



Analysis of energy loss in a C-type trapezoidal Piano key weir with outlet key jumps

Kadhim Challoob Mshali ¹, Ali Khoshfetrat ^{1*}, Amirhossein Fathi ²

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

² Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

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

© The Author(s) 2023

Received: 15 July 2023

Accepted: 05 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

Extended Abstract

Introduction

Piano Key Weirs (PKWs) are a type of long-crested weir with a lightweight structure and high discharge efficiency. Due to their high hydraulic performance, they are widely used in dam spillways. However, the high energy dissipation associated with these weirs is crucial to minimize downstream scouring. This study investigates the effect of adding a trapezoidal-shaped PKW with different configurations of end sills (jumps) on energy dissipation and discharge capacity. The research focuses on the impact of varying sill radii and heights on the hydraulic performance of the weir, aiming to optimize energy dissipation while maintaining discharge efficiency.

Materials and Method

The experiments were conducted in a hydraulic laboratory flume with dimensions of 10 meters in length, 0.6 meters in width, and 0.8 meters in height. A trapezoidal PKW with end sills of two different radii (0.15 m and 0.21 m) and heights (0.075 m and 0.14 m) was tested under three flow rates: 0.03, 0.035, and 0.04 m³/s. The flow depth upstream and downstream of the weir was measured using a needle depth gauge with an accuracy of ± 1 mm. The energy dissipation and discharge coefficient were calculated based on the measured hydraulic parameters. The study also employed dimensional analysis to identify the key factors influencing energy dissipation, including the ratio of upstream energy head to weir height (H_u/P) and the ratio of sill radius to sill height (R/h).

Results and Discussion

The results demonstrated that the addition of end sills significantly increased energy dissipation. Specifically, the energy dissipation for the PKW with a sill radius of 0.21 m was approximately 3.8% higher than that of the PKW without sills, while the PKW with a sill radius of 0.15 m showed a 2.5% increase. The average energy dissipation for the PKWs with sill radii of 0, 0.15, and 0.21 m was 54.1%, 55.4%, and 56.2%, respectively.



However, the discharge coefficient decreased with increasing sill radius and height. The discharge coefficient for the PKW with a sill radius of 0.21 m was 10.9% lower than that of the PKW without sills, while the PKW with a sill radius of 0.15 m showed a 3.9% reduction. The study also revealed that the presence of sills caused the flow to be projected further downstream, which could influence scouring patterns.

Conclusion

The study concludes that the addition of end sills to trapezoidal PKWs enhances energy dissipation, albeit at the cost of a reduced discharge coefficient. The PKW with a larger sill radius (0.21 m) exhibited the highest energy dissipation but the lowest discharge coefficient. The findings suggest that while sills are effective in increasing energy dissipation, their design must be carefully optimized to balance energy dissipation and discharge efficiency. The results also indicate that the trapezoidal PKW with sills outperforms the rectangular PKW in terms of energy dissipation, particularly in configurations without upstream overhangs. Future research could explore the impact of sill geometry and placement on scouring patterns and further optimize the design for practical applications.

Keywords: Energy loss, Jump, Output key, Piano Key Weir (PKW), The discharge coefficient

Extended Abstract



Analysis of energy loss in a C-type trapezoidal Piano key weir with outlet key jumps

Kadhim Challob Mshali¹, Ali Khoshfetrat^{1*}, Amirhossein Fathi²

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

² Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

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

© The Author(s) 2023

Received: 15 July 2023

Accepted: 05 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

Abstract

Piano key weirs are a type of long-crested weirs with a light foundation and a high discharge coefficient. Due to the high efficiency of these weirs, it is essential to find ways to increase their energy dissipation and ultimately reduce scour. This study investigated the energy dissipation of piano key weirs with a jump in their outlet keys. A laboratory experiment was conducted using a trapezoidal piano key weir with three discharges of 0.3, 0.35, and 0.4 cubic meters per second. Two jumps with radii of 0.21 and 0.15 meters and jump heights of 0.14 and 0.075 meters were also used. The results showed that the energy dissipation increased with increasing jump radius. The energy dissipation in the weir with a jump radius of 0.21 meters and in the weir with a jump radius of 0.15 meters is approximately 3.8% and 2.5% higher, respectively, than in the weir without a jump. The average energy dissipation in weirs with jump radii of 0, 0.15, and 0.21 meters was 54.1%, 55.4%, and 56.2%, respectively. With increasing jump radius and jump height, the discharge coefficient decreases. The discharge coefficient in piano key weirs with jump radii of 0.21 and 0.15 meters is reduced by 10.9% and 3.9%, respectively, compared to the weir without a jump. The use of a jump in the outlet keys of a weir can throw the flow forward of the weir toe. This can be effective in reducing scour.

