


# Energy Dissipation of Triangular Piano Key Weir

Hossein Sohrabzadeh Anzani<sup>1\*</sup>, Masoud Ghodsian<sup>2</sup>

1- Former M.Sc. Student of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

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

\*sohrabzadeh@modares.ac.ir

Received: 14 October 2022, Accepted: 6 February 2023  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Piano key weir (PKW) is a type of long crest weir, with more crest length in the same width, and the capacity of weir is higher than that of a linear weir. The piano key weirs are used in the crest of reservoir dams and in irrigation and drainage networks. So far, many studies have been done on the discharge coefficient of the piano key weir, but no research has been done on the energy dissipation of the triangular piano key weir. In this paper results of experiments on energy dissipation of triangular piano key weir are reported. The experiments were conducted using two models of piano key weirs; one with horizontal crest and the other one with inclined crest.

**Methodology:** Experiments were conducted in a rectangular channel (with 10 m length, 0.75 m width and 0.9 m height) in the hydraulic laboratory of Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Experiments were performed using two triangular piano key weirs. One with horizontal crest (i.e., Tri-Base model) and the other one with inclined crest (Tri-Base model). The slope of the weir with sloped crest was 10 degrees in the flow direction. The weir characteristics used in the laboratory are given in Table 1. Discharge was measured by two flow meters. The upstream flow depth and the downstream flow depth were measured by using digital point gages with an accuracy of  $\pm 0.1$  mm. The upstream and downstream depths of flow were measured at distances of  $4P$  and  $10P$ , respectively. The experiments were conducted for discharges in the range of  $40 \text{ L/s} < Q < 150 \text{ L/s}$  and relative upstream head in the range of  $0.23 < H_t/P < 0.8$ . Here  $P$  and  $H_t$  are the weir height and approach total head, respectively.

**Results:** The present results on relative energy dissipation for triangle piano key weirs with horizontal and inclined crests have been plotted and compared with the earlier results. The variation of the relative energy dissipation of triangular piano key weirs showed a logarithmic trend. According to results, the highest relative dissipation of energy is for the Tri-Base model. In other words, at the same flow rate, the highest relative amount of energy dissipation is occurred in the weir with a horizontal crest. It was also observed that the highest relative energy loss occurred at the lowest relative heads. As the relative head increases, the relative dissipation of energy decreases in both the models. The outflow velocity in the weir with sloped crest is higher than the weir with horizontal crest, and consequently the relative energy depreciation is reduced. The dissipation of energy in the weir with sloped crest was about 24% lower than the weir with horizontal crest. The variations of relative energy dissipation versus specific discharge were also compared for the

tested weirs. The relative energy  $E1/E0$  increased with the increase of the discharge per unit width. The higher relative residual energy in both the models were occurred at the higher flow rates. Also, in both the models, the increasing rate in  $E1/E0$  at the low flow rates, is higher compared to the high flow rates. The reason for this is the local submergence which occurred upstream of the weir in high discharges.

**Conclusion:** In the triangular piano key weir, by increasing the slope of the side walls crest from zero to 10 degrees, in the flow direction, the relative dissipation of energy has decreased by about 24%. The highest dissipation of energy in the weir with horizontal crest occurred in the lower relative heads. The dissipation of energy decreased with the increase of the relative head. The highest amount of energy dissipation for the weir with horizontal crest and sloped crest was 0.74 and 0.85, respectively. New equations were obtained for estimation the relative energy loss for triangular piano key weirs with horizontal crest and sloped crest.

**Keywords:** Energy dissipation, discharge confident, Triangular PKW.



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of  
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی

حسین سهراب زاده انزانی<sup>۱\*</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس-تهران.  
۲ استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس-تهران.

\*sohrabzadeh@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** سرریز کلیدپیانویی نوع خاصی از سرریزهای غیرخطی می‌باشد که بدلیل ابعاد به نسبت کوچک سطح اتکا<sup>۱</sup> و توانایی عبور دبی بالا، برای پروژه‌های بازسازی مناسب می‌باشد. تابحال بررسی‌های فراوانی بر روی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی صورت پذیرفته است، اما تحقیق بر روی استهلاک انرژی سرریز کلیدپیانویی مثلثی صورت نپذیرفته است. این مهم درحالی است که سرریزهای کلیدپیانویی در تاج سدهای مخزنی، شبکه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد فراوانی دارند. در این تحقیق به بررسی میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی و با تاج شیب‌دار پرداخته شده است. در نتیجه تحقیقات مشخص شد که سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی توانایی بیشتری در استهلاک انرژی دارد؛ به طوری که میزان استهلاک انرژی در سرریز با تاج افقی به طور میانگین ۲۴ درصد بیش از سرریز با تاج شیب‌دار است. در پایان روابطی برای محاسبه‌ی استهلاک انرژی برای هر دو سرریز با تاج افقی و تاج شیب‌دار ارائه شده است.

