

The Effect of Different Numbers of Flow Splitters on Energy Loss in a Piano Key Weir

S. Poursakhi¹, A. Khoshfetrat²

Extended Abstract

Introduction:

Piano key weirs have rectangular, triangular, and trapezoidal shapes in terms of plan and are presented in four types A, B, C, and D. Piano key weirs are the evolution of nonlinear weirs with high efficiency; therefore, it is essential to study the flow energy loss and the methods to increase it. In the present study the first time, various numbers of flow splitters were used in the trapezoidal piano key weir of type B to increase the flow energy loss. Also, two weirs with heights of 0.20 and 0.18 m were used. The flow splitters were cylindrical and are six, four, and two in each cycle.

Methods:

The experiments were conducted in a channel with 10 m length, 0.8 m width, and 1 m height. The slope of the channel was zero. Water temperature varied between 8 and 13°C. The flow was recharged into the tank by a pump, a 10,000 m³ underground tank, and a monitor. The pump had 0.01% error. Because the velocity profiles coincided at 3.5, 0.4, and 4.5 m from the beginning of the channel coincide, a weir was installed at a distance of 5.5 m from the start of the channel. The flow rates varied between 0.02 and 0.05 m³/s. Three ultrasonic sensors were used to measure the flow depth. The first sensor was installed at a distance of $2P$ upstream of the weir relative to its center, and the second sensor was positioned $8P$ downstream of the weir to record the flow depth. Two type B trapezoidal piano key weirs were used with constant geometry but different heights of 0.20 and 0.18 m. The width of the weir inlet keys (W_i) and outlet keys (W_o) was 0.215 m and 0.075 m respectively. The length of the weir side walls (B^*) and the length of the upstream overhanging edges of the weirs (B_i) was 0.40 m and 0.15 m, respectively. The length of the weir crest (L) was 3.27 m, and the thickness of the weir (T_s) was 0.01 m.

Results:

The flow splitters act as a barrier and divert the upstream flow; increasing the water level upstream of the weir. The splitters also divide the water flow and enhance aeration at the inlet keys. By the results of this research, as the number of blades increased, the water flow became more distributed and more aeration occurred at the keys. In the last row of blades (downstream of the weir), the degree of flow separation was more significant. In the weir with a greater height, the energy loss was higher and mixing of the flow near the weir toe was more intense; therefore, the flow was transferred downstream with a slower velocity. For weirs without flow splitters, the discharge coefficient in the 0.20 m high weir was obtained about 5.60% lower than that of the 0.18 m high weir. Also, the discharge coefficient in the weir with six, four, and two flow splitters per cycle was about 6.80, 1.97, and 0.50% lower, respectively, compared with the 0.20 m height weir without blades. In the weir with a height of 0.20 m compared to the weir with a height of 0.18 m, both without flow splitters, the flow energy loss was reduced by about 8.52%. Also, in weirs with a height of 0.20 meters with six, four, and two flow

¹ MSc student, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

* Corresponding Author: ali.khoshfetrat@iau.ir

Received: 2025/04/13

Accepted: 2025/06/27

splitters, the flow energy loss was about 5.06, 3.07, and 1.45 percent higher, respectively, comparing the weirs with the same height and without flow splitters.

Conclusion:

Investigation of flow energy loss in piano key weirs is of interest and importance due to their high efficiency in the flow passage. In the present study, flow energy loss was researched in a trapezoidal piano key weir type B, with and without varying numbers of flow splitters. Dimensional analysis was also used to extend the results to other weirs and different types of piano key weirs in channels. The key findings of the current study are as follows: (1) Increasing the number of flow splitters (thereby reducing the effective length of the weir crest) led to a decrease in the discharge coefficient and increase in the flow energy loss. (2) Increasing the height of the weir resulted in a higher discharge coefficient, and reduced the flow energy loss. (3) The presence of splitters shifted the flow farther from the weir toe and reduced the specific energy downstream. (4) Increasing values of H_u/P and L_e/P , the flow energy loss decreased. (5) A relationship was developed to calculate the flow energy loss with a correlation coefficient of 99.91%.

Keywords: Weir height, Relative energy, Trapezoidal, Discharge coefficient, Type B.

Citation: Poursakhi, S. and Khoshfetrat, A., 2025. The Effect of Different Numbers of Flow Splitters on Energy Loss in a Piano Key Weir. *Iranian Water Research Journal*. 57(2). Pp. 79-90. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15174.2676>.



تأثیر تعداد متفاوت تیغه‌های جداکننده جریان بر اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی

ساناز پورسخی^۱، علی خوش فطرت^{۲*}

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی جزو سرریزهای غیر خطی و تکامل‌یافته‌ی سرریزهای منقاری هستند. با توجه به راندمان بالا در این سرریزها، بررسی اتلاف انرژی جریان و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش به بررسی تأثیر تعداد تیغه‌های جداکننده جریان بر اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B پرداخته است. در این مطالعه، دو ارتفاع سرریز ۰/۲۰ و ۰/۱۸ متری ارزیابی شدند. تیغه‌های جداکننده جریان استوانه‌ای به صورت شش تایی، چهارتایی و دوتایی روی هر سیکل تاج سرریز، نصب شدند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد تیغه‌های جداکننده جریان در کلیدهای ورودی سرریز، باعث افزایش اتلاف انرژی جریان می‌شود. به‌طور مثال، در سرریزهای با ارتفاع ۰/۲۰ متری همراه با تیغه‌های جداکننده جریان شش تایی، چهارتایی و دوتایی در هر سیکل سرریز، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز با همین ارتفاع و بدون تیغه‌ی جداکننده جریان، حدود ۵/۰۶، ۳/۰۷ و ۱/۴۵ درصد بیشتر است. با افزایش ۱۱۱ درصدی ارتفاع سرریز، اتلاف انرژی حدود ۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد تیغه‌های جداکننده جریان، ضریب دبی کاهش می‌یابد. تیغه‌های جداکننده جریان باعث افزایش فاصله‌ی ریزش جریان به پایین‌دست سرریز می‌شوند. در نهایت از آنالیز ابعادی جهت بسط نتایج به سرریزهای کلیدپیانویی با طول تاج موثر متفاوت استفاده شد.

