

Blocks on the tunnel structure and their effect on flow energy dissipation in a type B rectangular piano key weir (PKW)

Wadi Mohammed Wadi¹, Ali Khoshfetrat^{1*} , Musa Habib Jasim², Niloofar Salemi¹

1. Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Karbala, Karbala, Iraq.

Abstract

Piano key weirs (PKWs) are a type of non-linear, long-crested weir characterized by their plan forms, which can be rectangular, triangular, or trapezoidal. They are categorized into four main types based on their overhang configuration: Type A features overhangs on both the upstream and downstream sides; Type B has only an upstream overhang; Type C has only a downstream overhang; and Type D has no overhangs at all. A key advantage of PKWs is their ability to significantly increase discharge capacity—typically by three to four times—within the same channel width compared to traditional weirs. First implemented at the Goulours dam in France, their efficient design requires a lighter foundation, making them suitable for a wide range of applications beyond dams, including agricultural, drainage, and irrigation canals. As an evolved and highly efficient form of nonlinear weir, PKWs warrant investigation into their flow energy dissipation and methods for its enhancement. This study introduces, for the first time, the use of blocks with varying geometries—specifically rectangular, trapezoidal, and circular shapes—placed within the outlet keys of a rectangular Type B PKW. The experimental setup involved three weir models with heights of 0.20 m, 0.18 m, and 0.15 m, tested under four different flow rates ranging from 0.02 to 0.05 m³/s. The research was conducted in a level (zero-slope), rectangular flume measuring 10 m in length, 0.8 m in width, and 1 m in height. Water, with a temperature varying between 8°C and 13°C, was circulated by a pump from a 10 m³ underground reservoir, with the flow rate regulated by a monitor. The study employed three rectangular Type B PKWs with identical geometries but differing heights of 0.15 m, 0.18 m, and 0.20 m. The consistent parameters for all weirs were an inlet and outlet key width (W_i and W_o) of 0.145 m, a sidewall length (B^*) of 0.40 m, an upstream overhang (B_i) of 0.13 m, a total crest length (L) of 3.27 m, and a wall thickness (T_s) of 0.01 m. A tunnel structure was positioned at the outlet keys of the 0.20 m high weir. In this tunnel, blocks with a height of 0.06 m, featuring rectangular, circular, and trapezoidal cross-sections, were arranged in a zigzag pattern. The cross-sectional area of each block was 0.025 x 0.025 m. Fabricated from compressed plastic the blocks were affixed downstream of the weir using a waterproof adhesive. Investigating energy dissipation in PKWs is crucial due to their high hydraulic efficiency. To ensure the applicability of the findings, dimensional analysis was employed, allowing the results to be scaled and extended to other weir sizes and PKW types used in channel applications. The results indicate a clear relationship between weir height and hydraulic performance. Compared to the shortest weir, an increase in height led to an 11.2% reduction in the discharge coefficient and an 18.8% increase in flow energy loss (energy dissipation). On average, the blocks installed in the outlet keys functioned as a flow barrier, increasing energy dissipation by 2.3%. Furthermore, the study found that flow energy loss decreases as the dimensionless ratio H_u/P and L/P increase. The tunnel structure causes more flow energy loss, and the highest flow energy loss was observed in the weir with rectangular, trapezoidal, and circular blocks, respectively.

Review History

Received: Sep 24, 2025
Revised: Oct 27, 2025
Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Piano key weir
Weir height
Relative energy
Outlet keys
Type B

* Corresponding Author Email: ali.khoshfetrat@iau.ac.ir - ORCID: 0000-0002-011-35287



بلوک‌های موجود روی سازه‌ی تونلی و تأثیر آن‌ها بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B

وادی محمودادی^۱، علی خوش فطرت^{۱*} , موسی حبیب‌جاسم^۲، نیلوفر سالمی^۱

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کربلا، کربلا، عراق.

چکیده

تاریخچه داوری

سرریزهای کلیدپیانویی، به عنوان نوعی سرریز کنگره‌ای تکامل یافته و به صورت غیرخطی، به دلیل بازدهی بالای عبور جریان، مورد توجه هستند. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی میزان اتلاف انرژی و راهکارهای افزایش آن با استفاده از بلوک‌هایی با اشکال هندسی متفاوت است که روی سازه تونلی نصب شده در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. سه ارتفاع مختلف سرریز (۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر) و سه شکل بلوک (مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای) مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که بیشترین اتلاف انرژی به ترتیب مربوط به بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای است. با افزایش ۱/۱۱ و ۱/۳۳ برابری ارتفاع سرریز نسبت به کمترین ارتفاع، اتلاف انرژی به میزان ۶/۸ و ۱۸/۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی کاهش پیدا می‌کند. مقایسه نتایج نشان داد که وجود سازه تونلی در مقایسه با حالت بدون آن، منجر به اتلاف انرژی بسیار بیشتری می‌شود. در پایان، از تحلیل ابعادی برای محاسبه اتلاف انرژی در سرریزهای با و بدون بلوک استفاده شد.

کلمات کلیدی

سرریز کلیدپیانویی

ارتفاع سرریز

انرژی نسبی جریان

کلیدهای خروجی

نوع B

۱- مقدمه

تاج طویل قرار می‌گیرند که ویژگی بارز آن‌ها، توانایی عبور دادن دبی جریان به مراتب بیشتر (حدود سه تا چهار برابر) در مقایسه با سرریزهای خطی با عرضی مشابه است [2]. اولین نمونه از این سرریزها روی کانال جانبی سد گولورز (Goulours) در فرانسه احداث شد [3]. از مزایای مهم این سازه‌ها، نیاز به پی و فونداسیون سبک‌وزن است که امکان کاربرد آن‌ها را علاوه بر سدها، در شبکه‌های آبیاری، کانال‌های زهکشی و انتقال آب کشاورزی نیز فراهم می‌کند [4]. با توجه به کارایی بالای این سرریزها در انتقال جریان، مطالعه میزان اتلاف انرژی و ارائه راهکارهایی به منظور

سرریزهای کلیدپیانویی بر اساس طرح کلی (پلان) به سه دسته مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. این سرریزها در چهار گروه اصلی A، B، C و D معرفی شده‌اند. ویژگی‌های این تیپ‌ها به این شرح است: نوع A در هر دو سمت بالادست و پایین‌دست دارای لبه آویزان است. نوع B تنها در سمت بالادست دارای این لبه است، در حالی که نوع C لبه آویزان را فقط در سمت پایین‌دست دارد. سرریز نوع D نیز فاقد هر گونه لبه آویزان در هر دو طرف است [1]. این سرریزها در دسته سرریزهای غیرخطی با

* رایانامه نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iauo.ac.ir - ORCID: 0000-0002-011-35287

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.