Keywords: Energy loss, Jump, Output key, Piano Key Weir (PKW), The discharge coefficient.



استهلاک انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با جامپ در کلیدهای خروجی آن

کاظم جلوب مشالی^۱، علی خوش فطرت^{۱*}، امیرحسین فتاحی^۲

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۲. دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی جزء سرریزهای تاج‌طولانی با پی سبک و دارای ضریب آبگذری بالایی هستند. به دلیل راندمان بالای این سرریزها؛ لذا راهکار برای افزایش استهلاک انرژی در آن‌ها و در نهایت کاهش آبشستگی بسیار حیاتی است. در این تحقیق از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل همراه با جامپ در کلیدهای خروجی آن به صورت آزمایشگاهی و از سه دبی ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. همچنین از دو جامپ با شعاع ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر و ارتفاع لبه جامپ برابر ۰/۱۴ و ۰/۰۷۵ متر استفاده شد. نتایج نشان که با افزایش شعاع جامپ، میزان استهلاک انرژی در سرریز با شعاع جامپ ۰/۲۱ متر و در سرریز با شعاع جامپ ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، به ترتیب حدود ۳/۸ درصد و ۲/۵ درصد بیشتر است. همچنین میانگین استهلاک انرژی در سرریزهای با شعاع جامپ برابر ۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۱ متر، به ترتیب برابر ۵۴/۱، ۵۵/۴ و ۵۶/۲ درصد است. با افزایش شعاع جامپ و ارتفاع لبه آن، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. میزان کاهش ضریب آبگذری در سرریز با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، برابر ۱۰/۹ درصد و ۳/۹ درصد است. همچنین در ادامه روابطی برای میزان استهلاک انرژی در سرریزهای معرفی شده، ارائه شد. استفاده از جامپ در کلیدهای خروجی سرریز، چنانچه باعث استهلاک انرژی زیادی نمی‌شود؛ اما جریان را به جلوتر از پنجه سرریز پرتاب می‌کند که در بررسی میزان آبشستگی و کاهش آن، می‌تواند موضوع حائز اهمیتی باشد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، جامپ، کلید خروجی، سرریز کلیدپیانویی، ضریب آبگذری.

سرریزهای کلیدپیانویی دارای تاج بیشتر در یک عرض محدود هستند و این امر باعث افزایش ضریب آبگذری در آنها می‌شود. همچنین سرریزهای کلیدپیانویی از بالا به صورت مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی شکل و دارای چهار نوع A, B, C و D هستند. نوع A دارای لبه آویزان در بالا و پایین دست سرریز، نوع B دارای لبه آویزان در بالادست سرریز، نوع C دارای لبه آویزان در پایین دست سرریز و نوع D بدون لبه آویزان است. تفاوت سرریزهای کنگره‌ای با سرریز کلیدپیانویی نوع آخر، در وجود و عدم وجود شیب در کلیدهای خروجی آن است. اولین سرریز کلیدپیانویی روی بدنه‌ی یکی از سدهای فرانسه ساخته شد (Crookston et al., 2019). افراد زیادی مانند (Ribeiro et al., 2007), (Khanh et al., 2010), (Bieri et al., 2011) و (Erpicum et al., 2013) روی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی تحقیقات ارزشمندی انجام دادند. (Sajadi et al., 2017) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافتند که وجود بلوک در کلیدهای خروجی باعث استهلاك انرژی بیشتری می‌شود. آن‌ها از دو سرریز با تعداد بلوک متفاوت اما هندسه ثابت استفاده کردند. سرریز اول دارای ردیف‌های سه‌تایی و دوتایی و سرریز دوم دارای ردیف‌های دوتایی اما با آرایش زیگزاکی است. محدوده‌ی دبی‌های مورد بررسی در کار ایشان بین ۵ تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه است. عرض سرریز ۰/۹ متر، عرض کلید خروجی و ورودی ۲۱/۴ و ۳۱/۸ متر، ضخامت ۰/۰۱ متر و ارتفاع ۰/۷۴ متر است.