کلمات کلیدی: ارتفاع سرریز، انرژی نسبی، کلیدپیانویی، ضریب آب‌گذری.

ارجاع: پورسخی، س. و خوش فطرت، ع.، ۱۴۰۴. تأثیر تعداد متفاوت تیغه‌های جداکننده جریان بر اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۷(۲). صص ۷۹-۹۰. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15174.2676>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iaui.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

مقدمه

سرریزهای کلیدپیانویی از لحاظ پلان دارای شکل‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای هستند و در چهار تیپ A، B، C و D ارائه می‌شوند. سرریز نوع A دارای لبه‌ی آویزان در بالادست و پایین‌دست، سرریز نوع B دارای لبه‌ی آویزان در بالادست، سرریز نوع C دارای لبه‌ی آویزان در پایین‌دست و سرریز نوع D فاقد لبه‌ی آویزان است (Bodaghi et al. 2024). سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان یکی از انواع سرریزهای غیر خطی و با تاج طولانی هستند که در یک عرض معین، ظرفیت بیشتری (۳ تا ۴ برابر بیشتر) از جریان را از روی خود عبور می‌دهند (Safarzadeh and Noroozi, 2014). اولین سرریز کلیدپیانویی روی کانال جانبی سد Goulours در کشور فرانسه ساخته شد (Crookston et al. 2019). سرریزهای کلیدپیانویی به دلیل پی و فونداسیون سبک علاوه بر سدها در کانال‌های کشاورزی، کانال‌های زهکشی و کانال‌های آبیاری جای می‌گیرند (Fathi et al. 2025). به دلیل ظرفیت بالای عبور جریان در این سرریزها بررسی اتلاف انرژی و راهکارهایی برای افزایش آن از دیدگاه مهندسی، دارای اهمیت است. برخی از محققان تأثیر سرعت و دبی جریان و برخی دیگر تأثیر سازه‌های اضافی و عوامل هندسی را روی اتلاف انرژی جریان بررسی کرده‌اند. افرادی مانند (Pfister, Khanh et al. 2011), (Torabi et al. 2017), (Pinto et al. 2017) و (et al. 2017) جزو اولین افرادی بودند که به عوامل هیدرولیکی جریان و تأثیر آن بر اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی پرداختند. (Al-Shukur and Al-Khafaji 2018) تأثیر شیب‌های مختلف کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی نوع B را بر اتلاف انرژی بررسی کردند. ایشان دریافتند که با افزایش شیب کلیدهای خروجی، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. Karimi et al. (2018) به بررسی اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی و همچنین افزایش راندمان هوادهی پرداختند. Karimi et al. (2020) یک مطالعه تجربی و عددی را برای بررسی ویژگی‌های جریان یک سرریز کلیدپیانویی با کلیدهای مورب انجام داد. (Eslinger and Crookston 2020) با بررسی تجربی به اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی نوع A پرداختند. ایشان همچنین دو رابطه تجربی نسبت به آنالیز ابعادی ارائه کردند که در آن‌ها از دو نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی و نسبت هد کل جریان به ارتفاع سرریز استفاده کردند.

(Singh and Kumar 2022) در یک مطالعه تجربی به بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی پله‌ای پرداختند. ایشان دریافتند که وجود پله باعث افزایش اتلاف انرژی می‌گردد. (Ehsanifar et al. 2023) به بررسی اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی با هندسه متفاوت تیغه‌های جداکننده جریان پرداختند و بیان کردند که وجود تیغه‌ها باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود. همچنین (Singh and Kumar 2023) و (Bansal et al. 2023) در تحقیقی جداگانه به بررسی اتلاف انرژی و روش‌هایی برای افزایش آن در سرریزهای کلیدپیانویی پرداختند. ایشان همچنین با توجه به آنالیز ابعادی، تأثیر نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی سرریزهای کلیدپیانویی نوع A را روی اتلاف انرژی جریان بررسی و دو معادله تجربی با ضریب همبستگی بالا ارائه کردند. Shen and Oertel (2021, 2023) تأثیر شکل‌های مختلف تاج سرریز و تغییرات عرض کلیدهای سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی را بر اتلاف انرژی جریان بررسی کردند. Rdhaiwi et al. (2024) با مقایسه سرریزهای کلیدپیانویی نوع B و C دریافتند که اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی نوع C بیشتر از نوع B است. آنها دلیل بیشتر بودن اتلاف انرژی جریان را وجود لبه‌ی آویزان در پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی نوع C دانستند. (Fathi et al. 2023, 2024) با ایجاد پله در کلیدهای خروجی سرریز دریافتند که اتلاف انرژی جریان در سرریزهای ده پله‌ای بیشتر از سرریزهای بدون پله، پنج و پانزده پله‌ای است. (Abdi Chooplou et al. 2024) با ایجاد بافل در کلیدهای سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که اتلاف انرژی در این حالت بسیار بیشتر از سرریزهای بدون بافل است. (Mirkhorli et al. 2025) به بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی نوع D پرداختند. ایشان بهترین اتلاف انرژی را در نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی (W_i/W_o) برابر ۰/۶ و تعداد سه پله در کلیدهای خروجی مشاهده کردند. سرریزهای کلیدپیانویی تکامل‌یافته‌ی سرریزهای غیر خطی و با راندمانی بالا هستند؛ بنابراین مطالعه اتلاف انرژی جریان و ارائه راهکارهایی برای افزایش آن دارای اهمیت ویژه‌ای است. همانطور که گفته شد (Ehsanifar et al. 2023) هندسه متفاوت تیغه‌ها و تأثیر آن‌ها بر اتلاف انرژی را بررسی کردند بنابراین در تحقیق حاضر برای اولین بار از تعداد مختلف

قطر تیغه‌های جداکننده جریان، L طول تاج سرریز، n تعداد تیغه‌های جداکننده جریان در یک سیکل سرریز و عدد ۳ نشانگر تعداد سیکل‌های سرریز است. با توجه به ثابت بودن مقدار نیروی گرانش در پارامترهای هد کل جریان و اتلاف انرژی، این عامل به طور مستقیم در تحلیل ابعادی در نظر گرفته نشده است (Fathi et al. 2023).

$$E_L = f(H_u, P, V_1, \mu, \sigma, \rho, L_e) \quad (1)$$

$$E_L = (E_1 - E_2)/E_1 \quad (2)$$

$$E_1 = P + h + (V_1^2/2g) = P + H_u \quad (3)$$

$$E_2 = y + V_2^2/2g \quad (4)$$

$$L_e = L - 3dn \quad (5)$$

با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری هد کل جریان، سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز و چگالی جریان و با استفاده از تئوری π باکینگهام، اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی همراه با تیغه‌های جداکننده جریان، تابع رابطه (۶) خواهد بود. در این رابطه Re ، عدد رینولدز جریان است که از رابطه (۷) و We عدد وبر است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند.

