

# مقایسه آبگذری سرریز کلیدپیانویی با سرریزهای اوجی و لبه‌تیز

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

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران  
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران

ghods@modares.ac.ir\*

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

## چکیده

یکی از مهم‌ترین آثار تغییرات آب و هوایی وقوع سیلاب‌های ناگهانی است. از آنجاکه حفظ سلامت سدها هنگام سیلاب ضروری می‌باشد، پس وجود سرریز مناسب در سدها امری غیرقابل انکار است. در واقع سرریزها وظیفه انتقال آب از مخزن سد به پائین‌دست را بر عهده دارند. در بین سرریزهای موجود، سرریز کلیدپیانویی جدیدترین سرریز می‌باشد. هدف از مطالعه حاضر بررسی آبگذری سرریز کلیدپیانویی و مقایسه آن با سرریز لبه‌تیز و سرریز اوجی است. برای بررسی این موضوع، آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران در فلومی به ابعاد ۰/۹ در ۰/۷۵ در ۱۰ متر روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی صورت گرفت. نتایج نشان داد متوسط ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی ۰/۴ و بیشترین میزان آن ۰/۵۵ است که با افزایش بار آبی روی سرریز از مقدار آن کاسته شده و به مقدار ۰/۳ میل می‌کند. آبگذری سرریز کلیدپیانویی به‌طور متوسط ۲/۵ برابر آبگذری سرریز اوجی و حدود ۳ تا ۵ برابر آبگذری سرریز لبه‌تیز است. محاسبات نشان داد متوسط استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی نیز حدود ۰/۳ است.

**واژگان کلیدی:** سرریز اوجی، سرریز لبه‌تیز، سرریزهای غیرخطی، سرریز کلیدپیانویی، ضریب آبگذری

## ۱- مقدمه

۴۲۱ نفر و در سال ۱۹۶۳ در سد واجونت<sup>۳</sup> در ایتالیا، ۱۹۱۰ نفر به کام مرگ کشیده شدند [1]. آخرین مورد نیز در سال ۲۰۲۰ در میشیگان<sup>۴</sup> آمریکا اتفاق افتاد [2]. به علت مشکلاتی مانند افزایش بارهای وارد شده به سرریزهای کنگره‌ای و حجم زیاد مصالح بکار رفته در این سرریزها، به علت فونداسیون بزرگ‌تر، پژوهشگران سرریزی معرفی کردند که علاوه برداشتن مزایای سرریزهای کنگره‌ای،

طبق گزارش ICOLD<sup>۱</sup>، تعداد ۵۶۳۹۲ سد در دنیا موجود است که از این تعداد، ۳۷۶۴۱ سد با حداقل ارتفاع ۱۵ متر می‌باشد که تقریباً دوسوم آن‌ها نقش آبیاری دارند و مابقی آن‌ها برای تولید برق، ذخیره آب و کنترل سیلاب استفاده می‌شوند. تخریب سدها خطرات جبران‌ناپذیری باقی خواهد گذاشت. در سال ۱۹۵۱ با تخریب سد مالپاست<sup>۲</sup> در فرانسه

<sup>۳</sup> Vajont  
<sup>۴</sup> Michigan

<sup>۱</sup> International Commission on Large Dams  
<sup>۲</sup> Malpasset

سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی سه تا چهار برابر است. Ribeiro et al. با مطالعه روی ۷ سد بزرگ فرانسه که دارای سرریز کلیدپیانویی بودند اعلام داشتند در بارهای آبی خیلی کم، سرریز کلیدپیانویی شبیه به سرریز لبه تیز عمل می‌کند و با افزایش بار آب روی سرریز، از کارایی این سرریز کاسته شده و کارایی آن نزدیک به سرریزهای لبه پهن می‌شود [10]. Belaabed and Oumane با بررسی آبگذری سرریز کلیدپیانویی در حالت مستغرق نشان دادند استغراق باعث کاهش ضریب آبگذری سرریز می‌شود [11]. Anderson and Tullis با مقایسه عملکرد سرریزهای کنگره‌ای با سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی به این نتیجه رسیدند که سرریزهای کلیدپیانویی به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [12]. Kabiri-Samani and Javaheri با مطالعه روی سرریز کلیدپیانویی نشان دادند با افزایش نسبت طول سرریز به عرض آن، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد، اما افزایش بیش‌ازحد این نسبت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب آبگذری نخواهد داشت. همچنین آن‌ها به بررسی مشخصات هندسی همچون ارتفاع سرریز، طول و عرض کلیدها بر کارایی سرریز نوع A پرداختند [13]. Belzner et al. به بررسی و مقایسه ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی نوع A و نوع C پرداختند [14]. Mehboudi et al. با بررسی هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای نشان دادند سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کارایی بالاتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی دارد [15]. انسداد ناشی از جسم‌های شناور در سرریز کلیدپیانویی توسط Poshteh-Shirani et al. بررسی و مشخص شد سرریز با نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی برابر ۰٫۲۵، کمترین انسداد را دارد [16]. Ghodsian and Ehsanifar با مقایسه ضریب آبگذری در سه سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای به این نتیجه