افزایش این تلفات، از اهمیت مهندسی بالایی برخوردار است. در این راستا، پژوهش‌های مختلفی انجام شده که برخی روی پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت و دبی جریان متمرکز بوده‌اند و برخی دیگر اثر عوامل هندسی یا استفاده از سازه‌های الحاقی را روی اتلاف انرژی مورد بررسی قرار داده‌اند. پژوهش‌های اولیه در زمینه پارامترهای هیدرولیکی و اثر آن‌ها بر تلفات انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی توسط محققانی از جمله خان و همکاران، پیستر و همکاران، پیتو و همکاران و ترابی و همکاران انجام شد [5-8]. الشکور و الخفاجی (۲۰۱۸) به مطالعه تأثیر زوایای متفاوت کلیدهای خروجی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B بر میزان اتلاف انرژی پرداختند [9]. کریمی و همکاران علاوه بر بررسی اتلاف انرژی، افزایش کارایی هوادهی در این سرریزها را نیز مورد تحلیل قرار دادند [10]. در ادامه، کریمی و همکاران در پژوهشی ترکیبی (تجربی-عددی)، ویژگی‌های جریان روی سرریز کلیدپیانویی با کلیدهای دارای زاویه را بررسی کردند [11]. اسلینگر و کروکستون نیز در یک مطالعه آزمایشگاهی، اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی نوع A را ارزیابی نموده و دو رابطه تجربی مبتنی بر نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی و نیز نسبت هد کل به ارتفاع سرریز ارائه دادند [12]. در یک مطالعه آزمایشگاهی، سینگ و کومار میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی را مورد تحلیل قرار دادند [13]. همچنین، سینگ و کومار به همراه بنصل و همکارانش در پژوهش‌های مستقل دیگری، به ارزیابی اتلاف انرژی و راهکارهای افزایش آن در این نوع سرریزها پرداختند. آن‌ها اثر نسبت عرض کلیدهای ورودی به کلیدهای خروجی را در سرریزهای نوع A بر روی اتلاف انرژی بررسی کرده و دو رابطه تجربی با ضرایب همبستگی قابل توجه ارائه نمودند [14, 15]. از سوی دیگر، شن و اورتل در تحقیقات خود در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳، تأثیر هندسه متفاوت تاج سرریز و نیز تغییر ابعاد کلیدها را روی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی با طرح دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند [16, 17]. بر اساس مطالعه رضیوی و همکاران (۲۰۲۴)، مقایسه بین سرریزهای کلیدپیانویی تیپ B و C نشان داد که نوع C اتلاف انرژی بیشتری ایجاد می‌کند. این برتری ناشی از وجود لبه آویزان در قسمت پایین دست سرریز نوع C عنوان شده است [18]. فتحی و همکاران با احداث پله در کلیدهای خروجی سرریز به این نتیجه

رسیدند که مدل دارای ده پله، در مقایسه با مدل‌های فاقد پله، پنج پله و پانزده پله، منجر به بیشترین میزان اتلاف انرژی می‌شود [19, 20]. در پژوهش عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴)، استفاده از بافل در کلیدهای سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای نوع A منجر به افزایش قابل ملاحظه اتلاف انرژی در قیاس با حالت بدون بافل شد [21]. میرخورلی و همکاران با بررسی سرریزهای نوع D مشخص کردند که بیشترین اتلاف انرژی زمانی حاصل می‌شود که نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی (W_i/W_o) برابر 0.6 بوده و سه پله در کلیدهای خروجی وجود داشته باشد [22]. فتحی و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیق روی سرریز دوزنقه‌ای نوع B دریافتند که افزایش تراکم پوشش گیاهی صلب در پایین دست سرریز، باعث افزایش تلفات انرژی می‌شود. در این مطالعه آثار فاصله‌گذاری طولی و عرضی این پوشش‌های گیاهی بر میزان اتلاف انرژی نیز تحلیل شد [23]. وادی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از هندسه متفاوت بلوک‌ها در کلیدهای خروجی سرریزهای کلیدپیانویی نوع C دریافتند که بلوک‌های مستطیلی نسبت به بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای بهترین عملکرد را در افزایش اتلاف انرژی نشان دادند [24].

چنان که پیش‌تر اشاره شد، سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان نمونه‌های پیشرفته‌ی سرریزهای غیرخطی، از بازدهی بالایی برخوردارند. بنابراین، مطالعه سازوکار اتلاف انرژی و ارائه راهکارهایی به منظور بهبود آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر برای نخستین بار به کارگیری سازه تونلی و بلوک‌هایی با اشکال هندسی گوناگون (مستطیل، دوزنقه و دایره) را روی آن و واقع در کلیدهای خروجی یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B مورد بررسی قرار می‌دهد. این مطالعه با سه ارتفاع سرریز (0.2 ، 0.18 و 0.15 متر) و در محدوده دبی 0.02 تا 0.05 مترمکعب بر ثانیه انجام شده است. از جمله مفروضات اصلی این تحقیق می‌توان به دائمی بودن جریان و ثابت بودن ضریب تصحیح انرژی جنبشی اشاره کرد. از سوی دیگر، حضور آشغال و رسوبات در جریان‌های سیلابی و اثر آن بر انسداد ورودی سازه تونلی، از محدودیت‌های این پژوهش محسوب شده که نیاز مانیتورینگ سازه‌ها را در بر دارد و لازم است در مطالعات آتی به‌طور مجزا تحلیل شود. در نهایت، از تحلیل ابعادی برای ارائه یک رابطه با ضریب همبستگی بالا برای محاسبه اتلاف انرژی

جریان استفاده شد.

۲- آنالیز ابعادی

شکل (۱) همراه با رابطه (۱)، متغیرهای مؤثر در محاسبه اتلاف انرژی را در شرایطی که یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B به همراه بلوک موجود روی سازه تونلی در کلیدهای خروجی آن قرار دارد، نمایش 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 [25]. 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 $E_1 = P + h + (V_1^2/2g) = P + H_u$ و انرژی مخصوص جریان در پایین‌دست سرریز از رابطه $E_2 = y + V_2^2/2g$ محاسبه می‌شود. در رابطه (۱)، پارامتر Type نشانگر هندسه و چیدمان متفاوت بلوک‌ها (مستطیلی، دوزنقه‌ای با دایره‌ای) و وجود و عدم وجود سازه‌ی تونلی است. به دلیل وجود نیروی گرانش در پارامتر اتلاف انرژی جریان و هد کل جریان؛ پس از حضور مستقیم آن در آنالیز ابعادی صرف نظر شده است [19].

$$E_L = f(H_u, P, V_1, \mu, \sigma, \rho, \text{Type}) \quad (1)$$

با استفاده از تئوری π باکینگهام و در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری هد کل جریان، سرعت متوسط در بالادست سرریز و چگالی جریان، می‌توان نتیجه گرفت که اتلاف انرژی در یک

سرریز کلیدپیانویی مجهز به بلوک روی سازه‌ی تونلی، مطابق با رابطه (۲) مدل‌سازی می‌شود. در این رابطه Re عدد رینولدز جریان است که از رابطه $(V_1 \rho H_u / \mu)$ و We عدد وبر است که از رابطه $(V_1^2 \rho H_u / \sigma)$ محاسبه می‌شوند.

