضوع اشاره داشته‌اند که کشش سطحی زمانی مؤثر است که عدد وبر کمتر از ۵۰ باشد. Erpicum et al. (2013) اعلام داشته است در این شرایط ($We < 50$) مقیاس عامل مؤثری بر ضریب آگذری می‌باشد. به عبارت دیگر زمانی که عدد وبر کمتر از ۵۰ باشد، رفتار تیغه جریان در مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی متفاوت می‌باشد (Erpicum et al., 2013) و Erpicum et al. (2016). همچنین کشش سطحی موجب کاهش کارایی سرریز می‌شود. این موضوع توسط Leite Ribeiro et al. (2009) و Erpicum et al. (2013) نیز اشاره شده است.

۷- رابطه‌ی ضریب آگذری

به منظور تعیین ضریب آگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و شیبدار به ترتیب رابطه‌های (۹) و (۱۰) پیشنهاد می‌شود. این رابطه‌ها در واقع ارتباط بین ضریب آگذری (C_w) و فراسنجه‌های مشخص شده در قسمت تحلیل ابعادی را نشان می‌دهد. رابطه‌های پیشنهادی برای محاسبه‌ی ضریب آگذری دارای شاخص آماری R^2 بالاتر

$$C_w = \left(2.6 \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^3 - 3.248 \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^2 + 1.867 \left(\frac{H_t}{P_i} \right) - 0.228 \right)^{-0.217} \quad (9)$$

$$C_w = \left(-1.834 \left(\frac{H'_t}{P'} \right)^3 + 5 \left(\frac{H'_t}{P'} \right)^2 - 4.354 \left(\frac{H'_t}{P'} \right) + 2.422 \right)^{1.156} \quad (10)$$

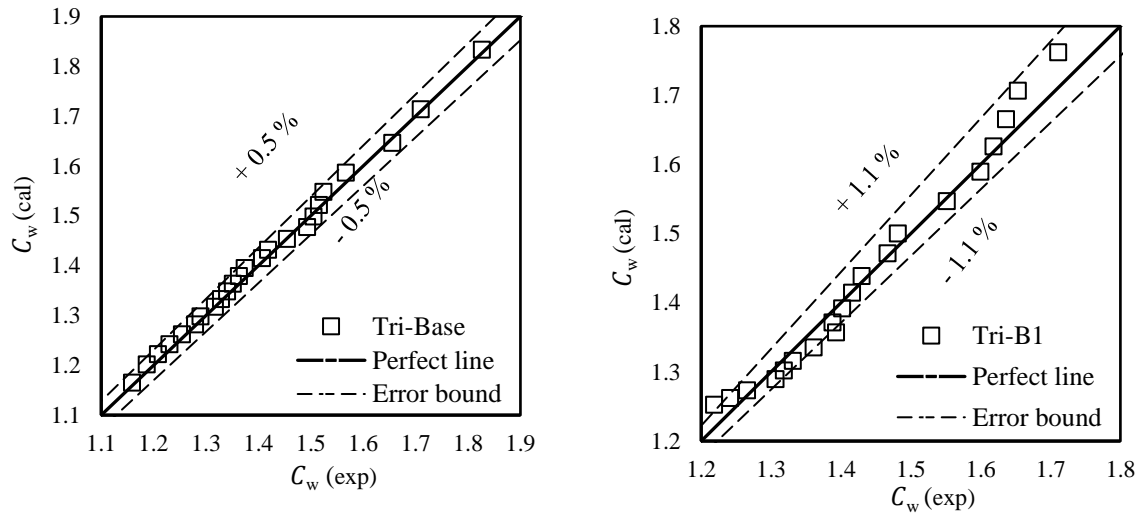


Fig. 10 Comparison of measured and calculated values of C_w for weirs with horizontal and sloping Crest

شکل ۱۰ مقایسه میزان‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی و شیبدار

S_o	شیب کف آبراهه	حالتی آزاد به خود می‌گیرد.
Z	عمق جریان (Cm)	۵- با شیب‌دار کردن سرریز کلیدپیانویی مثلثی تراز آب بالادست سرریز ۲۹ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که در یک دبی ثابت بار آبی موثر روی سرریز نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی ۳/۸ کاهش یافته است.
h	بار آبی روی سرریز (Cm)	۶- با توجه به اینکه در سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی با افزایش دبی، بار آبی روی سرریز افزایش یافته و تداخل لایه‌های جریان‌ها از کارایی سرریز می‌کاهد.
H_t	بار کل بالادست سرریز (Cm)	۷- از آنجاکه سطح رودخانه‌ها نسبت به اراضی زیر کشت به‌طور معمول پایین‌تر هستند، به‌واسطه‌ی افزایش تراز ارتفاعی آب بالادست سرریز، از این سرریز می‌توان در آبراهه‌ها و رودخانه‌ها برای آبگیری استفاده کرد و به نسبت تراز ارتفاعی سطح آب رودخانه از آن بهره برد.
H'_t	بار مؤثر (Cm)	
θ^0	زاویه‌ی تاج سرریز نسبت به افق	
α^0	زاویه‌ی بین دیواره‌ی جانبی سرریز با راستای اصلی جریان	
V	سرعت میانگین جریان (ms^{-1})	
Q	دبی جریان (LS^{-1})	
E	درصد خطای میانگین	
F	نماد تابع	
n	شمار دیواره‌های جانبی سرریز	
n'	تعداد داده‌های آزمایشگاهی	
W_i	عرض کلید ورودی (Cm)	
W_o	عرض کلید خروجی (Cm)	
w	عرض یک چرخه (Cm)	
W	عرض فلوم (Cm)	
We	عدد وبر	
		۹- فهرست نشانه‌ها
		N تعداد چرخه یا سیکل‌ها
		P_o ارتفاع بالادست سرریز (Cm)
		P_i ارتفاع پایین دست سرریز (Cm)
		P' ارتفاع میانگین سرریز (Cm)

of circular labyrinth weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6), 04018007.

Epicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Piroton, M., Tralli, H. and Alende, J. (2017). A Piano Key Weir to improve the discharge capacity of the Oule Dam spillway (France). In: *Labyrinth and piano key weirs III-PKW 2017*, CRC Press, 195-204.

Epicum, S., Tullis, B.P., Lodomez, M., Archambeau, P., Dewals, B.J. and Piroton, M. (2016). Scale effects in physical piano key weirs models. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692-698.

Epicum, S., Silvestri, A., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M., Colombié, M. and Faramond, L. (2013). Escouloubre Piano Key weir: Prototype versus scale models. *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, CRC press. London, 65-72.

Ghodsian, M. and Ehsanifar, A. (2020). Experimental investigation of flow over piano key weir with rectangular, triangular and trapezoidal plans. *Proceedings of the 18th Iranian Hydraulic Conference*, University of Tehran.

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.

Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N. and Ranjan, S. (2020). Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. *Journal of Applied Water Science*. 10, 1-9.

Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower & Dams*, 10(5), 144-149.

Lempérière, F. and Jun, G. (2005). Low cost increase of dam's storage and flood mitigation: the piano keys weir. *Proc. of 19th Congress of ICID*, Beijing, China.

Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A., Delorme, F. and Laugier, F. (2009). Hydraulic capacity improvement of existing spillways—design of a piano key weirs. In: *Proceedings (on CD) of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB-ICOLD*, Vol. 2, No. CONF, 100-118.

Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs, PhD Thesis, Université de Liège, Belgium.

B_i	طول شیروانی پایین دست سرریز (Cm)
B_o	طول شیروانی بالادست سرریز (Cm)
B	طول تاج جانبی سرریز (Cm)
t	ضخامت دیواره‌های سرریز (Cm)
D	ارتفاع دیواره‌های اضافه شده به تاج (Cm)
L	طول کل تاج (Cm)
L'	طول مؤثر (Cm)
l'	طول تر شده‌ی یک دیواره‌ی جانبی سرریز (Cm)
g	شتاب گرانش زمین (ms^{-2})
C_w	ضریب آبگذری
\bar{C}_w	ضریب آبگذری متوسط
C_{wcat}	ضریب آبگذری محاسباتی
C_{wexp}	ضریب آبگذری آزمایشگاهی
C_{wmax}	حداکثر ضریب آبگذری

۱۰- منابع‌ها

Ahadian, J. and Afzalian, A. (2017). Applied Analysis of Piano Key Weir (PKW) Structures as a Diversion Dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 49(3), 463-476.

Anderson, R.M. and Tullis, B. (2011). Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. In: *proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs*, 75-80.

Anderson, R. and Tullis, B. (2012). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(4), 358-361.

Akbari, M., Karami Moghadam, M., Sabzevari, T. and Ghadampour, Z. (2020). Experimental Study of Effect of Sidewall Angle and Weir Height on Total Head and Discharge Coefficient in Trapezoidal Piano Key Weir. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(79), 93-110. (In Persian)

Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M. and Thorenz, C. (2017). Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. In: *Labyrinth and Piano Key Weirs III-PKW 2017*, CRC Press, 167-174.

Bilhan, O., Aydin, M.C., Emiroglu, M.E. and Miller, C.J. (2018). Experimental and CFD analysis

- scientific model investigations. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs, 273-281.
- Sajadi, S.M. (2017). Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(69), 77-92.
- Sangsefidi, Y., Tavakol-Davani, H., Ghodsian, M., Mehraein, M. and Zarei, R. (2021). Hydrodynamics and free-flow characteristics of piano key weirs with different plan shapes. *Water*, 13(15), 2108.
- Suprpto, M. (2013). Increase spillway capacity using Labyrinth Weir. *Procedia Engineering*, 54, 440-446.
- Yarmohammadi, B. and Ahadiyan, J. (2017). Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. *Scientific Journal of Agriculture*, 39(4), 47-58.
- Zounemat-Kermani, M. and Mahdavi-Meymand, A. (2019). Hybrid meta-heuristics artificial intelligence models in simulating discharge passing the piano key weirs. *Journal of Hydrology*, 569, 12-21.
- Mehboudi, A., Attari, J. and Hosseini, S.A. (2017). Flow regimes over trapezoidal piano key weirs. In *Labyrinth and Piano Key Weirs III-PKW*, CRC Press, 65-73.
- 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, International Commission on Large Dams (ICOLD), Taylor and Francis. London, UK.
- Pfister, M., Battisacco, E., De Cesare, G. and Schleiss, A.J. (2013). Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano Key weirs. *Labyrinth and piano key weirs II*, 73.
- Poshteh-Shirani, M., Rahimpour, M. and Ahmadi, M.M. (2018). The Effect of Upstream Overhang on Debris Blocking and Discharge Capacity of Piano Key Weirs. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering* 30(2), 33-44. (In Persian)
- Rezaei Ahvanooei, A., Mousavi, S.F. and Karami, H. (2019). Improvement of Hydraulic Performance of Nonlinear Piano-key Weirs in Plan. *Modares Civil Engineering journal*, 19(4), 71-82. (In Persian)
- Ribeiro, M.L., Pfister, M. and Schleiss, A. (2013). Overview of Piano Key weir prototypes and