مشکلات آن نیز به طریقی کاهش پیدا کند. به همین دلیل موسسه هیدروکوپ<sup>۱</sup> فرانسه با همکاری آزمایشگاه هیدرولیک در دانشگاه بیسکارا<sup>۲</sup> در الجزایر شکل جدیدی از سرریز به نام سرریز کلیدپیانویی را عرضه کردند. مدل اولیه این سرریز در سال ۱۹۹۹ در آزمایشگاه LNH فرانسه ارائه شد [3]. Muslu از دانشگاه بیسکارا در الجزایر و لمپرییر در فرانسه برای بهبود سرریزهای کنگره‌ای، این نوع سرریز را با مقیاسی کوچک ساخت و در ادامه با توجه به مزایای آن، به‌طور چشم‌گیری در بین کشورها گسترش یافت. در سال ۲۰۰۲ دانشگاه رورکی<sup>۳</sup> هندوستان همراه با دانشگاه بیسکارا نیز به مطالعاتی روی این سرریزها پرداختند. اولین مطالعه روی مدل سرریز کلیدپیانویی برای اصلاح سد گولورس در فرانسه، با مطالعاتی توسط موسسه برق فرانسه (ای دی اف<sup>۴</sup>) از ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ صورت پذیرفت و سپس در سال ۲۰۰۶ این سد با سرریز کلیدپیانویی بازسازی شد [4]. ساخت بعدی این نوع سرریز برای سد سینت مارک<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۸ صورت پذیرفت [5]. از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ ده سد دیگر با سرریز کلیدپیانویی به بهره‌برداری رسید [6]. مزیت‌های استفاده از سرریزهای کلیدپیانویی در مقایسه با سرریزهای کنگره‌ای، عبارت‌اند از کاهش ابعاد فونداسیون سرریز و ظرفیت تخلیه بالاتر آن‌ها. Lempérière and Ouamane با بررسی سرریز کلیدپیانویی نوع A پیشنهاد کردند تعداد کلیدهای سرریز بین ۴ تا ۷ در نظر گرفته شود. آن‌ها همچنین، کمترین شیب کف کلیدهای سرریز را ۱ به ۲ توصیه کردند [7]. Lempérière and Jun بهترین مقدار برای تعداد کلیدهای سرریز کلیدپیانویی نوع A را ۵ بیان کردند. آن‌ها کمترین شیب کف کلیدهای سرریز را نیز ۱ به ۲ توصیه کردند [8]. Ouamane and Lempérière با بررسی دو نوع A و B سرریزهای کلیدپیانویی کارایی سرریز نوع B را ۱۰ درصد بیشتر گزارش کردند [9]. همچنین نشان دادند که ظرفیت تخلیه

۴ Électricité de France (French Electricity)

