

## هندسه متفاوت بلوک در سرریز کلیدپیانویی و تأثیر آن بر اتلاف انرژی

نگین حفیظی<sup>۱</sup> و علی خوش فطرت<sup>۲\*</sup>

### چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی شکل جدیدی از سرریزهای منقاری هستند که ظرفیت عبور جریان بیشتری از روی خود دارند؛ بنابراین بررسی اتلاف انرژی در این سرریزها، دارای اهمیت است. در این تحقیق از سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C با دو ارتفاع ۰/۲ و ۰/۱۸ متر در یک فلوم آزمایشگاهی استفاده شد. برای نخستین بار از سه هندسه متفاوت بلوک در کلیدهای خروجی برای بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C استفاده شد. بلوک‌ها براساس سرریزهای مجهز به بارشکن طراحی شدند. بلوک‌های اول مکعب‌مستطیل، بلوک‌های دوم استوانه‌ای و بلوک‌های سوم با مقطع دوزنقه‌ای هستند. همچنین از چهار دبی ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه نیز استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ۱۰ درصدی ارتفاع سرریز، اتلاف انرژی جریان حدود ۱۹/۳ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین اتلاف انرژی در سرریز با بلوک مستطیلی مشاهده شد. اتلاف انرژی در سرریزهای با بلوک مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای نسبت به سرریز بدون بلوک و با ارتفاع ۰/۲ متر، حدود ۱۶/۸، ۱۰/۹ و ۱۴/۱ درصد افزایش می‌یابد. در انتها رابطه‌ای با ضریب همبستگی ۹۸/۸۳ درصد برای ۲۰ آزمایش به منظور بررسی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای دوزنقه‌ای نوع C با دو ارتفاع متفاوت و با/ بدون بلوک در کلیدهای خروجی، ارائه شد.

**واژه‌های کلیدی:** بررسی آزمایشگاهی، بلوک استوانه‌ای، بلوک دوزنقه‌ای، بلوک مستطیلی، کلیدهای خروجی.

ارجاع: حفیظی ن. و خوش فطرت ع. ۱۴۰۳. هندسه متفاوت بلوک در سرریز کلیدپیانویی و تأثیر آن بر اتلاف انرژی. نشریه پژوهش آب ایران. ۱۸: ۴۴-۴۹.  
<https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2024.14787.2606>

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: [khoshfetrat@khuisf.ac.ir](mailto:khoshfetrat@khuisf.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

(2023) *et al.* به بررسی وجود پله با هندسه و تعداد متفاوت در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع A پرداختند. ایشان دریافتند که وجود پله باعث افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. همچنین آنها بیشترین میزان اتلاف انرژی را در سرریز ۱۰ پله‌ای مشاهده کردند. (Rdhaiwi *et al.* (2024) با مقایسه سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع B و C دریافتند که مقدار اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع C به مراتب بیشتر است. با توجه به مطالعات انجام شده بر اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی، همچنان کمبود مطالعه اتلاف انرژی و راهکار برای افزایش آن در سرریز کلیدپیانویی نوع C به چشم می‌خورد. در این تحقیق و برای نخستین بار به بلوک با هندسه متفاوت در کلیدهای خروجی سرریز و تأثیر آن بر اتلاف انرژی جریان پرداخته می‌شود.

### آنالیز ابعادی

معادله (۱)، میزان اتلاف انرژی، شکل ۱ و معادله (۲) نیز پارامترهای تأثیرگذار بر میزان اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی با وجود مانع در کلیدهای خروجی آن را نشان می‌دهند. در این معادلات،  $E_{Loss}$  میزان اتلاف انرژی،  $y_1$  عمق جریان در بالادست سرریز از روی لبه سرریز (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (متر مربع بر ثانیه)،  $g$  نیروی گرانش (متر بر مجذور ثانیه)،  $y_2$  عمق پایین دست سرریز (متر)،  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $\mu$  لزجت دینامیکی (کیلوگرم بر متر بر ثانیه)،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی (کیلوگرم بر مجذور ثانیه)،  $Y$  ارتفاع کل جریان  $(=y_1+q^2/2gy_1^2)$ ،  $P$  ارتفاع سرریز (متر) و  $Sh$  ضریب شکل یا هندسه بلوک‌ها هستند.

