

# An Experimental Study of the Effects of Splitter Geometry on the Flow Discharges of Piano Key Weirs


Ali Ehsanifar<sup>1</sup>, Masoud Ghodsian<sup>2\*</sup>, Chonoor Abdi Chooplou<sup>3</sup>

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

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

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

\* [ghods@modares.ac.ir](mailto:ghods@modares.ac.ir)

Received: 21 February 2022, Accepted: 13 May 2022  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Piano Key Weir (PKW) is the newest type of nonlinear Labyrinth Weirs (LWs). An initial study on this weir has indicated that it can significantly increase the discharge besides having a simple and economical structure. During the past years, different researches have been done to check the factors effecting the flow discharge and optimization of this type of weir. However, there are limited references on the ventilation mechanism and aeration of this weir at the outlet. Only solution that has been presented for aeration at the outlet is aeration gallery at the downstream part. Another problem that has been discussed for PKWs and weir overflows is nappe oscillation after the flow crosses the weir crest. The past studies have considered the use of a splitter for reducing nappe oscillations in linear weirs. Bing inspired by this method, researchers have used three piers with different circular, square, and rectangular geometries in PKWs to reduce Nappe oscillation.

**Methodology:** All the experiments of this research were performed in a rectangular channel with a metal floor with a width of 75 cm and unbreakable glass walls with a height of 80 cm in the hydraulic laboratory of the Department of Water Engineering and Hydraulic Structures in Tarbiat Modares University, Tehran. The water flow from the underground tank entered the flow-calming tank by two pumps with a maximum discharge of 85 L/s, reached the weirs after passing through the calming plates, and fell into the underground tank after passing over the weirs at the end of the flume. This cycle continued during various tests under different hydraulic conditions. The discharge flow was measured with an ultrasonic flowmeter with an accuracy of 0.01 l/s after being pumped and before entering the calming tank. All the experiments were performed under the free flow conditions. The upstream flow depth was measured with a point gauge with an accuracy of  $\pm 1$  mm. This depth gauge was moved through the rails mounted on the walls of the channel so that the water depth could be measured at the desired points. 3 A-type PKWs with different rectangular, triangular, and trapezoidal designs were used in the plan. Three splitters with circular, square, and rectangular cross-section geometries were installed on the weir crowns and in the downstream corners of the weir keys.

**Results and Discussion:** The results showed that the splitters could reduce the nappe oscillation intensity of the flow passing through them in addition to separating the flow and

creating a space for the connection of the free surface air with the lower part of the outflow from the weirs. The use of the splitters did not have a negative effect on the flow discharge in the rectangular and trapezoidal PKWs; they only reduced the discharge flow by 10% in the triangular PKW.

The square and rectangular splitters showed similar performances on water discharge and separation. The flow separation in the rectangular splitter was evaluated to have a higher effect compared to that on a square base. Also, these two splitters displayed more suitable effects on the flow separation compared to the circular splitter.

The comparison of the discharge coefficients of the 3 mentioned types of weirs revealed that the discharge coefficients in the rectangular and trapezoidal PKWs had higher values than that of the triangular PKW at  $\frac{H_t}{P} < 0.2$ , which was due to more flow suction in the heads of the two former weirs as vacuum was created below their inlet keys. By increasing  $\frac{H_t}{P}$  up to 0.4, the difference between the discharge coefficient values of the rectangular and trapezoidal PKWs and that of the triangular PKW gradually decreased to the point that the discharge coefficient value of the triangular PKW had increased compared to those of the two former PKWs after  $\frac{H_t}{P} > 0.4$ , one of the main reasons of which could be the ventilation performance of the triangular type of PKW.

**Conclusion:** Regarding the increasing use of PKWs due to their advantages and the need for improving downstream performance via aeration, this study aimed to provide an economical solution by using a splitter instead of an aeration gallery, which could ameliorate the downstream ventilation of PKWs. To this goal, the effects of a splitter with different circular, square, and rectangular sections on the flow discharges of A-type PKWs with 3 rectangular, triangular, and trapezoidal designs in the plan were studied. The obtained results could be summarized as follows: With the total head of smaller than 0.08 m, the rectangular PKW had a smaller head of about 5 and 15% compared to those of the trapezoidal and triangular PKWs at a constant discharge, respectively. Nonetheless, with the total head of larger than 0.08 m, the trapezoidal PKW had a smaller head of averagely 5 and 8% in comparison with those of the rectangular and triangular PKWs at a constant discharge, respectively. The splitters showed the best performance in terms of flow separation in the case of  $\frac{H_t}{P} < 0.6$ . While this performance was affected by the high water flow in the case of  $\frac{H_t}{P} > 0.6$  so that the connection of the bottom water flow with the open air was reduced by increasing the discharge. Thus, it was not possible to ensure the complete connection of the open air with the downstream parts and the outlets of the PKWs. Regarding the geometric shape of the splitter, the square and rectangular splitters depicted similar performances in flow discharge and separation. Yet, the rectangular splitter was evaluated to provide a better flow separation compared to the square splitter. Furthermore, the geometries of these two splitters were more suitable for flow separation in comparison with that of the circular splitter.

**Keywords:** discharge coefficient, Piano Key Weir (PKW), Nappe oscillation, splitter, free flow.

© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

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

# بررسی آزمایشگاهی اثرگذاری‌های هندسه پایه‌های جداکننده جریان بر آبگذری سرریز کلیدپیانویی

علی احسانی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>، چنور عبدی چوپلو<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\*ghods@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۳، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** از جمله مسئله‌هایی که در زمینه سرریز کلیدپیانویی مطرح شده است، نوسان تیغه آب عبوری از روی سرریز است. استفاده از پایه‌های جداکننده جریان یکی از راه‌های موثر بر کاهش نوسان تیغه آب است. در این تحقیق آزمایشگاهی اثرگذاری‌های پایه‌های جداکننده جریان بر آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای شکل در نقشه و طرح (پلان) بررسی شده است. پایه‌های استفاده شده با مقطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی روی دیوارهای پایین‌دست سرریز نصب شد. آزمایش‌ها در آبراه‌های (کانالی) با طول ۱۰ متر، عرض و ارتفاع ۰/۷۵ و ۰/۸۰ متر انجام شد. نتایج نشان داد که پایه‌های جداکننده جریان، افزون بر جدایش جریان پس از پایه‌ها و ایجاد فضایی برای ارتباط هوای سطح آزاد با قسمت زیرین جریان خروجی از روی سرریز، موجب کاهش شدت نوسان تیغه آب عبوری از روی آن نیز می‌شود. استفاده از پایه‌های جداکننده تاثیر منفی بر آبگذری در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای ندارد و تنها در سرریز کلیدپیانویی مثلثی، موجب کاهش ۱۰ درصدی آبگذری سرریز شده است. عملکرد پایه‌های مربعی و مستطیلی بر روی آبگذری و جدایش جریان مشابه بود. تاثیر جدایش جریان در پایه مستطیلی نسبت به پایه مربعی بهتر ارزیابی می‌شود. همچنین تاثیر این دو پایه بر روی جدایش جریان مناسب‌تر از پایه دایره‌ای است.

