

## Experimental Investigation of using the Piano Key Weirs in the Outlet of the Clarifier Structure

Y. Gatezadeh<sup>1</sup>, M. Hosein Purmohammadi<sup>2</sup>, M. Solimani Babarsad<sup>3\*</sup>, E. Drikvand<sup>4</sup> and H. Ghorbanizadeh kharazi<sup>5</sup>

1- PhD student, Department of Water Science and Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

2- Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

3\* - Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran. (m.solimani@iau-shoushtar.ac.ir)

4- Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

5- Department of Water Sciences, Water Science and Environmental Research Center, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 22 January 2022

Revised: 6 September 2022

Accepted: 10 September 2020

#### Keywords:

Water treatment, Capacity, Discharge coefficient.

### TO CITE THIS ARTICLE :

Gatezadeh, Y., Purmohammadi, M. H., Solimani babarsad, M., Drikvand, E., Ghorbanizadeh Kharazi, H. (2023). 'Experimental Investigation of using the Piano Key Weirs in the Outlet of the Clarifier Structure', *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(4), pp. 145-156. doi: 10.22055/jise.2022.39789.2012.

### Introduction

Sustainable development and survival depends on environmental protection, especially water. Water treatment aims to produce safe and healthy water, which is possible in water treatment plants. Therefore the importance of water is understandable, and the importance of building and equipping a water treatment plant is paramount. Many principles have been proven. Moreover, ideas for upgrading treatment plants worldwide have increased treatment plants' capacity and improved water quality.. The proposed methods can not only be applied to optimize existing water treatment plants but can also be used to design New refineries will also be used. One of the critical parts that are considered in clarifiers is the weir part. Increasing the weir width to increase the discharge capacity of the design due to the width limit is one of the problems that designers face. This has led engineers to design weirs with nonlinear geometry. Congress weir and piano keys are two essential types of nonlinear overflows in which the length of the weir crest is increased by the crinkle of this structure in the plan. The use of nonlinear overflows is increasing worldwide, which has led researchers to estimate the discharge coefficient for weir efficiency. Tullis et al. (2020) conducted a study to investigate the effect of engineering specifications on the hydraulic performance of congressional weirs. The results of this study showed the effect of the number of weir cycles on hydraulic performance. As the number of congressional weir cycles increases, the hydraulic performance of the overflow decreases. Kumar et al(2019)., in their research, examined the effect of the ratio of crest length to width (L/W) and overflow height (P) of the piano key. Using soft calculations, the discharge coefficient was considered a function of geometric variables without the dimension of piano key overflow. Therefore, in this research, an attempt was made to evaluate the hydraulic flow in the overflow of refinery clarifier structures with the shape of a piano key at its outlet using a physical model.

## Methodology

The clarifier weir model was tested in the sediment laboratory of Khuzestan Water and power Authority Company. This laboratory has a main tank that is fed from the city network. The tank water is transferred to the laboratory flume by a centrifugal pump. The physical model in which the piano key weir was placed was designed to have a length and width of 130.75 cm and a height of 105 cm at the end of the transverse face, a gate with a length and width of 15 cm was installed for the passage of water. The outlet water enters the Clarifier semicircular structure with a diameter of 100 and 80 cm, on which the piano key weir was placed. The material of all its aspects is brick, and its floor is ceramic; to prevent water leakage and its insulation, the coating has been used for the floor and walls. According to Kumar *et al.*'s studies (2019) and due to laboratory limitations, PK weirs in 9 models are made of Plexiglas with a thickness of 3 mm. Water enters the model through a 4-inch diameter PE pipe. In the water inlet path to the Clarifier, a digital meter is installed to measure the discharge. A ductile iron cast iron valve with a diameter of 4 inches is installed to adjust the inlet water. The model water inlet will be supplied from the outlet of the flume in the same laboratory. In each experiment, after the installation of the laboratory models, the water was transferred to the laboratory flume through the water supply tank, and pump and measurements, including water level, were performed. The water level on the weir is read by a scale attached to the body, and finally, the weir water outlet returns to the water storage tank as a free flow through a channel. This study investigated various dimensions, including length and width, and their effect on discharge coefficient was also investigated. Variables include Experiments with 17 different discharges (17variables) and three changes along the Sidewall weir crest length to weir width ( $B/W=0.01, 0.16, \text{ and } 0.23$ ) and three changes in the number of cycles ( $N=8, 10, \text{ and } 12$ ) of which 153 experiments It is related to the piano key model and with 17 experiments, it has a total of 170 experiments. There were 170 experiments with 17 discharges in variations between 3.68 to 52.8 liters per hour (lit/h). Then the discharge coefficient was calculated from the  $C_{pk} = \frac{3Q}{2\sqrt{2g}H^{\frac{3}{2}}L}$  equation.

## Results and Discussion

In this study, we investigate the effect of the number of piano key clarifier weirs on the weir discharge coefficient ( $C_{pk}$ ). Due to the change in the internal radius ratio of the overflow ( $R_i/W$ ) due to the change in its number of faces, in this section, the effect of the internal arch radius ratio on the discharge coefficient in different longitudinal ratios ( $B/W$ ) is discussed in the form of diagrams and analysis. This study investigated the effect of internal arc radius to weir width ratio ( $R_i/W$ ) on discharge coefficient in piano key overflows. In piano key weirs with crown width to overflow ratio  $B/W=0.01$  with increasing overflow radius ratio, the discharge coefficient is reduced so that the overflow with an arc radius ratio of  $R_i/W=0.63$  has about 11.63% higher discharge coefficient than the weir with an arc radius ratio of  $R_i/W=0.77$ . In a piano key weir with a weir-to-crown ratio of  $B/W=0.16$ , with increasing the ratio of the overflow radius of the weir, the discharge coefficient increases so that the weir with an arch radius ratio of  $R_i/W=0.77$ , about 22.06% It has a higher discharge coefficient than the weir with an arc radius ratio of  $R_i/W=0.63$ . A Weir with an arc radius ratio of  $R_i/W=0.77$  has about an 8.96% higher discharge coefficient than a weir with an arc radius ratio of  $R_i/W=0.63$ . By increasing the length of the side ( $B/W$ ) of the 8-sided weir cleaver from 0.01 to 0.23, we see an increase of 26.8%, 36.6%, and 34.3% of the flow coefficient ( $C_{pk}$ ) compared to the control model, respectively. Side length ( $B/W$ ) of the 10-sided weir from 0.01 to 0.23, respectively, we see a 31.6, 40.7, and 35.2% increase in flow rate ( $C_{pk}$ ) compared to the control model. By increasing the side length ( $B/W$ ) of the 8-sided cleaver overflow from 0.01 to 0.23, we see an increase of 33.2, 44.7, and 38.3%, respectively, of the flow coefficient ( $C_{pk}$ ) compared to the control model.

