



Research Article



Experimental study of the effect of obstacles on flow energy loss in piano key weir

Shimaa Ezzaldine Ibrahim¹, Ali Khoshfetrat^{*2}

¹ MS, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

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

**Corresponding Author: khoshfetrat@khuisf.ac.ir*

Received: 06 Sept 2023

Accepted: 08 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

Abstract

Piano key weirs have a longer crown length than linear weirs. Increasing the length of the weir crest in a limited width increases the water flow coefficient. Considering the importance of these weirs and the solution to increase the energy loss and finally reduce scour in them; therefore, in this research, it used a C-type trapezoidal piano key weir. Four flow rates of 0.025, 0.03, 0.035 and 0.04 cubic meters per second were also used. Three barriers with heights of 0.01, 0.03 and 0.05 meters were also used at the end of the overflow output keys. The results show that with the increase in the height of the obstacles, the amount of energy loss also increases. Also, by increasing the flow rate, the amount of energy loss is reduced. In barriers of 0.01, 0.03 and 0.05 meters, the amount of energy loss increases by 1.20, 2.13 and 2.53%, respectively, compared to the weir without obstacles. The average energy loss in weirs with barriers of 0, 0.01, 0.03 and 0.05 meters at the end of the outlet switches is equal to 57.8, 58.5, 59.06 and 59.3, respectively. At the end, a relationship was obtained to calculate the amount of energy loss in the C-type trapezoidal piano key weir along with the barrier at the end of the output keys with a correlation coefficient of 98.9%.

Keywords: Energy loss, Experimental study, Obstacle, Piano key weir (PKW), Type C



مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر موانع بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی

شیماء عزالدین ابراهیم^۱، علی خوش فطرت^{۲*}

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

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

*نویسنده مسئول: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی، دارای طول تاج بیشتر نسبت به سرریزهای خطی است. افزایش طول تاج سرریز در عرض محدود، باعث افزایش ضریب آبگذری می‌گردد. با توجه به اهمیت این سرریزها و راهکار برای کاهش اتلاف انرژی و در نهایت کاهش آبشستگی در آنها؛ در این تحقیق از یک سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع C، چهار دبی ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه و سه مانع با ارتفاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر در انتهای کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع موانع، میزان اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جریان، از میزان اتلاف انرژی کاسته می‌شود. در موانع ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر، میزان اتلاف انرژی نسبت به سرریز بدون مانع به ترتیب ۱/۲۰، ۲/۱۳ و ۲/۵۳ درصد افزایش می‌یابد. میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای با موانع ۰، ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر در انتهای کلیدهای خروجی، به ترتیب برابر ۵۷/۸، ۵۸/۵، ۵۹/۰۶ و ۵۹/۳ است. در انتها رابطه‌ای برای محاسبه میزان اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با مانع در انتهای کلیدهای خروجی با ضریب همبستگی ۹۸/۹ درصد، به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اتلاف انرژی، سرریز کلیدپیانویی، مطالعه‌ی آزمایشگاهی، مانع، نوع C.