(Al-Shukur & Al-Khafaji, 2018) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B، به این نتیجه رسیدند که با کاهش شیب‌های کلیدهای خروجی، استهلاك انرژی بیشتر می‌شود. ایشان از چهار سرریز با مشخصات ثابت اما شیب‌های متفاوت استفاده کردند. محدوده H_0/P در کار ایشان بین ۰/۲۵ تا ۰/۷ است. H_0 عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز و P ارتفاع سرریز است. ایشان همچنین رابطه‌ای برای ضریب آبگذری سرریز ارائه دادند که ضریب همبستگی در آن ۰/۹۸۴ است.

(Naghibzadeh et al., 2020) با مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافتند که وجود بلوک و پله، باعث افزایش استهلاك انرژی بیشتری می‌شود. دبی‌های مورد بررسی در کار ایشان بین ۱۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه و ارتفاع سرریز ۰/۲ متر است. ایشان تاثیر عدد و بر استهلاك انرژی را نیز در نظر گرفتند که محدوده آن بین ۳۵ تا ۱۵۰۰ است. میزان استهلاك انرژی در موانع بافل به میزان ۸/۷۵ درصد بیشتر از میزان استهلاك انرژی در موانع پلکانی و ۱۵/۲۱ درصد بیشتر از میزان استهلاك انرژی در حالت بدون مانع است.

(Eslinger & Crookston, 2020) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافتند که با افزایش دبی، مقدار استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. در سرریزهای با ارتفاع بیشتر، مقدار استهلاك انرژی کمتر می‌شود و عرض کلید خروجی و وردی تأثیر زیادی بر استهلاك انرژی ندارد. محدوده H_0/P مورد بررسی در کار ایشان بین ۰/۱ تا ۰/۶ است. (Singh & Kumar, 2022) با مطالعه آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B دریافتند که وجود پله باعث استهلاك انرژی بیشتر می‌شود. محدوده دبی‌های مورد بررسی کار ایشان بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۵ متر مکعب بر

ثانیه هستند. در دبی‌های کمتر، استهلاک انرژی با وجود پله تا ۸۵ درصد است. ایشان از دو سرریز با ارتفاع‌های ۰/۱۵ تا ۰/۱۸۵ متر استفاده کردند. ایشان همچنین استهلاک انرژی در سرریز بدون پله را هم مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

Fathi et al. (2023) با مطالعه آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع A دریافتند که وجود پله باعث افزایش استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. همچنین ایشان سرریزهای کلیدپیانویی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ پله‌ای را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که میزان استهلاک انرژی در سرریزهای ۵، ۱۰ و ۱۵ پله‌ای نسبت به سرریز بدون پله حدود ۱۵/۷۳، ۲۴/۹۳ و ۱۸/۵۲ درصد بیشتر است. همچنین ایشان سرریز کلیدپیانویی ۱۰ پله‌ای را سرریز بهینه معرفی کردند. با توجه به تحقیقات انجام شده بر استهلاک انرژی سرریزهای کلیدپیانویی؛ لذا بررسی وجود جامپ در کلیدهای خروجی این سرریز قابل بررسی است و تا کنون بررسی استهلاک انرژی با وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای نوع C، مورد بررسی قرار نگرفته است. می‌دانیم که با افزایش استهلاک انرژی جریان، میزان آبستگي کاهش می‌یابد. به همین دلیل هدف از این تحقیق استفاده از یک سرریز کلیدپیانویی، دو جامپ با شعاع ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر و ارتفاع لبه ۰/۱۴ و ۰/۰۷۵ متر است.

۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، محاسبه استهلاک انرژی جریان را نشان می‌دهد که در آن g نیروی گرانش، V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، h_u و h_d میزان عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، P ارتفاع سرریز، E_{Loss} میزان استهلاک انرژی، E_1 میزان انرژی در بالادست سرریز و E_2 میزان انرژی در پایین‌دست سرریز است.

$$E_{Loss} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{(h_u + P + \frac{V_1^2}{2g}) - (h_d + \frac{V_2^2}{2g})}{(h_u + P + \frac{V_1^2}{2g})} \quad (1)$$

رابطه (۲) پارامترهای موثر بر میزان استهلاک انرژی را نشان می‌دهد. ρ چگالی آب، σ ضریب کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی، H_u عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز، R شعاع جامپ و h ارتفاع لبه جامپ‌ها است.

$$E_{Loss} = f(\rho, \sigma, \mu, V_1, H_u, P, R, h) \quad (2)$$

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

$$E_{Loss} = f(We, Re, \frac{H_u}{p}, \frac{H_u}{R}, \frac{H_u}{h}) \quad (3)$$

به دلیل آشفتگی زیاد جریان و به دلیل بیشتر از 0.03 متر بودن عمق جریان روی تاج سرریز؛ لذا از عدد رینولدز و وبر صرف نظر خواهد شد (Sumer and Fredsoe 1991, Novák and Čabelka 1981). همچنین با ترکیب دو پارامتر $\frac{H_u}{h}$ و $\frac{R}{h}$ پارامتر $\frac{R}{h}$ حاصل می‌شود که تابع شعاع و ارتفاع لبه جامپ‌ها است.

$$E_{Loss} = f\left(\frac{H_u}{p}, \frac{R}{h}\right) \quad (4)$$

۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آیت‌الله اشرفی اصفهانی، در یک کانال آزمایشگاهی به طول 10 متر، عرض 0.6 متر و ارتفاع 0.8 متر انجام شد. جریان از طریق دو مخزن سطحی و پس از طی 0.5 متر در داخل فلوم، به سرریز می‌رسید (شکل ۱). پس از روشن کردن پمپ، دبی مورد نظر توسط یک شیر و مانیتور با خطای ± 0.01 درصد تنظیم می‌شد. عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز توسط عمق‌سنج سوزنی با خطای ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. از سه دبی 0.03 ، 0.035 و 0.04 متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. عمق پایاب توسط دریچه انتهایی و به صورت مصنوعی تنظیم نشد. جدول (۱) و شکل (۲)، مشخصات سرریز مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد که در آن W عرض سرریز، W_o عرض کلید خروجی، W_i عرض کلید ورودی، B طول دیواره جانبی سرریز، B_o طول لبه آویزان در پایین دست سرریز، L طول تاج سرریز، T_s ضخامت لبه سرریز و P ارتفاع سرریز هستند. همچنین جدول (۲)، مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که در آن Q دبی جریان است.

جدول ۱. مشخصات سرریز مورد بررسی

Table 1. Characteristics of the studied spillway

P (m)	Ts (m)	L(m)	Bo (m)	B (m)	W _i (m)	W _o (m)	W(m)
0.2	0.1	2.6	0.13	0.5	2.15	0.075	0.6

شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی



Fig 1. Laboratory flume

شکل ۲. مشخصات سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C

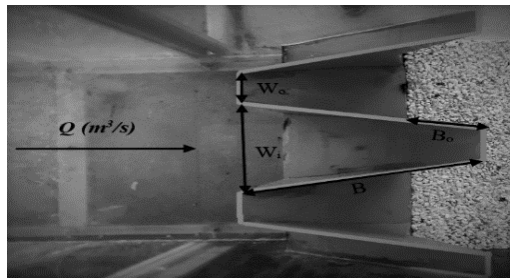


Fig 2. C-type trapezoidal piano key weir specifications

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی جریان

Table 2. Hydraulic properties of the flow

Row	Q (m ³ /s)	R (m)	h (m)	H _u (m)	E _{Loss}
۱	۰/۰۳	۰	۰	۰/۰۳۲	۰/۰۷۰
۲	۰/۰۳۵	۰	۰	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸
۳	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۴۲	۰/۰۱۵
۴	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۳۳	۰/۰۸۶
۵	۰/۰۳۵	۰/۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۳۸	۰/۰۵۳
۶	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴۳	۰/۰۲۴
۷	۰/۰۳	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۳۵	۰/۰۹۶
۸	۰/۰۳۵	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۴۰	۰/۰۶۱
۹	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۴۵	۰/۰۲۹

۴- نتایج و بحث

شکل (۳)، جریان عبوری از روی سرریز همراه با جامپ را نشان می‌دهد. جریان از کلیدهای ورودی به صورت جت ریزشی آزاد از روی کلیدهای ورودی به پایین دست و در کلیدهای خروجی می‌ریزد. همچنین جریان از داخل کلیدهای خروجی به صورت جت مایل به پایین دست منتقل می‌شود. در کلیدهای خروجی ناحیه استغراق به وجود نیامده است؛ اما به دلیل عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز، در جریان بالادست کلیدهای خروجی، فرورفتگی ایجاد شد.