**کلیدواژه‌گان:** ضریب آبگذری، سرریز کلیدپیانویی، نوسان تیغه آب، پایه‌های جداکننده جریان، جریان آزاد.

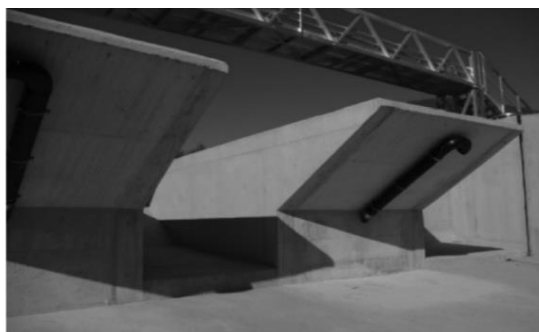
## ۱- مقدمه

(Lempérière and Ouamane, 2003). نخستین نتایج این

تحقیق در سال ۲۰۰۶ در بیست و دومین کنگره ICOLD<sup>۱</sup> (کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ) نشان داد که آبگذری این سرریز به فراسنجه‌های طول کل سرریز به عرض کل و نسبت بار (هد) به ارتفاع سرریز بستگی دارد. به طور کلی نسبت طول کل سرریز به عرض کل بین ۴ تا ۷، و نسبت بار به ارتفاع سرریز بین ۰/۲ تا ۰/۵ متغیر است و تا میزان ۱ هم در برخی موارد خاص می‌رسد. این سرریز قابلیت احداث روی سدهای موجود و سدهای وزنی را دارد و باعث افزایش ظرفیت مخزن می‌شود. افزون بر این ساختاری به نسبت ساده دارد و به سادگی قابل اجراست. Blancher

سرریز کلیدپیانویی جدیدترین نوع از سرریز غیرخطی است. طرح اولیه این سرریز توسط لمپرییر و اوامان در اواخر سال ۱۹۹۰ ارائه شد. پژوهش‌ها بر روی این سرریز پس از چند سال در ویتنام آغاز شد که در مقایسه با سرریزهای کنگره‌ای، نشان از برتری سرریز کلیدپیانویی می‌داد. نخستین پژوهش و ارزیابی بر روی سرریز کلیدپیانویی در ویتنام در سال ۲۰۰۳ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی شهر Chi Minh با حمایت موسسه هیدروکوپ فرانسه صورت گرفت. این تحقیق بر روی فراسنجه (پارامتر) های سرریز، مانند طول، عرض، ارتفاع و طول کلیدهای ورودی و خروجی انجام شد

1 International Committee of Large Dams



a



b

**Fig. 1** Aeration gallery in the piano key weir of: (a) Goulours dam and (b) Saint Mark dam

شکل ۱ گالری هوادهی در سرریز کلیدپیانویی سد: (a) گلورز و (b) سنت‌مارک

گالری‌ها و عملکرد بهتر آن شد (شکل ۱).

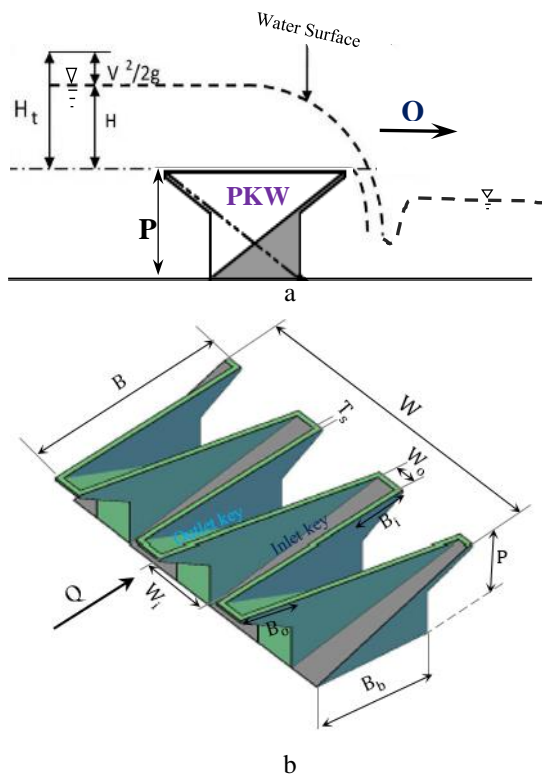
در این نوع سرریزها، جریان آب پس از سرریز، در شرایط خاص هیدرولیکی دچار حرکت نوسانی می‌شود. نوسان تیغه آب<sup>۱</sup> سبب لرزش سازه سرریز و تولید صدای نامطلوبی می‌شود، که تا چند صد متر پیرامون سرریز باعث آزار ساکنان محلی است (Casperson, 1993). Anderson (2014) با بررسی این پدیده و با توجه به شرایط و نوع سرریز دلیل آنرا به صورت زیر بیان کرد: هنگامی که لایه مرزی به سمت پایین دست تاج سرریز گسترش پیدا می‌کند، سبب ناپیوستگی ناگهانی بین فشار هوای سطح آزاد و فشار زیر تیغه جریان عبوری از روی سرریز می‌شود. این ناپیوستگی در فشار می‌تواند سبب ناپایداری و نوسان تیغه آب شود. ایشان ایجاد پایه‌های جداکننده جریان (Splitter) را در کاهش نوسان تیغه آب ریزشی از روی سرریز موثر دانست. (Ehsanifar et al. (2021) به بررسی عددی اثرگذاری پایه‌های جداکننده جریان بر سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در طرح (پلان) پرداختند. نتایج

(2011) et al. نشان دادند که دبی عبوری از این سرریز دست کم چهار برابر سرریز خطی است. Paxson et al. (2013) با مقایسه سرریز کلیدپیانویی با سرریز کنگره‌ای و سرریز دریچه‌دار، به بهتر بودن سرریز کلیدپیانویی، از لحاظ اقتصادی و هزینه نگهداری، اشاره کردند. Anderson and Tullis (2013) با بررسی عملکرد سرریز کنگره‌ای و سرریز کلیدپیانویی نشان دادند که در شرایط هیدرولیکی متفاوت، سرریز کلیدپیانویی قادر به عبور دبی بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای است. Cicero and Delisle (2014)، به صورت آزمایشگاهی عملکرد سرریز کلیدپیانویی با تاج تخت، نیمه گرد و یک چهارم گرد را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که تاثیر شکل تاج بر ظرفیت آگذری سرریز، در بارهای آبی کم، بیشتر از بارهای آبی زیاد است. Safarzadeh and Noroozi (2017) با استفاده از مدل عددی سه بعدی، ساختار جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای را بررسی و به بهبود مناسب ضریب آگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و کنگره‌ای اشاره کردند. Kumar et al. (2020) به صورت آزمایشگاهی عملکرد سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای را بررسی کردند و با استفاده از نتایج بدست آمده و یک الگوریتم مبتنی بر شبکه عصبی، رابطه‌هایی برای ضریب آگذری سرریز کلیدپیانویی ارائه دادند.

محبوس شدن هوا در زیر جریان ریزشی از روی سرریز و اثرگذاری‌های منفی ناشی از آن اعم افزایش توان بالقوه حفره زایی (پتانسیل کاویتاسیون) و افزایش نوسان‌های سطح جریان، سبب استفاده از گالری‌های هوادهی در برخی سرریزها شد. سرریز کلیدپیانویی سد گلورز جز نخستین سرریزهایی است که مجهز به گالری هوادهی شده است (Laugier, 2007). پس از آن در سرریز سنت‌مارک از دو گالری هوادهی به قطر ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شد (Laugier et al., 2009).