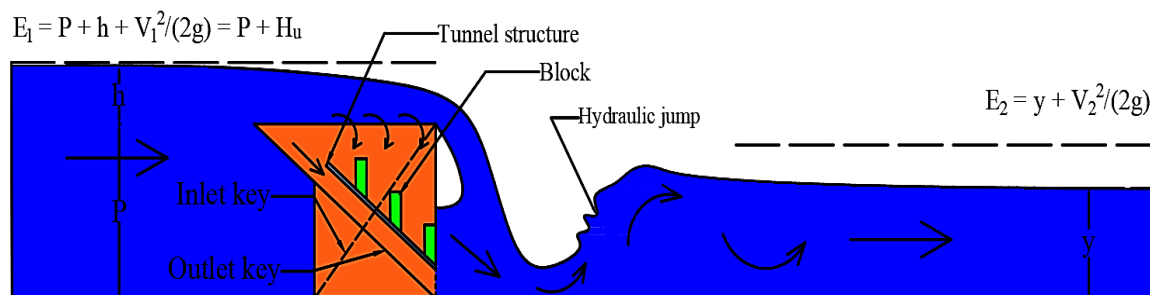
$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, We, Re, \text{Type}\right) \quad (2)$$

با توجه به اغتشاش شدید جریان و مقادیر عدد رینولدز بالاتر از ۲۰۰۰ در این مطالعه، اثر این پارامتر و همچنین به دلیل عمق قابل توجه جریان در بالادست سرریز (بیش از ۰/۳ متر)، اثر عدد وبر در تحلیل‌ها نادیده گرفته شد [4]. بنابراین، اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با بلوک و سازه تونلی در کلیدهای خروجی آن تابع رابطه (۳) خواهد شد.

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

۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال با ابعاد ۱۰ متر طول، ۰/۸ متر عرض و ۱ متر ارتفاع انجام گرفت. شیب این کانال در حالت صفر قرار داشت. دامنه دمای آب مورد استفاده نیز بین ۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد در نوسان بود. جریان آب به کمک یک پمپ و یک مخزن زیرزمینی با حجم ۱۰ متر مکعب تأمین و سپس توسط یک مانیتور به داخل مخزن هدایت می‌شد. میزان خطای پمپ ۰/۰۱ درصد گزارش شده است. پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در فواصل ۳/۵، ۴/۰ و ۴/۵ متری از ابتدای کانال بر یکدیگر منطبق بودند و بر همین مبنا، سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد [26]. در این آزمایش‌ها از چهار دبی متفاوت استفاده شد. مقادیر دبی توسط دستگاه PLC و از طریق مانیتور قابل تنظیم هستند.



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی همراه با بلوک و سازه تونلی

Fig. 1. Parameters affecting flow energy loss in a piano key weir with a block and tunnel structure

از ۰/۰۳ متر بود تا امکان صرف نظر کردن از اثر ضریب کشش سطحی فراهم شود [4]. همچنین عمق جریان با یک عمق سنج نقطه‌ای دارای خطای ۰/۱ میلی متر نیز سنجیده شد. مقادیر عمق جریان اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و عمق سنج نقطه‌ای، با اختلافی بسیار ناچیز با یکدیگر برابر بودند. جریان در پایین دست سرریز به صورت آزاد و بدون نیاز به دریچه انتهایی کانال، به داخل مخزن بازمی گشت. شکل (۲-الف) نمایانگر کانال آزمایشگاهی، شکل (۲-ب) مربوط به دستگاه PLC و شکل (۲-ج) نشان دهنده سنسورهای آلتراسونیک است.

از سه سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B با هندسه ثابت اما ارتفاع‌های متفاوت ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریزها (W_i) ۰/۱۴۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریزها (W_o) ۰/۱۴۵ متر، طول دیوارهای جانبی سرریزها (B^*) ۰/۴۰ متر، طول لبه‌های آویزان بالادست سرریزها (B_i) ۰/۱۳ متر، طول تاج سرریزها (L) ۳/۲۷ متر و ضخامت سرریزها (T_s) ۰/۰۱ متر هستند (شکل ۳). سرریزهای مورد استفاده به سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم کلید ورودی مجهز هستند.

از بلوک‌هایی با مقطع مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای با ارتفاع ۰/۰۶ متر ($0.3P$) در روی سازه‌های تونلی موجود در کلیدهای خروجی سرریز دارای ارتفاع ۰/۲۰ متر استفاده شد. سطح مقطع بلوک‌ها ۰/۰۲۵ در ۰/۰۲۵ متر است. شکل (۴) هندسه بلوک‌های استفاده شده در مطالعه حاضر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. ارتفاع بلوک‌ها به شکلی انتخاب شد که در کمترین دبی جریان (۰/۰۲ متر مکعب بر ثانیه) مستغرق هستند. جنس بلوک‌ها پلاستیک فشرده است و با چسب ضدآب در روی سازه تونلی نصب شدند. بلوک‌ها به صورت زیگزاک و پنج تایی روی سازه تونلی سرریز نصب شدند. مطابق شکل (۵-الف)، بلوک‌های مستطیلی، شکل (۵-ب)، بلوک‌های دوزنقه‌ای و شکل (۵-ج) بلوک‌های دایره‌ای روی سازه تونلی در کلیدهای خروجی سرریز را نشان می‌دهد.