۵ Saint Marc

۱ Hydrocoop

۲ Biskra

۳ Roorke

علت آنکه سرریزهای کلیدپیانویی نسبت به دیگر سرریزها جدیدتر می‌باشد بررسی بیشتر هیدرولیک این سرریزها امری مهم است. پس در این تحقیق به مقایسه آبگذری سرریز کلیدپیانویی با سرریز لبه‌تیز و سرریز اوجی پرداخته می‌شود تا میزان عملکرد آنها مورد ارزیابی قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران صورت پذیرفته است. آزمایش‌ها در فلومی به ابعاد  $0.9 \times 0.75 \times 1.0$  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 تغذیه‌شده و دیواره‌های فلوم از جنس شیشه لمینت انتخاب شده است تا بتوان رفتار جریان را مشاهده کرد. جریان در فلوم بعد از عبور از روی سرریز وارد مخزن خروجی در پایین دست شده و سپس به چاه زیرزمینی وارد می‌شود. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی که مشخصات آن در شکل (۲) نشان داده شده است در فاصله ۴ متری ابتدای فلوم نصب و آب‌بندی شد. دبی موردنظر، به کمک تابلو کنترل نصب‌شده در آزمایشگاه که با تغییر دور موتورپمپ‌ها کار می‌کنند، قابل تنظیم می‌باشد. عمق جریان با استفاده از عمق‌سنج با دقت  $\pm 0.1$  mm اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با دبی ۵۰ تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه و با گام‌های ۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. عمق جریان در فاصله‌های  $4P$  و  $10P$ ، به ترتیب در بالادست و پایین دست سرریز اندازه‌گیری شد. در اینجا  $P$  ارتفاع سرریز است. برای اندازه‌گیری طول مؤثر تاج سرریز، از یک خط‌کش با دقت  $\pm 1$  mm در هر آزمایش استفاده شد. مشخصات سرریز استفاده شده در جدول (۱) ارائه شده است.



Fig. 1. Laboratory flume

رسیدند که در  $H_t > 8$  cm سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی آبگذری بهتری نسبت به دو سرریز دیگر دارند. در اینجا  $H_t$  بار کل در بالادست سرریز است. همچنین برای  $H_t < 8$  cm نشان دادند سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای کارایی بهتری نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و مثلی دارند [17]. Ghodsian and Sohrabzadeh Anzani. با بررسی جریان روی سرریز کلیدپیانویی مثلی با دیواره جانبی شیب‌دار نشان دادند که ارتفاع جریان در بالادست سرریز با تاج شیب‌دار نسبت به سرریز با تاج افقی، ۲۹ درصد افزایش یافته است. همچنین ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار، به‌طور میانگین  $0.5/3$  درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی افزایش یافته است. آن‌ها همچنین با بررسی آزمایشگاهی آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج شیب‌دار اعلام داشتند که تراز سطح آب در بالادست سرریز با تاج دیواره‌های جانبی شیب‌دار، نسبت به سرریز با تاج دیواره‌های جانبی افقی،  $11.02$  درصد افزایش یافت. درحالی‌که ضریب آبگذری و کارایی سرریز با تاج دیواره‌های جانبی شیب‌دار را به‌طور متوسط به ترتیب  $4.8$  درصد و  $7.3$  درصد بیش از سرریز با تاج افقی اعلام کردند [18].

Sohrabzadeh Anzani and Ghodsian با بررسی آزمایشگاهی نشان دادند که ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار ناپیوسته به‌طور میانگین حدود ۷ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی افزایش یافته است. ایشان کارایی سرریز با تاج شیب‌دار را در حدود ۷ درصد بیش از سرریز با تاج افقی اعلام نمودند [19]. Sohrabzadeh Anzani and Ghodsian. در تحقیق دیگری نشان دادند سرریز کلیدپیانویی مثلی با تاج افقی توانایی بیشتری در استهلاک نسبی انرژی دارد؛ بطوریکه میزان استهلاک انرژی در سرریز با تاج افقی به‌طور متوسط ۲۴ درصد بیش از سرریز با تاج شیب‌دار می‌باشد [20].

از آنجاکه عبور جریان اضافی در مواقع بحرانی مانند سیلاب برای حفظ سلامت و پایداری سد ضروری است؛ بررسی و اطمینان از آبگذری سرریز در سدها امری حیاتی است. به

جدول ۱. مشخصات سرریز استفاده شده (واحد اعداد به سانتی متر است)

Model	P	$B_b$	$B_o=B_i$	L
B/W=1/3	20	۱۲,۵	۶,۲۵	225.09

Table 1. Specifications of weir used (cm)

$$C_{pkw} = \frac{\frac{3}{2}Q}{L\sqrt{2gH_t^2}} = F\left(\frac{H_t}{P}\right) \quad (5)$$