### Conclusions

According to the results, the discharge coefficient has increased with the number of cycles of the piano key clarifier. By increasing the number of the cycle's piano key weir from 8 to 12 crest length to weir width of 0.01, 0.16, and 0.23 were 68.43, 70.5 and 61.3% and 36.62, 40.61 and 44.7%, 34.3, 35.2 and 38.3%, respectively. We see an increase in the discharge coefficient compared to the control model. With the increase of B/W in the overflows of 8, 10 and 12 cycles from 0.01 to 0.23, 26.8, 36.6, 34.3%, 31.6, 40.7, and 35.2% were observed and we see an increase of 33.2, 44.7 and 38.3 percent of the discharge coefficient compared to the control model.

### Gratitude

In the end, we thank and appreciate the cooperation of the Khuzestan Water and Power Authority Co.

### Acknowledgment

In the end, the authors thank the cooperation of the Khuzestan Water and Power Authority Co.

### References

- 1- Kumar, B., Kadia, S. & Ahmad, Z. 2019. Evaluation of discharge equations of the Piano Key Weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101577.
- 2- Tullis, B. P., Crookston, B. M., Brislin, J. & Seamons, T. 2020. Geometric Effects on Discharge Relationships for Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146, 04020066.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## بررسی آزمایشگاهی کاربرد سرریزهای کلید پیانو در خروجی سازه زلال ساز

یوسف گاطع زاده<sup>۱</sup>، محمدحسین پورمحمدی<sup>۲</sup>، محسن سلیمانی بابرصاد<sup>۳\*</sup>، احسان دریکنوند<sup>۴</sup> و حسین قربانی زاده خرازی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.
- ۲- گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.
- ۳- نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران. [m.solimani@iau-shoushtar.ac.ir](mailto:m.solimani@iau-shoushtar.ac.ir)
- ۴- گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.
- ۵- گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

### چکیده

سازه کلاریفایر یا زلال ساز سازه ایست مهم در تصفیه خانه که می بایست با حداقل بار سطحی جریان را از خود عبور داده که این امر به ضریب تخلیه آن و کاهش سرعت جریان خروجی بستگی دارد. محققین روش های مختلفی را برای افزایش ضریب خروجی جریان سرریزهای کلید پیانو در کانال ها مورد بررسی قرار داده اند که در این تحقیق با ساخت یک مدل فیزیکی از سازه زلال ساز، به ارزیابی هیدرولیک جریان این نوع سرریزها در این سازه مورد بررسی قرار گرفت. برای کاهش بار سطحی این سرریز حالت های مختلفی به عنوان سناریو در آزمایش ها تعریف گردید. در این مطالعه بررسی تأثیر طول جانبی تاج به عرض سرریز (B/W) با در نظر گرفتن نسبت های  $B/W = 0/16$ ،  $B/W = 0/23$  و  $B/W = 0/23$  و تعداد وجوه (N) سرریز بر ضریب تخلیه سرریز کلید پیانو (C<sub>pk</sub>) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، با افزایش تعداد وجوه های سرریز، ضریب دبی افزایش پیدا کرد. با افزایش تعداد وجوه های سرریز کلید پیانویی از هشت به ۱۲ با نسبت طول تاج به عرض سرریز ۰/۰۱، درصد های ۶۱/۳، ۷۰/۵ و ۶۱/۳ درصد، نسبت ۰/۱۶ درصد های ۳۶/۶۲، ۴۰/۶۱ و ۴۴/۷ درصد و نسبت ۰/۲۳، درصد های ۳۴/۳، ۳۵/۲ و ۳۸/۳ درصد افزایش ضریب تخلیه نسبت به مدل شاهد مشاهده گردید. با افزایش نسبت B/W در سرریزهای هشت، ۱۰ و ۱۲ وجهی از ۰/۰۱ به ۰/۲۳، ترتیب شاهد ۲۶/۸، ۳۶/۶، ۳۴/۳ درصد، ۳۱/۶، ۴۰/۷ و ۳۵/۲ درصد و ۳۳/۲، ۴۴/۷ و ۳۸/۳ درصد ضریب تخلیه نسبت به مدل شاهد افزایش داشت.

**کلید واژه ها:** کلاریفایر، ضریب تخلیه، تصفیه خانه.

### مقدمه

توسعه پایدار و ادامه حیات منوط به حفظ محیط زیست به ویژه آب است. هدف از تصفیه آب تولید آب سالم و بهداشتی و با کیفیت است که این امر در تصفیه خانه های آب امکان پذیر است و به این دلیل اهمیت آب قابل درک است و اهمیت ساخت و تجهیز تصفیه خانه آب نیز بسیار مهم می باشد. ثابت شده است که بسیاری از اصول و ایده هایی که برای ارتقای انواع تصفیه خانه ها در سرتاسر جهان هستند، در افزایش ظرفیت تصفیه خانه ها و بهبود کیفیت آب خروجی موثر بوده اند. روش های پیشنهاد شده نه تنها می توانند برای بهینه سازی تصفیه خانه های آب موجود اعمال شوند، بلکه می توانند برای طراحی تصفیه خانه های جدید نیز به کار روند.