**کلیدواژگان:** استهلاک انرژی، سرریز کلیدپیانویی مثلثی، ضریب آبگذری، کارایی سرریز.

## ۱- مقدمه

سرریز کلیدپیانویی یک سازه کنترل کننده جریان است که اغلب به عنوان تاج سرریزها و برای تنظیم جریان استفاده می‌گردد. این سازه هیدرولیکی، نوعی سرریز غیر خطی است که برای نخستین بار توسط موسسه هیدروکوپ<sup>۲</sup> معرفی شد (Blanc and Lempérière, 2001). سرریز کلیدپیانویی شامل کلیدهای ورودی و خروجی همراه با سطح شیب‌دار می‌باشند. قسمت‌هایی از تاج این نوع سرریز فراتر از پایه آن امتداد می‌یابند و برآمدگی‌هایی را در جهت بالادست و یا پایین دست ایجاد می‌کنند (Eslinger and Crookston, 2020). سرریزهای کلیدپیانویی به دلیل عملکرد هیدرولیکی و اقتصادی مناسب در آمریکای شمالی، اروپا، آسیا و استرالیا در سدهای وزنی (مانند سد مالارس، فرانسه<sup>۳</sup>)، سدهای خاکی

(مانند سد دریاچه هلو، آمریکا<sup>۴</sup>) و همچنین سازه‌های رودخانه‌ای (مانند داکمی<sup>۵</sup> و ون فونگ بریج، ویتنام<sup>۵</sup>) ساخته شده‌اند. بررسی و ارزیابی‌های هیدرولیکی زیادی بر روی استهلاک انرژی با جریان آزاد در سرریزهای متفاوت صورت پذیرفته است که از جمله آن می‌توان به بررسی‌های (Moore (1943)، White (1943)، Rand (1953)، Gill (1973)، Chanson (1994)، Chanson (1995) و Chamani (1995) اشاره کرد؛ اما برای سرریزهای غیرخطی، در بیشتر پژوهش‌ها به بررسی ضریب آبگذری سرریزها پرداخته شده است که می‌توان به بررسی‌های انجام شده توسط Lempérière and Oumane (2003)، Ribeiro et al. (2003)، Erpicum et al. (2011)، Machiels et al. (2013)، Erpicum et al. (2013)، Crookston et al. (2014)، Erpicum et al. (2017)

4 Lake Peachtree Dam, GA, USA  
5 Dakmi 2 and Van Phong Barrage, Vietnam

1 Footprint  
2 Hydrocoop  
3 Malarce Dam, France

در پژوهش‌های پیشین تأثیر شیب دیواره‌ی جانبی سرریز کلیدپیانویی مثلثی جهت استهلاک انرژی مورد بررسی واقع نشده است. همچنین بررسی‌های اندکی بر روی استهلاک انرژی سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی صورت پذیرفته است. از آنجا که در نتایج بررسی‌های Sohrabzadeh and Ghodsian (2022) نیز سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار، ضریب آبگذری بالاتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی داشته است، لذا ضرورت بررسی استهلاک انرژی در این دو سرریز کلیدپیانویی بیش از پیش احساس می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها برای بررسی استهلاک انرژی و ویژگی‌های جریان در پائین‌دست سرریز کلیدپیانویی مثلثی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران صورت پذیرفته است. آزمایش‌ها در فلومی به ابعاد  $10 \times 0.75 \times 0.9$  متر انجام شد (شکل ۱). عرض فلوم از ۲ متر، با تبدیلی به صورت همگرا به عرض ۷۵ سانتی‌متر کاهش یافته است. فلوم از یک مخزن زیرزمینی تغذیه شده و دیواره‌های آن از جنس شیشه لمینت انتخاب شده است تا بتوان رفتار جریان را مشاهده کرد. جریان در فلوم پس از عبور از روی سرریز وارد مخزن خروجی در پایین‌دست شده و سپس به چاه زیرزمینی وارد می‌شود. سرریز کلیدپیانویی مثلثی در فاصله ۴ متری ابتدای فلوم نصب و آب‌بندی شد که کمترین اغتشاش جریان مشاهده می‌شود. دو مدل سرریز کلیدپیانویی با شیب‌های مختلف استفاده شد. به‌منظور شیب‌دار کردن تاج دیواره‌های جانبی سرریز، میزان ارتفاع دیواره‌های شیروانی بالادست طوری انتخاب شد که شیب‌های ۱۰ درجه ایجاد شود. دبی مورد نظر، به کمک تابلو کنترل نصب‌شده در آزمایشگاه که با تغییر دور موتور پمپ‌ها کار می‌کنند، قابل تنظیم می‌باشد. برای سرریز کلیدپیانویی از دبی ۵۵ لیتر بر ثانیه تا ۱۵۰ لیتر بر ثانیه و با فاصله‌های ۵ لیتر بر ثانیه استفاده شد. عمق جریان در بالادست سرریز ( $h_0 = P+h$ ) در فاصله 4P و در پائین‌دست سرریز ( $h_1$ ) در فاصله 10P، با دقت  $0.1 \text{ mm}$   $\pm$  اندازه‌گیری شد. مشخص‌های سرریزهای استفاده شده و مشخص‌های آزمایش‌های انجام شده به ترتیب در