Vermeulen et al. (2017) با بررسی گالری‌های هوادهی اجرا شده در سرریزهای کلیدپیانویی سدهای سنت‌مارک و گلورز به ارائه رابطه‌های تجربی و روش جدید برای طراحی گالری‌های هوادهی پرداخت که منجر به کاهش ابعاد

1 Nappe oscillation



**Fig. 2** Schematic diagram: (a) Free flow in piano key weir and (b) geometric parameters of piano key weir  
 شکل ۲ طرح شمای کلی: (a) جریان آزاد در سرریز کلیدپیانویی و (b) نشانه‌های بعدهای هندسی سرریز کلیدپیانویی

سرریز  $v$  و شتاب ثقل  $g$  هستند. بر مبنای نتایج بررسی‌های انجام شده، متغیرهای موثر بر آبگذری سرریز کلیدپیانویی نوع A در جریان آزاد را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت:

$$f(W_i, W_o, W, B, B_i, B_o, T_s, L, P, N, Sh_w, Sh_p, S, Q, H_t, g) = 0 \quad (1)$$

با به کارگیری روش تحلیل ابعادی و پس از ترکیب‌سازی، متغیرهای بدون بعد زیر به دست آمد:

$$f\left(\frac{W_i}{W_o}, \frac{W}{L}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{T_s}{B}, N, Sh_w, Sh_p, S, \frac{H_t}{P}, \frac{Q}{L\sqrt{gH_t}^{3/2}}\right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه (۲) نسبت  $\frac{Q}{L\sqrt{gH_t}^{3/2}}$ ، ضریب آبگذری سرریز  $(C_d)$  است. با توجه به ثابت بودن هندسه سرریز و شیب کف آبراهه و حذف فراسنجه‌های ثابت در این پژوهش،

ایشان نشان داد که استفاده پایه‌های جداکننده جریان سبب ارتباط سطح هوای آزاد با لایه‌های زیرین جریان در پایین دست سرریز می‌شود و با وجود بی‌تأثیر بودن بر آبگذری سرریز، سبب کاهش سرعت لایه‌های سطحی و زیر سطحی و آشفته‌گی جریان در پایین دست سرریز می‌شود.

با وجود پژوهش‌هایی که در این زمینه صورت گرفته، عملکرد هواگیری در پایین دست سرریز کلیدپیانویی و نوسان تیغه جریان پس از سرریز کمتر بررسی شده، و راهکار مناسب برای بهبود این موارد معرفی نشده است. بنابراین برای بهبود عملکرد سرریز کلیدپیانویی و ارائه راهکاری در زمینه هواگیری سرریز و کاهش نوسان جریان در پایین دست آن، در این پژوهش به بررسی تأثیر پایه‌های جداکننده جریان بر سرریز کلیدپیانویی با شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای در طرح پرداخته شده است. همچنین ضمن بررسی کارآمدی پایه‌های جداکننده جریان برای برقراری ارتباط با قسمت زیرین جریان در پایین دست سرریز به بررسی تأثیر این پایه‌های جداکننده بر ضریب آبگذری و چگونگی جریان عبوری از سرریز کلیدپیانویی پرداخته شده است.

## ۲- تحلیل ابعادی

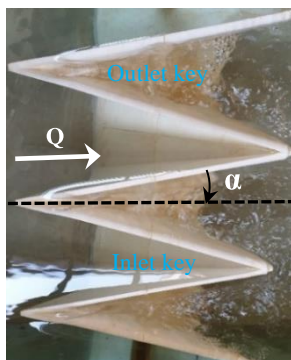
شکل (۲) جریان آزاد عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی و نشانه‌های هندسی آن را نشان می‌دهد. متغیرهای هندسی شامل عرض کلید ورودی  $(W_i)$ ، عرض کلید خروجی  $(W_o)$ ، عرض کل سرریز  $(W)$ ، طول دیوار جانبی سرریز  $(B)$ ، طول بیرون زدگی کلیدهای ورودی سرریز  $(B_i)$ ، طول بیرون زدگی کلیدهای خروجی سرریز  $(B_o)$ ، ضخامت دیواره‌های سرریز  $(T_s)$ ، طول موثر سرریز  $(L)$  (برابر با  $W_i + W_o + 2B$ )، ارتفاع سرریز  $(P)$ ، شمار کلیدهای سرریز  $(N)$ ، شکل سرریز در طرح  $(sh_w)$ ، شکل پایه‌های جداکننده جریان (اثر هندسه پایه‌های جداکننده جریان)  $(sh_p)$  و شیب کف آبراهه  $(S)$  است. متغیرهای مربوط به ویژگی‌های جریان و سیال نیز شامل دبی جریان ورودی  $(Q)$ ، عمق جریان در بالادست سرریز  $(H)$ ، بار کل جریان در بالادست سرریز  $(H_t = H + \frac{v^2}{2g})$ ، سرعت جریان روی تاج

آبراهه حرکت کرده و با استفاده از آن عمق آب در نقطه های دلخواه اندازه گیری می شود.

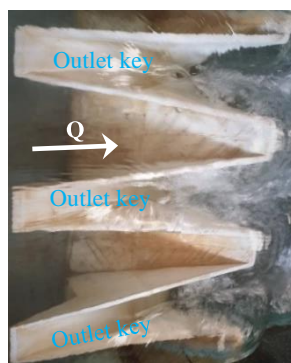
**سرریز کلیدپیانویی:** در این پژوهش از سه نوع سرریز کلیدپیانویی نوع A با طرح های مختلف مستطیلی، مثلثی و دوزنقه ای در طرح، که در شکل (۴) نشان داده شده، استفاده شد که ویژگی های آن ها در جدول (۱) آورده شده است.



a



b



c

**Fig. 4** Piano key weirs used: (a) rectangular, (b) triangular and (c) trapezoidal in plan

شکل ۴ نمایی از سرریزهای کلیدپیانویی با طرح: (a) مستطیلی، (b) مثلثی و (c) دوزنقه ای در طرح

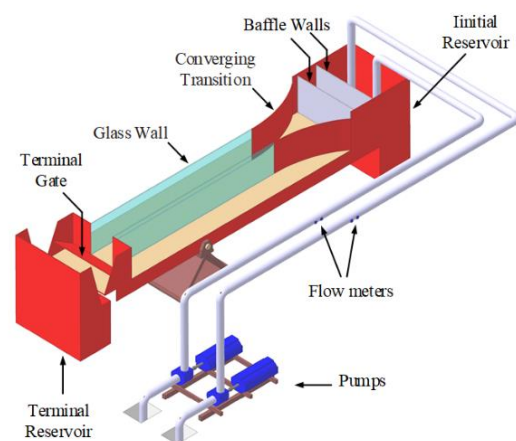
در این جدول  $B_b$  طول جانبی سرریز بدون بیرون زدگی و  $\alpha$  زاویه ی بین دیوار جانبی سرریز با راستای جریان است.

متغیرهای بدون بعد مؤثر بر ضریب آنگذری به صورت معادله (۳) خواهد بود:

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{P}, Sh_w, Sh_p\right) \quad (3)$$

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش های این پژوهش در یک آبراهه مستطیلی به عرض ۷۵ سانتی متر، با کف فلزی، دیواره های شیشه ای نشکن و ارتفاع ۸۰ سانتی متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شد. جریان آب از مخزن زیرزمینی به وسیله دو پمپ با بیشینه دبی هر کدام ۸۵ لیتر بر ثانیه وارد مخزن آرام کننده جریان می شود و پس از عبور از بین صفحه های آرام کننده به سرریز رسیده و با عبور از روی آن در انتهای آبراهه به صورت ریزشی به مخزن زیر زمینی تخلیه می شود. این چرخه در طول آزمایش های گوناگون در شرایط هیدرولیکی مختلف ادامه دارد. نمایی سه بعدی از آبراهه آزمایشگاهی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



**Fig. 3** A view of the laboratory flume (Sangsefidi et al., 2021)

شکل ۳ نمایی از آبراهه آزمایشگاهی (Sangsefidi et al., 2021)




اندازه گیری دبی به وسیله دبی سنج فراآوایی (التراسونیک) با دقت  $0.1/0.1$  لیتر بر ثانیه، پس از پمپ و پیش از ورود به مخزن آرام کننده، انجام شد. تمامی آزمایش ها در شرایط جریان آزاد انجام شد. اندازه گیری عمق جریان در بالادست به وسیله عمق سنج نقطه ای با دقت  $\pm 1$  میلی متر صورت گرفت. این عمق سنج به وسیله ریل هایی بر روی دیواره