۱. مقدمه

سرریزهای کلیدپیانویی توسعه یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند. تفاوت این دو سرریز، وجود شیب در کلیدهای ورودی و خروجی در سرریز کلیدپیانویی است. سرریزهای کلیدپیانویی دارای چهار تیپ A، B، C و D هستند. نوع اول دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع دوم و سوم به ترتیب دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز و نوع چهارم، بدون لبه آویزان است. همچنین سرریزهای کلیدپیانویی دارای شکل‌های مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای هستند. به دلیل راندمان بالای سرریزهای کلیدپیانویی در ضریب آبگذری و دارا بودن پی سبک؛ لذا راهکار برای کاهش میزان اتلاف انرژی در این سازه‌های هیدرولیکی و در نهایت کاهش آبشستگی در آن‌ها، حائز اهمیت است. افرادی مانند Leite Ribeiro et al., 2007; Khanh et al., 2010; Bieri et al., 2011; Erpicum et al., 2013 روی اتلاف انرژی و ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی تحقیقات ارزشمندی انجام دادند. Sajadi و همکاران (2017)، با بررسی عددی و آزمایشگاهی روی اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که وجود بلوک در کلیدهای خروجی سرریز باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. Al-Shukur و Al-Khafaji (2018) با بررسی آزمایشگاهی روی اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، دریافتند که با افزایش شیب‌های کلیدهای خروجی سرریز، میزان انرژی کمتر می‌شود. ایشان همچنین رابطه‌ای برای ضریب آبگذری سرریز ارائه دادند که ضریب همبستگی در آن ۰/۹۸۴ است. Naghibzadeh و همکاران (2020)، با بررسی آزمایشگاهی و عددی روی میزان اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که وجود پله و بلوک در کلیدهای خروجی سرریز، باعث بیشتر شدن میزان اتلاف انرژی می‌شود. ایشان تأثیر عدد وبر را بر میزان اتلاف انرژی در نظر گرفتند که بازه‌ی آن بین ۳۵ تا ۱۵۰۰ است. Eslinger و Crookston (2020)، با بررسی آزمایشگاهی روی میزان اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که با کاهش دبی جریان، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. همچنین در سرریزهای با ارتفاع کمتر، مقدار اتلاف انرژی بیشتر است و نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی سرریز، تأثیر زیادی بر میزان اتلاف انرژی ندارد. Singh و Kumar (2022)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، باعث افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. ایشان همچنین میزان اتلاف انرژی در سرریز ساده و بدون پله را نیز مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با کاهش دبی جریان، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. Fathi و همکاران (2023)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای پله‌ای، به این نتیجه رسیدند که وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. ایشان تعداد صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ پله در کلیدهای خروجی سرریز استفاده کردند و دریافتند که میزان اتلاف انرژی در سرریز ۱۰ پله‌ای به مراتب بیشتر از مابقی سرریزها است. همچنین بیان داشتند که با افزایش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. Challoob Mshali و همکاران (2023)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی همراه با جامپ در کلیدهای خروجی سرریز، به این نتیجه رسیدند که وجود جامپ باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. همچنین بیان داشتند که با کاهش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالعات ارزشمند انجام شده روی میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی و راهکار برای افزایش آن؛ لذا تحقیقی بر مبنای تأثیر موانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز، صورت گرفته است. در این تحقیق از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C، با چهار دبی جریان ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه و سه مانع به ارتفاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر استفاده شد.

۲. آنالیز ابعادی

رابطه (۱) پارامترهای موثر بر میزان اتلاف انرژی جریان را نشان می‌دهد که در آن چگالی آب، ρ ضریب کشش سطحی، σ لزجت دینامیکی، μ V_1 سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز، H عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز، P ارتفاع سرریز و h ارتفاع موانع هستند.

$$E_L = f(\rho, \sigma, \mu, V_1, H, P, h) \quad (1)$$

با توجه به تئوری π باکینگهام و با در نظر گرفتن سه متغیر تکراری چگالی آب، سرعت متوسط جریان و عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز، میزان اتلاف انرژی جریان، تابع پارامترهای زیر می‌شود.

$$E_L = f(\mathbf{We}, \text{Re}, \frac{H}{p}, \frac{H}{h}) \quad (2)$$

به دلیل آشفتگی زیاد جریان و به دلیل بیشتر از ۰/۰۳ متر بودن عمق جریان روی تاج سرریز؛ لذا از عدد رینولدز $(\text{Re} = \frac{\rho V_1 H}{\mu})$ و ویر $(\text{We} = \frac{\rho V_1^2 H}{\sigma})$ صرف نظر خواهد شد (Sumer & Fredsoe, 1991; Novák & Čabelka, 1981). در نهایت میزان اتلاف انرژی جریان تابع رابطه (۳) می‌شود.

$$E_L = f\left(\frac{H}{p}, \frac{h}{H}\right) \quad (3)$$

۳. موارد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان (خوراسگان) انجام شد. پس از روشن کردن پمپ و تنظیم دبی جریان، جریان از آرام‌کننده‌ها عبور کرده و پس از طی حدود ۶ متر، وارد سرریز می‌شد. پمپ با خطای ۰/۰۱ درصد راندمان نسبتاً بالایی دارد. عرض، طول و ارتفاع فلوم آزمایشگاهی برابر ۰/۶ متر، ۱۰ متر و ۱/۱ متر هستند (شکل ۱). از چهار دبی جریان ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. در کمترین دبی جریان، عمق روی تاج سرریز بیشتر از ۰/۰۳ متر برداشت شد و شرایط جریان به نحوی بود که از کشش سطحی صرف نظر شد. از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای استفاده شد. سرریز دارای دو سیکل و با عرض ۰/۶ متر است. ارتفاع سرریز (P): ۰/۲ متر، عرض کلیدهای ورودی

سرریز (W_i) : ۰/۲۱۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریز (W_o) : ۰/۰۷۵ متر، طول دیواره‌های جانبی سرریز (B) : ۰/۵ متر و ضخامت (T_s) : ۰/۰۱ متر است. عمق پایین دست سرریز توسط دریچه انتهایی فلوم آزمایشگاهی، تنظیم نشد. پس از تنظیم دبی و عبور جریان از روی سرریز، عمق بالادست، عمق روی تاج سرریز و عمق پایین دست سرریز، توسط سه سنسور متصل روی کانال، برداشت شد. عمق بالادست سرریز در فاصله $4y$ و عمق پایین دست سرریز در فاصله $10P$ از پنجه سرریز، برداشت شد (Fathi et al., 2023). y عمق جریان روی تاج سرریز و P همان ارتفاع سرریز است. جدول (۱)، پارامترهای هیدرولیکی و موثر بر میزان اتلاف انرژی را نشان می‌دهد. که در آن Q دبی جریان است.

شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی



Fig 1. The laboratory channel

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی جریان

Table 1. Hydraulic characteristics of the flow

ROW	Q (m ³ /s)	H/P	h/H	E _L
1	0.025	0.163	0	0.633
2	0.03	0.204	0	0.585
3	0.035	0.249	0	0.567
4	0.04	0.297	0	0.527
5	0.025	0.163	0.306	0.636
6	0.03	0.204	0.245	0.589
7	0.035	0.249	0.201	0.571
8	0.04	0.297	0.168	0.545
9	0.025	0.163	0.919	0.637
10	0.03	0.204	0.736	0.594
11	0.035	0.249	0.602	0.576
12	0.04	0.297	0.5054	0.555

۴. نتایج و بحث

جریان از روی کلیدهای ورودی به پایین دست و در داخل کلیدهای خروجی می‌ریخت. همچنین جریان از کلیدهای خروجی به صورت جت مایل به پایین دست منتقل می‌شد. پس از رسیدن جریان به انتهای کلیدهای خروجی، جریان پشت موانع به گیر افتاده و سپس با یک پرش نسبتاً ضعیف، وارد پایین دست می‌شد. این پرش هیدرولیکی و جمع شدن جریان پشت موانع،

باعث کاهش سرعت جریان و در نهایت افزایش اتلاف انرژی می‌شود. شکل (۲-الف) و شکل (۲-ب)، میزان اتلاف انرژی را بر حسب پارامترهای بدون بعد شده H/P و h/H نشان می‌دهند. با افزایش نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. یا به اصطلاح دیگر، با افزایش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. با وجود موانع، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت ارتفاع موانع به عمق جریان به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در بالادست سرریز، میزان اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد.

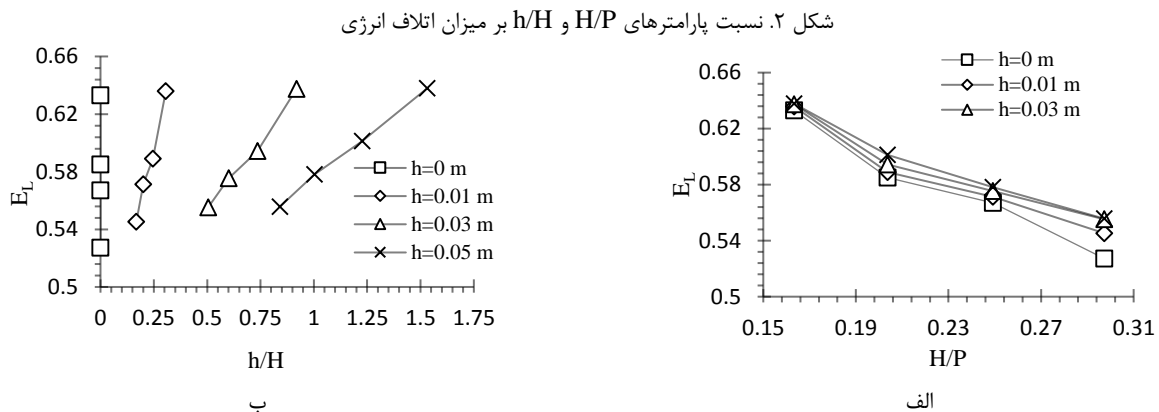


Fig. 2. The ratio of H/P and h/H parameters on the amount of energy loss

میانگین اتلاف انرژی در سرریز ساده و بدون مانع در انتهای کلیدهای خروجی، برابر $57/8$ است. همچنین در سرریزهای با ارتفاع مانع در انتهای کلیدهای خروجی برابر $0/01$ ، $0/03$ و $0/05$ متر، به ترتیب میانگین اتلاف انرژی حدود $59/3$ و $58/5$ ، $59/06$ است. در سرریزهای با ارتفاع مانع برابر $0/01$ ، $0/03$ و $0/05$ متر نسبت به سرریز بدون مانع، میزان اتلاف انرژی حدود $1/20$ ، $2/13$ و $2/53$ درصد افزایش یافته است.