$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, \frac{L_e}{P}, We, Re\right) \quad (6)$$

$$Re = V_1 \rho H_u / \mu \quad (7)$$

$$We = V_1^2 \rho H_u / \sigma \quad (8)$$

به دلیل اغتشاش زیاد جریان و عدد رینولدز بیشتر از ۲۰۰۰ در تحقیق حاضر از عدد رینولدز و به دلیل عمق کافی جریان در بالادست سرریز (بیشتر از ۰/۳ متر) از عدد وبر صرف نظر خواهد شد (Fathi et al. 2025). بنابراین، اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B همراه با تیغه‌های جداکننده جریان تابع رابطه (۹) خواهد بود.

$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, \frac{L_e}{P}\right) \quad (9)$$

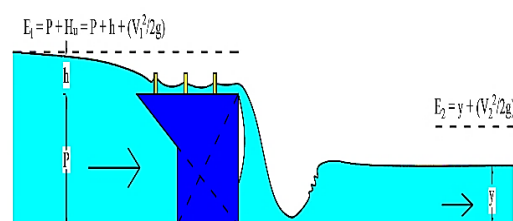
آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) و در یک کانال به طول ۱۰، عرض ۰/۸ و ارتفاع یک متر انجام شد. شیب افقی کانال صفر است. همچنین دمای آب بین ۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد متغیر است. جریان توسط یک پمپ و مخزن زیرزمینی به حجم ۱۰ هزار متر مکعب و توسط یک مانیتور وارد مخزن می‌شد. پمپ دارای خطای ۰/۱ درصد است. پروفیل‌های سرعت در فاصله ۳/۵، ۴/۰ و ۴/۵ متری از ابتدای کانال برداشت شدند. پروفیل‌ها در فاصله‌های ذکر شده، بر هم منطبق بودند و به همین دلیل سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب گردید

تیغه‌های جداکننده جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B برای افزایش اتلاف انرژی جریان استفاده شد. تیغه‌های جداکننده جریان استوانه‌ای و به صورت شش‌تایی، چهارتایی و دوتایی در هر سیکل هستند. از ۴ دبی متفاوت از ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه نیز استفاده گردید. این تحقیق با فرض‌هایی مانند دائمی بودن جریان و واحد بودن ضریب اصلاح سرعت انجام شده است. علاوه بر این، وجود آشغال و رسوبات در جریان‌های سیلابی و تأثیر آن‌ها بر عملکرد تیغه‌های جداکننده جریان از محدودیت‌های مطالعه حاضر محسوب می‌شود که انجام پژوهش‌های مستقل در این زمینه را ضروری می‌سازد. در ادامه نیز از آنالیز ابعادی برای بسط نتایج به کانال‌های زهکشی و کشاورزی موجود در طبیعت و دیگر سرریزهای کلیدپیانویی (مانند A، C و D) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

رابطه (۱) و شکل ۱، پارامترهای تأثیرگذار بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B همراه با تیغه‌های جداکننده جریان را نشان می‌دهند. در این رابطه، E_L اتلاف انرژی جریان، H_u هد کل جریان در بالادست سرریز، P ارتفاع سرریز، V_1 سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز، μ

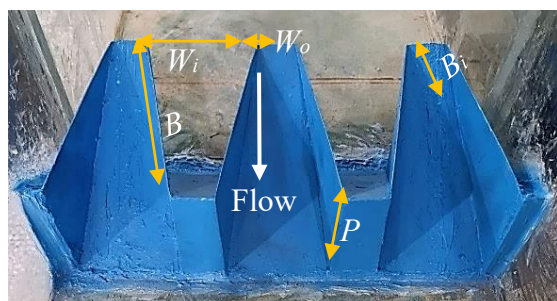


شکل ۱- پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی جریان در سرریز

کلیدپیانویی همراه با تیغه‌های جداکننده جریان

لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی و ρ چگالی جریان هستند. اتلاف انرژی جریان نیز از رابطه (۲) به دست می‌آید. با توجه به شکل (۱) و رابطه اتلاف انرژی جریان، E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، V_2 سرعت متوسط جریان در پایین‌دست سرریز، h عمق جریان در بالادست سرریز، y عمق جریان در پایین‌دست سرریز و g نیروی گرانش هستند. انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز از رابطه (۳) و انرژی مخصوص جریان در پایین‌دست سرریز از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در رابطه (۱)، L_e طول موثر سرریز است که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود و در آن d

شکل ۲-الف کانال آزمایشگاهی، شکل ۲-ب دستگاه PLC و شکل ۲-ج سنسورهای آلتراسونیک را نشان می‌دهند. از دو سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B با هندسه ثابت اما ارتفاع متفاوت ۰/۲۰ و ۰/۱۸ متر استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریزها (W_i) ۰/۲۱۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریزها (W_o) ۰/۰۷۵ متر، طول دیوارهای جانبی سرریزها (B^*) ۰/۴۰ متر، طول لبه‌های آویزان بالادست سرریزها (B_i) ۰/۱۵ متر، طول تاج سرریزها (L) ۳/۲۷ متر و ضخامت سرریزها (T_s) ۰/۰۱ متر است (شکل ۳). سرریزها دارای سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی هستند. هندسه سرریزها مطابق پژوهش (Babakhah and Khoshfetrat, 2024) نظر گرفته شد.