ارتفاع بیشتر لبه جامپ، باعث افزایش عمق جریان در کلیدهای خروجی و در نهایت باعث کاهش ضریب آبگذری (Cd) می‌شود. در پایین دست سرریز اصلی یک پرش هیدرولیکی و در نزدیکی پنجه سرریز مشاهده شد؛ اما با وجود جامپ، بر قدرت پرش هیدرولیکی افزوده شده و فاصله ایجاد آن از پنجه سرریز دورتر می‌شود. جریان خروج یافته از جامپ‌ها و کلیدهای خروجی سرریز، در فاصله‌ای دورتر از سرریز فرود می‌آید. در سرریز با شعاع جامپ بیشتر، این فاصله دورتر از سرریز با شعاع کمتر مشاهده شد. با افزایش دبی جریان، بر قدرت این جت پرتابی و فاصله آن از پنجه سرریز، افزوده شد. همچنین افزایش دبی جریان، باعث کاهش ضریب آبگذری و کاهش استهلاک انرژی گردید.

شکل (۴)، مقدار ضریب آبگذری سرریز را بر حسب نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش این نسبت و به طبع با افزایش سرعت متوسط جریان و دبی جریان، مقدار ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شعاع جریان و افزایش لبه جامپ، مقدار ضریب آبگذری کاهش می‌یابد.

