


The presence of a block downstream of a type B triangular piano key weir and its effect on increasing flow energy loss

Hamidreza Ahmadi¹, Ali Khoshfetrat^{2*} 

1. M.Sc. 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.

Abstract

Piano key weirs (PKWs) have rectangular, triangular, and trapezoidal shapes in terms of plan. They are available in four types: A, B, C, and D. Type A weir has an overhang upstream and downstream, type B weir has an overhang upstream, type C weir has an overhang downstream, and type D weir has no overhang. Piano key weirs are non-linear, long-crowned spillways that allow a greater flow capacity (3 to 4 times more) over a given width. The first piano key weir was built on the side channel of the Goulours dam in France. Piano key weirs are used in agricultural canals, drainage canals, and irrigation canals in addition to dams due to their lightweight foundation. Piano key weirs are the evolution of nonlinear weirs with high efficiency; therefore, it is important to investigate the flow energy loss and the solution to increase it. In the present study, for the first time, a block with a different geometry was used downstream of the triangular piano key weir type B. Also, two weirs with a height of 0.20 and 0.18 m were used. The blocks are rectangular and a combination of trapezoidal and circular blocks. Four discharges from 0.02 to 0.05 m³/s were also used. The experiments were conducted in a channel 10 m long, 0.8 m wide, and 1 m high. The slope of the channel is zero. The water temperature also varies between 8 and 13 °C. The flow was fed into the tank by a pump and an underground tank with a volume of 10,000 m³ and a monitor. Two triangular piano key weirs type B with constant geometry but different heights of 0.20 and 0.18 m were used. The width of the weir inlet keys (W_i) is 0.613 m, the width of the weir outlet keys (W_o) is 0 m, the length of the weir side walls (B^*) is 0.425 m, the length of the upstream overhanging edges of the weirs (B_i) is 0.14 m, the length of the weir crest (L) is 3.04 m, and the thickness of the weirs (T_s) is 0.01 m. Blocks with rectangular and trapezoidal cross-sections with a height of 0.06 m (0.3P) were used downstream of the 0.20 m high weir. The cross-sectional area of the blocks is 0.025 x 0.025 m. The height of the blocks was chosen so that they are submerged at the lowest flow rate (0.02 m³/s). The blocks are made of compressed plastic and were installed downstream of the weir with waterproof adhesive. The blocks were installed in three rows downstream of the weir. The distance between the blocks is 10.25 cm. As mentioned, the study of flow energy loss in piano key weirs is important due to their high efficiency in flow passage. Dimensional analysis was also used to extend the results to other weirs and other types of piano key weirs in channels. As the height of the weir increases, the discharge coefficient decreases, and the flow energy loss increases. The blocks downstream of the weir act as a barrier and the flow energy loss increases. The flow around the blocks has weak eddies and hydraulic jumps, which reduces the specific energy downstream. With increasing H_w/P , the flow energy loss decreases. The flow energy loss in the weir with a combination of trapezoidal and circular blocks is higher than that of rectangular blocks. Next, a relationship with a correlation coefficient of 99.92% was presented to calculate the flow energy loss.

Review History

Received: Apr 26, 2025

Revised: Dec 02, 2025

Accepted: Apr 18, 2026

Keywords

Piano key weir

Weir height

Relative flow energy

Block

Type B.

* Corresponding Author Email: ali.khoshfetrat@iau.ac.ir - ORCID: 0000-0002-0113-5287



وجود بلوک در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B و تأثیر آن بر افزایش اتلاف انرژی جریان

حمیدرضا احمدی^۱، علی خوش فطرت^{۲*}

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.

چکیده

تاریخچه داوری

سرریزهای کلیدپیانویی جزء سرریزهای غیر خطی و شکل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای هستند. به دلیل راندمان بالای این سرریزها در عبور جریان، بررسی اتلاف انرژی و راهکار برای افزایش آن حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر به بررسی اتلاف انرژی جریان و افزایش آن توسط هندسه متفاوت بلوک در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B پرداخته شد. آزمایش‌ها در یک کانال به طول ۱۰، عرض ۰/۸ و ارتفاع ۱ متری انجام شدند. سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. همچنین از سه ارتفاع متفاوت سرریز ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متری استفاده شد. بلوک‌ها به شکل‌های مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای هستند. نتایج نشان داد که اتلاف انرژی جریان به ترتیب در سرریزهای با ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای و سپس بلوک‌های مستطیلی بیشتر است. با افزایش ۱/۱۱ و ۱/۳۳ برابری ارتفاع سرریز نسبت به سرریز با ارتفاع کمتر، اتلاف انرژی ۸/۲ و ۲۳/۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی کاهش می‌یابد. در آخر از آنالیز ابعادی برای محاسبه اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با و بدون بلوک در پایین دست آن و بسط نتایج به طبیعت و دیگر تیپ‌های سرریزهای کلیدپیانویی استفاده شد.

