

## 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 به‌منظور 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. ۵۴: ۳۱-۳۷  
<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.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

## مقدمه

(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) ، Bieri *et al.* (2011) و (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، تأثیر زیادی روی میزان اتلاف انرژی ندارد. (Naghizadeh *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

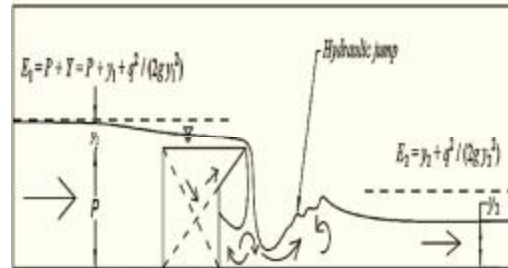
عمق سنج سوزنی، دارای خطای بسیار ناچیزی بود. (Rdhaiwi et al., 2023) در تحقیق خود به صورت کامل به موضوع بالا پرداخته‌اند. از دو سرریز کلیدپانویی نوع C با ارتفاع ۰/۲ و ۰/۱۸ متر و با هندسه ثابت نیز در این تحقیق استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریز ( $W_i$ ) برابر با ۰/۲۱۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریز ( $W_o$ ) 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

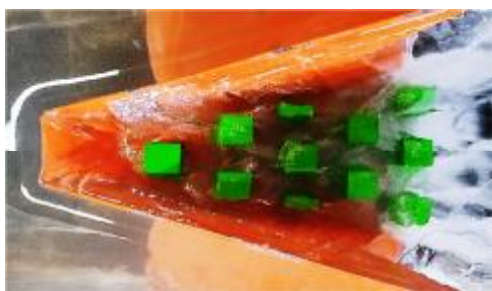
### مواد و روش‌ها

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 ذوزنقه‌ای 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	ذوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۱۷۸	۰/۶۲۴
۲	۰/۰۳۰	ذوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۲۴۱	۰/۵۹۳
۳	۰/۰۳۵	ذوزنقه‌ای	۰/۲	۰/۲۷۹	۰/۵۵۶
۴	۰/۰۴۰	ذوزنقه‌ای	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 پایین دست سرریز یک پرش هیدرولیکی شکل می‌گیرد. این پرش هیدرولیکی با افزایش دبی جریان، قدرت بیشتری می‌گیرد.



الف) مستطیلی



ب) دایره‌ای

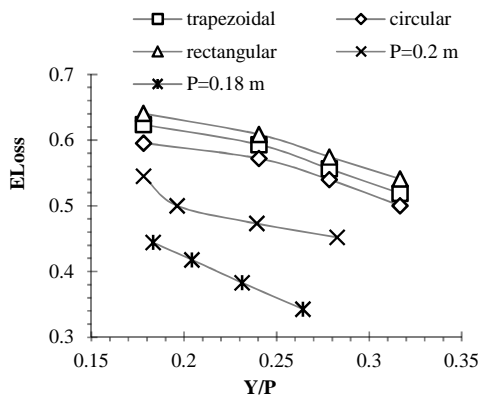


ج) ذوزنقه‌ای

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 نشان دادن موضوع از داده‌های Rdhaiwi *et al.*, (2023) نیز برای مقایسه نتایج این پژوهش استفاده شد. سرریز مورد بررسی در کار

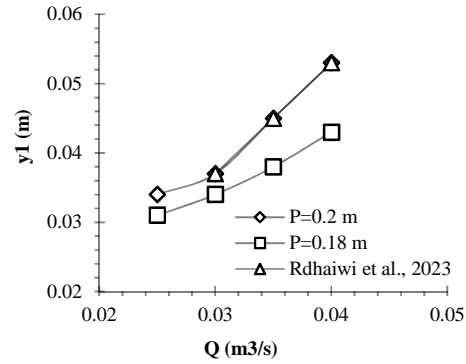
سرریز با ارتفاع ۰/۱۸ و ۰/۲ متر به ترتیب برابر با ۳۹/۷ و ۴۹/۲ است. با افزایش ۱۰ درصدی ارتفاع سرریز، مقدار اتلاف انرژی حدود ۱۹/۳ درصد افزایش می‌یابد.