با تنظیم دبی جریان از طریق دستگاه PLC و با در اختیار داشتن عمق جریان در بالادست سرریز و همچنین با توجه به عرض ثابت کانال، می‌توان سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز را از رابطه ($Q = V_i.W.h$) محاسبه کرد. در این رابطه Q



a)



b)

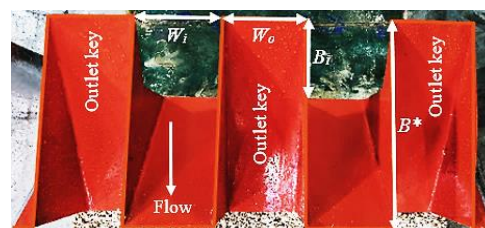


c)

شکل ۲. الف) کانال آزمایشگاهی،

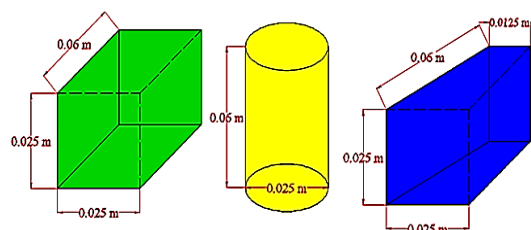
ب) دستگاه PLC و ج) سنسورهای آلتراسونیک

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



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B مورد استفاده در تحقیق حاضر

Fig. 3. Type B rectangular piano key weir used in the present study



شکل ۴. هندسه متفاوت بلوک‌ها

Fig. 4. Different block geometries

مقادیر دبی در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه تغییر کردند. برای اندازه‌گیری عمق جریان از سه سنسور آلتراسونیک (فراصوت) استفاده شد. سنسور اول در فاصله ۲P بالادست سرریز نسبت به مرکز آن و سنسور دوم در فاصله ۸P پایین دست سرریز نسبت به مرکز آن، عمق جریان را ثبت می‌نمایند [14]. سنسور سوم نیز مسئولیت اندازه‌گیری عمق جریان روی تاج سرریز را بر عهده داشت. در کلیه آزمایش‌ها، عمق جریان روی تاج سرریز بیش

پایین‌دست سرریز، امکان محاسبه سرعت متوسط جریان در پایین‌دست سرریز نیز فراهم می‌شود [27, 28]. جدول (۱) پارامترهای هیدرولیکی و اتلاف انرژی جریان در سرریز همراه با بلوک روی سازه تونلی را نشان می‌دهد که در آن C_d ضریب آبگذری، E_r انرژی نسبی جریان، N سرریزهای بدون سازه تونلی، TN سرریز با سازه تونلی، NR سرریز با بلوک مستطیلی، NT سرریز با بلوک دوزنقه‌ای و NC سرریز با بلوک دایره‌ای 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 [19]. همان‌طور که نتایج جدول نشان می‌دهد، در نهایت تعداد ۲۸ آزمایش برای بررسی اتلاف انرژی جریان تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. فتحی و همکاران نیز تعداد ۱۶ آزمایش را به منظور مطالعه اتلاف انرژی جریان روی یک سرریز کلیدیپانویی دوزنقه‌ای نوع A با ارتفاع ثابت ۰/۲۰ متر انجام دادند [19]. بلوک‌ها و سازه‌ی تونلی به شکلی در کلیدهای خروجی سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متری نصب شدند که تأثیری بر ضریب آبگذری ندارند.

۴- نتایج و بحث

جریان به شکل جت آزاد از روی کلیدهای ورودی سرریز شده و به سمت پایین‌دست و داخل کلیدهای خروجی جاری می‌شود. این جریان به صورت یک جت مایل نیز از کلیدهای خروجی به طرف پایین‌دست انتقال می‌یابد. در انتهای کلیدهای ورودی، به دلیل عدم وجود لبه آویزان در سمت پایین‌دست سرریز، آب در نزدیکی پنجه سرریز به پایین می‌ریزد. در سمت بالادست سرریز و مجاور کلیدهای خروجی، جریان همگرا شده و یک ناحیه غوطه‌وری (استغراق) موضعی در ابتدای این کلیدها به وجود می‌آورد (شکل ۶). با افزایش دبی، این ناحیه استغراق هم از نظر طول و هم از نظر ارتفاع گسترش می‌یابد. علاوه‌براین، ریزش جریان از کلیدهای ورودی به درون کلیدهای خروجی، منجر به تشکیل گردابه‌هایی در سطح آب کنار دیواره‌های کلیدهای خروجی می‌شود. قدرت دو گردابه کناری کم بوده و به شکل سطحی به بستر پایین‌دست وارد می‌شوند. یک گردابه قوی نیز در میانه کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد که علت اصلی تشکیل آن، ناحیه استغراق موضعی است. این گردابه با برد بیشتری در جهت پایین‌دست منتشر می‌شود [4].



a)



b)

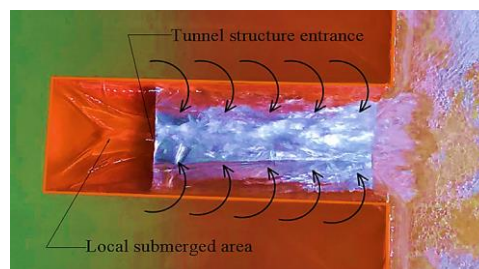


c)

شکل ۵. الف) بلوک‌های مستطیلی، ب) بلوک‌های دوزنقه‌ای و ج) بلوک‌های

دایره‌ای نصب شده روی سازه‌ی تونلی

Fig. 5. a) rectangular blocks, b) trapezoidal blocks, and c) circular blocks installed on the tunnel structure



شکل ۶. ناحیه استغراق موضعی و سازه‌ی تونلی در کلید خروجی

Fig. 6. Localized submerged area and tunnel structure in the outlet key

نشان‌دهنده دبی جریان و W عرض کانال یا عرض سرریز است. علاوه‌براین، به کمک معادله پیوستگی و با دانستن عمق جریان در

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی و هندسی موثر بر اتلاف انرژی جریان (N سرریز ساده، TN سرریز با سازه تونلی، NR سرریز با بلوک‌های مکعب مستطیلی، NT سرریز با بلوک‌های مکعب دوزنقه‌ای و NC سرریز با بلوک‌های استوانه‌ای)

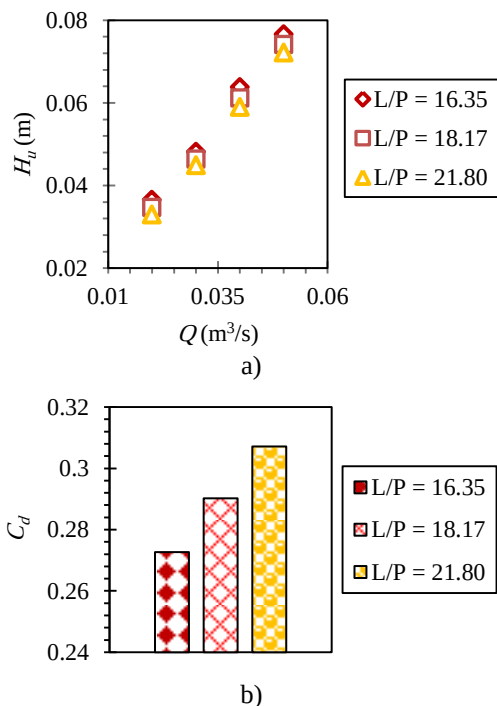
Table 1. Hydraulic and geometric parameters affecting flow energy loss (N is a simple weir, TN is a weir with a tunnel structure, NR is a weir with rectangular cube blocks, NT is a weir with trapezoidal cube blocks and NC is a weir with cylindrical blocks)