کلمات کلیدی

سرریز کلیدپیانویی

ارتفاع سرریز

انرژی نسبی جریان

بلوک

نوع B

۱- مقدمه

Goulours در کشور فرانسه ساخته شد [3]. سرریزهای کلیدپیانویی به دلیل پی و فونداسیون سبک علاوه بر سدها در کانال‌های کشاورزی، کانال‌های زهکشی و کانال‌های آبیاری جای می‌گیرند [4]. به دلیل راندمان بالای این سرریزها در عبور جریان؛ بررسی اتلاف انرژی و راهکارهایی برای افزایش آن از دیدگاه مهندسی، حائز اهمیت است. برخی از محققان تأثیر سرعت و دبی جریان و برخی دیگر تأثیر سازه‌های اضافی و عوامل هندسی را روی اتلاف انرژی جریان مورد بررسی قرار دادند. افرادی مانند خان و همکاران (۲۰۱۱)، پفیستر و همکاران (۲۰۱۷)، پیتو و همکاران (۲۰۱۷) و ترابی و همکاران (۲۰۱۸) جزو اولین افرادی

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 لبه آویزان در بالادست و پایین دست، سرریز نوع B دارای لبه آویزان در بالادست، سرریز نوع C دارای لبه آویزان در پایین دست و سرریز نوع D فاقد لبه آویزان است [1]. سرریزهای کلیدپیانویی جزء 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 [2]. اولین سرریز کلیدپیانویی روی کانال جانبی سد

* رایانامه نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iau.ac.ir - ORCID: 0000-0002-0113-5287

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این



مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

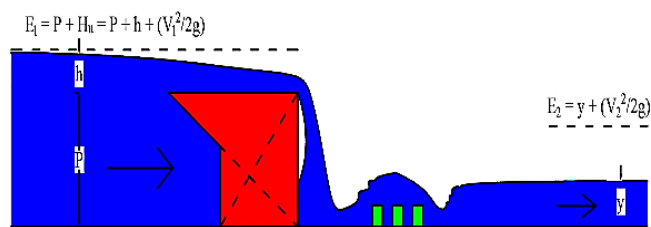
(۲۰۲۵)، به بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی نوع D پرداختند. ایشان بهترین اتلاف انرژی را در نسبت W_i/W_o برابر $0/6$ و تعداد سه پله در کلیدهای خروجی مشاهده کردند [22]. همانطور که گفته شد سرریزهای کلیدپیانویی تکامل یافته سرریزهای غیر خطی و با راندمانی بالا هستند؛ پس بررسی اتلاف انرژی جریان و راهکار برای افزایش آن حائز اهمیت است. برای اولین بار، در تحقیق حاضر از بلوک با هندسه متفاوت در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B استفاده شد. همچنین از سه سرریز با ارتفاع $0/20$ ، $0/18$ و $0/15$ متر استفاده شد. بلوکها به شکل های مستطیلی و ترکیبی از بلوکهای دوزنقه‌ای با دایره‌ای هستند. از ۴ دبی متفاوت از $0/02$ تا $0/05$ متر مکعب بر ثانیه نیز استفاده گردید. این تحقیق با فرض‌هایی مانند دائمی بودن جریان و واحد بودن ضریب اصلاح سرعت انجام شده است. همچنین آشغال و گل و لای موجود در جریان در مواقع سیلابی و تأثیر آن بر بلوکها و تراکم آنها، از محدودیت‌های مطالعه حاضر است که نیاز به تحقیقی جداگانه دارند. 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.

۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱) و شکل (۱)، پارامترهای تأثیرگذار بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B همراه با بلوک در پایین دست آن 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 لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، ρ چگالی جریان هستند. اتلاف انرژی جریان نیز از رابطه $(E_L = (E_1 - E_2)/E_1)$ به دست می‌آید [23]. با توجه به شکل (۱) و رابطه اتلاف انرژی جریان، E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص جریان در بالادست و پایین دست سرریز، V_2 سرعت متوسط جریان در پایین دست سرریز، h عمق جریان در بالادست سرریز، y عمق جریان در پایین دست سرریز و g نیروی گرانش هستند. انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز از رابطه $(E_1 = P + h + (V_1^2/2g) = P + H_u)$ و انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز از رابطه $(E_2 = y + V_2^2/2g)$ محاسبه

بودند که به عوامل هیدرولیکی جریان و تأثیر آن بر اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی پرداختند [8-5]. الشکور و الخفاجی (۲۰۱۸)، تأثیر شیب‌های مختلف کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی نوع B را بر اتلاف انرژی مورد بررسی قرار دادند [9]. کریمی و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی و همچنین افزایش راندمان هوادمی پرداختند [10]. کریمی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مطالعه تجربی و عددی را برای بررسی ویژگی‌های جریان یک سرریز کلیدپیانویی با کلیدهای مورب انجام داد [11]. اسلینگر و کروکستون (۲۰۲۰)، با بررسی تجربی به اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی نوع A پرداختند. ایشان همچنین دو رابطه تجربی 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 [12]. سینگ و کومار (۲۰۲۲)، با مطالعه‌ای تجربی به بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی پرداختند [13]. همچنین سینگ و کومار (۲۰۲۳) و بنصل و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقی جداگانه به بررسی اتلاف انرژی و روش‌هایی برای افزایش آن در سرریزهای کلیدپیانویی پرداختند. ایشان همچنین تأثیر نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی سرریزهای کلیدپیانویی نوع A را روی اتلاف انرژی جریان مورد بررسی قرار دادند و دو معادله تجربی با ضریب همبستگی بالایی ارائه کردند [14, 15]. شن و اورتل (۲۰۲۱ و ۲۰۲۳)، تأثیر شکل‌های مختلف تاج سرریز و تغییرات عرض کلیدهای سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی را بر اتلاف انرژی جریان مورد بررسی قرار دادند [16, 17]. رضیوی و همکاران (۲۰۲۴)، با مقایسه سرریزهای کلیدپیانویی نوع B و C دریافتند که اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی نوع C بیشتر از نوع B است. دلیل بیشتر بودن اتلاف انرژی جریان را وجود لبه آویزان در پایین دست سرریز کلیدپیانویی نوع C دانستند [18]. فتحی و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴)، با ایجاد پله در کلیدهای خروجی سرریز، دریافتند که اتلاف انرژی جریان در سرریزهای ده پله‌ای بسیار بیشتر از سرریزهای بدون پله، پنج و پانزده پله‌ای است [19, 20]. عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴)، 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 [21]. میرخورلی و همکاران