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

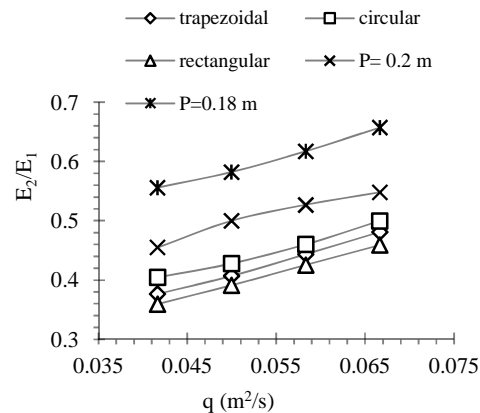
همان‌طور که گفته شد؛ وجود بلوک در کلیدهای خروجی سرریز، باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. میانگین میزان اتلاف انرژی در سرریزهای بلوک‌دار با مقطع مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای به ترتیب برابر با ۵۹/۱، ۵۵/۲ و ۵۷/۳ است. همان‌طور که پیداست، میزان اتلاف انرژی در سرریز با بلوک‌های 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 سر خوردن 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 دوزنقه‌ای 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 دوزنقه‌ای 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 آب‌شناسی 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	دو زنگه‌ای	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

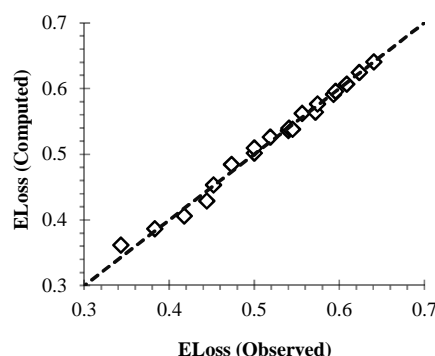
سرریزهای کلیدپیانویی سازه‌های پراهمیتی هستند که نسبت به سرریزهای خطی، جریان بیشتری را از روی خود عبور می‌دهند. بررسی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی و راهکار برای افزایش آن، حائز اهمیت است. در این تحقیق از سرریز کلیدپیانویی دو زنگه‌ای نوع C همراه با بلوک در کلیدهای خروجی آن استفاده شد. نتایج نشان 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 دو زنگه‌ای 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 دو زنگه‌ای 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 دو زنگه‌ای 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

- Water, 12(5): 1253. DOI: 10.3390/w12051253
12. 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): 55-64. DOI: 10.31272/jeasd.28.1.4
  13. 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): 688-697. DOI: 10.31272/jeasd.27.6.2
  14. Safarzadeh A. and 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. and 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. and 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/OMAE2010-20719
  18. Hashemi Fesharaki M. H. Khoshfetrat A. Izadinia E. and 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.
- منابع
1. 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): 63-70.
  2. Bieri M. Federspiel M. Boillat J. L. Houdant, B. Faramond L. and Delorme F. 2011. Energy dissipation downstream of piano key weirs—case study of Gloriettes dam (France). *Labyrinth and piano key weirs—PKW* 2011: 123-130. DOI: 10.1201/b12349-19
  3. Erpicum S. Laugier F. Pfister M. Piroton M. Cicero G. M. and Schleiss A. J. 2013. *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press. DOI: 10.1201/b15985
  4. Fathi A. Abdi Chooplou Ch. and Ghodsian M. 2023. An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4): 163-174. DOI: 10.22034/23.4.163
  5. Fathi A. Abdi Chooplou Ch. and Ghodsian M. 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1-13. DOI: 10.1080/09715010.2024.2353612
  6. Kabiri-Samani A. and 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. and 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. and 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. and 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. and Čabelka J. 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*.
  11. Eslinger R. Crookston K. and B. M. 2020. Energy dissipation of type a piano key weir.