$$E_{Loss} = \frac{\left(y_1 + P + \frac{q^2}{2gy_1^2}\right) - \left(y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2}\right)}{\left(y_1 + P + \frac{q^2}{2gy_1^2}\right)} \quad (1)$$

$$E_{Loss} = f(\rho, \mu, \sigma, Y, P, q, Sh) \quad (2)$$

با استفاده از تئوری پی باکینگهام و با در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری چگالی جریان، هد کل جریان و دبی در واحد عرض، میزان اتلاف انرژی تابع پارامترهای زیر می‌شود.

$$E_{Loss} = f\left(\text{Re}, \text{We}, \frac{Y}{P}, Sh\right) \quad (3)$$

سرریزهای کلیدپیانویی تکامل یافته سرریزهای منقاری بوده که در یک عرض محدود، دارای طول تاج بیشتری هستند. سرریزهای کلیدپیانویی در پلان به شکل‌های مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای هستند. همچنین به چهار نوع A، B، C و D تقسیم می‌شوند (Kabiri-Samani and Javaheri, 2012). سرریز نوع اول دارای پیشانی در بالادست و پایین دست آن، سرریز نوع دوم و سوم به ترتیب دارای پیشانی در بالادست و پایین دست و سرریز نوع آخر فاقد پیشانی در بالادست و پایین دست سرریز است (Safarzadeh and Noroozi, 2014). مطالعات زیادی در مورد ضریب آبگذری این سرریزها و راهکارهایی برای افزایش آن انجام شده است. به دلیل راندمان بالای این سرریزها؛ بررسی میزان اتلاف انرژی در آن حائز اهمیت است. افرادی مانند (Khanh, Leite Ribeiro *et al.* (2007) ، (Erpicum *et al.* (2010) و (Bieri *et al.* (2011) ، (2013) مطالعات ارزشمند و مفیدی روی سرریزهای منقاری و کلیدپیانویی انجام داده‌اند. (Sajadi (2017) با ایجاد بلوک با هندسه ثابت در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافت که وجود بلوک باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود. (Al-Shukur and Al-Khafaji (2018) با بررسی شیب‌های مختلف کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B دریافتند که با افزایش شیب، میزان اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. (Eslinger and Crookston (2020) با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی نوع A با ارتفاع و نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی متفاوت دریافتند که با افزایش دبی، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین آنها دریافتند که نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی روی میزان اتلاف انرژی ندارد. (Naghbizadeh *et al.* (2020) با ایجاد بلوک و پله با هندسه ثابت در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A و به صورت آزمایشگاهی و عددی دریافتند که با وجود بلوک و پله میزان اتلاف انرژی به ترتیب ۸/۷۵ و ۱۵/۲۱ درصد افزایش می‌یابد. (Singh and Kumar (2022) تأثیر وجود پله با تعداد ثابت در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B را بررسی کردند. ایشان دریافتند که وجود پله باعث افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. (Fathi

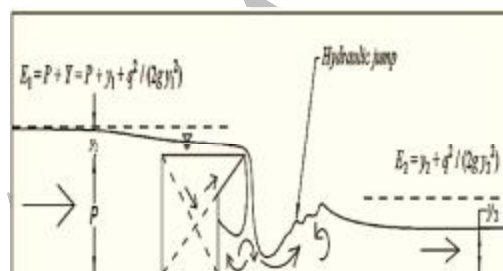
عمق سنج سوزنی، دارای خطای بسیار ناچیزی بود. (Rdhaiwi et al., 2023) در تحقیق خود به صورت کامل به موضوع بالا پرداخته‌اند. از دو سرریز کلیدپانویی نوع C با ارتفاع ۰/۲ و ۰/۱۸ متر و با هندسه ثابت نیز در این تحقیق استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریز ( $W_i$ ) برابر با ۰/۲۱۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریز ( $W_o$ ) برابر با ۰/۰۷۵ متر، طول دیواره‌های جانبی سرریز (B) برابر با ۰/۵ متر و ضخامت ( $T_s$ ) برابر با ۰/۰۱ متر است. عمق جریان در پایین دست سرریز به صورت مصنوعی و توسط دریچه انتهایی تنظیم نگردیده است. از چهار دبی ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵، ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه استفاده شد. از سه هندسه متفاوت بلوک با مقطع مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای استفاده شد (شکل ۲). همانطور که مشخص است، در هر کلید خروجی از ۹ بلوک کامل به ابعاد مقطع ۰/۰۲۵ در ۰/۰۲۵ متر و ۲ بلوک با نصف این ابعاد و در کناره‌ها و با ارتفاع ۰/۰۶ متر استفاده شد. اولین بلوک در فاصله‌ای قرار گرفت که تأثیری روی ضریب آبگذری و عمق بالادست یا برگشت جریان نداشته باشد. جدول ۱، مشخصات هیدرولیکی جریان را نشان می‌دهد که در آن Q دبی جریان است. با وجود داشتن عمق جریان در بالادست سرریز و داشتن دبی جریان، می‌توان سرعت جریان را نیز محاسبه کرد. همچنین با استفاده از معادله پیوستگی و با داشتن عمق جریان در پایین دست سرریز، می‌توان سرعت جریان در پایین دست سرریز را محاسبه کرد. بلوک‌ها فقط در سرریز با ارتفاع ۰/۲ متر نصب شدند.