شکل ۳- سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B مورد استفاده در تحقیق حاضر

از تیغه‌های جداکننده جریان استوانه‌ای با ارتفاع ۰/۰۸ متر ($0.4P$) روی تاج سرریز و در لبه‌ی کلیدهای ورودی استفاده شد. قطر تیغه‌های جداکننده جریان برابر ضخامت سرریز (۰/۰۱ متر) است. ارتفاع تیغه‌های جداکننده جریان به گونه‌ای انتخاب شد که در بیشترین دبی (۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه) مستغرق نشوند. جنس تیغه‌ها آهنی است و با چسب ضدآب در تاج سرریز نصب شدند. تیغه‌های جداکننده جریان به صورت شش‌تایی، چهارتایی و دوتایی در هر سیکل نصب شدند.

مشخصات هندسی تیغه‌ها مطابق (Fathi et al., 2025) در نظر گرفته شد. فاصله بین تیغه‌ها ۰/۰۹۲۵ متر است. همانطور که گفته شد طول تاج سرریز برابر ۳/۲۷ متر است و تیغه‌های جداکننده جریان باعث کاهش طول تاج سرریز می‌شوند. طول مؤثر تاج سرریز (L_e) در حالت تیغه‌های جداکننده جریان شش‌تایی، چهارتایی و دوتایی در هر سیکل به ترتیب برابر ۳/۰۹، ۳/۱۵ و ۳/۲۱ متر است. لازم به ذکر است که تیغه‌های جداکننده جریان در سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متر نصب و بررسی شدند. شکل ۴، سرریز همراه با تیغه‌های جداکننده چهارتایی

(Babakhah and Khoshfetrat, 2024). از ۴ دبی متفاوت در آزمایش‌ها استفاده شد. دبی‌ها توسط دستگاه Programmable logic controller device (PLC) و استفاده از مانیتور قابل تنظیم بوده و بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه متغیر هستند. از سه سنسور آلتراسونیک برای اندازه‌گیری عمق جریان استفاده شد. سنسور اول در فاصله $2P$ در بالادست سرریز نسبت به مرکز آن و سنسور دوم در فاصله $8P$ در پایین‌دست سرریز نسبت به مرکز آن عمق جریان را برداشت می‌کنند (Singh and Kumar, 2022). سنسور سوم عمق جریان را روی تاج سرریز اندازه‌گیری می‌کند. به منظور نادیده گرفتن اثر ضریب کشش سطحی، در تمام آزمایش‌ها عمق جریان روی تاج سرریز همواره بیش از ۰/۰۳ متر حفظ شد (Fathi et al., 2025). عمق جریان نیز توسط عمق‌سنج نقطه‌ای با خطای ۰/۰۰۰۱ متر اندازه‌گیری شد. عمق جریان اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و عمق‌سنج نقطه‌ای با خطای ناچیزی برابر است. جریان در پایین‌دست سرریز به صورت آزادانه و بدون استفاده از دریچه انتهایی کانال به داخل مخزن برمی‌گردد. (Fathi et al., 2023) به بررسی تأثیر پرش هیدرولیکی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع A بر اتلاف انرژی جریان پرداختند. ایشان تأثیر پرش هیدرولیکی بر اتلاف انرژی جریان را حدود ۳ درصد و بسیار ناچیز در نظر گرفتند. به همین دلیل عمق جریان در پایین‌دست سرریز بعد از پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد.



(الف)



(ب)



شکل ۲- (الف) کانال آزمایشگاهی، (ب) دستگاه PLC و (ج) سنسورهای آلتراسونیک

همراه با تیغه‌های جداکننده جریان را نشان می‌دهد که در آن C_d ضریب آبگذری و E_r انرژی نسبی جریان هستند. ضریب آبگذری از رابطه عمومی سرریزها و انرژی نسبی جریان از تقسیم انرژی مخصوص در پایین‌دست سرریز به انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز محاسبه می‌شود (Fathi et al. 2023). همانطور که از جدول پیدا است، در نهایت از ۲۰ آزمایش برای اتلاف انرژی جریان در شرایط متفاوت هیدرولیکی و هندسی استفاده شد.



شکل ۴- سرریز کلیدپیاونویی با تیغه‌های جداکننده جریان چهارتایی در هر سیکل

در هر سیکل را نشان می‌دهد. پس از بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای با شش تیغه‌ی جداکننده جریان در هر سیکل، تیغه‌های جداکننده جریان وسط، حذف شده و سرریز به‌صورت چهارتایی و سپس تیغه‌های انتهایی موجود در بالادست سرریز حذف شده و سرریز به‌صورت تیغه‌های جداکننده جریان دوتایی در هر سیکل تبدیل می‌شود.

با تنظیم دبی جریان توسط دستگاه PLC، با داشتن عمق جریان در بالادست سرریز و با توجه به عرض ثابت کانال و همچنین با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان سرعت جریان در بالادست سرریز را محاسبه نمود. در این رابطه Q دبی جریان و W عرض کانال و یا عرض سرریز است. همچنین با استفاده از معادله پیوستگی و با داشتن عمق جریان در پایین‌دست سرریز، می‌توان سرعت جریان در پایین‌دست سرریز را محاسبه کرد (Khoshfetrat et al. 2025; Rdhaiwi et al. 2023).

$$Q = V_1 W h \quad (10)$$

جدول ۱ پارامترهای هیدرولیکی و اتلاف انرژی جریان در سرریز

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی و هندسی موثر بر اتلاف انرژی جریان