جدول ۱ ویژگی‌های سرریز کلیدپیانویی مورد استفاده

Parameter	Values		
	Rectangular PKW	Triangular PKW	Trapezoidal PKW
N (-)	3	3	3
W (m)	0.75	0.75	0.75
Wi (m)	0.125	0.25	0.175
Wo (m)	0.125	0.00	0.075
P (m)	0.2	0.2	0.2
L (m)	3.75	3	3.45
B (m)	0.5	0.5	0.5
B <sub>b</sub> (m)	0.25	0.25	0.25
Bi=Bo (m)	0.125	0.125	0.125
Ts (m)	0.012	0.012	0.012
α (deg)	0	14	16

کردن آن، آزمایش‌ها به این شرح صورت گرفته است. پس از روشن کردن پمپ و تنظیم دبی و کنترل آن به وسیله دبی سنچ فراآوایی، و دستیابی جریان دائمی در فلوم، برداشت عمق جریان در بالا دست سرریز به وسیله عمق سنچ انجام شد. این روند برای دبی‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰، ۱۵۰ و ۱۶۰ لیتر بر ثانیه و عمق جریان در بالادست سرریز در محدوده‌ی ۰/۱۹ الی ۰/۱۳۹ متر و برای سه پایه‌ی دایره‌ای، مربعی و مستطیلی شکل و برای هر سه شکل سرریز تکرار شده است. در هر آزمایش اثر گذاری‌های پایه‌های تعبیه شده بر روی تاج سرریز، بر جدادگی جریان نیز بررسی و ثبت شد.

جدول ۲ ویژگی‌های هندسی پایه‌های جداکننده جریان

Type of splitter	Length (m)	Width (m)	Diameter (m)	Height (m)	Geometric shape
Circular	-	-	0.01	0.6	
Square	0.01	0.01	-	0.6	
Rectangular	0.02	0.01	-	0.6	

پایه‌های جداکننده جریان: پایه‌های جداکننده جریان بر روی تاج سرریز و در گوشه‌های پایین دست کلیدهای سرریز برابر شکل (۵) تعبیه شد.

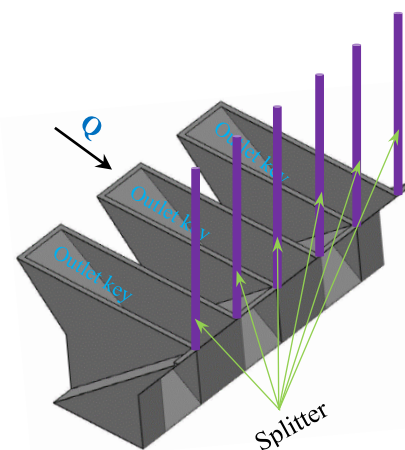


Fig. 5 View of the location of the splitter on the rectangular piano key weir

شکل ۵ نمایی از محل قرارگیری پایه‌های جداکننده جریان روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی

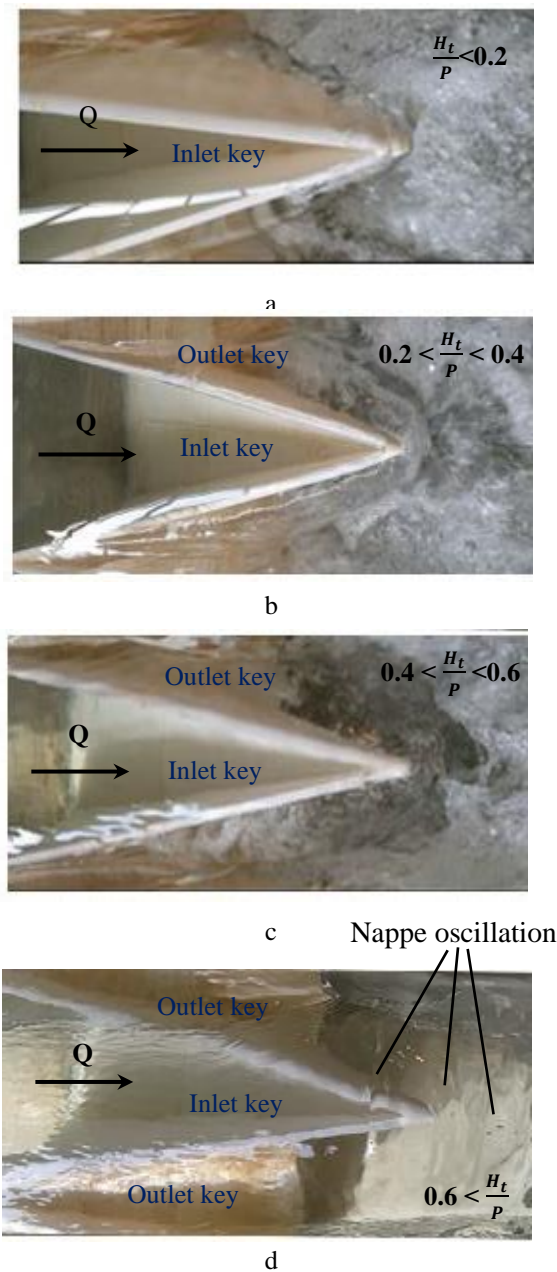
#### ۴- نتایج و بحث

در شکل (۶) مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج Anderson and Tullis (2013) نشان داده شده است. جدول (۳)، مقایسه بین ویژگی‌های آزمایش‌های این پژوهش و آزمایش‌های Anderson and Tullis (2013) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که نتایج پژوهش حاضر با نتایج Anderson and Tullis (2013) همخوانی خوبی دارد.

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی به دو بخش جریان عبوری از تاج بالادست و پایین دست و همچنین جریان عبوری از دیواره‌های جانبی تقسیم می‌شود. برابر شکل (۷) برای نمونه در سرریز مثلثی بدون پایه‌های جداکننده جریان، در دبی‌های پایین ( $\frac{H_t}{P} < 0.2$ )، جریان با فاصله کم و تاحدودی چسبیده به دیواره‌ی سرریز از روی آن عبور

هندسه مقطع این پایه‌ها، دایره‌ای، مربعی و مستطیلی است. ویژگی‌های پایه‌های استفاده شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

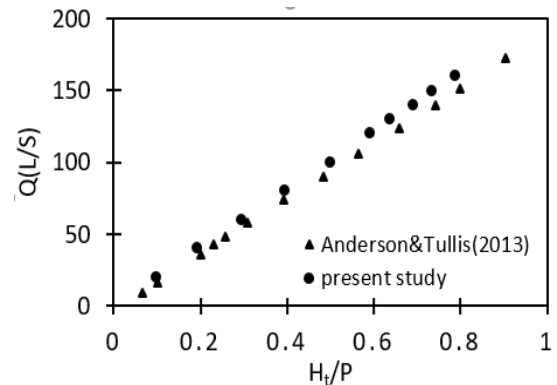
روش انجام آزمایش‌ها: برای برداشت داده‌های مربوط به هر کدام از سرریزها، پس از نصب سرریز در فلوم و آب بند



**Fig. 7** Ventilation steps of triangular piano key weir without splitter: (a) sticky, (b) ventilated, (c) transitional and (d) choking

شکل ۷ مرحله های هواگیری سرریز کلیدپیانویی مثلثی بدون پایه های جداکننده جریان: (a) چسبنده، (b) هواگیری شده، (c) انتقالی و (d) خفگی