Sohrabzadeh and Crookston et al. (2019)، (2018) Ghodsian and Sohrabzadeh و Ghodsian (2022) (2023) اشاره نمود. Lopez et al. (2008) و Lopez et al. (2011) با بررسی بر روی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای و مقایسه با نتایج Magalhães and Lorena (1994) الگوی جریان در سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای را افزایش دادند. آنان یک الگوی سه‌بعدی پیچیده را در پائین‌دست سرریزهای کنگره‌ای مشاهده کرده و موج‌های ضربه‌ای<sup>۱</sup> و در نقطه‌هایی حباب هوا در پائین‌دست مشاهده کردند. همچنین اشاره کردند که در رژیم جریان دوبعدی، عمق‌های مشخصه<sup>۲</sup> و رخ‌نماهای غلظت هوا بدون توجه به موقعیت عرضی همانند می‌شوند. (Akbariyan 2009) اعلام داشته است که یکی از راه‌های استهلاک انرژی جریان، کاربرد بازدارنده یا زبری در سرریز است که در سطح جریان تلاطم ایجاد نموده و انرژی جنبشی آن را مستهلک می‌کند. (Ercicun and Machiels 2011) میزان استهلاک انرژی را در دو هندسه‌ی متفاوت از سرریز کلیدپیانویی و یک سرریز اوجی مقایسه نموده و هر یک از سرریزها را از پائین‌دست، به یک سرریز پلکانی متصل نمودند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد به ازای یک دبی مخصوص یکسان (q)، تفاوت‌های معناداری در جریان بالادست سرریز پلکانی، بسته به تفاوت‌های نوع سرریز مشاهده شد. همچنین در سرریزهای کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی، استهلاک انرژی با نرخ بالاتری رخ می‌دهد. (Mansouri and Ahadian 2015) احتمال انسداد در سرریزهای کلیدپیانویی با دیواره سپری و بدون آن را بررسی و اعلام نمودند، در یک دبی ثابت، انسداد باعث افزایش سطح آب در بالادست و کاهش ضریب آبگذری سرریز می‌شود. (Qanavati et al. 2016) اثرگذاری ارتفاع بازدارنده‌ها در خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی را بر میزان استهلاک انرژی بررسی کردند. آنها اعلام نمودند با افزایش ارتفاع بازدارنده‌ها میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

1 Shockwaves  
2 Characteristic depths

### ۳- تحلیل ابعادی

برای دستیابی به هدف‌های موردنظر فراسنجه‌های مؤثر در استهلاک انرژی مشخص شده و سپس با استفاده از روش تحلیل ابعادی فراسنجه‌های بی‌بعد مؤثر شناسایی می‌گردند. فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدیابی در شکل‌های (۲) تا (۴) نشان داده شده است. فراسنجه‌های مؤثر در این تحقیق عبارت‌اند از:

$$F(W, B, T_s, L, P_i, H_t, \theta, \alpha, E_1, E_0) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $F$  نماد تابع،  $W_i$  عرض کلید ورودی،  $W$  عرض کل سرریز،  $B = B_i + B_0 + B_b$  طول تاج جانبی سرریز،  $B_i$  طول شیروانی پائین‌دست،  $B_0$  طول شیروانی بالادست،  $T_s$  ضخامت دیواره سرریز،  $L$  طول کل تاج سرریز،  $P_i$  ارتفاع سرریز در پائین‌دست،  $H_t$  هد کل،  $E_1$  انرژی جریان در پائین‌دست سرریز و  $E_0$  انرژی جریان در بالادست سرریز می‌باشند. همچنین  $\theta$  زاویه شیب تاج دیواره‌ی جانبی سرریز ( $\theta = \tan^{-1} \frac{D}{B}$ )،  $D$  ارتفاع دیواره‌های شیروانی بالادست و  $\alpha$  زاویه بین دیوار جانبی سرریز با راستای اصلی جریان می‌باشد. با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه (۱) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$F\left(\frac{L}{W}, \frac{B}{W}, \frac{H_t}{P}, \frac{T_s}{P_i}, \theta, \alpha, \frac{\Delta E}{E_0}\right) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه میزان‌های  $\frac{L}{W}$  و  $\frac{B}{W}$ ،  $\frac{T_s}{P_i}$  در همه‌ی سرریزها و آزمایش‌های انجام ثابت است. همین‌طور مقدار  $\alpha$  ثابت و برابر ۱۴ درجه می‌باشد. با حذف فراسنجه‌های ثابت یادشده رابطه (۲) به شکل رابطه زیر نوشته می‌شود. در سرریز با تاج شیب‌دار، ارتفاع میانه طولی سرریز که در ادامه با  $P'$  نشان داده شده، جایگزین  $P_i$  می‌شود.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = F\left(\frac{L}{W}, \frac{B}{W}, \frac{H_t}{P'}, \theta\right) \quad (3)$$

جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. در ادامه Tri-Base معرف سرریز با تاج افقی و Tri-B<sub>1</sub> معرف سرریز با تاج شیب‌دار است.

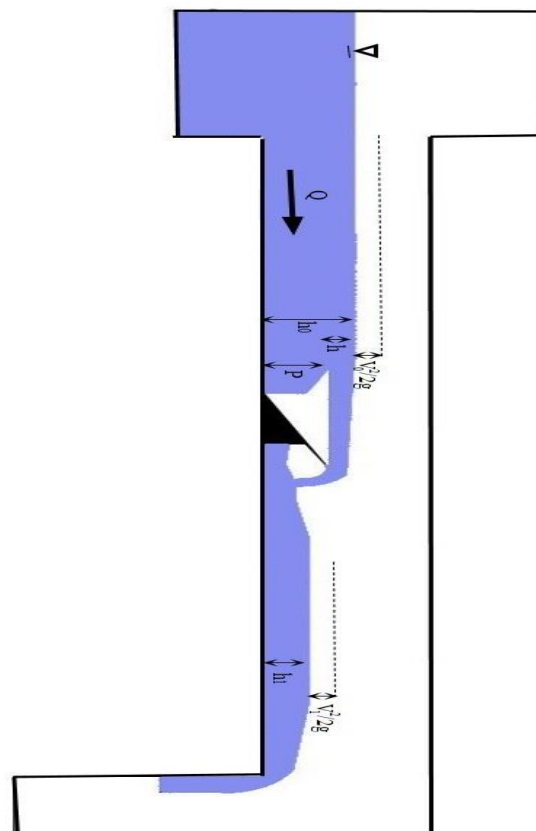


Fig. 1 Laboratory flume  
شکل ۱ فلوم آزمایشگاهی

جدول ۱ مشخص‌های سرریزهای استفاده شده

Table 1 Specifications of weirs used

Model	$\theta$	$P_o$	$P_i$	$B_b$	$B_i=B_o$	L
	(o)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Tri-Base	0	20	20	25	12.5	301.8
Tri-B <sub>1</sub>	10	28.86	20	25	12.5	306.42

جدول ۲ مشخص‌های کلی آزمایش‌ها به همراه محدوده‌ی آن‌ها

Table 2 Characteristics of the tests conducted

Model	Number of tests	Q (L/S)	$H_t/P_i$	Wi/Wo
Tri-Base	23	40-150	0.23-0.78	1/25
Tri-B <sub>1</sub>	23	40-150	0.49-0.89	1/25

(2020):

$$E_0 = h + V_0^2/2g + P \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)، ارتفاع جریان در بالادست سرریز و  $V_0$  سرعت میانگین جریان در بالادست سرریز می‌باشد.

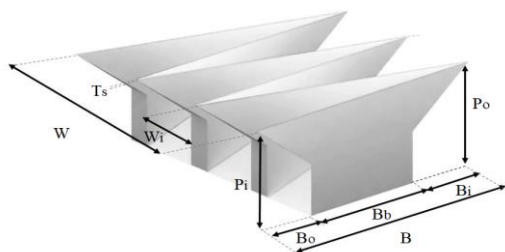
همچنین انرژی جریان در پایین‌دست سرریز مطابق معادله‌ی (۵) می‌باشد (Eslinger and Crookston, 2020):

$$E_1 = h_1 + V_1^2/2g \quad (5)$$

در رابطه‌ی بالا  $h_1$  ارتفاع جریان در پایین‌دست سرریز و  $V_1$  سرعت متوسط جریان در پایین‌دست سرریز می‌باشد. افت انرژی و افت انرژی نسبی به کمک رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند (Eslinger and Crookston, 2020):