برداشت می کنند [14]. سنسور سوم عمق جریان روی تاج سرریز را اندازه گیری می کند. در تمامی آزمایش ها عمق جریان روی تاج سرریز بیشتر $0/03$ متر است با بتوان اثر ضریب کشش سطحی را نادیده گرفت [4]. عمق جریان نیز توسط عمق سنج نقطه ای با خطای $0/001$ متر اندازه گیری شد. عمق جریان اندازه گیری شده توسط سنسورها و عمق سنج نقطه ای با خطای ناچیزی برابر است. جریان در پایین دست سرریز به صورت آزادانه و بدون استفاده از دریچه انتهایی کانال به داخل مخزن برمی گردد. شکل (۲-الف) کانال آزمایشگاهی، شکل (۲-ب) دستگاه PLC و شکل (۲-ج) سنسورهای آلتراسونیک را نشان می دهند.



شکل ۱. پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی همراه با بلوک در پایین دست آن

Fig. 1. Parameters affecting flow energy loss in a piano key weir with a block downstream of it



a)



b)



c)

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

Fig. 2. a) Laboratory channel, b) PLC device and c) Ultrasonic sensors

می شود. در رابطه (۱)، پارامتر S نشانگر هندسه و چیدمان متفاوت بلوک ها (مستطیلی و ترکیبی از دوزنقه ای با دایره ای) است. به دلیل وجود نیروی گرانش در پارامتر اتلاف انرژی جریان و هد کل جریان؛ از حضور مستقیم آن در آنالیز ابعادی صرف نظر شده است [19].

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

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 تیغه های جداکننده جریان، تابع رابطه (۲) خواهد شد. در این رابطه عدد رینولدز جریان است که از رابطه $(V_1 \rho H_u / \mu)$ و عدد وبر است که از رابطه $(V_1^2 \rho H_u / \sigma)$ محاسبه می شوند.

$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, We, Re, S\right) \quad (2)$$

به دلیل اغتشاش زیاد جریان و عدد رینولدز بیشتر 2000 در تحقیق حاضر از عدد رینولدز و به دلیل عمق کافی جریان در بالادست سرریز (بیشتر از $0/03$ متر) از عدد وبر صرف نظر خواهد شد [4]. بنابراین، اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B همراه با بلوک در پایین دست آن تابع رابطه (۳) خواهد شد.

$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, S\right) \quad (3)$$

۳- مواد و روش ها

آزمایش ها در یک کانال به طول ۱۰ متر، عرض $0/8$ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. شیب کانال صفر است. همچنین دمای آب بین ۸ تا ۱۳ درجه سانتی گراد متغیر است. جریان توسط یک پمپ و مخزن زیرزمینی به حجم 10000 متر مکعب و توسط یک مانیتور وارد مخزن می شود. خطای پمپ برابر $0/01$ درصد است. پروفیل های سرعت در فاصله $0/3$ ، $0/4$ و $0/5$ متری از ابتدای کانال بر هم منطبق هستند و به همین دلیل سرریز در فاصله $0/5$ متری از ابتدای کانال نصب شد [24]. از ۴ دبی متفاوت در آزمایش ها استفاده شد. دبی ها توسط دستگاه PLC و با استفاده از مانیتور قابل تنظیم هستند.

دبی ها بین $0/02$ تا $0/05$ متر مکعب بر ثانیه متغیر هستند. از سه سنسور آلتراسونیک برای اندازه گیری عمق جریان استفاده شد. سنسور اول در فاصله 2P در بالادست سرریز نسبت به مرکز آن و سنسور دوم در فاصله 8P در پایین دست سرریز نسبت به مرکز آن عمق جریان را

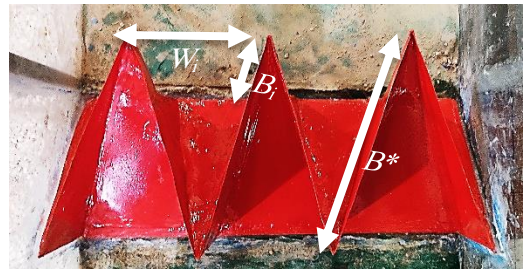
نصب شدند. بلوک‌های مستطیلی در سه و بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای در چهار ردیف و در پایین‌دست سرریز نصب شدند. فاصله بین بلوک‌ها از هم $10/25$ سانتی‌متر است. مطابق شکل (۴-الف)، بلوک‌های مستطیلی به تنهایی و به صورت زیگزاک و مطابق شکل (۴-ب)، بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای به صورت ترکیبی و زیگزاک در پایین‌دست سرریز و در فاصله $0/1$ متری از پنجه سرریز نصب شدند.