شکل ۲. فراسنجه‌های سرریز کلیدپیانویی: الف) نمای ۳ بعدی،

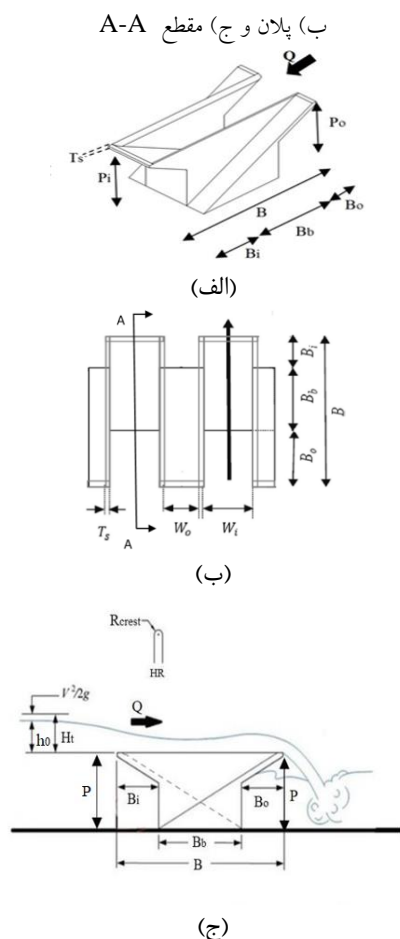


Fig. 2. Piano key weir parameters: a) 3D view, b) Plan and c) Section A-A

#### ۴- مشاهدات آزمایشگاهی

شکل (۳) عبور جریان از روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی را نشان می‌دهد. در آزمایش‌های انجام شده مشاهده شد که تداخل و برخورد قسمت‌های جریان ریزشی از روی کلیدهای سرریز در انتهای آن رخ می‌دهد. با افزایش دبی و هیدرولیکی این تداخلات با شدت بیشتری اتفاق افتاده و در نهایت در کل سرریز مشاهده می‌شود. همچنین استغراق موضعی در کلیدهای خروجی رخ داده و با افزایش بار هیدرولیکی بیشتر نمایان می‌شود.

#### ۳- تحلیل ابعادی

برای تعیین دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی از رابطه عمومی سرریزها به صورت زیر استفاده می‌شود [21].

$$Q = \frac{3}{2} C_{pkw} L \sqrt{2g} H_t^{1.5} \quad (1)$$

که در آن ضریب آبدگذری سرریز کلیدپیانویی،  $g$  شتاب جاذبه و  $L$  طول تاج سرریز است. ضریب آبدگذری سرریز کلیدپیانویی طبق رابطه بالا به صورت زیر است:

$$C_{pkw} = \frac{\frac{3}{2}Q}{L\sqrt{2g}H_t^{1.5}} \quad (2)$$

فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در شکل (۲) نشان داده شده است. فراسنجه‌های موثر بر ضریب آبدگذری سرریز کلیدپیانویی عبارت‌اند از:

$$F(W, B, T_s, L, g, P, H_t, \rho, \sigma, Q) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه  $W$  عرض کل سرریز،  $B = B_i + B_o + B_b$ ،  $B_i$  طول شیروانی پائین دست،  $B_o$  طول شیروانی بالادست،  $T_s$  ضخامت دیواره سرریز،  $P$  ارتفاع سرریز،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی،  $F$  نماد تابع و  $Q$  دبی جریان می‌باشند. با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه (۳) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$F\left(\frac{Q}{L\sqrt{g}H_t^{\frac{3}{2}}}, \frac{W}{B}, \frac{L}{W}, \frac{W}{P}, \frac{H_t}{P}, \frac{T_s}{P}, We\right) = 0 \quad (4)$$

در سرریزهای کلیدپیانویی چنانچه عمق جریان در بالادست تاج سرریز بیش از ۳ سانتی متر باشد تاثیر کشش سطحی ناچیز است و در نتیجه از عدد وبر  $We$  صرف نظر می‌شود [21, 6] در تحقیق حاضر میزان‌های  $\frac{W}{B}$ ،  $\frac{L}{W}$ ،  $\frac{W}{P}$  و  $\frac{T_s}{P}$  در تمامی آزمایش‌ها دارای مقدار ثابتی است. بنابراین با حذف

## ۵- نتایج

شکل (۵) تغییرات دبی بر حسب بار کل برای تحقیق حاضر و نتایج Anderson and Tullis [22] را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روند افزایشی دبی با افزایش بار کل در هر دو تحقیق مشابه یکدیگر می‌باشد. اختلاف در مقادیر به علت اختلاف در ابعاد هندسی سرریز و شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است. جدول (۲) مشخصات هندسی در آزمایش‌های تحقیق حاضر و تحقیق Anderson and Tullis [22] را نشان می‌دهد.