شکل ۳. نمایی از جریان روی سرریز

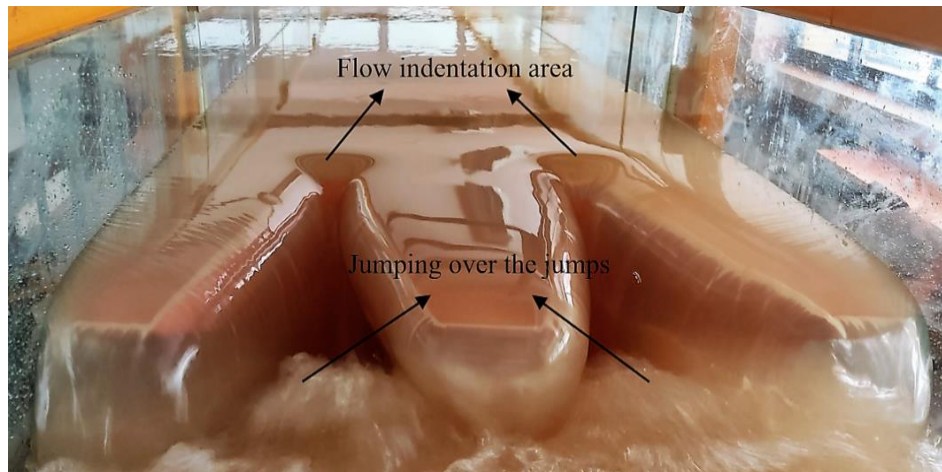


Fig 3. View of the flow over the weir

شکل ۴. ضریب آبگذری بر حسب H_u/P

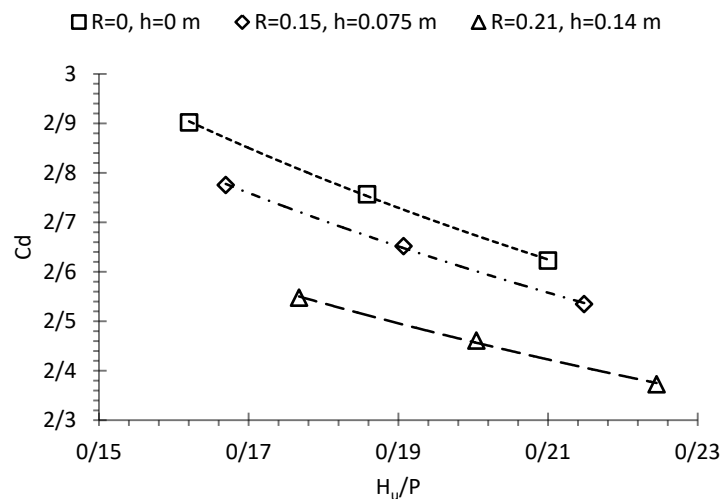


Fig 4. Flow rate coefficient in terms of H_u/P

پس از برداشت عمق جریان در بالادست سرریز (در فاصله ۴ برابر عمق جریان روی لبه سرریز) و عمق جریان در پایین دست سرریز (در فاصله ۱۰ برابر ارتفاع سرریز)، نتایج نشان داد که میانگین ضریب آبگذری در سرریزهای با شعاع جامپ بیشتر و شعاع جامپ کمتر نسبت به سرریز بدون جامپ، به ترتیب برابر $10/9$ و $3/9$ درصد کمتر است. همچنین میانگین ضریب آبگذری در سرریزهای بدون جامپ، جامپ با شعاع کمتر و جامپ با شعاع بیشتر، به ترتیب برابر $2/76$ ، $2/65$ و $2/46$ است.

شکل (۵)، تأثیر دبی در واحد عرض جریان را بر روی میزان استهلاک انرژی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش دبی در واحد عرض، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند افزایش عمق و سرعت متوسط جریان در سرریزهای جامپ‌دار باشد.

شکل ۵. تأثیر دبی در واحد عرض بر استهلاک انرژی

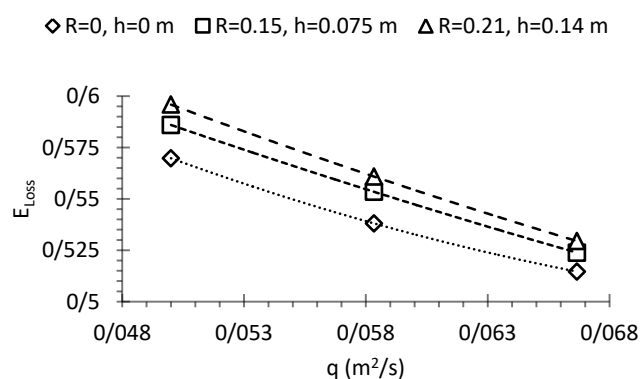


Fig 5. The effect of flow per unit width on energy loss

شکل (۶)، میزان استهلاک انرژی را بر حسب نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است و با افزایش این نسبت، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. همچنین رابطه (۵)، برای محاسبه مقدار استهلاک انرژی در سرریز بدون جامپ و در سرریزهای جامپ‌دار، ارائه شده است که در آن مقدار K_1 و K_2 بستگی به نسبت R/h دارد و در جدول (۳) به آن پرداخته شده است.

شکل ۶. میزان استهلاک انرژی بر حسب H_u/P

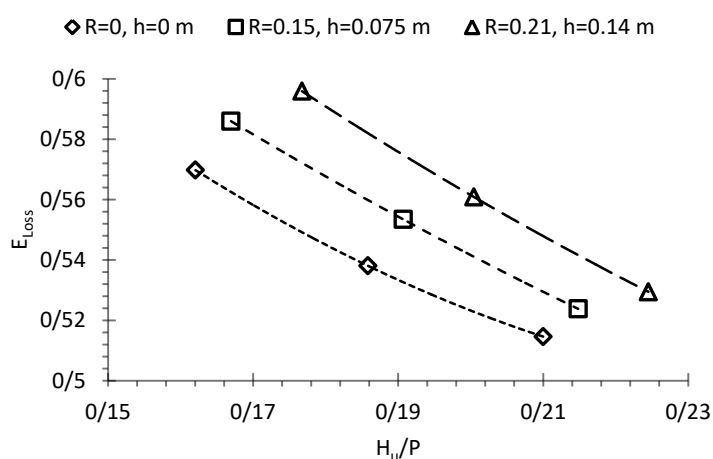


Fig 6. The amount of energy loss in terms of H_u/P

$$E_{Loss} = -k_1 \frac{H_u}{P} + k_2 \quad (5)$$

شکل (۷)، مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده‌ی استهلاك انرژی جریان را نشان می‌دهد که با توجه به رابطه (۵) با خطای قابل قبولی (حدود ۱ درصد)، مورد پذیرش است.