رابطه (۴)، برای محاسبه اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی با و بدون مانع در انتهای کلیدهای خروجی ارائه شده است که ضریب همبستگی در آن برابر $98/9$ درصد خواهد بود. همچنین شکل (۳)، میزان اتلاف انرژی محاسبه شده با رابطه (۴) و میزان اتلاف انرژی مشاهده شده را نشان می‌دهد که با خطای قابل قبولی مورد پذیرش است.

$$E_L = \left(\frac{H}{p}\right)^{k_1} \left(\frac{h}{H} + k_2\right)^{k_3} \quad (4)$$

ضرایب K موجود در رابطه (۴)، با توجه به اندازه‌های ارتفاع موانع، محاسبه می‌شوند که در جدول زیر به آن پرداخته شده است.

جدول ۲. محاسبه مقادیر K در رابطه (۴)

Table 2. Calculation of K values in relation (4)				
ROW	h (m)	K_1	K_2	K_3
1	0	0.1	$K_2 = 0.0368 (H/P)^{-1.269}$	0.28
2	0.01	0.2	0	0.6
3	0.03	0.07	0	0.28
4	0.05	0.4	0	0.8

شکل ۳. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده اتلاف انرژی

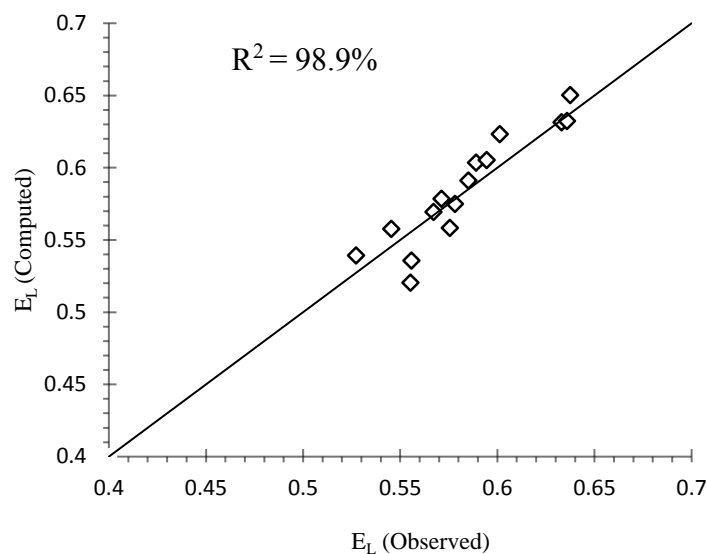


Fig 3. Observed and Computed energy loss values

۵. نتیجه‌گیری

با افزایش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت H/P ، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. نتایج چنین بود که وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز، باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. افزایش نسبت h/H میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. در سرریزهای با ارتفاع موانع $0/01$ ، $0/03$ و $0/05$ متر، نسبت به سرریز بدون مانع، میزان اتلاف انرژی حدود $1/20$ ، $2/13$ و $2/53$ درصد بیشتر است. در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه میزان اتلاف انرژی در سرریزهای با و بدون مانع در انتهای کلیدهای خروجی با ضریب همبستگی $98/9$ درصد ارائه شد.

۶. تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۷. مراجع

- 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.
- 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*, 123-130.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Pirotton, M., Cicero, G. M., & Schleiss, A. J. (Eds.). (2013). *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press.
- Fathi, A., Abdi Chooplou, C., & Ghodsian, M. G. (2023). An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), 0-0.
- Kadhim Challoor, m., Khoshfetrat, A., Fathi ah (2023). Analysis of energy loss in a C-type trapezoidal Piano key weir with outlet key jumps. *Technical Strategies in Water Systems*, 1(1): 27-36

- Khanh, M. H. T., Hien, T. C., & Quat, D. S. Study and construction of PK Weirs in Vietnam (2004 to 2011).
- Naghizadeh, 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 Slope. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2431-2442.
- Novák, P., & Čabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*.
- R. Eslinger, K., & Crookston, B. M. (2020). Energy dissipation of type a piano key weirs. *Water*, 12(5), 1253.
- Ribeiro, M. L., Boillat, J. L., Schleiss, A., Laugier, F., & Albalat, C. (2007). Rehabilitation of St-Marc dam. Experimental optimization of a piano key weir. In *Proc. of 32nd Congress of IAHR. Vince. Italy*.
- 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.
- Singh, D., & Kumar, M. (2022). Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B piano key weir. *Renewable Energy Focus*, 41, 230-235.
- Sumer, B. M., & Fredsoe, J. (1991, August). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-1). ISOPE.