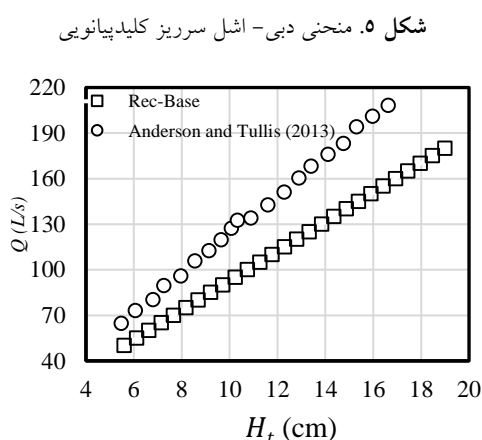


Fig. 5.  $Q$  versus  $H_t$  for piano key weir

جدول ۱ مشخصات سرریزهای استفاده شده در تحقیق حاضر و تحقیق اندرسون و تولیس (۲۰۱۳)

Researcher	$W/B$	$P/W$	$L/W$	$B_t/B_o$	$W_t/W_o$	$N$
Anderson and Tullis (2013)	0.48	0.21	5.05	1	1	4
Present Study	0.33	0.26	5	1	1	3

Table 2. Specifications of weirs used by Anderson and Tullis (2013) and present study

شکل (۶) تغییرات ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی را نشان می‌دهد. روند کاهش ضریب آبگذری با افزایش بار کل برای داده‌ها مشخص است. عبور جریان از روی سرریز کلیدپیانویی، از تاج بالادست و پایین دست و دیواره‌های جانبی سرریز صورت می‌پذیرد. در سرریزهای کلیدپیانویی، با افزایش دبی و بار روی سرریز، بازدهی سرریز به علت افزایش تداخل قسمت‌های جریان کاهش می‌یابد. کاهش ضریب آبگذری تا  $\frac{H_t}{p} \leq 0.4$  با شیب زیادی اتفاق می‌افتد و برای مقادیر  $\frac{H_t}{p}$  بالاتر از  $0.4$ ، از شیب آن کاسته شده و

شکل ۳. عبور جریان از روی سرریز



Fig. 3. Flow over the weir

در دبی‌های بیش از  $120$  لیتر بر ثانیه جریانی به صورت شکل (۴) روی سرریز تشکیل می‌شود. جریان در سرریزهای کلیدپیانویی به دو قسمت تقسیم می‌شود. بخشی از جریان به کلیدهای ورودی وارد شده و بخشی دیگر به کلیدهای خروجی می‌ریزد. جریان از کلیدهای خروجی به طور مستقیم به پایین دست سرریز هدایت می‌شوند؛ اما جریان در کلیدهای ورودی خود به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخشی به پایین دست هدایت و بخشی از طریق دیواره‌های جانبی به کلیدهای خروجی مجاور خود وارد می‌شود. در کلیدهای خروجی سه قسمت جریان با یکدیگر برخورد می‌کنند: جریانی که از کلیدهای ورودی و از طریق دیواره‌های جانبی سرریز به کلید خروجی وارد می‌شوند و جریان عبوری از خود کلیدهای خروجی. برخورد این سه قسمت جریان با یکدیگر در کلیدهای خروجی منجر به افزایش آشفتگی جریان در کلیدهای خروجی و پایین دست آن می‌شود.

شکل ۴. اغتشاش جریان روی سرریز



Fig. 4. Flow disturbance on the weir

متغیر ضریب آبگذری سرریز لبه‌تیز با استفاده از رابطه بالا استفاده شده است. با تقسیم دبی سرریز کلیدپیانویی (رابطه ۱) بر دبی سرریز اوجی (رابطه ۷) و دبی سرریز لبه‌تیز (رابطه ۸) روابط زیر را خواهیم داشت:

$$r_{Og} = \frac{Q_{Pkw}}{Q_{Ogee}} = \frac{\frac{2}{3} C_{pkw} L \sqrt{2gH_t^3}}{\frac{2}{3} C_{Ogee} W \sqrt{2gH_t^3}} = \frac{C_{pkw} L}{C_{Ogee} W} \quad (9)$$

$$h = \frac{Q_{Pkw}}{Q_{Sh}} = \frac{\frac{2}{3} C_{pkw} L \sqrt{2gH_t^3}}{\frac{2}{3} C_{sh} W \sqrt{2gH_t^3}} = \frac{C_{pkw} L}{C_{sh} W} \quad (10)$$