به همراه دارد. ارتباط فضای زیرین جریان ریزشی از روی سرریز، با سطح هوای آزاد سبب کاهش این گونه مسئله ها برای سرریز می شود. مشاهده های اولیه پس از قراردادن پایه های جداکننده بدین صورت بود که پایه ها باعث جدا شدن جریان و ارتباط فضای زیرین آن با هوای آزاد می شود. در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با پایه های



**Fig. 6** Comparison of the present study with the results of Anderson and Tullis, 2013 for a rectangular piano key weir

شکل ۶ مقایسه این پژوهش با نتایج Anderson and Tullis (2013) برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی

### جدول ۳ فراسنجه های هندسی سرریز کلیدپیانویی

مستطیلی آزمایش های Anderson and Tullis (2013)

**Table 3** Geometric parameters of rectangular piano key weir from Anderson and Tullis, 2013 experiments

Parameter	P (m)	L (m)	W (m)	Wi = Wo (m)
Values	0.197	4.74	0.937	0.115

Parameter	Si = So (deg)	Bi = Bo (m)	Ts (m)	N (-)
Values	55.56	0.121	0.012	4

می کند (شکل ۷-۱). پس از آن در  $0.4 < \frac{H_t}{P} < 0.6$ ، هوا به زیر تیغه جریان نفوذ کرده و جریان به صورت هواگیری شده عمل می کند. با افزایش دبی و عمق، در حالت  $0.6 < \frac{H_t}{P} < 0.8$ ، جریان حالتی انتقالی بین هواگیری شده و خفه شده عمل می کند (هوای محبوس شده در زیر جریان در پایین دست سرریز تخلیه می شود). در این حالت حباب های هوا و نوسان تیغه آب به دلیل هواگیری و افزایش عمق در پایین دست، ایجاد شده است (شکل ۷-۲). در حالت  $0.8 < \frac{H_t}{P} < 1.0$ ، هوای زیرین جریان کامل تخلیه و جریان به صورت خفه شده (مستغرق) از روی سرریز عبور می کند. در این شرایط نوسان تیغه آب قابل مشاهده است (شکل ۷-۳).

مکش هوای محبوس شده در زیر کلیدهای ورودی توسط جریان و ایجاد فشار منفی، افزایش توان بالقوه حفره زایی را



شکل (۹) مقایسه نمودار دبی-بار کل و تغییرپذیری‌های ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$  در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با پایه‌های جداکننده جریان و بدون پایه‌های جداکننده را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل (۹-ا) روشن است تا هنگامی که سرریز کلیدپیانویی مثلثی به صورت هواگیری شده عمل می‌کند، عملکرد آن با پایه‌های جداکننده و بدون پایه‌های جداکننده یکسان است و تفاوتی از نظر بار کل ندارند، اما هنگامی که  $H_t < 0.08$  متر باشد، هد کل سرریز کلیدپیانویی مثلثی با پایه‌های جداکننده، تا ۱۰ درصد نسبت به حالت بدون پایه برای دبی مشخص افزایش یافته است. عمده دلیل تفاوت در بار کل، نوع هواگیری سرریز پس از  $\frac{H_t}{P} < 0.4$  است. هنگامی که هواگیری سرریز کلیدپیانویی مثلثی بدون پایه، به صورت ناقص انجام می‌شود، وجود پایه‌ها باعث جداسازی جریان و سبب هواگیری کامل سرریز می‌شود که این هواگیری سبب افزایش بار می‌شود. می‌توان تاثیر هواگیری در افزایش بار بالادست را به خاطر رژیم زیر بحرانی جریان دانست. با توجه شکل (۹-ب) مشهود است هنگامی که  $\frac{H_t}{P} < 0.2$  است، چسبندگی تیغه آب به بدنه سرریز بر جریان اثر می‌گذارد. در این حالت ضریب آبگذری در سرریز کلیدپیانویی مثلثی بیشتر است، که این مورد در حالت با پایه جداکننده جریان هم مشاهده می‌شود. هنگامی که  $0.35 < \frac{H_t}{P} < 0.2$  هر دو حالت سرریز با پایه و بدون پایه به صورت هواگیری شده عمل می‌کند، وجود پایه‌ها اثرگذاری محسوسی در ضریب آبگذری ندارد. ولی هنگامی که دبی و بار افزایش پیدا می‌کند ( $\frac{H_t}{P} < 0.35$ ) وجود پایه‌ها به هواگیری سرریز کمک کرده و موجب افزایش بار در دبی یکسان نسبت به سرریز بدون پایه شده و سبب کاهش ضریب آبگذری می‌شود. این وضعیت تا  $\frac{H_t}{P} > 0.6$  ادامه دارد و پس از آن هواگیری با وجود پایه‌ها نیز به صورت کامل صورت نمی‌گیرد و به وضعیت انتقالی در می‌آید. در واقع ضریب آبگذری در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با ایجاد پایه جداکننده جریان در حدود ۱۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، اما ایجاد پایه‌ها منجر به افزایش عملکرد هواگیری سرریز می‌شود. در نتیجه هواگیری بهبود یافته، منجر به کاهش نوسان تیغه جریان، کاهش توان

جداکننده جریان، مشاهده شد که با ایجاد پایه‌ها، عملکرد چهارگانه سرریز کلیدپیانویی مثلثی در هواگیری (چسبنده، هواگیری شده، انتقالی و مستغرق) به سه عملکرد چسبنده، هواگیری شده و انتقالی تغییر یافت. در حالت  $\frac{H_t}{P} < 0.2$ ، عملکرد دوگانه چسبنده-هواگیری شده، در پایه دایره‌ای و مربعی رخ داد. به طوری که در یک کلید، الگوی چسبنده و در کلیدی دیگر الگوی هواگیری شده صورت می‌گرفت (شکل ۸). دلیل این عملکرد عدم برقراری ارتباط با هوای آزاد است. اما در پایه مستطیلی به دلیل جداسازی بیشتر جریان نسبت به دیگر پایه‌ها، عملکرد هواگیری در  $\frac{H_t}{P} < 0.2$  به خوبی صورت می‌گیرد. در حالت  $0.2 < \frac{H_t}{P} < 0.6$ ، سرریز به صورت کامل هواگیری شده عمل می‌کند، این عملکرد سبب ایجاد فاصله زیاد تیغه جریان عبوری و سرریز شده و موجب هواگیری سرریز می‌شود که از عمده دلایل افزایش هد سرریز نسبت به سرریز بدون پایه است. در حالت  $\frac{H_t}{P} < 0.6$ ، هواگیری به صورت ناقص صورت می‌گیرد که سبب نوسان جریان روی سرریز می‌شود.

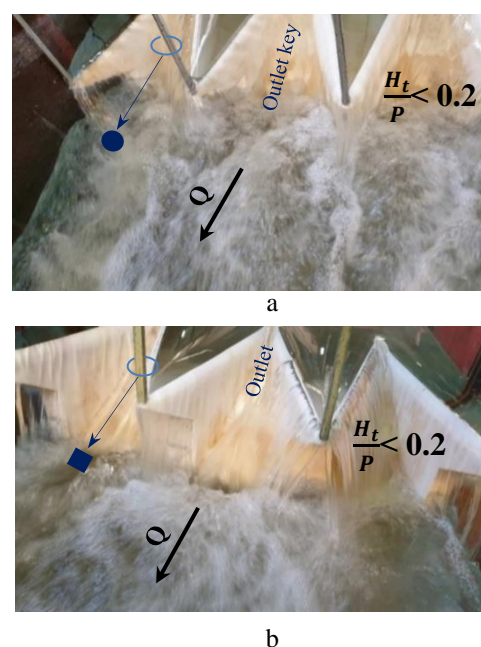
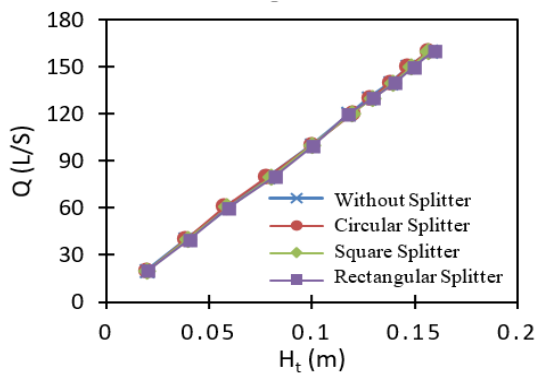
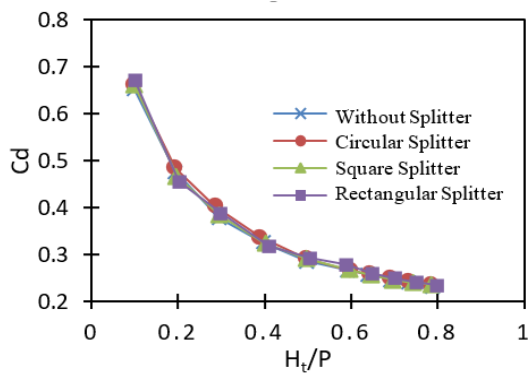