از بخش های مهمی که در کلاریفایرها مورد توجه است بخش سرریز می باشد. افزایش عرض سرریز برای افزایش ظرفیت دبی طرح بدلیل محدودیت عرض از اشکالاتی است که طراحان با آن

روبرو هستند. این موضوع باعث روی آوردن مهندسیین برای طراحی سرریزهای با هندسه غیر خطی شده است. سرریزهای کنگره ای و کلید پیانویی دو نوع مهم سرریز غیر خطی می باشند که در آن افزایش طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن این سازه در پلان صورت می گیرد، (Pirzad et al., 2022). استفاده از سرریزهای غیر خطی در سراسر جهان رو به افزایش است که این امر باعث گرایش محققان به برآورد ضریب دبی برای کارایی سرریزها رو به افزایش است. شکل جدیدی از سرریزهای غیر خطی سرریزهای کلید پیانویی هستند که توسط مؤسسه Hydrocoop فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه Biskra الجزایر مورد بررسی قرار گرفتند (Laugier, 2007 & Laugier et al., 2009). اولین نمونه سرریز کلید پیانویی (PK) سد Goulours در سال ۲۰۰۶ در فرانسه ساخته شد. دومین نمونه سرریز کلید پیانویی (PK) در سال ۲۰۰۸ در سد سنت مارک (Saint Mark) در فرانسه تکمیل گردید.

افزایش دبی سیلاب و مسائل مربوط به ایمنی سدها موجب شده است که کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ لزوم بازنگری و اصلاح در صورت نیاز را اعلام نماید. احداث و اصلاح به وسیله سرریزهای کلید پیانو از مناسب‌ترین اقدامات برشمرد شده است. دو مزیت عمده سرریزهای کلید پیانو نسبت به سرریزهای زیگزاگی معمولی افزایش ظرفیت تخلیه سیلاب و کاهش فضای ساخت می‌باشد. این مزیت اجازه ساخت این سرریزها بر روی تاج بسیاری از سدهای وزنی موجود را ممکن می‌سازد. همچنین هندسه خاص این سرریزها باعث افزایش ظرفیت تخلیه به میزان حدوداً چهار برابر سرریزهای اوجی گردیده است. مدل شماتیک سرریز کلید پیانو سه بعدی در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱) عرض کلیدهای ورودی و خروجی در بالادست و پایین دست با  $W_{od}$ ,  $W_{ou}$ ,  $W_{id}$ ,  $W_{iu}$  مشخص شده است. ارتفاع سرریز  $P$ ، عرض سرریز  $W$ ، طول جانبی سرریز  $B$ ، ضخامت دیواره  $T$  و تعداد سیکل‌ها  $N$  می‌باشد. هر سیکل از دو دیواره متقاطع (عرضی)، یک ورودی و دو نیمه خروجی تشکیل شده است. Kabiri-Samani و Javaheri (2012) با انجام یک سری آزمایش‌ها دبی را برای جریان آزاد و غوطه‌وری برای انواع A، B، C و D سرریزهای کلید پیانو پیشنهاد دادند. Cicero و Delisle (2013) آزمایشی را برای بررسی اثرات پیش‌آویزهای بالادست و پایین دست بر ضریب تخلیه و راندمان سرریز کلید پیانو نوع A، B و C برای شرایط جریان آزاد و همچنین شرایط غرق شده انجام داده‌اند. تمام آزمایش‌ها در یک شکل مستطیل به پهنای دو متر و عمق یک متر و به طول ۲۵ متر با حداکثر ظرفیت تخلیه ۵۰۰ لیتر در ثانیه انجام شد. Kumar et al. (2019) به ارزیابی معادل‌های تخلیه سرریزهای کلید پیانو پرداختند. نتایج نشان داد ضریب دبی را بهتر از سایر معادل‌های مورد استفاده در این پیش‌بینی می‌کنند. مطالعه حاضر برای این دو معادله ۹۷ درصد نتایج در خطوط خطای ۲۰ درصد تجربی همچنین با روابط ارائه شده توسط محققان قبلی مقایسه شد. معادله پیشنهادی Crookston et al. (2018) ضریب تخلیه را به‌طور مؤثر برای تمام دامنه‌های H/P تخمین می‌زند، در حالی که معادله پیشنهادی توسط Cicero و Delisle (2013) برای H/P بین ۰/۲ و ۰/۸ کمی کارآمدتر است. Lemperiere و Ouamane (2003) تیپ‌های مختلف سرریزهای کلید پیانو که از سال ۱۹۹۸ توسط موسسه هیدروکوپ فرانسه مطالعه گردیده بود را در چهار نوع متفاوت دسته‌بندی نمودند. آن‌ها دو راه‌حل ارائه نموده‌اند. راه‌حل اول شامل مدل A با پیش‌آویزهای بالا دست و پایین دست مشابه می‌باشد که در آن از عناصر پیش‌ساخته بتنی استفاده می‌شود و بسیاری از سرریزهای کنونی را بهبود بخشیده است در حالی که راه‌حل دوم مدل B است که تنها دارای یک پیش‌آویز بالا دست می‌باشد و می‌توان برای سدهای بزرگ آینده مؤثر عمل کند. برای درک عملکرد هیدرولیک سرریز کلید پیانو و برای بهبود کارایی آن تحقیقاتی در حال انجام می‌باشد (Hien et