Row	$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$	H_u/P	L_e/P	$Re = V_1 \rho H_u / \mu$	$C_d = 1.5Q / (\sqrt{2g} L_e H_u^{1.5})$	$E_r = E_2/E_1$	$E_L = (E_1 - E_2)/E_1$
۱	۰/۰۲	۰/۱۶۳	۱۶/۳۵۰	۳۵۱۲	۰/۳۶۳	۰/۳۶۵	۰/۶۳۵
۲	۰/۰۳	۰/۱۹۶	۱۶/۳۵۰	۶۱۸۶	۰/۴۱۲	۰/۴۰۳	۰/۵۹۷
۳	۰/۰۴	۰/۲۴۱	۱۶/۳۵۰	۹۷۷۷	۰/۴۰۵	۰/۴۳۷	۰/۵۶۳
۴	۰/۰۵	۰/۳۰۰	۱۶/۳۵۰	۱۴۵۹۴	۰/۳۶۳	۰/۴۶۶	۰/۵۳۴
۵	۰/۰۲	۰/۱۶۳	۱۶/۰۵۰	۳۵۱۲	۰/۳۷۰	۰/۳۵۸	۰/۶۴۲
۶	۰/۰۳	۰/۲۰۱	۱۶/۰۵۰	۶۳۱۶	۰/۴۰۵	۰/۳۹۵	۰/۶۰۵
۷	۰/۰۴	۰/۲۴۵	۱۶/۰۵۰	۹۹۳۷	۰/۴۰۱	۰/۴۲۷	۰/۵۷۳
۸	۰/۰۵	۰/۳۰۵	۱۶/۰۵۰	۱۴۷۷۴	۰/۳۶۲	۰/۴۵۷	۰/۵۴۳
۹	۰/۰۲	۰/۱۶۸	۱۵/۷۵۰	۳۶۰۳	۰/۳۶۱	۰/۳۴۲	۰/۶۵۸
۱۰	۰/۰۳	۰/۲۰۶	۱۵/۷۵۰	۶۴۴۴	۰/۳۹۸	۰/۳۸۷	۰/۶۱۳
۱۱	۰/۰۴	۰/۲۵۰	۱۵/۷۵۰	۱۰۰۹۵	۰/۳۹۶	۰/۴۱۸	۰/۵۸۲
۱۲	۰/۰۵	۰/۳۱۰	۱۵/۷۵۰	۱۴۹۵۳	۰/۳۶۰	۰/۴۵۱	۰/۵۴۹
۱۳	۰/۰۲	۰/۱۷۸	۱۵/۴۵۰	۳۷۸۵	۰/۳۳۷	۰/۳۲۸	۰/۶۷۲
۱۴	۰/۰۳	۰/۲۱۶	۱۵/۴۵۰	۶۶۹۸	۰/۳۷۸	۰/۳۷۲	۰/۶۲۸
۱۵	۰/۰۴	۰/۲۶۰	۱۵/۴۵۰	۱۰۴۰۸	۰/۳۸۱	۰/۴۰۷	۰/۵۹۳
۱۶	۰/۰۵	۰/۳۲۴	۱۵/۴۵۰	۱۵۴۸۱	۰/۳۴۲	۰/۴۴۰	۰/۵۶۰
۱۷	۰/۰۲	۰/۱۷۶	۱۸/۱۶۷	۳۷۵۸	۰/۳۷۹	۰/۴۱۰	۰/۵۹۰
۱۸	۰/۰۳	۰/۲۰۹	۱۸/۱۶۷	۶۵۱۷	۰/۴۴۱	۰/۴۵۴	۰/۵۴۶
۱۹	۰/۰۴	۰/۲۵۳	۱۸/۱۶۷	۱۰۲۱۶	۰/۴۴۰	۰/۴۹۰	۰/۵۱۰
۲۰	۰/۰۵	۰/۳۲۶	۱۸/۱۶۷	۱۵۵۸۶	۰/۳۷۷	۰/۵۱۶	۰/۴۸۴

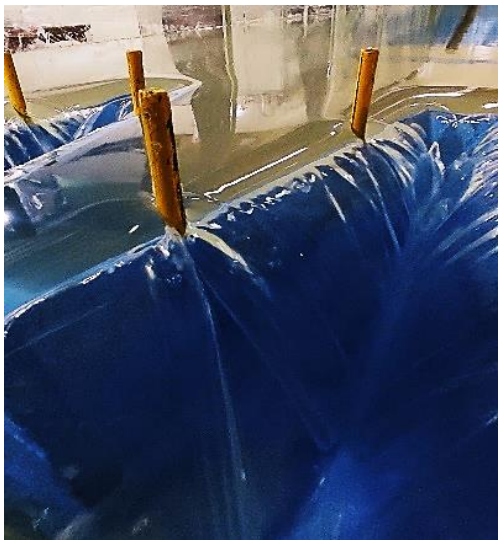
نتایج و بحث

جریان به صورت جت آزاد از روی کلیدهای ورودی سرریز به پایین دست و داخل کلیدهای خروجی می‌ریزد. همچنین به صورت جت شیدار از کلیدهای خروجی به پایین دست منتقل می‌شود. جریان عبوری از انتهای کلیدهای ورودی به دلیل عدم نبود لبه آویزان در پایین دست سرریز، در نزدیکی پنجه سرریز به پایین دست می‌ریزد. جریان در بالادست سرریز در نزدیکی کلیدهای خروجی همگرا شده و باعث ایجاد یک ناحیه استغراق موضعی در ابتدای کلیدهای خروجی می‌شود. جریان ریخته شده از کلیدهای ورودی به داخل کلیدهای خروجی باعث ایجاد گردابه‌های سطحی در کنار دیواره‌های کلیدهای خروجی می‌شود. قدرت دو گردابه کناری ضعیف بوده و به صورت سطحی وارد بستر پایین دست می‌شوند. یک گردابه پر قدرت نیز در وسط کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد که عامل اصلی آن ناحیه استغراق موضعی است. این گردابه با طول انتشار بیشتری در پایین دست پیشروی می‌کند.