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (6)$$

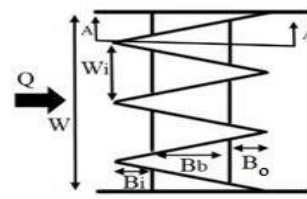
$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (7)$$



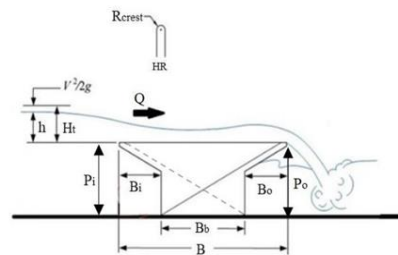
**Fig. 4** Geometric parameters of PK weir with horizontal crest

شکل ۴ فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی

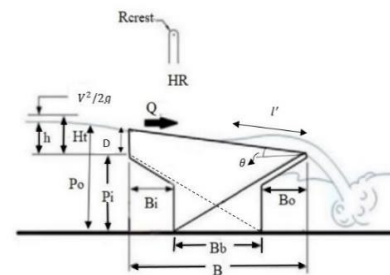
شکل ۵ تغییرپذیری‌های استهلاک انرژی را برای سرریز با تاج افقی (Tri-Base) و سرریز با تاج شیبدار (Tri-B1) و مقایسه آن‌ها با نتایج دیگر محققان را نشان می‌دهد. روند تغییرات استهلاک انرژی با افزایش عمق نسبی جریان، برای سرریزهای استفاده در این شکل مشابه است. با توجه به شکل ۵ بیشترین استهلاک نسبی انرژی برای مدل Tri-Base می‌باشد. به عبارت دیگر در یک دبی یکسان، بیشترین میزان نسبی استهلاک انرژی به مدل سرریز با تاج افقی مرتبط می‌باشد. همچنین آشکار است



(a)



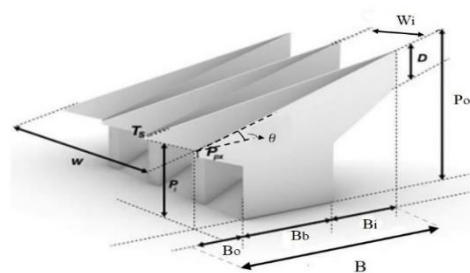
(b)



(c)

**Fig. 2** PKW schematic: (a) in plan, (b) section A-A for horizontal crest; (c) section A-A for sloped crest

شکل ۲ سرریز کلیدپیانویی: (a) نمای بالا، (b) مقطع A-A با تاج افقی و (c) مقطع A-A با تاج شیبدار



**Fig. 3** Geometric parameters of PK weir with sloped crest  
شکل ۳ فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی با تاج شیبدار

#### ۴- نتایج

برای محاسبه‌ی انرژی جریان در بالادست سرریز از رابطه‌ی (۴) استفاده شد Eslinger and Crookston

می‌یابد. بیشترین میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی و سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج شیبدار به ترتیب برابر ۰/۷۴ و ۰/۸۵ می‌باشد.

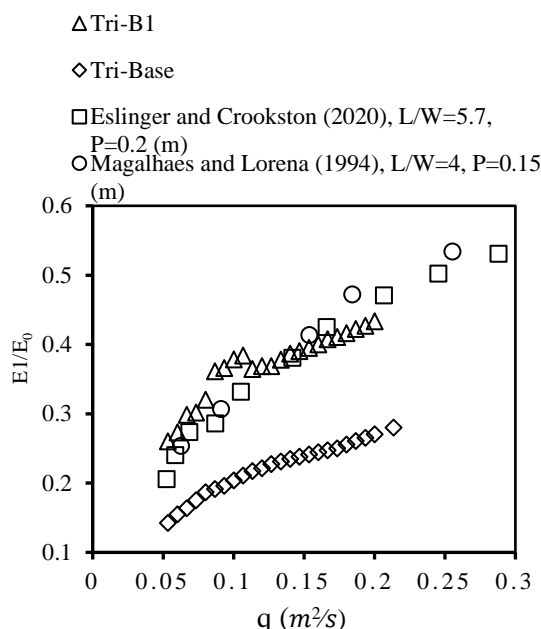


Fig. 6 Relative residual energy vs. unite discharge

شکل ۶ انرژی باقی مانده نسبی در برابر دبی بر واحد عرض

### ۶- رابطه‌ی استهلاک انرژی

به منظور تعیین انرژی نسبی مستهلک شده در سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و تاج شیبدار به ترتیب رابطه‌های (۸) و (۹) پیشنهاد می‌شود. این رابطه‌ها در واقع ارتباط بین انرژی نسبی مستهلک شده و فراسنجه‌های مشخص شده در قسمت تحلیل ابعادی را نشان می‌دهد. رابطه‌های پیشنهادی برای محاسبه‌ی استهلاک نسبی انرژی برای سرریز با تاج افقی (Tri-Base) و سرریز با تاج شیبدار (Tri-B1) به ترتیب دارای ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۹۹ و ۰/۸۹۷ می‌باشند. در این رابطه‌ها  $P'$  و  $P_i$  به ترتیب ارتفاع پایین دست سرریز و ارتفاع میانگین سرریز می‌باشد.