al., 2006). تحقیق پارامتریک خود را در مورد ظرفیت سرریز کلید پیانو به پایان رسانده‌اند این امر درست پیش از اینکه Ribeiro et al (2012) در کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ برزیل طرح سرریز کلید پیانو را عاملی در به‌منظور ظرفیت سرریزهای کنونی معرفی نمودند، صورت گرفت. Laugier (2007) به بررسی هندسه سرریزهای کلید پیانویی با نرم‌افزار FLOW3D پرداخت. در این تحقیق رفتار هیدرولیک یک چرخه از هر سرریز با استفاده از میانگین رینولتز مدل‌های عددی Navier-Stocks مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که برای کل ستون فرادست روی سرریزی که از ۰/۵ تا چهار متر متغیر است، عملکرد تخلیه پایه یک سرریز کلید پیانو حدود ۲۰-۱۵ درصد بیشتر از سرریز مارپیچی مستطیلی شکل متناظر است. Kumar et al. (2019) اعتبارسنجی چهار معادله موجود داده شده توسط محققان برای بررسی ضریب دبی را بررسی کردند. ارزیابی گرافیکی و آماری استفاده از معادله‌های داده شده توسط محققان نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی Cicero و Delisle (2013) ضریب دبی را بهتر از سایر معادله‌ها برای مجموعه داده‌های مورد استفاده در این پیش‌بینی می‌کنند مطالعه حاضر برای این دو معادله ۹۷ درصد نتایج در خطوط خطای ۲۰ درصد قرار دارند. در این تحقیق همچنین با روابط ارائه شده توسط محققان قبلی مورد مقایسه قرار گرفتند. معادله جنگل تصادفی (Random Forest) و الگوریتم درختی M5 (M5 tree algorithm) را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم درختی M5 پیش‌بینی دقیق‌تری از ضریب تخلیه دارد. بنا به این مهم در این تحقیق سعی بر آن شد که با مدل فیزیکی به ارزیابی هیدرولیک پیشنهادی توسط Tullis et al (2020) ضریب تخلیه را به‌طور مؤثر برای تمام دامنه‌های H/P تخمین می‌زند، در حالی که معادله پیشنهادی توسط Cicero و Delisle (2013) برای H/P بین ۰/۲ و ۰/۸ کمی کارآمدتر است. Tullis et al (2020) تحقیقی در خصوص بررسی اثر مشخصات مهندسی بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای انجام دادند که نتایج این تحقیق تأثیر تعداد سیکل‌های سرریز بر عملکرد هیدرولیکی را نشان داد. بطوری‌که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای عملکرد هیدرولیکی سرریز کاهش می‌یابد. Kumar et al. (2019) در تحقیقات خود تأثیر نسبت طول تاج به عرض (L/W) و ارتفاع سرریز (P) کلید پیانویی را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از محاسبات نرم، ضریب تخلیه را تابعی از متغیرهای هندسی بدون بعد سرریز کلید پیانویی در نظر گرفتند. آن‌ها با این رویکرد، دو الگوریتم جریان در سرریز سازه‌های کلاریفایر تصفیه‌خانه‌ها با شکل کلید پیانویی در ورودی آن پرداخته شود. بنا به این مهم در این تحقیق سعی بر آن شد که با مدل فیزیکی به ارزیابی هیدرولیک جریان در سرریز سازه‌های کلاریفایر تصفیه‌خانه‌ها با شکل کلید پیانویی در خروجی آن پرداخته شود. در شکل (۲) پلان و در شکل (۳) مقطع طولی از کلید خروجی سرریز کلید پیانو نشان داده شده است.

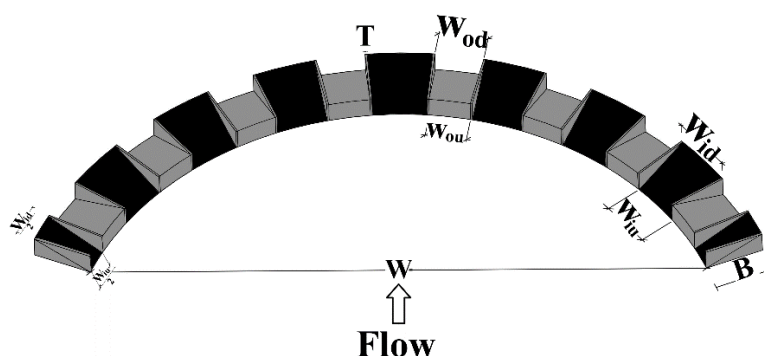


Fig. 1- 3D view from upstream of a arched Piano key weir

شکل ۱- نمای سه بعدی سرریز از بالادست سرریز کلید پیانویی



Fig. 2- Fabricated physical model of arched Pianokey weir

شکل ۲- مدل هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی قوسی

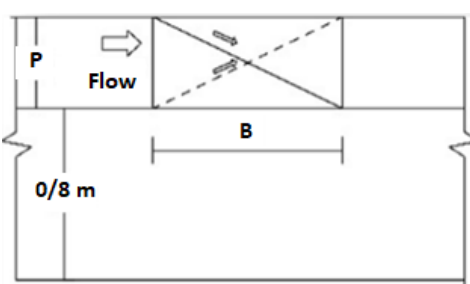


Fig. 3- Longitudinal section of piano key weir outlet key

شکل ۳- مقطع طولی از کلید خروجی سرریز کلید پیانو

وجه عرضی آن درپچه‌ای به ابعاد ۱۵×۱۵ برای عبور آب تعبیه شده است (شکل ۴). آب خروجی از درپچه وارد سازه نیم‌دایره کلاریفایر به قطر و ارتفاع ۱۰۰ و ۸۰ سانتی‌متری می‌گردد که بر روی قوس آن سرریزهای کلید پیانویی قرار می‌گرفتند. جنس تمامی وجوه آن آجری و کف آن سرامیک و برای جلوگیری از خروج آب و عایق بندی آن، برای کف و دیواره‌ها از پوشش ایزوگام استفاده شده است. با توجه به مطالعه‌های Kumar et al (2019) و با توجه به محدودیت آزمایشگاهی و در نظر گرفتن طول قوس خارجی برابر ۱/۲۸۴ متر و طول قوس‌های داخلی ۰/۹۶۵، ۱/۰۴۹ و ۱/۱۲۷ متر

### مواد و روش‌ها

#### تجهیزات آزمایشگاهی

مدل سرریز کلاریفایر در آزمایشگاه رسوب سازمان آب و برق خوزستان مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایشگاه دارای یک مخزن اصلی می‌باشد که از شبکه شهری تغذیه می‌شود. آب مخزن توسط یک پمپ سانترفیوژ به فلوم آزمایشگاه منتقل می‌گردد. مدل فیزیکی که در آن سرریزهای کلید پیانویی قرار می‌گرفتند، بگونه‌ای طراحی شده است که دارای طولی به اندازه ۷۵ سانتی‌متر و عرض ۱۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۵ سانتی‌متر بوده که در انتهای

مدل‌های آزمایشگاهی، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ به فلوم آزمایشگاهی منتقل شده و اندازه‌گیری که شامل ارتفاع سطح آب است انجام پذیرفت. ارتفاع آب روی سرریز به وسیله یک اشل با دقت یک میلی‌متر که به بدنه چسبیده است قرائت شده و در نهایت خروجی آب سرریز به صورت جریان آزاد توسط یک کانال، به مخزن ذخیره آب باز می‌گردد. در مجموع ۱۷۰ آزمایش با ۱۷ دبی در محدوده تغییرات بین ۳/۶۸ تا ۵۲/۸ مترمکعب بر ساعت (m<sup>3</sup>/h) انجام گردید. و سپس ضریب تخلیه از معادله

$$C_{pk} = \frac{3Q}{2\sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} L}$$

محاسبه گردید.