تشکیل ناحیه هوای محبوس در زیر کلیدهای ورودی و نیمه ورودی موجب جدایی جریان شده و الگوی جریان به صورت جت آزاد در پایین دست مشاهده می‌شود. تیغه‌های جداکننده جریان مانند مانع عمل کرده و موجب بازگشت بخشی از جریان به سمت بالادست می‌شوند که این پدیده افزایش دبی جریان در ناحیه بالادست سرریز را در پی دارد. از سوی دیگر، این تیغه‌ها با تقسیم جریان، سبب اختلاط هوا با جریان ریزشی از کلیدهای ورودی شده و در نتیجه نقطه برخورد جریان با بستر در فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز شکل می‌گیرد. با افزایش تعداد تیغه‌ها، شکافته شدن جریان بیشتر شده و هوای بیشتری به زیر کلیدها وارد می‌شود. شکل ۵، شکافته شدن جریان در جلوی تیغه‌ها را نشان می‌دهد. در آخرین ردیف تیغه‌ها (پایین دست سرریز)، شکافته شدن جریان بیشتر است. همانطور که گفته شد، تیغه‌ها مانند مانع عمل می‌کنند و عمق جریان اندکی در پشت آن‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۶-الف، منحنی دبی-ارتفاع جریان (اِشِل) و شکل ۶-ب، ضریب دبی جریان در سرریز را نسبت به پارامتر بدون بعد L/P نشان می‌دهد. همانطور که پیدا است، با افزایش دبی جریان، هد کل جریان نیز افزایش می‌یابد. در سرریزهای همراه با تیغه‌های جداکننده جریان و با ارتفاع 0.20 متری، با کاهش طول مؤثر سرریز (وجود بیشتر تیغه‌های جداکننده جریان)، هد کل جریان

افزایش می‌یابد و همانطور که گفته شد تیغه‌ها جریان را به بالادست سوق می‌دهند و مانند مانعی در برابر جریان عمل می‌کنند.

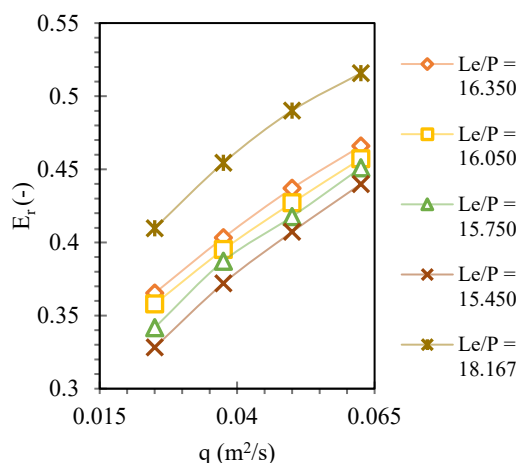


شکل ۵ - شکافته شدن جریان در جلوی تیغه‌های جداکننده جریان

با افزایش هد کل جریان، ضریب آبگذری نیز کاهش می‌یابد. همانطور که پیدا است، با کاهش ارتفاع سرریز و افزایش پارامتر بدون بعد L/P ، هد کل جریان کمتر شده و ضریب آبگذری جریان افزایش می‌یابد و یا به عبارت دیگر، با کاهش ارتفاع سرریز، جریان راحت‌تر از تاج سرریز عبور می‌کند و به همین دلیل ظرفیت عبور جریان افزایش می‌یابد. در سرریزهای بدون تیغه‌های جداکننده جریان، ضریب آبگذری در سرریز با ارتفاع 0.20 متری نسبت به سرریز با ارتفاع 0.18 متری، حدود $5/60$ درصد کمتر است. همچنین ضریب آبگذری در سرریز با تیغه‌های جداکننده جریان شش تایی، چهار تایی و دو تایی در هر سیکل نسبت به سرریز بدون تیغه با ارتفاع 0.20 متری، حدود $6/80$ ، $1/97$ و $0/50$ درصد کمتر است.

میانگین ضریب دبی در تحقیق Fathi et al. (2023) و Rdhaiwi et al. (2024) برابر 0.45 و 0.51 بدست آمده است. ایشان به ترتیب روی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A و C با ارتفاع 0.20 متر ضریب دبی را محاسبه کردند. میانگین ضریب دبی در سرریز دارای بیشترین طول مؤثر (بدون تیغه‌های جداکننده جریان) با ارتفاع 0.20 متر برابر 0.39 است. دلیل اختلاف زیاد بین ضریب دبی‌های دو تحقیق ذکر شده با تحقیق حاضر، متفاوت بودن طول مؤثر تاج در آن‌ها و شرایط مرزی متفاوت در سرریزها است.

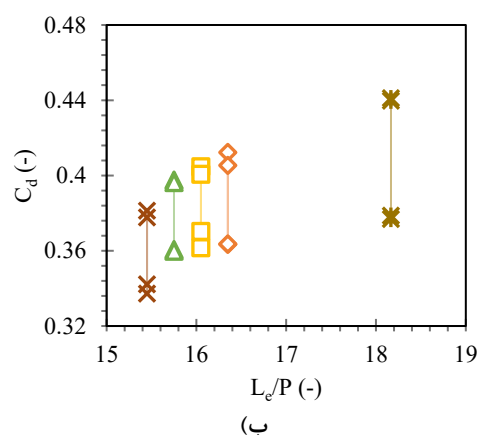
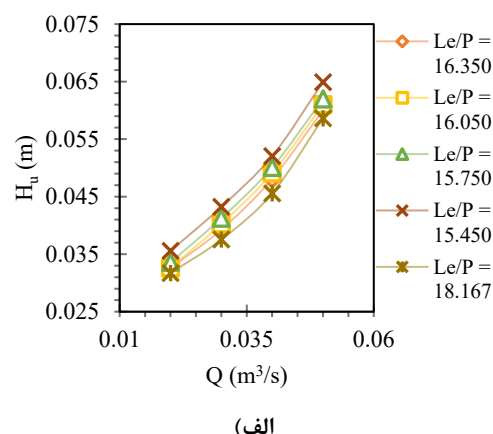
است با افزایش پارامتر هد کل جریان به ارتفاع سرریز، اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد و دلیل آن افزایش سرعت جت‌های خروجی از سرریز و افزایش اغتشاش جریان است. همچنین در سرریزهای با طول مؤثر کمتر (سرریزهای همراه با تیغه‌های جداکننده جریان)، اتلاف انرژی جریان بیشتر است.