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 $(Q = V_1 Wh)$ می‌توان سرعت جریان در بالادست سرریز را محاسبه نمود. در این رابطه Q دبی جریان، W عرض کانال و یا عرض سرریز و L_e طول تاج سرریز هستند. همچنین با استفاده از معادله پیوستگی و با داشتن عمق جریان در پایین‌دست سرریز، می‌توان سرعت جریان در پایین‌دست سرریز را محاسبه کرد [25, 26].

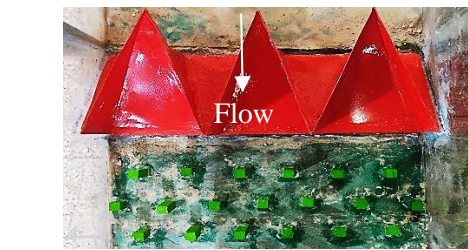
جدول (۱) پارامترهای هیدرولیکی و اتلاف انرژی جریان در سرریز همراه با بلوک را نشان می‌دهد که در آن C_d ضریب آگذری، E_r انرژی نسبی جریان، N سرریزهای بدون بلوک، NR سرریز با بلوک مستطیلی و TC سرریز با ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای هستند. ضریب آگذری از رابطه عمومی سرریزها و انرژی نسبی جریان از تقسیم انرژی مخصوص در پایین‌دست سرریز به انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز محاسبه می‌شود [19]. همانطور که از جدول پیدا است، در نهایت از ۲۰ آزمایش برای اتلاف انرژی جریان در شرایط متفاوت هیدرولیکی و هندسی استفاده شد. فتحی و همکاران (۲۰۲۳) نیز از ۱۶ آزمایش برای بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A و با ارتفاع ثابت $0/20$ متری استفاده کردند [19].

۴- نتایج و بحث

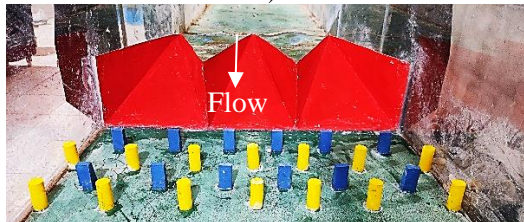
جریان به صورت جت آزاد از روی کلیدهای ورودی سرریز به پایین‌دست و داخل کلیدهای خروجی می‌ریزد. همچنین به صورت جت شیبدار از کلیدهای خروجی به پایین‌دست منتقل می‌شود. جریان عبوری از انتهای کلیدهای ورودی به دلیل عدم نبود لبه آویزان در پایین‌دست سرریز، در نزدیکی پنجه سرریز به پایین‌دست می‌ریزد. جریان در بالادست سرریز در نزدیکی



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B مورد استفاده در تحقیق حاضر
Fig. 3. Type B triangular piano key weir used in the present study



a)



b)

شکل ۴. الف) بلوهای مستطیلی و ب) ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای با دایره‌ای
Fig. 4. a) Rectangular blocks and b) combination of trapezoidal and circular blocks

از سه سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B با هندسه ثابت اما ارتفاع متفاوت $0/20$ ، $0/18$ و $0/15$ متر استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریزها (W_i) $0/613$ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریزها (W_o) 0 متر، طول دیوارهای جانبی سرریزها (B_i) $0/425$ متر، طول لبه‌های آویزان بالادست سرریزها (B_i) $0/14$ متر، طول تاج سرریزها (L) $2/55$ متر و ضخامت سرریزها (T_s) $0/01$ متر هستند (شکل ۳). سرریزها دارای سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی هستند.

از بلوک‌هایی با مقطع مستطیلی و ترکیبی از دوزنقه‌ای و دایره‌ای با ارتفاع $0/06$ متر ($0.3P$) در پایین‌دست سرریز با ارتفاع $0/20$ متر استفاده شد. سطح مقطع بلوک‌ها $0/25$ در $0/25$ متر است. ارتفاع بلوک‌ها به شکلی انتخاب شد که در کمترین دبی جریان ($0/02$ متر مکعب بر ثانیه) مستغرق هستند. جنس بلوک‌ها پلاستیک فشرده است و با چسب ضدآب در پایین‌دست سرریز