شکل (۵) سرریزهای کلید پیانو در نه مدل و براساس پارامترهای جدول (۱) که در محدوده محققان قبلی قرار دارد از جنس پلکسی گلاس با ضخامت سه میلی‌متر ساخته شده‌اند. نام‌گذاری مدل‌ها با حرف M و اعداد انجام گرفت. عدد سمت چپ نشان دهنده تعداد وجه سرریز و عدد سمت راست نسبت طول جانبی تاج سرریز به عرض آن را به درصد نشان می‌دهد. مدل شاهد نیز با M-S نشان داده شده است. آب توسط لوله پلی اتیلن با قطر چهار اینچ وارد مدل می‌گردد. در مسیر ورودی آب به کلاریفایر، یک کنترلر دیجیتال برای اندازه‌گیری دبی ورودی با دقت ±۱ درصد و یک شیر گلوپ چند داکتیل به قطر چهار اینچ برای تنظیم آب ورودی تعبیه شده است. ورودی آب مدل از قسمت خروجی فلوم آزمایشگاهی موجود در همان آزمایشگاه تأمین خواهد شد، در هر آزمایش پس از استقرار

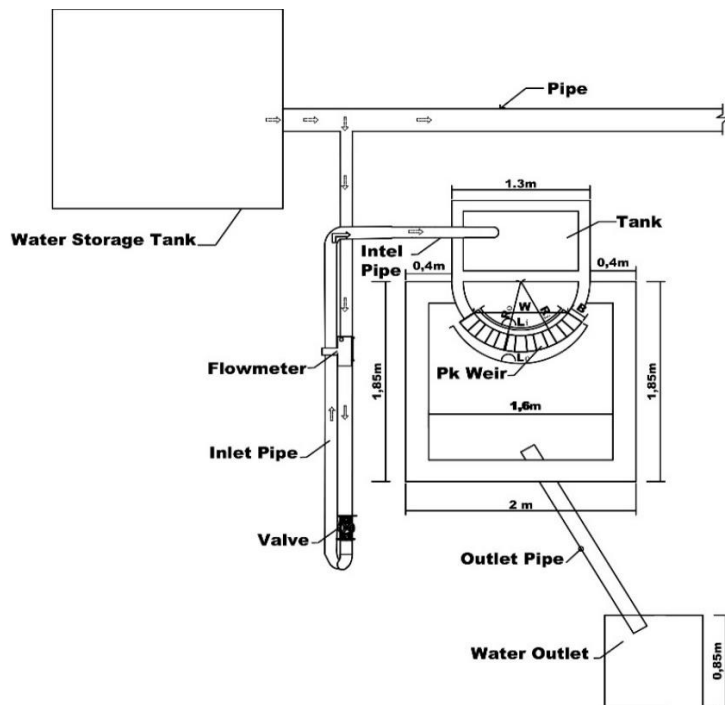


Fig.4- Schematic plan and photometric view of the laboratory flume

شکل ۴-نمایی شماتیک و تصویری از فلوم آزمایشگاهی



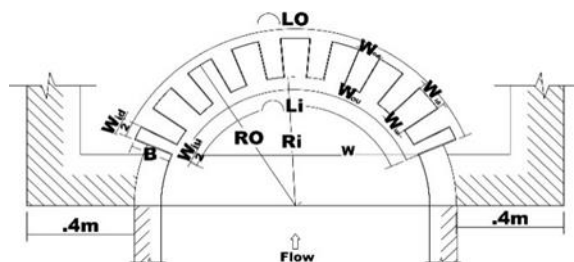


Fig.5-Geometric parameters of arched piano key weir in plan

شکل ۵- پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی قوسی در پلان

جدول ۱- جزئیات اندازه سرریز کلید پیانو

Table 1- Detailed dimensions of Piano key weir

Elements of Piano key weir	Dimensions (in m if not mentioned)									
	M8-1	M10-1	M12-1	M8-16	M10-16	M12-16	M8-23	M10-23	M12-23	M-S
Developed crest length (L)	4.35	5.21	6.13	5.78	7.00	8.31	7.53	9.08	10.67	1.22
Weir width (W)	1.12	1.12	1.12	0.94	0.94	0.94	0.87	0.87	0.87	0.74
Sidewall Overflowing crest length (B)	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20	-
Inlet key width in upstream (W <sub>iu</sub> )	0.0750	0.0593	0.4890	0.6950	0.0549	0.0452	0.0432	0.0505	0.0415	-
Inlet key width in downstream (W <sub>id</sub> )	0.0860	0.0682	0.0562	0.0860	0.0682	0.0562	0.0860	0.0682	0.0562	-
Outlet key width in upstream (W <sub>ou</sub> )	0.0610	0.0475	0.0353	0.0556	0.0439	0.0362	0.0860	0.0403	0.0299	-
Outlet key width in downstream (W <sub>od</sub> )	0.0690	0.0546	0.0408	0.0690	0.0546	0.0408	0.0690	0.0546	0.0408	-
Weir height(p)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Divide wall (T)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Inlet key slope angle	45°	45°	45°	33.69°	33.69°	33.69°	26.56°	26.565°	26.565°	-
outlet key slope angle	45°	45°	45°	33.69°	33.69°	33.69°	26.56°	26.565°	26.565°	-
External arch length (L <sub>o</sub> )	1.284	1.284	1.284	1.284	1.284	1.284	1.284	1.284	1.284	1.22
Internal arch length (L <sub>i</sub> )	1.127	1.127	1.127	1.049	1.049	1.049	0.965	0.965	0.965	1.22
External radius (R <sub>o</sub> )	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.33
Internal radius (R <sub>i</sub> )	0.705	0.705	0.705	0.650	0.650	0.650	0.607	0.607	0.607	0.33