شکل ۷- انرژی نسبی جریان نسبت به دبی در واحد عرض

دلیل آن کاهش سرعت جت‌های خروجی از کلیدهای ورودی و ایجاد اختلاط بیشتر جریان خروجی از کلیدهای ورودی با جریان خروجی از کلیدهای خروجی و در نهایت کاهش قدرت جت‌ها است. در سرریزهای با ارتفاع بیشتر، افزایش ارتفاع ریزش جریان و اختلاط شدیدتر در ناحیه مجاور پنجه سرریز منجر به اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. در نتیجه، جریان با سرعت کاهش یافته‌ای به پایین دست منتقل می‌شود. در سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متری نسبت به سرریز با ارتفاع ۰/۱۸ متری که هر دو بدون تیغه‌های جداکننده جریان هستند؛ اتلاف انرژی جریان حدود ۸/۵۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سرریزهای با ارتفاع ۰/۲۰ متری با تیغه‌های جداکننده جریان شش‌تایی، چهارتایی و دوتایی در هر سیکل سرریز، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز با همین ارتفاع و بدون تیغه‌ی جداکننده جریان، حدود ۵/۰۶، ۳/۰۷ و ۱/۴۵ درصد بیشتر است.

میانگین اتلاف انرژی جریان در تحقیق (Fathi et al. (2023) در سرریز کلیدپیاپویی ذوزنقه‌ای نوع A صفر، پنج، ده و پانزده پله‌ای به ترتیب برابر ۰/۵۰۲، ۰/۵۹۵، ۰/۶۷۱ و ۰/۶۱۷ است. در بهترین حالت تحقیق حاضر (یعنی سرریز همراه با تیغه‌های جداکننده جریان شش‌تایی در هر سیکل)، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز با سرریز صفر پله‌ای حدود ۱۸/۱۷ درصد بیشتر، نسبت به سرریز پنج پله‌ای حدود ۲/۹۲ درصد بیشتر، نسبت به سرریز ده پله‌ای حدود ۸/۵۵ درصد کمتر و نسبت به سرریز پانزده



شکل ۶- الف منحنی دبی - ارتفاع جریان و ب ضریب آبگذری نسبت به پارامتر بدون بعد L_e/P

شکل ۷، انرژی نسبی جریان (E_r) را نسبت به دبی در واحد عرض (q) نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش دبی در واحد عرض جریان، انرژی نسبی جریان نیز افزایش می‌یابد. انرژی نسبی جریان، نسبت انرژی مخصوص در پایین دست سرریز نسبت به انرژی مخصوص در بالادست سرریز را نشان می‌دهد. با افزایش دبی جریان در واحد عرض، انرژی مخصوص جریان در ناحیه بالادست افزایش می‌یابد. این افزایش دبی همچنین منجر به رشد سرعت جریان شده و در نتیجه، انرژی مخصوص در پایین دست سرریز با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. این مکانیزم در نهایت باعث ایجاد انرژی نسبی بالاتر در سیستم می‌گردد. در سرریزهای مجهز به تعداد بیشتر تیغه‌های جداکننده جریان، انرژی نسبی جریان کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش انرژی مخصوص جریان در پایین دست است. این پدیده منجر به کاهش سرعت‌های مخرب در ناحیه پایین دست می‌شود. همچنین با کاهش ارتفاع سرریز، جریان به راحتی انرژی مخرب خود را از دست نمی‌دهد و در پایین دست مقدار بیشتری دارد.

شکل ۸- الف، تأثیر پارامتر H_u/P و شکل ۸- ب، تأثیر پارامتر L_e/P را بر اتلاف انرژی جریان نشان می‌دهند. همانطور که پیدا

دیگر سرریزهای موجود در کانال‌ها بسط داد، از آنالیز ابعادی استفاده شد.

یافته‌های کلیدی این پژوهش:

- با افزایش تعداد تیغه‌های جداکننده جریان (کاهش طول مؤثر تاج سرریز)، ضریب آبگذری جریان کاهش می‌یابد.
- با افزایش تعداد تیغه‌های جداکننده جریان (کاهش طول مؤثر تاج سرریز)، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد.
- با افزایش ۱/۱۱ برابری ارتفاع سرریز، ضریب آبگذری جریان افزایش پیدا کرده و اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.
- وجود تیغه‌های جداکننده باعث انتقال جریان به فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز و کاهش انرژی مخصوص در پایین‌دست می‌شود.
- با افزایش H_u/P و L_e/P ، اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) به خاطر در اختیار قرار دادن آزمایشگاه هیدرولیک، تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

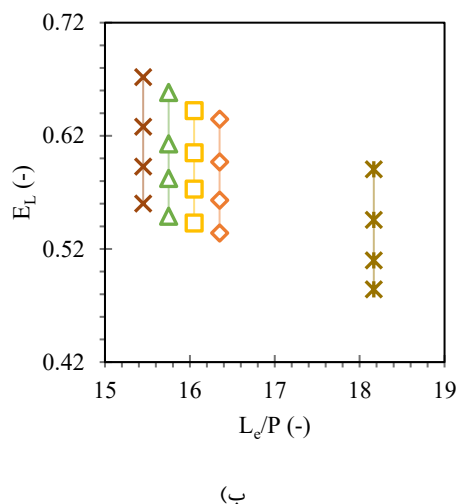
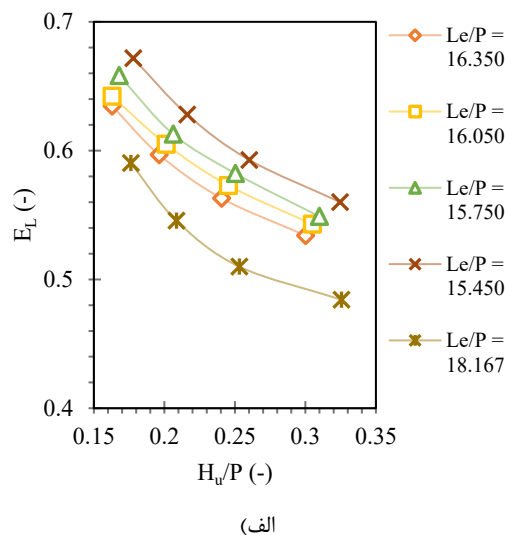
نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها و انجام مراحل آزمایشگاهی

نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله و کنترل نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید همه ایشان است.

پله‌ای حدود ۰/۵۴ درصد کمتر است. دلیل آن، افزایش زبری موجود در کلیدهای خروجی توسط پله‌ها و استهلاک بیشتر جریان است. با این حال، اتلاف انرژی جریان در بهترین حالت تحقیق حاضر نسبت به سرریزهای پنج و پانزده پله‌ای تفاوت چندانی ندارد و دلیل آن افزایش فاصله ریزش جریان در پایین‌دست سرریز و اختلاط بیشتر جریان و کاهش سرعت جریان مخرب در پایین‌دست است.