Fig. 8 Sticky-ventilated function in triangular piano key weir with splitter: (a) circular and (b) square

شکل ۸ عملکرد چسبنده-هواگیری شده در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با پایه‌های جداکننده جریان: (a) دایره‌ای و (b) مربعی



a

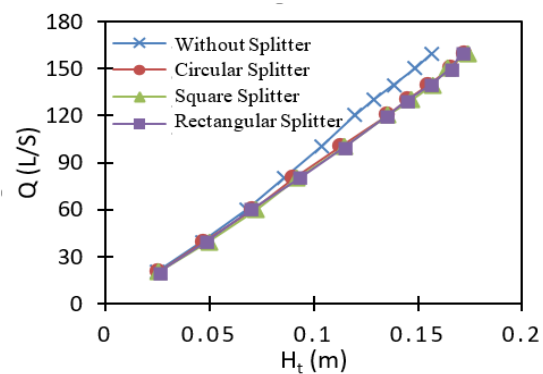


b

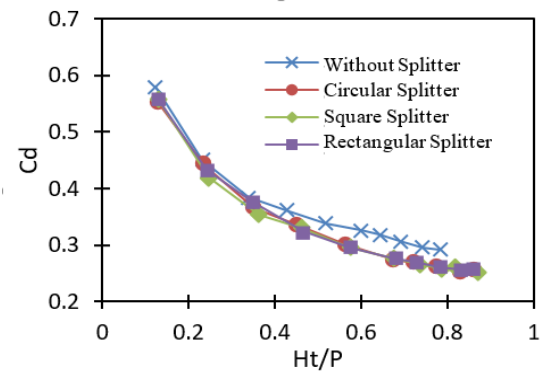
**Fig. 10** (a) discharge vs total head and (b) discharge coefficient against  $\frac{H_t}{P}$  for rectangular piano key weir with and without splitter

شکل ۱۰ (a) دی- بار کل و (b) ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$  در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با و بدون پایه های جداکننده

ایجاد پایه های جداکننده جریان است (شکل ۱۰- b). مشاهده های اولیه در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای با پایه های جداکننده نشان داد که عملکرد هواگیری سرریز به سه عملکرد نیمه چسبنده، هواگیری شده و انتقالی تغییر یافته است. بدین صورت که تا  $\frac{H_t}{P} < 0.2$ ، تیغه جریان تا حدودی در نصف طول دیوار جانبی سرریز، به صورت نیمه چسبنده و در نصف دیگر منتهی به پایه جداکننده، به صورت ریزشی و هواگیری شده عمل می کند (شکل ۱۱). پس از آن با افزایش بار و تا  $\frac{H_t}{P} < 0.6$ ، عملکرد هواگیری سرریز به صورت هواگیری شده است و از  $\frac{H_t}{P} < 0.6$ ، عملکرد انتقالی در هواگیری سرریز رخ می دهد. به این صورت که با هواگیری سرریز، افزایش بار و با تخلیه هوا، کاهش بار روی سرریز رخ می دهد. البته اختلاف این نوسان بار، حدود یک درصد از  $\frac{H_t}{P}$  است. اما این عملکرد نوسانی باعث تغییر پذیری های احتمالی فشار و



a



b

**Fig. 9** (a) discharge vs total head and (b) discharge coefficient vs  $\frac{H_t}{P}$  for triangular piano key weir with and without splitter

شکل ۹ (a) دی- بار کل و (b) ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$  در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با و بدون پایه های جداکننده

بالقوه حفره زایی و همچنین کاهش نوسان های فشار در پایین دست سرریز می شود.

در شکل (۱۰) مقایسه نمودار دی- بار کل و تغییر پذیری های ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$ ، در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با پایه های جداکننده و بدون پایه های جداکننده نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۱۰- a) مشاهده می شود که ایجاد پایه های جداکننده جریان در سرریز کلیدپیانویی موجب تغییر بار کل نشده است و این مورد، حسن ایجاد این پایه ها در این شکل از سرریز کلیدپیانویی است. زیرا افزون بر ایجاد جدادگی در جریان و ارتباط قسمت زیرین تیغه آب در پایین دست سرریز با سطح آزاد، عملکرد منفی بر آبگذری نیز ندارد. تغییر پذیری های بسیار جزئی در ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با پایه نسبت به بدون پایه، به دلیل کمتر شدن طول موثر سرریز به سبب

بار کل، و تغییرپذیری‌های ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$  در سرریز با پایه و بدون پایه‌های جداکننده جریان در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

در زمینه سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با پایه‌های جداکننده پس از  $\frac{H_t}{P} < 0.4$ ، سرریز با وجود پایه‌ها به صورت هواگیری شده عمل می‌کند و افزایش اندک بار کل گواهِ آن است. اما پس از  $\frac{H_t}{P} < 0.6$ ، به دلیل هواگیری ناقص، نوسان بار آب نیز رخ می‌دهد که با توجه به شکل (۱۲-ا)، اختلاف بار کل در پایه‌های جداکننده به دلیل هواگیری ناقص و نبود زمینه جداشدگی جریان به صورت مطلوب، است. با توجه به شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود که در سرریز دوزنقه‌ای مانند سرریز مستطیلی، ایجاد پایه‌ها افزون بر اینکه سبب جداشدگی جریان می‌شود تاثیری بر ضریب آبگذری سرریز ندارد. نبود تاثیر بر ضریب آبگذری به دلیل نبود افزایش بار جریان پس از قرار دادن پایه‌ها است.

شکل (۱۳) پایه‌های مختلف جداکننده جریان را بر روی سرریز کلیدپیانویی نشان می‌دهد.