## تحلیل ابعادی

در تحقیق حاضر تمامی پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه ( $C_{pk}$ ) جریان سرریز در معادله (۱) ارائه شده‌اند:

$$F(H, B, L, Q, \rho_w, \sigma, f_e, N, \mu, g, V, P, W, W_{iu}, W_{id}, W_{ou}, W_{od}, R_i) = 0 \quad (1)$$

پارامترهای هندسی شامل، عرض کلید ورودی در بالادست ( $W_{iu}$ )، عرض کلید ورودی در پایین دست ( $W_{id}$ )، عرض خروجی در پایین دست ( $W_{ou}$ )، عرض سرریز ( $W_{od}$ )، عرض سرریز ( $W$ )، طول تاج جانبی سرریز ( $B$ )، طول تاج سرریز ( $L$ )، ارتفاع سرریز ( $P$ )، شعاع داخلی ( $R_i$ ) و پارامترهای مربوط به خصوصیات جریان شامل، دبی جریان ( $Q$ )، سرعت بالادست ( $V$ )، بار آبی نسبت به تاج سرریز ( $H$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) و پارامترهای مربوط به خصوصیات سیال شامل، جرم مخصوص سیال ( $\rho_w$ )، کشش سطحی سیال ( $\sigma$ )، ضریب زبری بستر ( $f_e$ ) و لزجت دینامیکی سیال ( $\mu$ ).

با به‌کارگیری تکنیک تحلیل ابعادی و تلفیق پارامترهای معادله (۱) معادله (۲) به‌دست می‌آید.

$$\left( \frac{B}{H}, \frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{Q}{\sqrt{2gH^3L}}, \frac{H}{L}, \frac{\sigma}{\rho_w g H^2}, f_e, \frac{\mu}{\rho_w \sqrt{gH^3}}, N, \frac{P}{H}, \frac{W_{od}}{H}, \frac{W}{H}, \frac{W_{ou}}{H}, \frac{W_{iu}}{H}, \frac{W_{id}}{H}, \frac{R_i}{W} \right) \quad (2)$$

نسبت‌های  $\frac{V}{\sqrt{gH}}$  و  $\frac{Q}{\sqrt{2gH^3L}}$  به ترتیب به ضریب دبی و عدد فرود اشاره دارند. براساس تحقیقات صورت گرفته توسط سایر محققان از برخی پارامترها به علت کم بودن تأثیرشان بر ضریب تخلیه می‌توان چشم‌پوشی نمود. به این ترتیب که می‌توان اثر کشش سطحی را نادیده گرفت. همچنین با توجه به وجود جریان آزاد غیرقابل تراکم و ضخامت ناچیز لایه مرزی می‌توان از اثرات تغییر جرم مخصوص، لزجت و خصوصیات جریان در پایین دست صرف نظر و با انجام اندکی عملیات بر روی پارامترهای بیان شده می‌توان پارامترهای بی بعد مؤثر بر ضریب دبی را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_{pk} = f\left(N, \frac{B}{W}, \frac{R_i}{W}, \frac{H}{P}\right) \quad (3)$$

## متغیرهای آزمایش

در این تحقیق مطابق جدول (۲) انواع ابعاد از طول و عرض مورد بررسی قرار خواهد گرفت و تأثیر آن بر روی ضریب دبی نیز مورد بررسی قرار گرفت. متغیرها شامل: آزمایش با ۱۷ دبی متفاوت (۱۷ متغیر) و سه تغییر در طول ضلع سرریز ( $B/W$ ) (۰/۱، ۰/۱۶، ۰/۲۳) و سه تغییر در تعداد وجه  $N$  (تعداد سیکل‌ها) (۸، ۱۰، ۱۲) که ۱۵۳ آزمایش آن مربوط به مدل کلید پیانویی و با ۱۷ آزمایش شاهد مجموعاً ۱۷۰ آزمایش می‌باشد.

## نتایج و بحث

در این پژوهش نه مدل سرریز خروجی کلاریفایر با ابعاد مختلف و یک مدل سرریز ساده به‌عنوان شاهد آزمایش شدند. در سرریزهای اشاره شده تعداد ۱۵۳ آزمایش آن مربوط به مدل کلید پیانویی با ۱۷ آزمایش شاهد مجموعاً ۱۷۰ آزمایش انجام شده است. در هر آزمایش پس از ایستادن مشخصات جریان، ارتفاع آب روی سرریز به‌وسیله اشل قرائت و ثبت شد. آزمایش‌ها تا قبل از حد استغراق ادامه پیدا کردند، یعنی به‌هنگام رسیدن به حد استغراق آزمایش‌ها روی هر دو سرریز با کلیه حالات مختلف متوقف می‌شد. لازمه استفاده از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی در مدل واقعی، ارائه داده‌هایی به‌صورت بدون بعد است. به همین منظور اعداد بدون بعد استخراج شده از معادله سرریز که پیش‌تر در قسمت آنالیز ابعادی و استخراج اعداد بدون بعد معرفی شدند، برای هر دبی و ارتفاع محاسبه شد که نتایج حاصله به‌صورت نمودار و جدول ارائه شده است.

## بررسی نتایج آزمایش‌ها

بررسی تأثیر تعداد وجه سرریز کلاریفایر کلید پیانویی بر ضریب تخلیه سرریز

در این تحقیق به بررسی تأثیر تعداد وجه سرریز کلاریفایر کلید پیانویی بر ضریب تخلیه سرریز ( $C_{pk}$ ) می‌پردازیم. با توجه به تغییر نسبت شعاع داخلی سرریز ( $R_i/W$ ) در اثر تغییر تعداد وجه آن، در این بخش تأثیر نسبت شعاع قوس داخلی بر ضریب دبی در نسبت‌های طولی متفاوت ( $B/W$ ) در قالب نمودار و تحلیل پرداخته شده است.