Row	Q (m ³ /s)	H _u /P	L/P	Type	Re	We	C _d	E _r	E _L
1	0.02	0.183	16.35	N	3814	452	0.296	0.320	0.680
2	0.03	0.241	16.35	N	7136	771	0.294	0.362	0.638
3	0.04	0.319	16.35	N	11832	1036	0.257	0.387	0.613
4	0.05	0.383	16.35	N	16880	1348	0.244	0.423	0.577
5	0.02	0.183	16.35	TN	3814	452	0.296	0.313	0.687
6	0.03	0.241	16.35	TN	7136	771	0.294	0.354	0.646
7	0.04	0.319	16.35	TN	11832	1036	0.257	0.381	0.619
8	0.05	0.383	16.35	TN	16880	1348	0.244	0.418	0.582
9	0.02	0.183	16.35	NR	3814	452	0.296	0.294	0.706
10	0.03	0.241	16.35	NR	7136	771	0.294	0.336	0.664
11	0.04	0.319	16.35	NR	11832	1036	0.257	0.370	0.630
12	0.05	0.383	16.35	NR	16880	1348	0.244	0.408	0.592
13	0.02	0.183	16.35	NT	3814	452	0.296	0.307	0.693
14	0.03	0.241	16.35	NT	7136	771	0.294	0.343	0.657
15	0.04	0.319	16.35	NT	11832	1036	0.257	0.375	0.625
16	0.05	0.383	16.35	NT	16880	1348	0.244	0.413	0.587
17	0.02	0.183	16.35	NC	3814	452	0.296	0.310	0.690
18	0.03	0.241	16.35	NC	7136	771	0.294	0.348	0.652
19	0.04	0.319	16.35	NC	11832	1036	0.257	0.377	0.623
20	0.05	0.383	16.35	NC	16880	1348	0.244	0.414	0.586
21	0.02	0.193	18.17	N	3972	428	0.310	0.364	0.636
22	0.03	0.258	18.17	N	7500	721	0.311	0.406	0.594
23	0.04	0.340	18.17	N	12343	972	0.273	0.428	0.572
24	0.05	0.412	18.17	N	17679	1253	0.256	0.465	0.535
25	0.02	0.220	21.80	N	4396	376	0.346	0.441	0.559
26	0.03	0.299	21.80	N	8355	622	0.326	0.483	0.517
27	0.04	0.393	21.80	N	13592	841	0.289	0.503	0.497
28	0.05	0.481	21.80	N	19495	1074	0.267	0.537	0.463

سازه تونلی و کلیدهای ورودی) در فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز اتفاق افتاده و موجب ایجاد گردابه‌هایی با ماهیت سطحی در جریان می‌شود. به منظور کاهش بیشتر سرعت جریان ریزشی از کلیدهای ورودی روی سازه تونلی، از بلوک‌هایی به عنوان مانع استفاده شد. این بلوک‌ها با ایجاد اصطکاک و اغتشاش، سرعت جریان را پس از برخورد کاهش می‌دهند. در ناحیه پشت بلوک‌ها، جریان چرخشی تشکیل می‌شود و با افزایش دبی، پرش جریان از روی بلوک‌ها به سمت پایین‌دست مشاهده می‌شود. با توجه به الگوی ریزش جریان از کلیدهای ورودی به کناره‌های سازه تونلی، آرایش بلوک‌ها به این صورت پیاده‌سازی شد: چهار بلوک در کناره‌ها و یک بلوک به

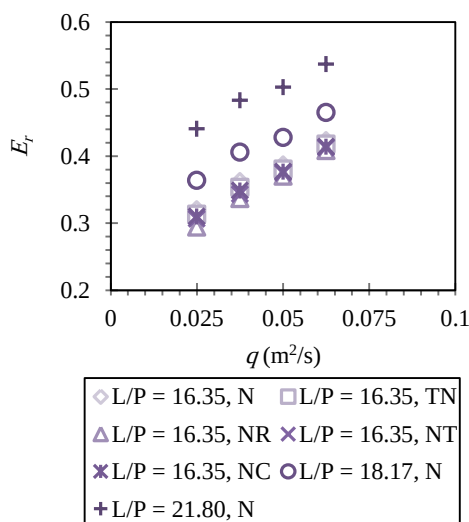
با استفاده از سازه تونلی در کلیدهای خروجی سرریز، از اختلاط جریان خروجی از این کلیدها با جریان ریزشی از کلیدهای ورودی جلوگیری به عمل آمد (شکل ۶). این جداسازی جریان، موجب حذف گردابه‌های سطحی کناری و عدم اختلاط جریان در مجاورت دیواره‌های کلیدهای خروجی شد. در این حالت، جریان‌های خروجی از کلیدهای خروجی و جریان عبوری از روی سازه تونلی، به صورت مجزا به سمت پایین‌دست هدایت می‌شوند. ریزش جریان از روی سازه تونلی در فاصله بیشتری از پنجه سرریز صورت می‌گیرد که این امر می‌تواند خطر واژگونی سرریز را کاهش دهد. اختلاط این جریان‌ها (خروجی از کلیدهای خروجی،

مقدار کمتری را نشان می‌دهد. این نتیجه حاکی از آن است که این بلوک‌ها با ایجاد اغتشاش و استهلاک انرژی، موفق شده‌اند انرژی مخصوص جریان را در پایین دست سرریز کاهش دهند. این کاهش انرژی به معنای کم شدن سرعت مخرب جریان در منطقه پایین دست است که از نظر مهندسی یک نقطه مثبت و مطلوب به



شکل ۷. الف) منحنی دبی - ارتفاع جریان و ب) ضریب آگذری نسبت به پارامتر بدون بعد L/P

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



شکل ۸. انرژی نسبی جریان نسبت به دبی در واحد عرض

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

صورت زیگزآگی در مرکز قرار گرفت. برای درک بهتر هندسه چیدمان بلوک‌ها و الگوی جریان روی آن‌ها می‌توان به شکل (۵) مراجعه کرد.