### نتایج و بحث

جریان از روی کلیدهای ورودی و به صورت جت آزاد به پایین دست و روی کلیدهای خروجی می‌ریخت. همچنین جریان توسط کلیدهای خروجی و به صورت جت مایل به پایین دست منتقل می‌شد. جریان خروجی از کلیدهای خروجی، به بلوک‌ها برخورد کرده و از سرعت آن کاسته می‌شد. همچنین جریان پس از برخورد به بلوک‌ها، جدا شده و به بلوک ردیف دوم برخورد می‌کرد. در ردیف دوم نیز جریان جدا شده از هر بلوک با هم مخلوط شده و به بلوک ردیف سوم برخورد می‌کرد. این عمل تا انتهای کلیدهای خروجی ادامه داشت. ناحیه استغراق موضعی جریان از روی بلوک اول عبور کرده و به بلوک‌های ردیف

به دلیل آشفتگی جریان و زیادبودن عدد رینولدز ( $Re=q/\theta$ )، از تأثیر آن صرف نظر شد (Sumer and Fredsoe, 1991). همچنین به دلیل عمق کافی بیشتر از ۰/۰۳ متر، از تأثیر عدد وبر ( $We=\rho q^2/\sigma Y$ ) نیز صرف نظر شد (Novák and Čabelka, 1981). میزان اتلاف انرژی در سرریز کلیدپانویی با هندسه متفاوت بلوک در کلیدهای خروجی تابع معادله زیر خواهد شد.

$$E_{Loss} = f \left( \frac{Y}{P}, sh \right) \quad (4)$$



شکل ۱- سرریز کلیدپانویی نوع C و پارامترهای مؤثر بر اتلاف انرژی در آن

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۱ متر و عرض ۰/۶ متر انجام شد. جریان پس از روشن کردن دستگاه PLC و تنظیم آن توسط مانیتور موجود روی این دستگاه و بعد از گذشت از آرام‌کننده‌های جریان وارد سرریز می‌شود. با روشن کردن دستگاه PLC، پمپ نیز روشن شده و جریان را از مخزن زیرزمینی به سمت فلوم، هدایت می‌کند. خطای PLC برابر با ۰/۰۱ درصد است. سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شده است. عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز، توسط سنسورهای موجود روی کانال، اندازه‌گیری شد. سنسورها به مانیتور متصل بوده و عمق جریان را نمایش می‌دهند. این سنسورها به صورت آلتراسونیک بوده و زمانی که جریان داخل فلوم نیست، تنظیم می‌شوند. پس از روشن کردن پمپ، این سنسورها موجی را به سمت جریان فرستاده و عمق جریان روی مانیتور ذکر شده، نمایش داده می‌شود. عمق جریان در بالادست سرریز و در فاصله  $4Y_1$  از ابتدای تاج سرریز و در فاصله 10P در پایین دست سرریز اندازه‌گیری شد (Fathi et al., 2023 and 2024). عمق جریان در این فواصل با عمق سنج سوزنی نیز برداشت شد. عمق اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و