(8)

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \left[ -0.496 \left( \frac{H_t}{P_i} \right)^3 + \left( \frac{H_t}{P_i} \right)^2 - 0.844 \left( \frac{H_t}{P_i} \right) + 1 \right]^{0.963}$$

که بیشترین افت نسبی انرژی در همه سرریزها در کمترین عمق‌های نسبی رخ داده است و با افزایش عمق نسبی، تاثیر شکل تاج سرریز بیشتر می‌شود.

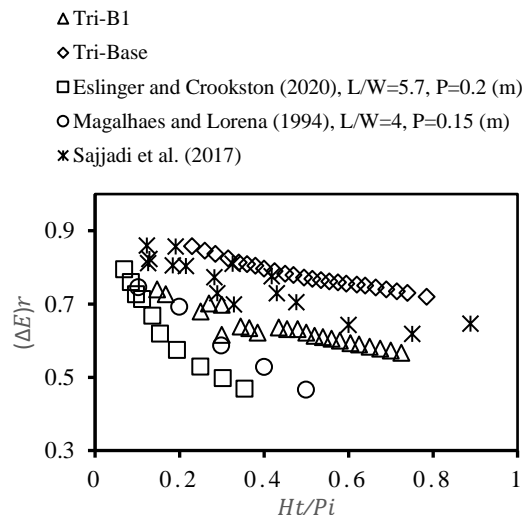
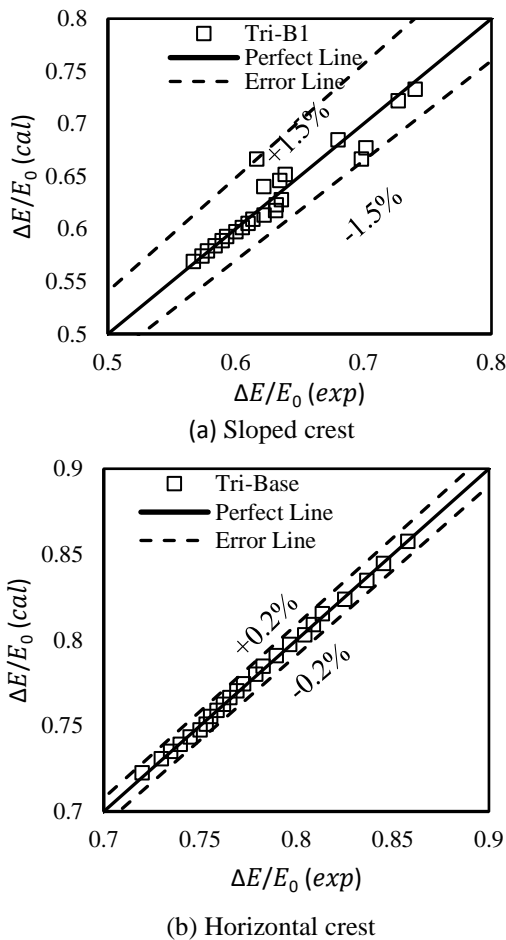


Fig. 5 Relative energy dissipation vs.  $H_t/P_i$

شکل ۵ استهلاک انرژی نسبی در برابر  $H_t/P_i$

با افزایش عمق نسبی از میزان استهلاک نسبی انرژی در هر دو سرریز کاسته می‌شود. علت این است که با افزایش دبی و سرعت جریان، از میزان اصطکاک بین جریان و سرریز کاسته شده و در نتیجه استهلاک جریان کاهش می‌یابد. از آنجاکه به واسطه‌ی شیب دیواره‌های سرریز، سرعت جریان در مدل Tri-B1 نسبت به مدل Tri-Base بیشتر می‌باشد بنابراین منطقه جدایی در مدل Tri-B1 کاهش یافته و در پی آن استهلاک نسبی انرژی در مدل Tri-B1 کمتر از مدل Tri-Base می‌باشد. این میزان کاهش حدود ۲۴ درصد است.