با تحلیل شکل‌های (۷-الف و ۷-ب) که به ترتیب منحنی ارتباط دبی-ارتفاع جریان (اشل) و ضریب دبی سرریز را نسبت به پارامتر بی بعد L/P نشان می‌دهند، نتایج زیر به دست می‌آید:

با افزایش دبی جریان، ارتفاع کل آب (هد) در بالادست سرریز افزایش می‌یابد که دلیل آن حضور حجم بیشتر آب در این ناحیه است. این افزایش هد، به نوبه خود باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش ارتفاع سرریز و در نتیجه افزایش پارامتر بی بعد L/P ، ارتفاع جریان در بالادست کاهش یافته و ضریب دبی افزایش می‌یابد. این پدیده نشان می‌دهد که در سرریزهای کوتاه‌تر، آب با سهولت بیشتری از روی تاج سرریز عبور می‌کند که در نهایت به افزایش ظرفیت عبور جریان منجر می‌شود. بر اساس داده‌های کمی، به‌طور میانگین در سرریزی با ارتفاع ۰/۲۰ متر در مقایسه با سرریزهای با ارتفاع ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر، ارتفاع جریان به ترتیب ۴/۶ درصد و ۹/۱ درصد بیشتر است. این افزایش هد موجب کاهش ضریب دبی به میزان ۶/۱ درصد و ۱۱/۲ درصد به ترتیب برای دو سرریز کوتاه‌تر شده است. ذکر این نکته ضروری است که ارتفاع بلوک‌ها و سازه تونلی به گونه‌ای انتخاب و نصب شدند که تأثیری بر ضریب دبی جریان نداشته باشند. علاوه بر این، دریچه انتهایی کانال به صورت آزاد عمل می‌کرد تا از مستغرق شدن سرریز جلوگیری شود.

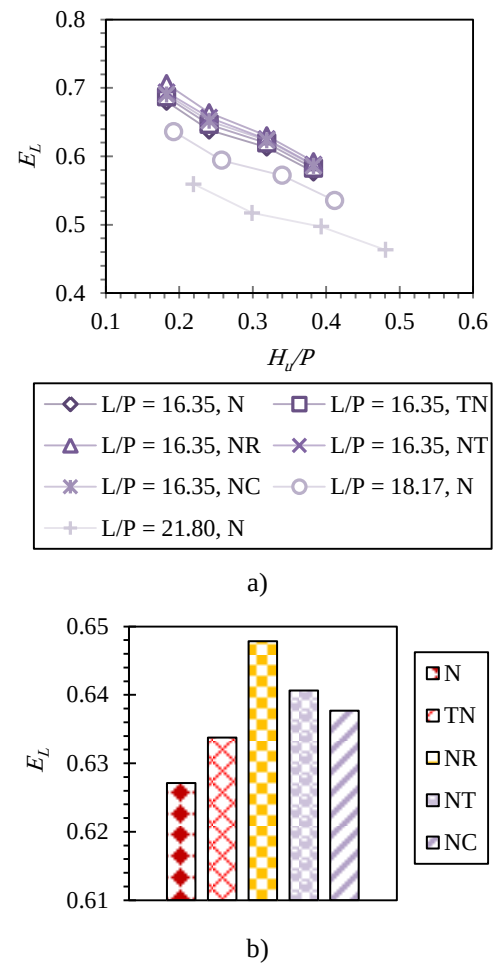
با تحلیل شکل (۸) که ارتباط بین انرژی نسبی جریان (E_r) و دبی در واحد عرض در بالادست سرریز (q) را نشان می‌دهد، نتایج زیر قابل استنباط است:

با افزایش دبی در واحد عرض، انرژی نسبی جریان نیز افزایش می‌یابد. انرژی نسبی، نسبت انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز به انرژی مخصوص در بالادست آن را بیان می‌کند. با افزایش دبی، انرژی مخصوص در بالادست افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش دبی منجر به سرعت بیشتر جریان در پایین دست می‌شود که باعث می‌شود و انرژی مخصوص در پایین دست با نرخ بیشتری افزایش یابد. این امر در نهایت به افزایش انرژی نسبی منجر می‌شود. در حالتی که از بلوک‌های مستطیلی روی سازه تونلی استفاده شده است، انرژی نسبی جریان

دلیل این امر آن است که افزایش این پارامتر نشان‌دهنده سرعت بیشتر جت‌های خروجی از سرریز و در نتیجه افزایش سطح اغتشاش در جریان است. در این شرایط، جریان انرژی کمتری را در حین عبور از سرریز تلف می‌کند و انرژی جنبشی بیشتری به پایین دست منتقل می‌شود. در سرریزهای مجهز به بلوک بر روی سازه تونلی، اتلاف انرژی جریان به طور قابل توجهی بیشتر است. عملکرد بلوک‌ها به این صورت است که با کاهش سرعت جت‌های خروجی از کلیدهای خروجی و همچنین کاهش اختلاط جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی، از قدرت جت‌ها کاسته و در نتیجه باعث افزایش تلفات انرژی می‌شوند. در سرریزهای با ارتفاع بیشتر، به دلیل افزایش ارتفاع ریزش جریان و اختلاط قوی تر جریان در نزدیکی لبه سرریز (پنجه)، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. این پدیده منجر به انتقال جریان به پایین دست با سرعت کمتری می‌شود که نشان از عملکرد مؤثر سرریزهای بلندتر در استهلاک انرژی مخرب جریان دارد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بلوک‌ها و همچنین افزایش ارتفاع سرریز می‌تواند به عنوان راهکارهایی مؤثر برای افزایش اتلاف انرژی و کاهش سرعت مخرب جریان در پایین دست مد نظر قرار گیرد.

در سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متر نسبت به مدل‌های ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متری که هیچ یک مجهز به بلوک نیستند، کاهش انرژی جریان به ترتیب حدود ۶/۸ و ۱۸/۸ درصد کمتر است. در سرریز ۰/۲۰ متری که با بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای تجهیز شده، افزایش اتلاف انرژی نسبت به حالت بدون بلوک با همان ارتفاع، به ترتیب حدود ۳/۲، ۲/۱ و ۱/۶ درصد بیشتر مشاهده می‌شود. این امر ناشی از عملکرد بلوک‌ها به عنوان مانع و تشکیل پرش هیدرولیکی بلندتر در قسمت بالادست آن‌ها است.

همچنین، میزان اتلاف انرژی در سرریز دارای بلوک مستطیلی در مقایسه با انواع دوزنقه‌ای و دایره‌ای، به ترتیب حدود ۱/۱ و ۱/۶ درصد بالاتر است که دلیل آن تأثیر ترکیبی پرش هیدرولیکی و گردابه‌های تشکیل شده در اطراف بلوک‌های مستطیلی است. علاوه بر این، مقایسه سرریزهای مجهز به سازه تونلی با سرریز فاقد این سازه نشان می‌دهد که اتلاف انرژی در حالت اول حدود ۱/۱ درصد بیشتر است که به دلیل عدم اختلاط جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی با یکدیگر رخ می‌دهد.