ایشان سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C و با ارتفاع ۰/۲ متر و هندسه آن مشابه سرریز مورد بررسی در تحقیق حاضر است. ایشان از دبی‌های ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه استفاده کردند. همان‌طور که مشخص است، با افزایش دبی جریان، عمق جریان در بالادست سرریز نیز افزایش می‌یابد و می‌تواند ضریب آبگذری را کاهش دهد. همچنین داده‌های تحقیق حاضر با داده‌های Rdhaiwi et al., (2023) تطابق خوبی دارند و به این معنا است که در تحقیق حاضر خطایی در اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست سرریز وجود ندارد.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان

ردیف	Q (m <sup>3</sup> /s)	مدل	P (m)	Y/P	E <sub>Loss</sub>
۱	۰/۰۲۵	دوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۶۲۴
۲	۰/۰۳۰	دوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۲۴۱	۰/۵۹۳
۳	۰/۰۳۵	دوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۲۷۹	۰/۵۵۶
۴	۰/۰۴۰	دوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۳۱۷	۰/۵۱۹
۵	۰/۰۲۵	دایره‌ای	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۵۹۶
۶	۰/۰۳۰	دایره‌ای	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۵۷۲
۷	۰/۰۳۵	دایره‌ای	۰/۲	۰/۲۴۱	۰/۵۴۰
۸	۰/۰۴۰	دایره‌ای	۰/۲	۰/۲۷۹	۰/۴۹۹
۹	۰/۰۲۵	مستطیلی	۰/۲	۰/۳۱۷	۰/۶۴۰
۱۰	۰/۰۳۰	مستطیلی	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۶۰۹
۱۱	۰/۰۳۵	مستطیلی	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۵۷۴
۱۲	۰/۰۴۰	مستطیلی	۰/۲	۰/۲۴۱	۰/۵۴۱
۱۳	۰/۰۲۵	-	۰/۲	۰/۲۷۹	۰/۵۴۵
۱۴	۰/۰۳۰	-	۰/۲	۰/۳۱۷	۰/۴۹۹
۱۵	۰/۰۳۵	-	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۴۷۳
۱۶	۰/۰۴۰	-	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۴۵۲
۱۷	۰/۰۲۵	-	۰/۱۸	۰/۱۸۳	۰/۴۴۴
۱۸	۰/۰۳۰	-	۰/۱۸	۰/۲۰۴	۰/۴۱۸
۱۹	۰/۰۳۵	-	۰/۱۸	۰/۲۳۱	۰/۳۸۳
۲۰	۰/۰۴۰	-	۰/۱۸	۰/۲۶۴	۰/۳۴۳



شکل ۳- نحوه قرارگیری بلوک‌ها در کلیدهای خروجی سرریز

سوم برخورد می‌کند. شکل ۳، نحوه قرارگیری بلوک‌های با مقطع مستطیلی (مکعب مستطیل) را نشان می‌دهد. آرایش همه بلوک‌ها مطابق با شکل ۳ است. جریان از روی بلوک‌ها عبور کرده و سپس در پایین‌دست سرریز یک پرش هیدرولیکی شکل می‌گیرد. این پرش هیدرولیکی با افزایش دبی جریان، قدرت بیشتری می‌گیرد.



الف) مستطیلی



ب) دایره‌ای

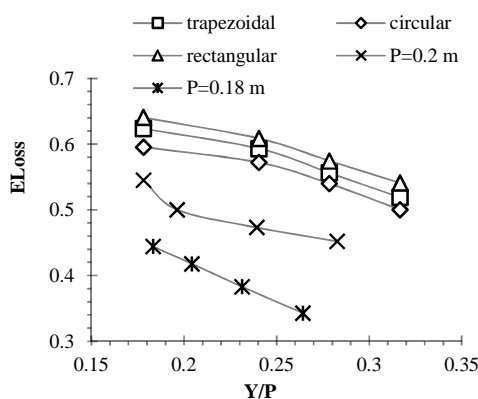


ج) دوزنقه‌ای

شکل ۲- سرریزهای کلیدپیانویی همراه با هندسه متفاوت بلوک در کلیدهای خروجی آن

شکل ۴، منحنی دبی-ارتفاع در سرریزهای کلیدپیانویی ساده و بدون بلوک و با ارتفاع ۰/۲ و ۰/۱۸ متر را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۱، بلوک‌ها تأثیری بر عمق بالادست سرریز ندارند. همان‌طور که از شکل پیداست، با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار عمق جریان در بالادست سرریز نیز افزایش می‌یابد. برای بهتر نشان‌دادن موضوع از داده‌های Rdhaiwi et al., (2023) نیز برای مقایسه نتایج این پژوهش استفاده شد. سرریز مورد بررسی در کار