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

Table 1. Hydraulic and geometric parameters affecting flow energy loss

Row	Q (m ³ /s)	H _u /P	L _e /P	S	Re	C _d	E _r	E _L
1	0.02	0.173	12.75	N	3695	0.333	0.333	0.667
2	0.03	0.206	12.75	N	6444	0.383	0.390	0.610
3	0.04	0.255	12.75	N	10252	0.371	0.424	0.576
4	0.05	0.320	12.75	N	15307	0.331	0.450	0.550
5	0.02	0.173	12.75	NR	3695	0.333	0.326	0.674
6	0.03	0.206	12.75	NR	6444	0.383	0.381	0.619
7	0.04	0.255	12.75	NR	10252	0.371	0.416	0.584
8	0.05	0.320	12.75	NR	15307	0.331	0.444	0.556
9	0.02	0.173	12.75	TC	3695	0.333	0.323	0.677
10	0.03	0.206	12.75	TC	6444	0.383	0.372	0.628
11	0.04	0.255	12.75	TC	10252	0.371	0.409	0.591
12	0.05	0.320	12.75	TC	15307	0.331	0.436	0.564
13	0.02	0.182	14.17	N	3857	0.362	0.397	0.621
14	0.03	0.225	14.17	N	6934	0.394	0.441	0.559
15	0.04	0.275	14.17	N	10897	0.389	0.472	0.528
16	0.05	0.342	14.17	N	16154	0.350	0.502	0.498
17	0.02	0.213	17.00	N	4416	0.598	0.457	0.543
18	0.03	0.254	17.00	N	7676	0.555	0.539	0.461
19	0.04	0.316	17.00	N	12213	0.507	0.571	0.429
20	0.05	0.392	17.00	N	18010	0.463	0.593	0.407

ناحیه مستغرق دارای طول و ارتفاع بیشتری می شود. همچنین جریان ریخته شده از کلیدهای ورودی به داخل کلیدهای خروجی باعث ایجاد گردابه های سطحی در کنار دیواره های کلیدهای خروجی می شود. قدرت دو گردابه کناری ضعیف بوده و به صورت سطحی وارد بستر پایین دست می شوند. یک گردابه پر قدرت نیز در وسط کلیدهای خروجی شکل می گیرد که عامل اصلی آن ناحیه استغراق موضعی است. این گردابه با طول انتشار بیشتری در پایین دست پیشروی می کند [4].

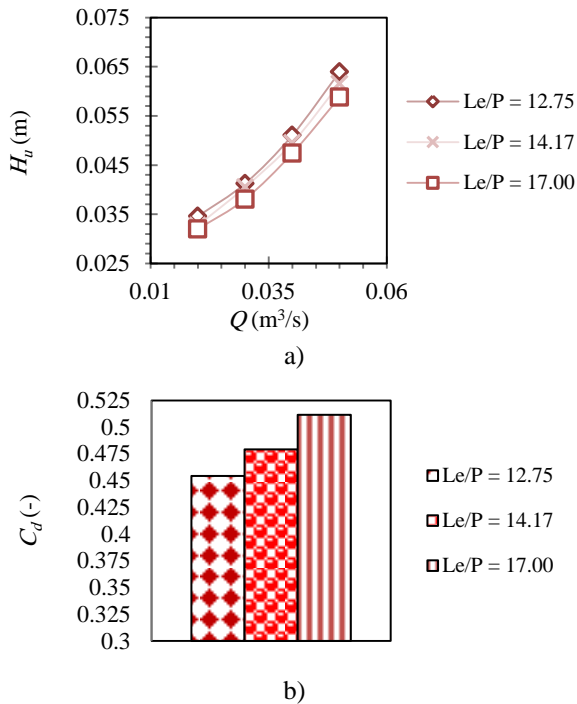
در زیر کلیدهای ورودی و نیم ورودی نیز هوایی محبوس شده شکل می گیرد و جریان به کلیدهای ورودی نمی چسبد و مانند جت آزادانه به پایین دست منتقل می شود. از سرعت جت های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی پس از برخورد با بلوک ها، کاسته شده و جریان پس از طی کردن بلوک ها با سرعت کمتری به پایین دست منتقل می شود. شکل (۶-الف)، جریان اطراف بلوک های مستطیلی و شکل (۶-ب)، جریان اطراف ترکیب بلوک های دوزنقه ای و دایره ای را نشان می دهد. بلوک ها مانند مانع عمل کرده و جریان پس از برخورد با آنها به عقب بازگشته



شکل ۵. ناحیه استغراق موضعی در کلید خروجی

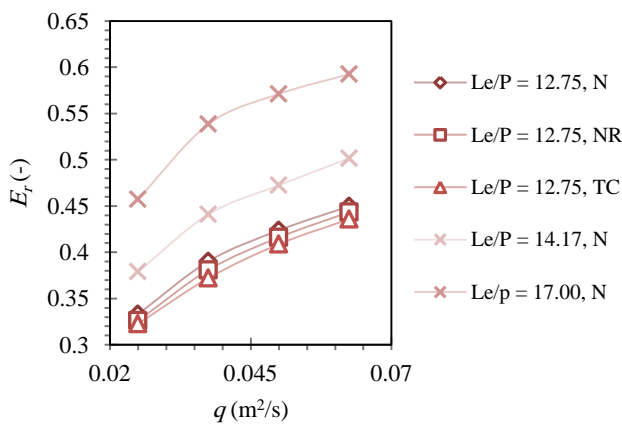
Fig. 5. Local submerged zone in outlet key