جدول ۳. محاسبه ضرایب K و ضریب همبستگی

Table 3. Calculation of K and determination coefficient

Row	R/h	K ₁	K ₂	R ²
۱	۰	۱/۱۴۹۷	۰/۷۵۴۶	۹۹/۱۸
۲	۱/۵	۱/۳۹۰۵	۰/۸۴۱۰	۹۹/۸۷
۳	۲	۱/۲۹۷۶	۰/۸۰۲۰	۹۹/۹۰

شکل ۷. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده استهلاك انرژی

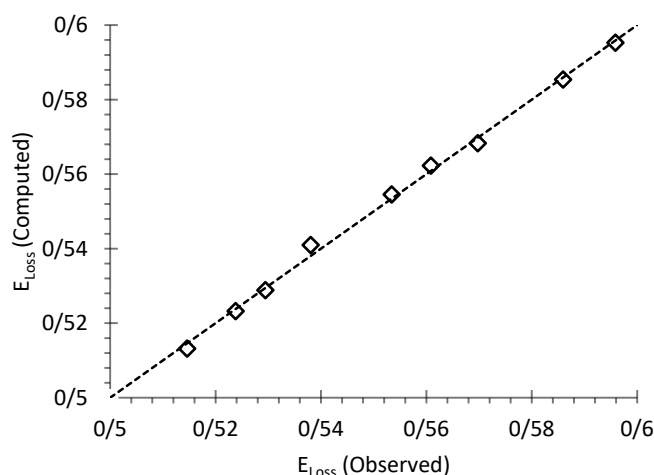


Fig 7. Observed and computed energy loss values

۵- نتیجه‌گیری

ضریب آبگذری با افزایش شعاع و لبه جامپ‌ها، کاهش می‌یابد. در سرریز با شعاع جامپ بزرگتر و در سرریز با شعاع جامپ کوچکتر، میزان ضریب آبگذری به ترتیب ۱۰/۹ و ۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش دبی جریان، میزان استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. در سرریز با شعاع جامپ بیشتر و در سرریز با شعاع جامپ کمتر نسبت به سرریز بدون جامپ، میزان استهلاك انرژی به ترتیب برابر ۳/۸ و ۲/۵ درصد بیشتر است. همچنین Fathi و همکاران (2023)، با بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A همراه با تعداد پله‌ی متفاوت ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ در کلیدهای خروجی سرریز به این نتیجه رسیدند که میانگین میزان استهلاك انرژی در سرریزهای ذکر شده به ترتیب برابر ۵۰/۲، ۵۹/۵، ۶۶/۸ و ۶۱/۶ درصد است. در این تحقیق و با بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با

شعاع متغیر جامپ در کلیدهای خروجی سرریز، نتایج نشان داد که در سرریز بدون جامپ، سرریز با شعاع جامپ کوچکتر و در سرریز با شعاع جامپ بزرگتر، میانگین میزان استهلاک انرژی به ترتیب برابر ۵۴/۱، ۵۵/۴ و ۵۶/۲ درصد است. در حالت سرریز بدون پله و جامپ، نتایج چنین است که میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی نوع C حدود ۷/۲ درصد از میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی نوع A بیشتر است. دلیل آن می‌تواند تعداد کلیدهای کمتر، عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز و شیب بیشتر کلیدهای خروجی در سرریز کلیدپیانویی نوع C باشد. اما با این حال، وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، باعث استهلاک انرژی بیشتری نسبت به وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز است.

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.
- Crookston, B. M., Erpicum, S., Tullis, B. P., & 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), 02519004.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G. M., & Schleiss, A. J. (Eds.). (2013). *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press.
- Eslinger, K., & Crookston, B. M. (2020). Energy dissipation of type a piano key weirs. *Water*, 12(5), 1253.
- 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. (In Persian).
- Khanh, M. H. T., Hien, T. C., & Quat, D. S. Study and construction of PK Weirs in Vietnam (2004 to 2011).
- Naghbizadeh, 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. (In Persian)
- Novák, P., & Čabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & Surveys in Water Resources Engineering*.
- 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. (In Persian)
- 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-I). ISOPE.