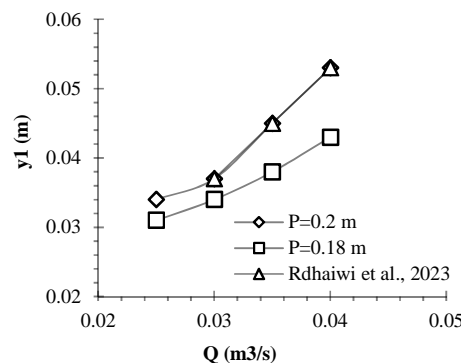
سرریز با ارتفاع ۰/۱۸ و ۰/۲ متر به ترتیب برابر با ۳۹/۷ و ۴۹/۲ است. با افزایش ۱۰ درصدی ارتفاع سرریز، مقدار اتلاف انرژی حدود ۱۹/۳ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۶- تأثیر نسبت  $Y/P$  بر اتلاف انرژی

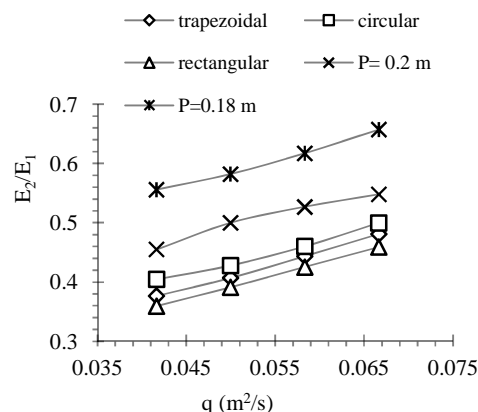
همان‌طور که گفته شد؛ وجود بلوک در کلیدهای خروجی سرریز، باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. میانگین میزان اتلاف انرژی در سرریزهای بلوک‌دار با مقطع مستطیلی، دایره‌ای و ذوزنقه‌ای به ترتیب برابر با ۵۹/۱، ۵۵/۲ و ۵۷/۳ است. همان‌طور که پیداست، میزان اتلاف انرژی در سرریز با بلوک‌های مستطیلی بیشتر است. دلیل آن می‌تواند برخورد جریان به پشت بلوک و جدا شدن آن به دو سمت بلوک باشد که در نتیجه کاهش سرعت جریان را به همراه دارد. در سرریز با بلوک‌های دایره‌ای مقدار اتلاف انرژی کمتر است و دلیل آن سرخوردن جریان پشت بلوک‌های دایره‌ای است.

همچنین جریان در اطراف بلوک‌های دایره‌ای شکل، به صورت جریان در اطراف سیلندر عمل کرده و جدایش جریان به وجود می‌آید. جدایش خطوط جریان نیز باعث کاهش کمتری از سرعت جریان می‌شود. در سرریزهای با بلوک ذوزنقه‌ای شکل و به دلیل شیب‌دار بودن پشت بلوک‌ها، جریان از بلوک‌ها بالا آمده و به پایین دست پرتاب می‌شود و هیچ جریانی پشت این نوع از بلوک‌ها برخورد نمی‌کند. اتلاف انرژی جریان در سرریزهای با بلوک مستطیلی، دایره‌ای و ذوزنقه‌ای نسبت به سرریز بدون بلوک و با ارتفاع ۰/۲ متر، حدود ۱۶/۸، ۱۰/۹ و ۱۴/۱ درصد افزایش می‌یابد؛ بنابراین نتیجه این است که در سرریز مجهز به بلوک مستطیلی، اتلاف انرژی بیشتری رخ می‌دهد. با این حال باید به بررسی آب‌سنجی موضعی در



شکل ۴- منحنی دبی-ارتفاع جریان

شکل ۵، تأثیر دبی در واحد عرض بر نسبت انرژی در پایین دست سرریز به انرژی در بالادست سرریز را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست با افزایش دبی در واحد عرض، انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد (Hashemi Fesharaki et al. 2024). دلیل آن می‌تواند افزایش عمق در پایین دست سرریز به دلیل افزایش دبی در واحد عرض جریان باشد.