کلیدهای خروجی همگرا شده و باعث ایجاد یک ناحیه استغراق موضعی در ابتدای کلیدهای خروجی می شود. به دلیل مثلثی بودن و عرض کلیدهای خروجی برابر صفر سرریز، ارتفاع ناحیه مستغرق موضعی محدود و طول آن زیاد است. شکل (۵) ناحیه استغراق موضعی جریان را نشان می دهد. با افزایش دبی جریان،



شکل ۷-الف. منحنی دبی - ارتفاع جریان و ۷-ب ضریب آبگذری نسبت به پارامتر بدون بعد L_e/P

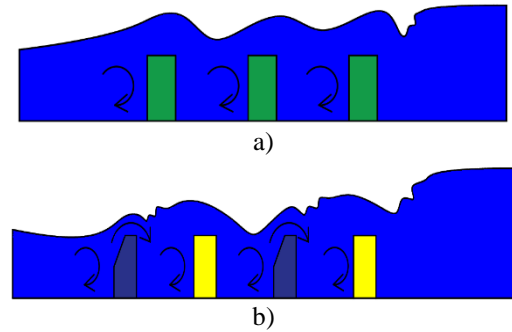
Fig. 7. a) Discharge-stage curve, and b) discharge coefficient relative to dimensionless parameter L_e/P



شکل ۸ انرژی نسبی جریان نسبت به دبی در واحد عرض

Fig. 8. Relative flow energy versus discharge per unit width

جریان در بالادست افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش این پارامتر، سرعت جریان افزایش یافته و انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز نیز افزایش بیشتری پیدا می‌کند و همین امر باعث می‌شود تا انرژی نسبی بیشتری را مشاهده‌گر باشیم. در سرریز همراه با بلوک، انرژی نسبی جریان کمتر است و به این معنا است که انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز کمتر بوده و سرعت مخرب در پایین دست کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش



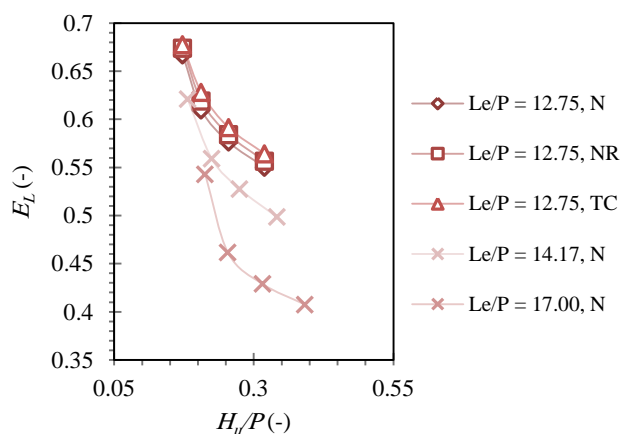
شکل ۶. الف جریان در اطراف بلوک‌های مستطیلی و ۶-ب جریان در اطراف ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای با دایره‌ای

Fig. 6. a) Flow around rectangular blocks and b) Flow around a combination of trapezoidal and circular blocks

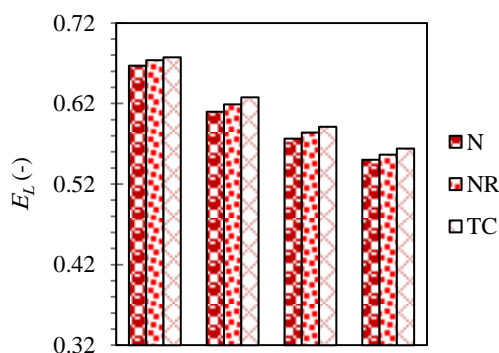
می‌شود. در پشت بلوک‌ها گردابه‌هایی شکل می‌گیرد که باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شوند. به دلیل شیب‌دار بودن بلوک‌های دوزنقه‌ای، جریان از روی شیب بلوک‌ها عبور کرده و در پایین دست آن‌ها پرش هیدرولیکی شکل می‌گیرد که باعث اتلاف انرژی بیشتری می‌شود. پرش هیدرولیکی عبور کرده از بلوک‌های دوزنقه‌ای به بلوک‌های دایره‌ای برخورد می‌کند. ترکیب پرش هیدرولیکی و تشکیل گردابه‌ها در اطراف ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای باعث اتلاف انرژی بیشتر جریان می‌شود. جریان در اطراف بلوک‌های مستطیلی نیز دارای گردابه است و پرش هیدرولیکی تنها در پایین دست بلوک آخر شکل می‌گیرد. شکل (۷-الف)، منحنی دبی - ارتفاع جریان (اشل) و شکل (۷-ب)، ضریب دبی جریان در سرریز را نسبت به پارامتر بدون بعد L_e/P نشان می‌دهد. همانطور که پیدا است، با افزایش دبی جریان، هد کل جریان نیز افزایش می‌یابد. دلیل آن وجود حجم بیشتر جریان در بالادست سرریز است. با افزایش هد کل جریان، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیدا است، با کاهش ارتفاع سرریز و افزایش پارامتر بدون بعد L_e/P هد کل جریان کمتر شده و ضریب آبگذری جریان افزایش می‌یابد و یا به عبارتی دیگر، با کاهش ارتفاع سرریز، جریان راحت‌تر از تاج سرریز عبور می‌کند و به همین امر ظرفیت عبور جریان افزایش می‌یابد. به طور میانگین در سرریز با ارتفاع 0.2 متر نسبت به سرریزهای با ارتفاع 0.18 و 0.15 متر، ارتفاع جریان $3/5$ و $7/6$ درصد افزایش می‌یابد و همین امر باعث می‌شود تا ضریب دبی جریان $5/2$ و $11/2$ درصد کاهش یابد. لازم به ذکر است که ارتفاع بلوک‌ها به گونه‌ای انتخاب شد تا تأثیری بر ضریب دبی جریان نداشته باشد. همچنین در بچه انتهایی کانال به صورت آزادانه عمل می‌کرد تا سرریز مستغرق نشود.