شکل ۸- الف تأثیر پارامتر H_u/P و ب تأثیر پارامتر L_e/P بر اتلاف انرژی جریان

نتیجه‌گیری

همانطور که گفته شد بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی به دلیل راندمان بالا در عبور جریان، دارای اهمیت بالایی است. در تحقیق حاضر به بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B با و بدون تیغه‌های جداکننده جریان با تعداد متفاوت پرداخته شد. همچنین برای آن که بتوان نتایج را به سایر تیپ‌های سرریزهای کلیدپیانویی و

منابع

- and Environment journal, 34, pp.444-453. DOI: 10.1111/wej.12544
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili Ghazizadeh, M.R., 2018. Side weir flow characteristics: comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), p.04018075. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001539
 - Khanh, M.H.T., Hien, T.C. and Quat, D.S., (2011-2014). Study and construction of PK Weirs in Vietnam. <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-and-construction-of-PK-Weirs-in-Vietnam-%28-to-Khanh-Hien/>
 - Khoshfetrat, A., Challob Mshali, K. and Fathi, A., 2025. Experimental study of the effect of jump on the scour downstream of type-C trapezoidal piano key weir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(11), pp.1353-1368. DOI: 10.22060/ceej.2024.22565.7996
 - Mirkhorli, P., Ghaderi, A., MohammadNezhad, H., Mohammadi, M. and Kisi, O., 2025. Hydraulic Behavior and Energy Dissipation in Piano Key Weirs vs. Rectangular Labyrinth Weirs: A Comparative Study. *Flow Measurement and Instrumentation*, p.102830. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2025.102830
 - Pfister M, Jüstrich S, Schleiss A.J., 2017. Toe-scour formation at piano key weirs. CRC Press, Labyrinth and Piano Key Weirs III, pp 147–156
 - Pinto, M., Matos, J.D.S.G. and dos Santos Viseu, M.T.F., 2017. Energy dissipation on stepped spillways with a piano key weir: experimental study. *Instituto Superior Técnico, Lisbon (in Portuguese)*, pp.1-11.
 - Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2024. Experimental comparison of flow energy loss in type-B and-C trapezoidal piano key weirs. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(1), pp.55-64. DOI: 10.31272/jeasd.28.1.4
 - Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2023. Experimental investigation of scour downstream of a C-Type trapezoidal piano key weir with stilling basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6), pp.688-697. DOI: 10.31272/jeasd.27.6.2
 - Safarzadeh, A. & Noroozi, B., 2014. Three-dimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulics*, 9(3), pp.61-79. DOI: 10.30482/JHYD.2014.10176
 - Shen, X. and Oertel, M., 2021. Comparative study of nonsymmetrical trapezoidal and rectangular piano key weirs with varying key width ratios. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(11), p.04021045. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001942
 - Shen, X. and Oertel, M., 2023. Influence of piano key weir crest shapes on flow characteristics, scale effects, and energy dissipation for in-channel application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(6), p.04023010. DOI: 10.1061/JHEND8.HYENG-13322
 - Singh, D. and Kumar, M., 2023. Effect of the inlet-to-outlet key width ratio of Piano Key Weir on its
 - Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M., 2024. Baffle-Enhanced Scour Mitigation in Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs: An Experimental and Machine Learning Investigation. *Water*, 16(15), p.2133. DOI: 10.3390/w16152133
 - Al-Shukur, A.H.K. and Al-Khafaji, G.H., 2018. Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), pp.63-70.
 - Babakhah, L. and Khoshfetrat, A., 2024. Investigating local scour downstream of Piano key weir with Riprap. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11), pp.1-15. DOI: 10.1007/s41062-024-01759-0
 - Bansal, N., Singh, D. and Kumar, M., 2023. Computation of energy across the type-C piano key weir using gene expression programming and extreme gradient boosting (XGBoost) algorithm. *Energy Reports*, 9, pp.310-321. DOI: 10.1016/j.egy.2023.04.003
 - Bodaghi E, Abdi Chooplou Ch, Ghodsian M., 2024. Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics.*, 71. DOI: 10.2478/johh-2023-0041
 - Crookston, B.M., Erpicum, S., Tullis, B.P. and Laugier, F., 2019. Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures, advancements, and future research needs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(12), p.02519004. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001646
 - Ehsanifar, A., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, C., 2023. The experimental study of the effect of splitter on the flow discharge Piano key weir. *Journal of Hydraulics*, 18(2), pp.39-52. DOI: 10.30482/jhyd.2022.330734.1591
 - Eslinger, K. R. and Crookston, B.M., 2020. Energy dissipation of type a piano key weirs. *Water*, 12(5), p.1253. DOI: 10.3390/w12051253
 - Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H., 2025. Downstream Local Scour of PKW with Different Shapes and Numbers of Flow Splitters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4), p.04025015. DOI: 10.1061/JHEND8.HYENG-1414
 - Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M., 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 1–13. DOI: 10.1080/09715010.2024.2353612
 - Fathi, A., Abdi Chooplou, Ch. and Ghodsian, M., 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), pp.163-174. DOI: 10.22034/23.4.163
 - Karimi, M., Jalili Ghazizadeh, M., Saneie, M. and Attari, J., 2020. Experimental and numerical study of a piano key side weir with oblique keys. *Water*

26. Torabi, H., Parsaie, A., Yonesi, H. and Mozafari, E., 2018. Energy dissipation on rough stepped spillways. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42, pp.325-330. DOI: [10.1007/s40996-018-0092-5](https://doi.org/10.1007/s40996-018-0092-5)
- hydraulic behaviour. *Flow Measurement and Instrumentation*, 91, p.102342. DOI: [10.1016/j.flowmeasinst.2023.102342](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102342)
25. Singh, D. and Kumar, M., 2022. Energy dissipation of flow over the type-B Piano Key Weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 83, p.102109. DOI: [10.1016/j.flowmeasinst.2021.102109](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102109)