شکل ۵- تأثیر دبی در واحد عرض بر مقادیر انرژی نسبی جریان

شکل ۶، تأثیر نسبت ارتفاع کل به ارتفاع سرریز را بر میزان اتلاف انرژی نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست، با افزایش این نسبت، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند افزایش هد کل یا دبی جریان باشد. همچنین در سرریز با ارتفاع کمتر، مقدار اتلاف انرژی به مراتب نسبت به سرریز با ارتفاع بیشتر، کمتر است. با افزایش ارتفاع سرریز و افزایش بیشتر ریزش جریان، تلاطم و اغتشاش به وجود آمده در پایین دست سرریز، بیشتر و از انرژی کاسته می‌شود. میانگین اتلاف انرژی در

نسبت به سرریز بدون بلوک و حالت ساده در تحقیق حاضر حدود ۲ درصد کمتر است و در بهترین حالت تحقیق حاضر، یعنی در سرریز با هندسه بلوک‌های مستطیلی نسبت به بهترین حالت تحقیق ایشان، یعنی سرریز ۱۰ پله‌ای، میزان اتلاف انرژی حدود ۱۲ درصد کمتر است.

$$E_{Loss} = K \left( -2.361 \left( \frac{Y}{P} \right)^2 + 0.441 \left( \frac{Y}{P} \right) + 0.637 \right) \quad (5)$$

جدول ۲- محاسبه ضریب K

ردیف	مدل	P (m)	K	R <sup>2</sup>
۱	دوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۹۷۵	۹۹/۶۸
۲	دایره‌ای	۰/۲	۰/۹۳۰	۹۸/۹۶
۳	مستطیلی	۰/۲	۱/۰۰۰	۹۹/۸۲
۴	-	۰/۲	۰/۸۴۰	۹۶/۴۲
۵	-	۰/۱۸	۰/۶۷۰	۹۹/۲۹

### نتیجه‌گیری

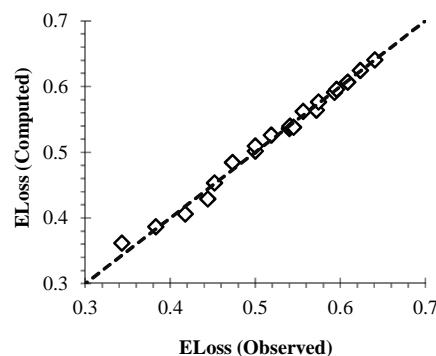
سرریزهای کلیدپیانویی سازه‌های پراهمیتی هستند که نسبت به سرریزهای خطی، جریان بیشتری را از روی خود عبور می‌دهند. بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی و راهکار برای افزایش آن، حائز اهمیت است. در این تحقیق از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با بلوک در کلیدهای خروجی آن استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان و ارتفاع سرریز، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت هد کل به ارتفاع سرریز، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش ۱۰ درصدی ارتفاع سرریز، مقدار اتلاف انرژی حدود ۱۹/۳ درصد کاهش می‌یابد. وجود بلوک در کلیدهای خروجی سرریز، باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود و بیشترین مقدار اتلاف انرژی در سرریز بلوک‌دار با مقطع مستطیلی مشاهده شد. اتلاف انرژی در سرریزهای با بلوک مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای نسبت به سرریز بدون بلوک، حدود ۱۶/۸، ۱۰/۹ و ۱۴/۱ درصد افزایش می‌یابد. در انتها و با توجه به آنالیز ابعادی، رابطه‌ای با ضریب همبستگی نسبتاً بالا، برای محاسبه اتلاف انرژی ارائه شد تا بتوان نتایج را به دیگر سرریزهای کلیدپیانویی موجود در کانال‌ها و رودخانه‌ها تعمیم داد.

پایین دست این سرریز پرداخته شود و تأثیر بلوک‌ها بر آبشستگی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

### محاسبه اتلاف انرژی

معادله (۵)، برای محاسبه میزان اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با بلوک در کلیدهای خروجی آن و با هندسه متفاوت کاربرد دارد. میانگین مقدار ضریب همبستگی در رابطه برابر با ۹۸/۸۳ درصد است. ضریب K در این معادله به شکل بلوک‌ها بستگی دارد که از جدول ۲ قابل استفاده است. همچنین این رابطه با خطای بسیار کمی قابل قبول است. از ۷۵ درصد داده‌ها برای استخراج معادله و از ۲۵ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی استفاده شده است و برای همه داده‌ها، محاسبات تکرار شده است.