برابر با شکل (۱۳-ا) جریان آب، پایه دایره‌ای را دور زده و موجب کاهش سطح ارتباط هوای زیر کلیدهای ورودی (دهانه خروجی) سرریز با هوای آزاد می‌شود. اما این وضعیت در پایه مربعی (شکل ۱۳-ب) و مستطیلی (شکل ۱۳-ج) این چنین نیست و پایه‌ها باعث جداشدگی بیشتر جریان آب می‌شوند. به طور کلی با مقایسه‌ی نمودارهای دبی-بار کل مشاهده می‌شود که در  $\frac{H_t}{P} < 0.4$ ، سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در دبی ثابت، بار کمتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای (به‌طور میانگین در حدود ۵ درصد)، و نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی به‌طور میانگین در حدود ۱۵ درصد دارد. عمده دلیل آن نبود هواگیری در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی مانند آنچه برای سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای رخ می‌دهد، است. اما در حالت  $\frac{H_t}{P} > 0.4$ ، سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در یک دبی ثابت، بار کمتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در حدود ۵ درصد و نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی به‌طور میانگین در حدود ۸ درصد را از خود نشان می‌دهد. عمده دلیل آن نسبت به

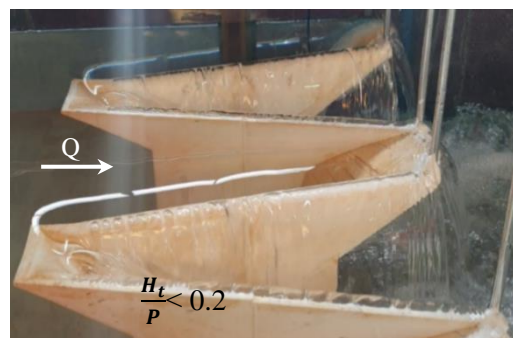


Fig. 11 Semi-sticky - ventilated performance in trapezoidal piano key weir at  $\frac{H_t}{P} < 0.2$

شکل ۱۱ عملکرد نیمه چسبنده - هواگیری شده در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در حالت  $\frac{H_t}{P} < 0.2$

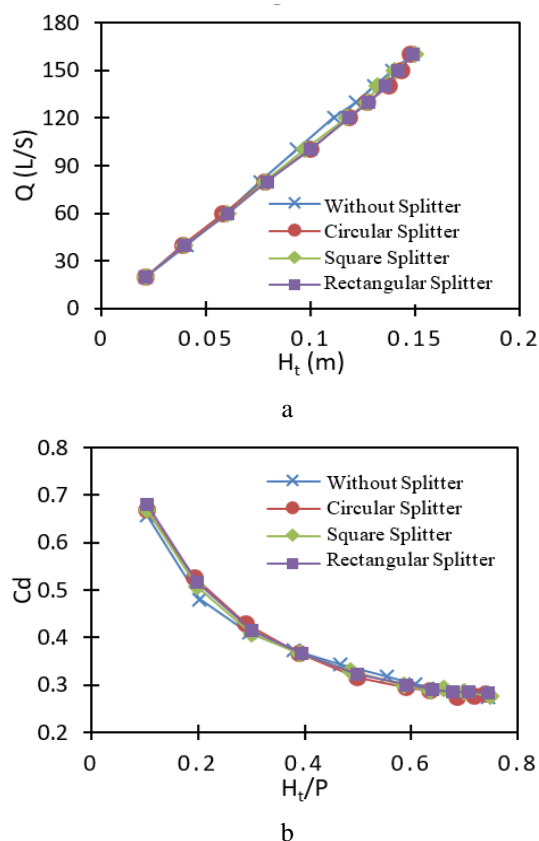


Fig. 12 (a) discharge vs total head and (b) discharge coefficient against  $\frac{H_t}{P}$  for trapezoidal piano key weir with and without splitter

شکل ۱۲ (a) دبی-بار کل و (b) ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$  در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با و بدون پایه‌های جداکننده در نتیجه افزایش ایجاد نوسان تیغه آب در سرریز می‌شود. به منظور بررسی عملکرد پایه‌های جداکننده در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل در طرح، مقایسه نمودار دبی-

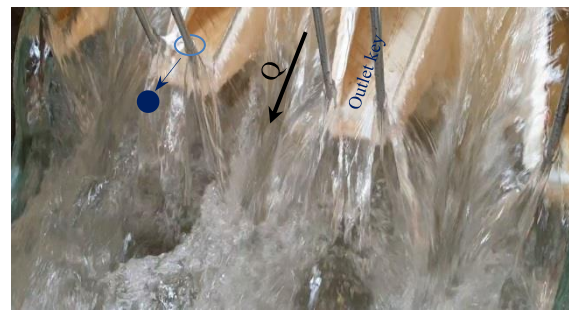
نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی بیشتر است که این به دلیل مکش بیشتر جریان (به دلیل خلا ایجاد شده در زیر کلیدورودی سرریز)، در این بار برای این دو سرریز است. با افزایش  $\frac{H_t}{p}$  تا حدود ۰/۴، به تدریج از اختلاف ضریب آبگذری سرریز مستطیلی و دوزنقه ای نسبت به مثلثی کاسته می شود تا جایی که پس از  $\frac{H_t}{p} < ۰/۴$  ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مثلثی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای و مستطیلی، افزایش پیدا کرده است که از عمده دلیل آن، می توان به عملکرد هواگیری این نوع سرریز اشاره کرد.

برای مقایسه اثرگذاری هندسه پایه های جداکننده جریان، تغییرپذیری های ضریب آبگذری در برابر  $\frac{H_t}{p}$  برای هر یک از پایه های جداکننده در شکل (۱۴) آورده شده است. با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می شود که به طور کلی هندسه پایه های جداکننده جریان، تفاوت زیادی بر ضریب آبگذری ندارند. تفاوت اندک هندسه پایه ها از  $\frac{H_t}{p} < ۰/۴$  آشکار می شود، به دلیل افزایش بار و سرعت جریان، جداسدگی در پایه ها کمی متفاوت می شود و این تفاوت در نوع جداسدگی جریان در پایه ها است.

### ۵- نتیجه گیری

این پژوهش به منظور بهبود عملکرد هواگیری در پایین دست سرریز کلیدپیانویی، به بررسی اثرگذاری های پایه های جداکننده جریان با مقطع های مختلف دایره ای، مربعی و مستطیلی بر روی آبگذری این نوع سرریز با سه شکل مستطیلی، مثلثی و دوزنقه ای در طرح پرداخته است. به طور کلی می توان نتایج به دست آمده در این تحقیق را به صورت زیر خلاصه نمود:

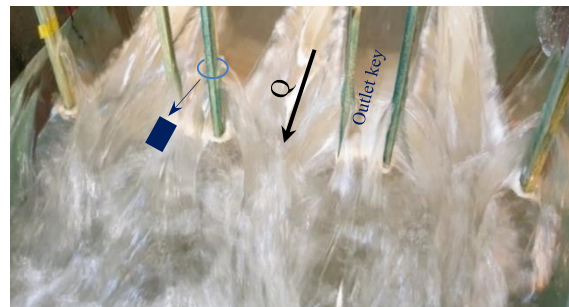
- در حالت  $\frac{H_t}{p} < ۰/۴$ ، سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در دبی ثابت، حدود ۵ و ۱۵ درصد، بار کمتری نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه ای و مثلثی دارد. اما در  $\frac{H_t}{p} > ۰/۴$ ، سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای در یک دبی ثابت، بار کمتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در حدود ۵ درصد و نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی به طور میانگین در حدود ۸ درصد را از خود نشان می دهد.



a



b



c

**Fig. 13** Trapezoidal weir for  $Q = 80$  L/s with splitter: (a) circular, (b) square and (c) rectangular

شکل ۱۳ سرریز دوزنقه ای در دبی ۸۰ لیتر بر ثانیه با پایه های جدا کننده جریان: (a) دایره ای، (b) مربعی و (c) مستطیلی