شکل ۹. الف) تأثیر پارامترهای H_w/P و L/P و ب) تأثیر Type سرریز بر اتلاف انرژی جریان

Fig. 9. a) Effect of H_w/P and L/P parameters, and b) Effect of Type weir on flow energy loss

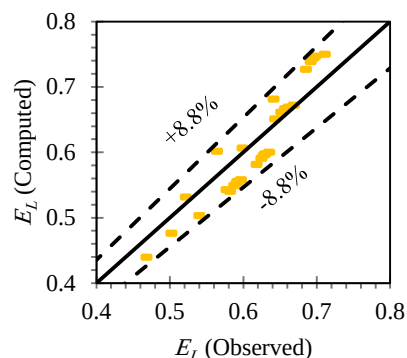
شمار می‌آید. با کاهش ارتفاع سرریز، جریان فرصت و مسیر کمتری برای از دست دادن انرژی خود قبل از رسیدن به پایین دست دارد. در نتیجه، انرژی نسبی جریان در پایین دست سرریزهای کوتاه‌تر مقدار بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. این نشان می‌دهد که سرریزهای بلندتر در استهلاک انرژی جریان کارآمدتر عمل می‌کنند. در سرریز دارای سازه تونلی نسبت به سرریز بدون سازه تونلی، انرژی نسبی مقدار کمتری دارد و افزایش اتلاف انرژی در سرریز دارای سازه تونلی به دلیل جدایش جریان در کلیدهای خروجی این سرریز است.

بر اساس تحلیل شکل‌های (۹-الف و ۹-ب) که به ترتیب تأثیر پارامترهای H_w/P و L/P و همچنین نوع سازه (Type) بر اتلاف انرژی جریان را نشان می‌دهند، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد: با افزایش پارامتر H_w/P ، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.

مقدار اتلاف انرژی مشاهده شده را نسبت به اتلاف انرژی محاسبه شده نشان می‌دهد. همانطور که پیدا است، این رابطه با حاشیه خطای ۸/۸ 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 محاسبه شدند [28].

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

میانگین اتلاف انرژی جریان در تحقیق فتحی و همکاران (۲۰۲۳) در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A صفر، پنج، ده و پانزده پله‌ای به ترتیب برابر ۰/۵۹۵، ۰/۶۷۱، ۰/۶۱۷ و ۰/۶۱۷ است [19]. در بهترین حالت تحقیق حاضر (یعنی سرریز همراه با بلوک‌های مستطیلی موجود روی سازه تونلی)، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز صفر پله‌ای حدود ۲۲/۵ درصد بیشتر، نسبت به سرریز پنج پله‌ای حدود ۸/۲ درصد بیشتر، نسبت به سرریز ده پله‌ای حدود ۳/۴ درصد کمتر و نسبت به سرریز پانزده پله‌ای حدود ۴/۸ درصد بیشتر است. دلیل آن جدایش جریان خروجی از کلیدهای ورودی با کلیدهای خروجی است. با این حال، اتلاف انرژی جریان در بهترین حالت تحقیق حاضر نسبت به سرریزهای ده پله‌ای کمتر است و دلیل آن زبری بیشتر سرریزهای کلیدپیانویی پلکانی نسبت به بلوک‌ها است. با پله‌های ده تایی، سرعت جریان به مراتب کاهش یافته و همین امر باعث افزایش اتلاف انرژی جریان می‌شود. میانگین اتلاف انرژی در بهترین حالت مطالعه فتحی و همکاران (۲۰۲۵) یعنی پوشش گیاهی صلب با تراکم بیشتر در پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B برابر ۰/۶۳۴ است [23]. با این حال، میانگین اتلاف انرژی در مطالعه ایشان حدود ۲/۲ درصد کمتر از میانگین اتلاف انرژی در بهترین حالت مطالعه حاضر است. دلیل این اختلاف کم، کاهش سرعت جریان و قدرت گردابه‌ها توسط بلوک‌ها و پوشش‌های گیاهی است. حفیظی و خوش فطرت (۲۰۲۴) نیز با ایجاد هندسه متفاوت بلوک روی کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C دریافتند که میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای دارای بلوک مستطیلی (R)، دوزنقه‌ای (T) و دایره‌ای (C) به ترتیب برابر ۰/۵۹۱، ۰/۵۷۳ و ۰/۵۵۲ است [29]. با توجه به شکل (۱۱)، میانگین اتلاف انرژی در مطالعه ایشان با سرریز تونلی با بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و



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

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

جدول ۲. ضریب همبستگی و میانگین خطاهای مورد نظر

Table 2. Correlation coefficient and mean of the desired errors

Row	L/P	Type	MAE	RMSE	CC
1	16.35	N	0.0336	0.0453	0.966
2	16.35	TN	0.0310	0.0342	0.985
3	16.35	NR	0.0271	0.0370	0.952
4	16.35	NT	0.0316	0.0295	0.997
5	16.35	NC	0.0258	0.0330	0.998
6	18.17	N	0.0311	0.0374	0.983
7	21.80	N	0.0243	0.0347	0.963

رابطه (۴)، برای محاسبه اتلاف انرژی جریان در سرریز با وجود بلوک و سازه تونلی موجود در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B ارائه شده است. این رابطه برای ۷۵ درصد داده‌ها ارائه و برای ۲۵ درصد دیگر داده‌ها با خطای بسیار کمی قابل اعتماد است. با توجه به تأثیر زیاد پارامتر L/P بر اتلاف انرژی جریان، این پارامتر در رابطه (۴) نیز مورد بررسی قرار گرفت. مربع ضریب همبستگی در این رابطه ۹۷/۷۸ درصد است. جدول (۲) نیز ضریب همبستگی (CC)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) را نشان می‌دهد. همچنین ضریب K در این رابطه به پارامتر L/P و Type مرتبط است. مقدار K در L/P برابر ۱۶/۳۵، ۱۸/۱۷ و ۲۱/۸۰ (سرریزهای بدون بلوک و سازه تونلی) به ترتیب ۰/۲۴۹، ۰/۲۳۵ و ۰/۲۱۳ است. مقدار K در سرریز با بلوک‌های مستطیلی (NR) برابر ۰/۲۵۷، در سرریز با بلوک‌های دوزنقه‌ای (NT) برابر ۰/۲۵۶ و در سرریز با بلوک‌های دایره‌ای (NC) برابر ۰/۲۵۵ است. همچنین مقدار K در سرریز با سازه تونلی (TN) برابر ۰/۲۵۳ است. شکل (۱۰) نیز

افزایش می‌یابد.