شکل ۷، مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده میزان اتلاف انرژی با استفاده از معادله (۵) را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست، مقادیر با خطای بسیار کم و قابل قبولی به هم نزدیک هستند.



شکل ۷- مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده اتلاف انرژی

Fathi et al. (2023) روی اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی پله‌ای مطالعه‌ای انجام دادند. سرریز مورد بررسی در کار ایشان، سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A و با ارتفاع ۰/۲ متر است. میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای ۵، ۱۰ و ۱۵ پله‌ای نسبت به سرریز بدون پله در کار ایشان به ترتیب برابر با ۱۵/۷۳ درصد، ۲۴/۹۳ درصد و ۱۸/۵۲ درصد است. میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ پله‌ای در کار ایشان نیز برابر با ۰/۵۰۲، ۰/۵۹۵، ۰/۶۷۱ و ۰/۶۱۷ است. میزان اتلاف انرژی در سرریز حالت ساده و صفر پله‌ای ایشان

- منابع
12. Rdhaiwi A. Q. Khoshfetrat A. & 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): 55-64. DOI: 10.31272/jeasd.28.1.4
  13. Rdhaiwi A. Q. Khoshfetrat A. & 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): 688-697. DOI: 10.31272/jeasd.27.6.2
  14. Safarzadeh A. & Noroozi B. 2014. Threedimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulics*, 9(3): 61-79. DOI: 10.30482/JHYD.2014.10176
  15. Sajadi S. M. 2017. Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(69): 77-92. DOI: 10.22092/aridse.2017.108456.1165
  16. Singh D. & Kumar M. 2022. Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B Piano Key Weir. *Renewable Energy Focus*, 41: 230-235. DOI: 10.1016/j.ref.2022.03.005
  17. Sumer B. M. & Fredsoe J. 1991. August. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *The First International Offshore and Polar Engineering Conference*. DOI: 10.1115/OMAEE2010-20719
  18. Hashemi Fesharaki M. H. Khoshfetrat A. Izadina E. & Delavari E. 2024. Experimental investigation of Energy loss in Crump spillways in free flow and submerged state. *Modares Civil Engineering journal*, 24(2): 157-16.
  1. Al-Shukur A. H. K. & Al-Khafaji G. H. 2018. Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1): 63-70.
  2. Bieri M. Federspiel M. Boillat, J. L. Houdant B. Faramond L. & Delorme F. 2011. Energy dissipation downstream of piano key weirs—case study of Gloriettes dam (France). *Labyrinth and piano key weirs—PKW 2011*, pp.123-130. DOI: 10.1201/b12349-19
  3. Erpicum S. Laugier F. Pfister M. Pirotton M. Cicero G. M. & Schleiss A. J. 2013. *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press. DOI: 10.1201/b15985
  4. Fathi A. Abdi Chooplou Ch. & Ghodsian M. 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4): 163-174. DOI: 10.22034/23.4.163
  5. Fathi A. Abdi Chooplou Ch. & 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
  6. Kabiri-Samani A. & Javaheri A. 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1): 114-120. DOI:10.1080/00221686.2011.647888
  7. Khanh M. H. T. Hien T. C. & Quat D. S. (2004 to 2011). *Study and construction of PK Weirs in Vietnam*.
  8. Leite Ribeiro M. Boillat J. L. Schleiss A. Laugier F. & Albalat C. 2007. Rehabilitation of St-Marc dam experimental optimization of a piano key weir. In *Proceedings of the 32nd Congress of IAHR (No. CONF)*.
  9. Naghibzadeh S. M. Heidarneshad M. Masjedi A. & Bordbar A. 2020. Experimental and Numerical Analysis of Energy Dissipation in Piano Key Weirs with Stepped and Baffled Barriers at Downstream Slop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10): 2431-2442. DOI: 10.22059/ijswr.2020.295541.668467
  10. Novák P. & Čabelka J. 1981. *Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications*. Monographs & surveys in water resources engineering.
  11. Eslinger R. Crookston K. & B. M. (2020). Energy dissipation of type a piano key weir. *Water*, 12(5): 1253. DOI: 10.3390/w12051253