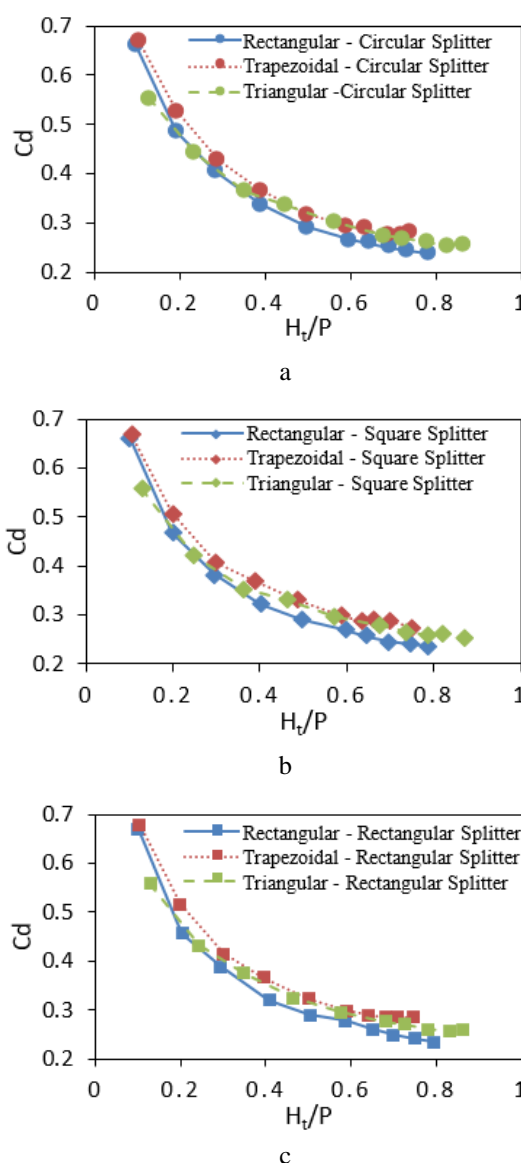
سرریز کلیدپیانویی مستطیلی بیشتر بودن نسبت  $\frac{W_i}{W_o}$  ارزیابی می شود و دلیل بهتر بودن آن نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی، عملکرد هواگیری این سرریز است. زیرا میزان هواگیری در سرریز دوزنقه ای نسبت به میزان هواگیری در سرریز مثلثی، به دلیل کمتر بودن زاویه ای بین دیوار جانبی سرریز با راستای جریان، کمتر است و تاثیر آن بر بار کل و آبگذری جریان نیز کمتر است. در زمینه مقایسه ضریب آبگذری این سه شکل سرریز (شکل های (b-۹)، (b-۱۰) و (b-۱۲)) در  $\frac{H_t}{p} < ۰/۲$  ضریب آبگذری در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه ای

و این جداشدگی منجر به ارتباط هوای محبوس شده زیرین جریان، با سطح آزاد در سرریز کلیدپیانویی می‌شود و سبب جلوگیری از تشدید نوسان تیغه آب می‌شود.

- پایه‌های جداکننده جریان در حالت  $\frac{H_t}{P} < 0.16$ ، بهترین عملکرد جداشدگی جریان را از خود نشان می‌دهند اما در حالت  $\frac{H_t}{P} < 0.16$ ، این عملکرد تحت تاثیر جریان زیاد آب قرار می‌گیرد تا جایی که با افزایش دبی، ارتباط قسمت زیرین جریان با هوای آزاد کاهش می‌یابد و نمی‌توان نسبت به ارتباط کامل هوای سطح آزاد با پایین‌دست و دهانه خروجی سرریز کلیدپیانویی اطمینان پیدا کرد.
- از نظر شکل هندسی، پایه‌های مربعی و مستطیلی در آبگذری و جداشدگی، عملکرد همانندی از خود نشان دادند. اما جداشدگی جریان در پایه مستطیلی نسبت به پایه مربعی بهتر ارزیابی می‌شود. همچنین هندسه این دو پایه برای جداشدگی جریان مناسب‌تر از هندسه دایره‌ای است.
- در سرریز کلیدپیانویی مثلثی ایجاد پایه‌های جداکننده جریان منجر به افزایش بار بالادست سرریز نسبت به حالت بدون پایه در حدود ۱۰ درصد می‌شود.

### ۶- فهرست نشانه‌ها

$g$	نیروی گرانش ( $m \cdot s^{-2}$ )
$P$	ارتفاع سرریز (m)
$L$	طول سرریز (m)
$W$	عرض آبراهه (m)
$W_i$	عرض کلیدهای ورودی (m)
$W_0$	عرض کلیدهای خروجی (m)
$S_i$	شیب صفحه شیبدار کلیدهای ورودی (deg)
$S_0$	شیب صفحه شیبدار کلیدهای خروجی (deg)
$B$	طول دیوار جانبی سرریز (m)
$B_b$	طول جانبی سرریز بدون بیرون زدگی (m)
$B_i$	طول بیرون زدگی کلیدهای ورودی سرریز (m)
$B_0$	طول بیرون زدگی کلیدهای خروجی سرریز (m)



**Fig. 14** Discharge coefficient vs  $\frac{H_t}{P}$  for different shapes of piano key weir with splitter: (a) circular, (b) square and (c) rectangular

شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های ضریب آبگذری بر حسب  $\frac{H_t}{P}$  برای شکل‌های مختلف سرریز کلیدپیانویی با پایه‌های جداکننده جریان: (a) دایره‌ای، (b) مربعی و (c) مستطیلی

- در حالت  $\frac{H_t}{P} < 0.2$ ، ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای نسبت به سرریز کلیدپیانویی مثلثی بیشتر است.
- از برتری‌های پایه‌های جداکننده جریان، عدم تاثیر منفی بر آبگذری در سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای است.
- پایه‌های جداکننده جریان باعث جداشدگی جریان شده

Laugier, F. (2007). Design and construction of the first Piano Key Weir spillway at Goulours dam. *Int. Hydropower and Dams*, 14(5), 94-101.

Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. and Boillat, J.L. (2009). Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. *Hydropower and Dams*, 16(5), 100-107.

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

Paxson, G., Tullis, B. and Hertel, D. (2013). Comparison of Piano Key Weirs with labyrinth and gated spillways: Hydraulics, cost, constructability and operations. *Labyrinth and Piano Key Weirs II - PKW 2013*, pp. 123-130.

Safarzadeh, A. and Noroozi, B. (2017). 3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 15(1), 89-101.

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, <https://doi.org/10.3390/w13152108>.

Vermeulen, J., Lassus, C. and Pinchard, T. (2017). Design of a Piano Key Weir aeration network. In: *Labyrinth and piano key weirs III-PKW 2017*, Erpicum, S., Laugier, F., Khanh, M.H.T. and Pfister, M. (Eds.), CRC Press, pp. 127-133.

$T_s$  ضخامت سرریز (m)

$N$  شمار چرخه‌های سرریز

$\alpha$  زاویه‌ی بین دیوار جانبی سرریز با راستای جریان (deg)

$Q$  دبی عبوری از سرریز ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

$C_d$  ضریب آبگذری سرریز

$H$  عمق جریان در بالادست سرریز (m)

$H_t$  بار کل (m)

$sh_w$  شکل سرریز در طرح

$sh_p$  شکل پایه‌های جداکننده جریان

## ۷- منابع‌ها

Anderson, A.A. (2014). Causes and countermeasures for nappe oscillation: An experimental approach, Master Thesis, Utah State University.

Anderson, R.M. and Tullis, B.P. (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3), 246-253.

Blancher, B., Montarros, F. and Laugier, F. (2011). Hydraulic comparison between Piano Key Weirs and labyrinth spillways. In: *Proc. Int. Conf. in Labyrinth and Piano Key Weirs*, CRC Press, pp. 141-150.

Casperson, L.W. (1993). Fluttering Fountains, *J. Sound Vib.*, 162(2), 251-262.

Cicero, G. and Delisle, J. (2014). Effects of the crest shape on the discharge efficiency of a type A Piano Key weir, In: *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G.-M. and Schleiss, A.J. (eds.), CRC Press/Balkema, CRC Press/Balkema, pp. 41-48.

Ehsanifar, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M. (2021). Numerical study of the effect of separating piers on the flow through the rectangular piano key weir. *Proceeding of 20th Iranian Hydraulic Conference*, Gorgan, Iran.

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