- به‌طور میانگین بلوک‌ها در کلیدهای خروجی سرریز مانند مانع عمل کرده و اتلاف انرژی جریان را تا ۲/۳ درصد افزایش می‌دهند.
- تشکیل گردابه‌های کم‌انرژی و پرش هیدرولیکی در اطراف بلوک‌ها، منجر به کاهش انرژی مخصوص جریان در بخش پایین‌دست می‌شود.
- با افزایش نسبت‌های H_u/P و L/P ، میزان اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد.
- سازه‌ی تونلی باعث اتلاف انرژی جریان بیشتری می‌شود و به‌ترتیب در سرریز با بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای بیشترین اتلاف انرژی جریان مشاهده شد.
- در ادامه نیز رابطه‌ای با ضریب همبستگی ۹۷/۷۸ درصد برای محاسبه اتلاف انرژی جریان ارائه شد.

در این پژوهش، فرض بر جریان دائمی و ضریب اصلاح سرعت واحد بوده و تأثیر عواملی همچون رسوبات، شاخ و برگ شناور در سیلاب، و همچنین یکسان در نظر نگرفتن دهانه‌های بازشدگی، مورد بررسی قرار نگرفت؛ که توجه به این محدودیت‌ها می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات آتی باشد.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می‌گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

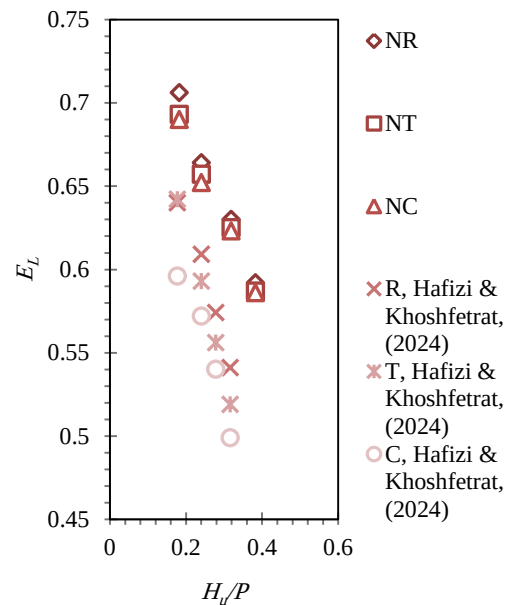
سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش‌ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر اتلاف انرژی مطالعه حاضر با مطالعه حفیظی و خوش‌فطرت (۲۰۲۴)

Fig. 11. Comparison of energy loss values of the present study with the study of Hafizi and Khoshfetrat (2024)

دایره‌ای به‌ترتیب حدود ۸/۸، ۱۰/۵ و ۱۳/۵ درصد کمتر است. دلیل اصلی آن وجود سازه تونلی و جدایش جریان‌های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی نسبت به مطالعه ایشان است. همچنین شرایط مرزی متفاوت بین سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و دوزنقه‌ای نوع C نیز می‌تواند از عوامل موثر بر اتلاف انرژی جریان باشد.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی، به دلیل کارایی بالای آن‌ها در انتقال جریان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعه حاضر، به تحلیل این پدیده در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B، در دو حالت مجهز و فاقد بلوک روی سازه تونلی، می‌پردازد. همچنین، از تحلیل ابعادی به‌عنوان ابزاری برای محاسبه اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی با و بدون سازه‌ی تونلی و با شکل متفاوت بلوک‌ها روی سازه تونلی استفاده شد.

۶- یافته‌های کلیدی

- با افزایش ارتفاع سرریز نسبت به سرریز کوتاه‌تر، ضریب آبگذری تا ۱۱/۲ کاهش و اتلاف انرژی جریان تا ۱۸/۸ درصد

فهرست علائم انگلیسی و یونانی

m^2/s	دبی در واحد عرض	q	m	طول دیواره‌ی جانبی سرریز	B*
m^3/s	دبی جریان	Q	m	طول لبه آویزان ورودی	B _i
-	عدد رینولدز	Re	m	انرژی جریان در بالادست سرریز	E ₁
m	ضخامت سرریز	Ts	m	انرژی جریان در پایین‌دست سرریز	E ₂
-	سرریزهای دارای سازه‌ی تونلی	TN	-	انرژی نسبی	Er
m/s	سرعت جریان در بالادست سرریز	V ₁	m/s ²	نیروی گرانشی	g
m/s	سرعت جریان در پایین‌دست سرریز	V ₂	m	عمق جریان در بالادست سرریز	h
m	عرض سرریز	W	m	هد کل جریان در بالادست سرریز	H _u
m	عرض کلید ورودی	W _i	-	مقادیر ثابت محاسبه شده در رابطه‌ها	K
m	عرض کلید خروجی	W _o	m	طول سرریز	L
-	عدد وبر	We	-	سرریز ساده	N
m	عمق جریان در پایین‌دست سرریز	y	-	سرریز با بلوک‌های استوانه‌ای	NC
Kg/(m.s)	لزجت دینامیکی	μ	-	سرریز با بلوک‌های مکعب مستطیلی	NR
Kg/m ³	چگالی آب	ρ	-	سرریز با بلوک‌های مکعب دوزنقه‌ای	NT
Kg/s ²	ضریب کشش سطحی	σ	m	ارتفاع سرریز	P

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*, 72(1), pp.34-48. 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., 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.
- [4] Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H., 2025a. 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., n.d. *Study and construction of PK weirs in Vietnam (2004 to 2011)*.
- [6] Pfister, M., Jüstrich, S. and Schleiss, A.J., 2017. Toe-scour formation at piano key weirs. In: *Labyrinth and Piano Key Weirs III*. Boca Raton: 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*. Lisbon: Instituto Superior Técnico, pp.1-11. (In Portuguese).
- [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, 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, 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*, pp.1-13. doi: 10.1080/09715010.2024.2353612.
- [21] Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M., 2024b. 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*, p.102830. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2025.102830.
- [23] Fathi, A., Khoshfetrat, A., Talebipour, F. and Saadat, M., 2025b. Influence of rigid vegetation on flow energy dissipation downstream of type B trapezoidal piano key weirs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(8), pp.1-15. doi: 10.1007/s41062-025-02172-x.
- [24] Wadi, W.M., Alavi, S.H., Izadinia, E., Daneshvar, F.A. and Khoshfetrat, A., 2025. The effect of different block shapes on the downstream local scour in piano key weir. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. doi: 10.3311/PPci.41037.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Khoshfetrat, A., Challoob 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.
- [29] Hafizi, N. and Khoshfetrat, A., 2024. Different block geometry in piano key weir and its effect on energy loss. *Iranian Water Researches Journal*, 18(3). Available at: https://iwrj.sku.ac.ir/article_11653.html?lang=en (Accessed: 25 August 2026).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mohammed Wadi, W., Khoshfetrat, A., Habib Jasim, M. and Salemi, N., 2026. Blocks on the tunnel structure and their effect on flow energy dissipation in a type B rectangular piano key weir (PKW). *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.21-33.