## Research paper

# Different block geometry in piano key weir and its effect on energy loss

N. Hafizi<sup>1</sup> and A. Khoshfetrat<sup>2\*</sup>

## Extended Abstract

Since ancient times, humans have built barriers in the water flows to increase the water level at the upstream of the barrier for drinking and agriculture purposes. Weirs are among the most widely-used hydraulic structures in water transmission systems. Labyrinth weirs are a non-linear weir that, with a longer length in a limited width, passes more discharge. Labyrinth weirs are used to regulate the water level and control it in dams and irrigation canals. Another type of non-linear and long crest weir is the Piano key weir (PKW). Piano key weirs are an evolution of labyrinth weirs. The difference between labyrinth weirs and piano key weirs (PKW) is the presence of slope in the inlet and outlet keys and hanging edges in piano key weirs. PKW is capable of passing more discharge (up to 3 to 4 times). Piano key weirs have triangular, trapezoidal, and rectangular shapes in their plan, and are classified into four types of A, B, C, and D. These weirs have inlet keys (with negative slope), and outlet keys (with positive slope). According to the conducted research, there is a lack of investigation into energy loss in the weir of a C-type piano key and the effect of different block geometry on its output keys.

The experiments were conducted in a flume with a length, width, and height of 10, 0.60, and 1.10 meters, respectively. The floor of the flume was galvanized and the walls were made of thick glass. After turning on the pump, the flow passed through flow straighteners made of large gravel grains and metal screens. Then after traveling 5.50 meters, it entered the weir. The water was pumped from a tank through a 0.1-meter-diameter pipe with a maximum flow rate of 55 liters per second into the flume. Flow depth was measured by three sensors installed at the top of the flume. The pump and sensors provided the flow rate and flow depth with minimal error. The elevation changes of the 10-meter laboratory flume were less than 4 mm, and the temperature of the water flowing in the flume varied between 7 and 13 centigrade degrees. Two trapezoidal type C piano key weirs with constant geometric specifications were used. The width of the weirs ( $W$ ) was 0.6 meters, the length of the crest of the weirs ( $L$ ) was 2.58 meters. The width of the inlet keys ( $W_i$ ) and outlet keys ( $W_o$ ) of the weirs were 0.215 and 0.075 meters, respectively. The length of the side walls of the weirs ( $B$ ) was 0.50 meters. The length of the inlet side walls ( $B_i$ ) and the length of the outlet side walls ( $B_o$ ) was 0 and 0.13 meters, respectively. The thickness of the weirs ( $T_s$ ) was 0.01 meters. The only non-constant geometric component of the weirs was their height. The height of the first weir was 0.20 meters and the height of the second weir was 0.18 meters. The weirs were made of iron sheets and had two cycles.

The water flowed into the input keys and then as a free jet to the downstream and output keys. The flow was directed downstream through the outlet keys in the form of an inclined jet. The output flow from the output keys hit the blocks and its speed was reduced.

1- M.Sc. Student, Civil Engineering Department, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

\* Corresponding Author: [khoshfetrat@khuisf.ac.ir](mailto:khoshfetrat@khuisf.ac.ir)

Received: 2024/05/26

Accepted: 2024/07/28

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14787.2606>



Also, after hitting the blocks, the current was separated and hit the block of the second row. In the second row, the flow separated from each block was mixed and hit the block of the third row. This action continued until the end of the output keys. The local submerged area of the flow passed over the first block and hit the blocks of the third row. By increasing the flow rate and weir height, the amount of energy loss decreased. Increasing the ratio of the total head to the height of the weir, the amount of energy loss decreased. By reducing the weir height by 10%, the amount of energy loss was reduced by 19.3%. The block in the weir output keys caused more energy loss. The highest amount of energy loss was observed in the block weir with a rectangular section. The amount of energy loss in weirs with rectangular, circular, and trapezoidal blocks increases by about 16.8, 10.9, and 14.1% compared with the weirs without blocks. Additionally in the current study, a relationship with a relatively high correlation coefficient was developed to calculate energy loss.

**Keywords:** blocks, energy dissipation, experimental investigation, PKWs, output keys.

**Citation:** Hafizi N. and Khoshfetrat A.. 2024. Different block geometry in piano key weir and its effect on energy loss. Iranian Water Research Journal. 54: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14787.2606>