دیگر داده‌ها با خطای بسیار کمی قابل اعتماد است. ضریب همبستگی در این رابطه ۹۵/۹۴ درصد است. همچنین ضریب K در این رابطه به پارامتر L_e/P و S مرتبط است. مقدار K در L_e/P برابر ۱۲/۷۵، ۱۴/۱۷ و ۱۷/۰۰ (سرریزهای بدون بلوک) به ترتیب ۰/۲۳۵، ۰/۲۱۰ و ۰/۱۸۲ است. همچنین مقدار K در سرریز با بلوک‌های مستطیلی برابر ۰/۲۳۱ و در سرریز با ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای با دایره‌ای برابر ۰/۲۲۹ است. شکل (۱۰) نیز مقدار اتلاف انرژی مشاهده شده را نسبت به اتلاف انرژی محاسبه شده نشان می‌دهد. همان‌طور که پیدا است، این رابطه با حاشیه خطای ۱۲ درصد برای محاسبه اتلاف انرژی جریان مورد قبول و قابل اعتماد است. حاشیه خطای رابطه (۴) و ضریب همبستگی در آن، مطابق پارامترهای آماری و مطابق تحقیق خوش فطرت و همکاران (۲۰۲۵) محاسبه شدند [26].

$$E_L = K \left(\left(\frac{H_u}{P} \right)^{-0.40} \left(\frac{L_e}{P} \right)^{0.14} \right) \quad (4)$$



a)



b)

شکل ۹. الف. تأثیر پارامتر H_u/P و شکل ۹-ب. تأثیر پارامتر L_e/P بر اتلاف انرژی جریان

Fig. 9. a) The effect of the H_u/P and L_e/P parameters, and b) the effect of the S parameter on the flow energy loss

ارتفاع سرریز، جریان به راحتی انرژی مخرب خود را از دست نمی‌دهد و در پایین دست مقدار بیشتری دارد.

شکل (۹-الف) تأثیر پارامتر H_u/P و پارامتر L_e/P و شکل (۹-ب) تأثیر پارامتر S را بر اتلاف انرژی جریان نشان می‌دهند. همان‌طور که پیدا 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 همراه با بلوک در پایین دست آن‌ها، اتلاف انرژی جریان بیشتر است. 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 سرریز با ارتفاع بیشتر و به دلیل ارتفاع بیشتر ریزش جریان و اختلاط پر قدرت تر جریان در نزدیکی پنجه سرریز، اتلاف انرژی جریان بیشتر است و جریان با سرعت کمتری به پایین دست انتقال می‌یابد.

در سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متری نسبت به سرریز با ارتفاع ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متری که هر سه بدون بلوک هستند؛ اتلاف انرژی جریان حدود ۸/۲ و ۲۳/۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سرریزهای با ارتفاع ۰/۲۰ متری با بلوک‌های مستطیلی و ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای با دایره‌ای، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز با همین ارتفاع و بدون بلوک در پایین دست آن، به ترتیب حدود ۱/۲۵ و ۲/۳۴ درصد بیشتر است. دلیل آن مانند مانع عمل کردن بلوک‌ها و ایجاد پرش هیدرولیکی با ارتفاع بیشتر در پشت بلوک‌ها است. اتلاف انرژی جریان در سرریز با ترکیب بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای نسبت به سرریز با بلوک‌های مستطیلی حدود ۱/۱۱ درصد بیشتر است. همان‌طور که گفته شد، دلیل آن تأثیر همزمان پرش هیدرولیکی و گردابه‌ها در اطراف بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای است. همان‌طور که پیدا است، اتلاف انرژی در سرریزهای همراه با بلوک نسبت به سرریز بدون بلوک، تفاوت چندانی ندارد. دلیل آن قدرت زیاد گردابه‌ها و مستغرق بودن بلوک‌ها و تراکم کمتر آن‌ها نسبت به سطح واحد است.

رابطه (۴)، برای محاسبه اتلاف انرژی جریان در سرریز با وجود بلوک در پایین دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B ارائه شده است. این رابطه برای ۷۵ درصد داده‌ها ارائه و برای ۲۵ درصد

جریان در سرریز کلیدپیانویی مثلثی نوع B با و بدون بلوک در پایین دست آن پرداخته شد. همچنین از آنالیز ابعادی استفاده شد تا بتوان نتایج را به دیگر سرریزها و تیپ‌های دیگر سرریزهای کلیدپیانویی موجود در کانال‌ها گسترش داد.