شکل ۶ تغییرات انرژی باقی مانده بر حسب دبی بر واحد عرض سرریز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، با افزایش دبی بر واحد عرض، نسبت  $E_1/E_0$  افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر انرژی باقی مانده نسبی بیشتری در هر دو مدل سرریز در دبی‌های بالا رخ می‌دهد. همچنین در هر دو مدل سرریز در دبی‌های پائین، شیب افزایشی نسبت  $E_1/E_0$  بیش از دبی‌های بالا است. علت این امر استغراق موضعی در بالادست سرریز در دبی‌های بالا می‌باشد؛ به طوری که در هدهای بالا هوادهی روی سرریز کاهش



**Fig. 7** Comparison of measured and calculated relative energy dissipation for PK weir with: (a) sloped crest and (b) horizontal crest

شکل ۷ مقایسه میزان‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی با: (a) تاج شیب دار و (b) تاج افقی

### ۸- فهرست نشانه‌ها

N	شمار سیکل‌ها
$P_0$	ارتفاع بالادست سرریز (cm)
$P_i$	ارتفاع پایین‌دست سرریز (cm)
$P'$	ارتفاع میانگین سرریز (cm)
$S_0$	شیب کف آبراه
Z	عمق جریان (cm)
h	بار آبی روی سرریز (cm)
$H_t$	هد کل بالادست سرریز (cm)
n	شمار دیواره‌های جانبی سرریز
$\theta^0$	زاویه‌ی تاج سرریز نسبت به افق
$\alpha^0$	زاویه‌ی بین دیواره‌ی جانبی سرریز با

$$\frac{\Delta E}{E_0} = -0.55 \left(\frac{H_t}{P'}\right)^3 + \left(\frac{H_t}{P'}\right)^2 - 0.796 \left(\frac{H_t}{P'}\right) + 0.83 \quad (9)$$

میزان‌های درصد خطای میانگین E با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه و برای سرریز با تاج افقی (Tri-Base) و سرریز با تاج شیب‌دار (Tri-B1)، به ترتیب برابر ۰/۲ و ۱/۵ درصد می‌باشد.

$$E = \sum_{i=1}^{n'} \left| \frac{\frac{\Delta E}{E_{0cal}} - \frac{\Delta E}{E_{0exp}}}{\frac{\Delta E}{E_{0cal}}} \right| \frac{100}{n'} \quad (10)$$

در رابطه بالا  $\frac{\Delta E}{E_{0exp}}$  و  $\frac{\Delta E}{E_{0cal}}$  به ترتیب میزان‌های محاسبه‌شده و میزان‌های واقع استهلاک نسبی انرژی و  $n'$  شمار داده‌ها است.

شکل ۷ مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده استهلاک نسبی انرژی برای سرریز با تاج افقی و سرریز با تاج شیب‌دار را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که معادله پیشنهادی، استهلاک نسبی انرژی را با دقت بالا نسبت به میزان‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌کند. محدوده‌ی اعتبار رابطه‌های (۸) و (۹)، به ترتیب برای سرریز با تاج افقی و سرریز با تاج شیب‌دار،  $0.178 < \frac{H_t}{P_i} < 0.189$  و  $0.149 < \frac{H_t}{P_i} < 0.189$  می‌باشد.

### ۷- نتایج

۱- در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با افزایش شیب دیواره‌های جانبی از صفر به ۱۰ درجه و در جهت جریان، استهلاک نسبی انرژی ۲۴ درصد کاهش یافته است.

۲- بیشترین استهلاک انرژی در سرریز با تاج افقی در بارهای پایین رخ داده است و با افزایش بار از این مقدار کاسته می‌شود.

۳- بیشترین میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی و سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج شیب‌دار به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۰/۷۴ می‌باشد.

۴- رابطه‌های (۸) و (۹)، به ترتیب برای محاسبه‌ی استهلاک نسبی انرژی سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و سرریز با تاج شیب‌دار پیشنهاد می‌شود.



Chamani, M. & Rajaratnam, N. (1995). Energy loss at drops. *J. Hydraul. Res.*, 33, 373–384.

Crookston, B.M., Erpicum, S., Tullis, B.P. & Laugier, F. (2019). Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures and future research needs. *J. Hydraul. Eng.* 145(12), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001646](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001646).

Crookston, B.M., Anderson, R.M. & Tullis, B.P. (2018). Free-flow discharge estimations for piano key weir geometries. *J. Hydro-environ. Res.*, 19, 160–167.

Erpicum, S., Laugier, F., Boillat, J.L. & Piroton, M. (2011). Labyrinth and piano key weirs; CRC Press: London, UK.

Erpicum, S., Laugier, F., Ho Ta Khanh, M. & Pfister, M. (2017). Labyrinth and piano key weirs III—PKW; CRC Press: London, UK.

Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G. & Schleiss, A.J. (2013). Labyrinth and piano key weirs; CRC Press: London, UK.

Eslinger K, & Crookston BM. (2020) Energy dissipation of type a piano key weir. *Water*, 12(5), 1253, <https://doi.org/10.3390/w12051253>.

Ghodsian, M. & Sohrabzadeh-Anzani, H. (2023). Experimental study on flow over rectangular Piano key weirs with slopped side crests. *Modares Civil Engineering Journal*. 23(2), 165-175. (in Persian)

Gill, M.A. (1979). Hydraulics of rectangular vertical drop structures. *Journal of Hydraulic Research*, 17, 289–302.

Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. & Boillat, A.L. (2012). Hydraulic design of A-type piano key weirs. *J. Hydraul. Res.*, 50, 400–408.

Lempérière, F. & Ouamane, A. (2003). The piano key weir: A new cost-effective solution for spillways. *Int. J. Hydropower Dams*, 10, 144–149.

Lopes, R., Matos, J. & Melo, J. (2008). Characteristic depths and energy dissipation downstream of a labyrinth weir. In *Hydraulic Structures, Proceedings of the International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures (IJREWHS '08)*, Pisa University Press: Pisa, Italy.

Lopes, R. Matos, J. & Melo, J.F. (2011). Flow properties and residual energy downstream of labyrinth weirs. In *Labyrinth and Piano Key Weirs*; Erpicum, S., Laugier, F., Boillat, J.L., Piroton, M.,

	راستای اصلی جریان
V	سرعت میانگین جریان ( $ms^{-1}$ )
Q	دبی جریان ( $LS^{-1}$ )
E	درصد خطای میانگین
F	نماد تابع
$n'$	شمار داده‌های آزمایشگاهی
$W_i$	عرض کلید ورودی (cm)
$W_o$	عرض کلید خروجی (cm)
w	عرض یک چرخه (cm)
W	عرض فلوم (cm)
$We$	عدد وبر
$B_i$	طول شیروانی پایین دست سرریز (cm)
$B_o$	طول شیروانی بالادست سرریز (cm)
B	طول تاج جانبی سرریز (cm)
t	ضخامت دیواره‌های سرریز (cm)
D	ارتفاع دیواره‌های اضافه شده به تاج (cm)
L	طول کل تاج (cm)
$L'$	طول مؤثر (cm)
$l'$	طول تر شده‌ی یک دیواره‌ی جانبی سرریز (cm)
g	شتاب گرانش زمین ( $ms^{-2}$ )
$E_1$	انرژی جریان در پائین دست سرریز
$E_0$	انرژی جریان در بالادست سرریز

## ۹- منابع‌ها

Akbariyan, A. (2009). Design of Hydraulic Structures Canals. Amidi Pub. (in Persian)

Anderson, R.M. & Tullis, B. (2012). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 138(4), 358-361.

Blanc, P. & Lempérière, F. (2001). Labyrinth spillways have a promising future. *Hydropower Dams*, 8, 129–131.

Chanson, H. (1994). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *J. Hydraul. Res.*, 32, 213–218.

Chanson, H. (1995). Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs, and spillways; Pergamon: Oxford, UK.

Reverchon, B., Schleiss, A., Eds., CRC Press/Balkema: Boca Raton, FL, USA, 97–104.

Machiels, O., Pirotton, M., Archambeau, P., Dewals, B.J. & Erpicum, S. (2014). Experimental parametric study and design of piano key weirs. *J. Hydraul. Res.* 52, 326–335.

Magalhães, A.P. & Lorena, M. (1994). Energy losses in flow over labyrinth Weirs; SILUSBA: Lisboa, Portugal, 203–211. (in Portuguese)

Mansouri, K. & Ahadiyan, J. (2015). Obstruction of piano key weirs in debris flow in individual experiments system. *Irrig. Sci. Eng.*, 5(3), 163-172. (in Persian).

Moore, W.L. (1943). Energy loss at the base of free over fall. *Trans. ASCE*, 108, 1343–1360.

Rand, W. (1953) Flow geometry at straight drop spillways. *Proc. ASCE*, 81(9), 1–13.

Ribeiro, M.L., Pfister, M. & Schleiss, A. (2013). Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs, 273-281.

Sohrabzadeh-Anzani, H. & Ghodsian, M. (2022). Experimental study of the effect of sidewall slope over the triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*. 17(4), 17-30. (In Persian)

Qanavati, M., Sajjadi, S.M. & Ahadiyan, J. (2016). The effect of block height on flow hydraulic behavior in rectangular piano key weir with baffled outlet key. The 3rd International Conference on Geographical Science. Nov. 3. Shiraz University. Shiraz, Iran. (in Persian)