Table 2- Experimental variables

جدول ۲- متغیرهای آزمایش

Discharge	B/W	number of cycles (N)	Control	Number of tests
17	3	3	17	170

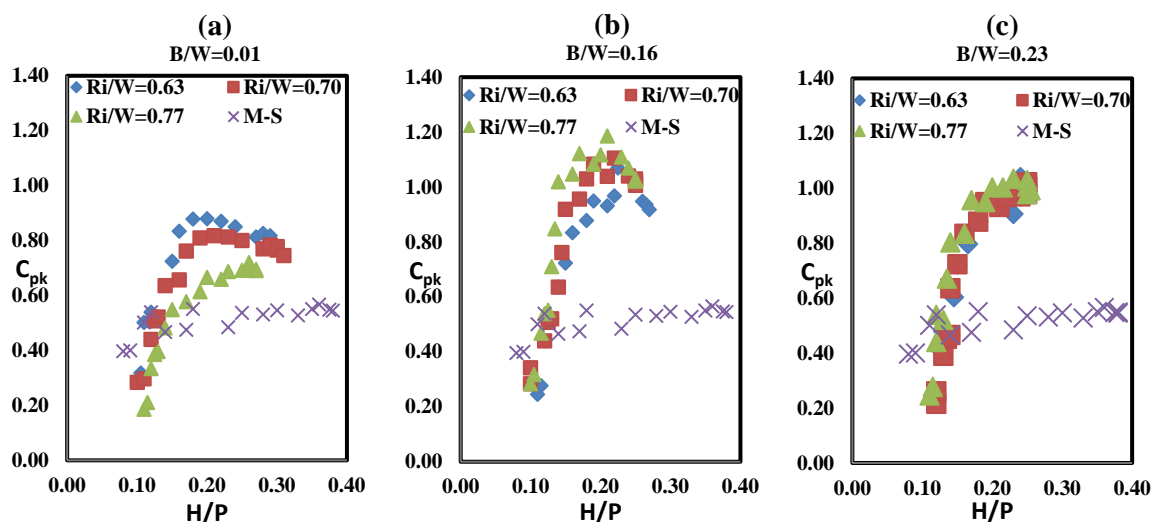


Fig.6- (a-c): Diagrams of the effect of arc radius ratio on coefficient of Discharge on the piano key weir for different ranges of B/W:(a) B/W=0.01, (b) B/W=0.16, (c) B/W=0.23

شکل ۶- (a-c): نمودارهای تأثیر نسبت شعاع قوس بر ضریب دبی سرریز برای محدوده های مختلف B/W:

(a) B/W=0.01, (b) B/W=0.16, (c) B/W=0.23

افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که سرریز با نسبت شعاع قوس  $Ri/W=0.77$  حدود  $8/96$  درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز با نسبت شعاع قوس  $Ri/W=0.63$  دارد. با افزایش تعداد وجه‌های سرریز در نسبت عرض تاج به عرض سرریز  $B/W=0.23$  میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) به میزان  $34/3$ ،  $35/2$  و  $38/3$  درصد افزایش نسبت به مدل شاهد را نشان می‌دهد.

#### بررسی تأثیر طول جانبی تاج به عرض سرریز کلاریفایر کلید پیانویی بر ضریب تخلیه سرریز

همان گونه که در شکل (۷-ا) مشاهده می‌شود، با افزایش طول ضلع ( $B/W$ ) سرریز کلاریفایر هشت وجهی از  $0.1$  به  $0.23$  به ترتیب شاهد  $26/8$ ،  $36/6$  و  $34/3$  درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم. با توجه به شکل (۷-ب) با افزایش طول ضلع ( $B/W$ ) سرریز کلاریفایر  $10$  وجهی از  $0.1$  به  $0.23$  به ترتیب شاهد  $31/6$ ،  $40/7$  و  $35/2$  درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم. با توجه به شکل (۷-ج) با افزایش طول ضلع ( $B/W$ ) سرریز کلاریفایر هشت وجهی از  $0.1$  به  $0.23$  به ترتیب شاهد  $33/2$ ،  $44/7$  و  $38/3$  درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم.

در این تحقیق تأثیر نسبت شعاع قوس داخلی به عرض سرریز ( $Ri/W$ ) بر ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانویی بررسی شد. همان گونه که در شکل (۶-ا) مشاهده می‌شود، در سرریزهای کلید پیانویی با نسبت عرض تاج به عرض سرریز  $B/W=0.01$  با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که سرریز با نسبت شعاع قوس  $Ri/W=0.63$  حدود  $11/63$  درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز با نسبت شعاع قوس  $Ri/W=0.77$  دارد. با افزایش نسبت شعاع قوس داخلی سرریز هشت وجهی  $12$  وجهی به ترتیب شاهد  $68/43$ ،  $70/5$  و  $61/3$  درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم. با توجه به شکل (۶-ب) در سرریزهای کلید پیانویی با نسبت عرض تاج به عرض سرریز  $B/W=0.16$  با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که سرریز با نسبت شعاع قوس  $Ri/W=0.77$  حدود  $22/06$  درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز با نسبت شعاع قوس  $Ri/W=0.63$  دارد و شاهد  $36/62$ ،  $40/61$  و  $44/7$  درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم. با توجه به شکل (۶-ج) در سرریزهای کلید پیانویی با نسبت عرض تاج به عرض سرریز  $B/W=0.23$  با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی

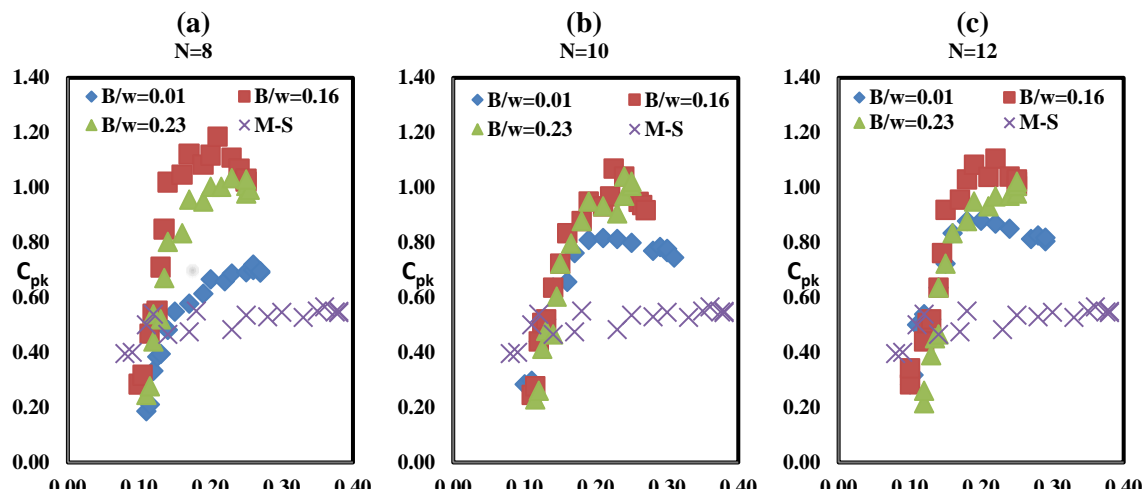


Fig. 7- (a-c) Diagrams of the effect of Sidewall weir crest length to weir width ratio for different ranges of the number of cycles weir: (a) N=8, (b) N=10, (c) N=12

شکل ۷- (a-c): نمودارهای تأثیر نسبت طول تاج سرریز جانبی به عرض سرریز برای محدوده های مختلف تعداد سیکل

سرریز: (a) N=8, (b) N=10, (c) N=12

۲۶/۸، ۳۶/۶ و ۳۴/۳ درصد افزایش ضریب تخلیه نسبت به مدل شاهد هستیم. با افزایش B/W سرریز کلایرفایر ۱۰ وجهی از ۰/۰۱ به ۰/۲۳ به ترتیب شاهد ۳۱/۶، ۴۰/۷ و ۳۵/۲ درصد افزایش ضریب تخلیه نسبت به مدل شاهد هستیم. با افزایش طول ضلع B/W سرریز کلایرفایر ۱۲ وجهی از ۰/۰۱ به ۰/۲۳ به ترتیب شاهد ۳۳/۲، ۴۴/۷ و ۳۸/۳ درصد افزایش ضریب تخلیه نسبت به مدل شاهد هستیم. با توجه به نتایج می توان به خوبی دریافت سرریز کلایرفایر کلید پیانویی راندمان بیشتری نسبت به سرریز کلایرفایر کنگره ای دارد.

### تقدیر و قدردانی

در پایان نویسندگان از همکاری سازمان آب و برق خوزستان بابت در اختیار گذاشتن آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب معاونت مطالعات جامع منابع آب تشکر و قدردانی می نمایند.

### نتیجه گیری

با افزایش تعداد وجه های سرریز کلایرفایر کلید پیانویی از هشت به ۱۲ وجه با طول جانبی تاج به عرض سرریز (B/W) ۰/۰۱ از هشت به ۱۲ وجهی به ترتیب شاهد ۶۸/۴۳، ۷۰/۵ و ۶۱/۳ درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم. با افزایش تعداد وجه های سرریز کلایرفایر کلید پیانویی از هشت به ۱۲ وجه با طول جانبی تاج به عرض سرریز (B/W) ۰/۱۶ ترتیب شاهد ۳۶/۶۲، ۴۰/۶۱ و ۴۴/۷ درصد افزایش میزان ضریب دبی ( $C_{pk}$ ) نسبت به مدل شاهد هستیم. با افزایش تعداد وجه های سرریز کلایرفایر کلید پیانویی از هشت به ۱۲ وجه با طول جانبی تاج به عرض سرریز (B/W) ۰/۲۳ به ترتیب شاهد ۳۴/۳، ۳۵/۲ و ۳۸/۳ درصد افزایش ضریب تخلیه نسبت به مدل شاهد هستیم. با افزایش B/W سرریز کلایرفایر هشت وجهی از ۰/۰۱ به ۰/۲۳ به ترتیب شاهد

### References

- 1- Cicero, G. & Delisle, J. 2013. Discharge characteristics of Piano Key weirs under submerged flow. *Labyrinth and Piano Key Weirs II-PKW 2013*, 101-109.
- 2- Crookston, B., Anderson, R. & Tullis, B. 2018. Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries. *Journal of Hydro-Environment Research*, 19, 160-167.
- 3- Hien, T., Son, H. & Khanh, M. 2006. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam, in proceedings of 22e congrès des grands barrages. *CIGB/ICOLD, Barcelona*.
- 4- Kabiri-Samani, A. & Javaheri, A. 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of Hydraulic research*, 50, 114-120.
- 5- Kumar, B., Kadia, S. & Ahmad, Z. 2019. Evaluation of discharge equations of the Piano Key Weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101577.

- 6- Laugier, F. 2007. Design and construction of the first Piano Key Weir spillway at Goulours dam. *International Journal on Hydropower and Dams*, 14, 94.
- 7- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. & Boillat, J.-L. 2009. Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. *Hydropower & Dams*, 16, 100-107.
- 8- Lemperiere, F. & Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower & Dams*, 10, 144-149.
- 9- Pirzad, M., Pourmohammadi, M., Ghorbanizadeh Kharazi, H., Solimani Babarsad, M. & Derikvand, E. 2022. Experimental study on flow over arced-plan porous weirs. *Water Supply*, 22, 2659-2672.
- 10- Ribeiro, L., Bieri, M., Boillat, J., Schleiss, A., Singhal, G. & Sharma, N. 2012a. Discharge capacity of piano key weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 199-203.
- 11- Ribeiro, M. L., Pfister, M., Schleiss, A. J. & Boillat, J.-L. 2012b. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50, 400-408.
- 12- Tullis, B. P., Crookston, B. M., Brislin, J. & Seamons, T. 2020. Geometric Effects on Discharge Relationships for Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146, 04020066.