۶- یافته‌های کلیدی

- با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب آبگذری تا ۱۱/۵۲ کاهش و اتلاف انرژی جریان تا ۲۳/۴۰ درصد افزایش می‌یابد.
- بلوک‌ها در پایین دست سرریز مانند مانع عمل کرده و اتلاف انرژی جریان تا ۲/۳۴ درصد افزایش می‌یابد.
- جریان در اطراف بلوک‌ها دارای گردابه‌های ضعیف و پرش هیدرولیکی است و همین امر باعث کاهش انرژی مخصوص در پایین دست می‌شود.
- با افزایش H_w/P و L_w/P ، اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد.
- اتلاف انرژی جریان در سرریز با ترکیب بلوک‌های ذوزنقه‌ای و دایره‌ای نسبت به بلوک‌های مستطیلی بیشتر است.
- در ادامه نیز رابطه‌ای با ضریب همبستگی ۹۵/۹۴ درصد برای محاسبه اتلاف انرژی جریان ارائه شد.

قدردانی نویسندگان

در انجام این پژوهش حمایت خاصی از شخص یا نهادی صورت نگرفته است.

تعارض منافع

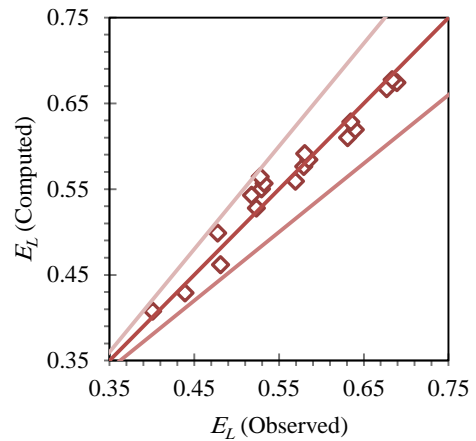
نویسندگان هیچگونه تعارض منافی ندارند.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان باهم برابر است.

منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی هیچ نهاد یا شخص دیگری استفاده نشده است.



شکل ۱۰. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده اتلاف انرژی جریان

Fig. 10. Observed and calculated values of flow energy loss

میانگین اتلاف انرژی جریان در تحقیق فتیحی و همکاران (۲۰۲۳) در سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع A صفر، پنج، ده و پانزده پله‌ای به ترتیب برابر ۰/۵۹۵، ۰/۶۷۱ و ۰/۶۱۷ است [19]. در بهترین حالت تحقیق حاضر (یعنی سرریز همراه با ترکیب بلوک‌های ذوزنقه‌ای با دایره‌ای)، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز صفر پله‌ای حدود ۱۸/۳۹ درصد بیشتر، نسبت به سرریز پنج پله‌ای حدود ۳/۲۷ درصد بیشتر، نسبت به سرریز ده پله‌ای حدود ۸/۳۳ درصد کمتر و نسبت به سرریز پانزده پله‌ای حدود ۰/۳۱ درصد کمتر است. دلیل آن افزایش زبری موجود در کلیدهای خروجی توسط پله‌ها و مستهلک شدن 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 پایین دست سرریز و اختلاط بیشتر جریان و کاهش سرعت جریان مخرب در پایین دست است.

۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که گفته شد بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی -به دلیل راندمان بالا در عبور جریان- دارای اهمیت است. در تحقیق حاضر به بررسی اتلاف انرژی

References

- [1] Bodaghi, E., Abdi Chooplou, C. and 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(3), pp.250–262. doi: 10.2478/johh-2023-0041.
- [2] Safarzadeh, A. and 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.
- [3] Crookston, B.M., Ercicum, 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.
- [4] 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.
- [5] Khanh, M.H.T., Hien, T.C. and Quat, D.S., 2011. *Study and construction of PK Weirs in Vietnam (2004 to 2011)*. Hanoi: Ministry of Agriculture and Rural Development.
- [6] Pfister, M., Jüstrich, S. and Schleiss, A.J., 2017. Toe-scour formation at piano key weirs. In: *Labyrinth and Piano Key Weirs III*. London: CRC Press, pp.147–156.
- [7] 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*. Thesis. Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- [8] 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(3), pp.325–330. doi: 10.1007/s40996-018-0092-5.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 and Environment Journal*, 34(3), pp.444–453. doi: 10.1111/wej.12544.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Singh, D. and Kumar, M., 2023. Effect of the inlet-to-outlet key width ratio of Piano Key Weir on its hydraulic behaviour. *Flow Measurement and Instrumentation*, 91, p.102342. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2023.102342.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Fathi, A., Abdi Chooplou, C. 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.
- [20] Fathi, A., Abdi Chooplou, C. 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*, 30(2), pp.1–13. doi: 10.1080/09715010.2024.2353612.
- [21] 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.
- [22] 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*, 98, p.102830. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2025.102830.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ahmadi, H. and Khoshfetrat, A., 2026. The presence of a block downstream of a type B triangular piano key weir and its effect on increasing flow energy loss. *Modares Civil Engineering journal*, 26(3), pp.97-106.