در روابط بالا  $W$  طول تاج سرریز اوجی و سرریز لبه‌تیز و برابر عرض کل فلوم (۷۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شده است. در روابط (۹ و ۱۰)،  $r_{Og}$  و  $r_{Sh}$  به ترتیب معرف افزایش دبی جریان سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی و سرریز لبه‌تیز می‌باشند. تغییرپذیری‌های  $r_{Og}$  و  $r_{Sh}$  برحسب بار نسبی جریان به ترتیب در شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌شود. براساس شکل (۷) برای  $H_t/P = 0.28$ ، دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی حدود ۳۰۵ برابر دبی عبوری از سرریز اوجی می‌باشد. با افزایش بار نسبی، میزان  $r_{Og}$  کاهش می‌یابد و در نهایت به عدد ۲ نزدیک می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده‌ی بازده بالای سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی در بارهای نسبی کم می‌باشد. طبق شکل (۷)، دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی حدود ۲ تا ۳۰۵ برابر و به طور متوسط ۲۰۵ برابر سرریز اوجی می‌باشد. با توجه به شکل ۷ رابطه زیر برای نسبت افزایش ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی به سرریز اوجی با ضریب همبستگی ۰٫۹۹ به دست آمد:

$$r_{Og} = 1.966 \left( \frac{H_t}{P} \right)^{-0.454} \quad (11)$$

در شکل (۸) نیز مشخص است دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی حدود ۲۰۳ تا ۴ برابر و به طور متوسط ۳ برابر سرریز لبه‌تیز است. اگر ضریب آبگذری سرریز لبه‌تیز ثابت و برابر ۰٫۴۲ در نظر گرفته شود دبی عبوری از سرریز

ضریب آبگذری به مقدار ۰٫۳ نزدیک می‌شود. بیشترین ضریب آبگذری با توجه به شکل (۶)، برابر ۰٫۵۴، کمترین مقدار آن برابر ۰٫۳۱ و متوسط آن برابر ۰٫۴ می‌باشد. با توجه به شکل (۶) رابطه زیر برای ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی با ضریب همبستگی ۰٫۹۹ به دست آمد:

$$C_{pkw} = 0.3072 \left( \frac{H_t}{P} \right)^{-0.454} \quad (6)$$

شکل ۶. تغییرات ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی

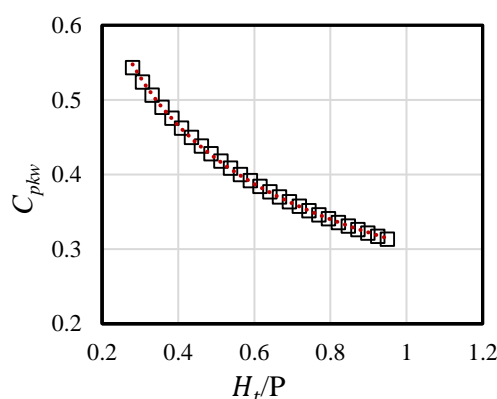


Fig. 6. Variations of discharge coefficient for piano key weir

برای مقایسه دبی‌های سرریز اوجی، سرریز لبه‌تیز و سرریز کلیدپیانویی نیاز به محاسبه دبی سرریز اوجی و دبی سرریز لبه‌تیز هست. برای محاسبه دبی سرریز اوجی از رابطه (۷) استفاده شده است.

$$Q_{Ogee} = \frac{2}{3} C_{Ogee} W \sqrt{2gH_t^3} \quad (7)$$

دبی عبوری از سرریز لبه‌تیز نیز از رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود.

$$Q_{Sh} = \frac{2}{3} C_{sh} W \sqrt{2gH_t^3} \quad (8)$$

در رابطه‌های (۷ و ۸)،  $W$  طول تاج سرریز و  $C_{Ogee}$  ضریب آبگذری سرریز اوجی است که مقادیر آن از نمودار ارائه‌شده توسط USBR استخراج شده است.  $C_{sh}$  ضریب آبگذری سرریز لبه‌تیز است که [23] Ribero et al. و Hager and Schleiss [24] مقدار آنرا ثابت و برابر ۰٫۴۲ در نظر گرفتند. این ضریب براساس رابطه  $C_{sh} = 0.611 + H_t/P$  نیز قابل محاسبه است. در اینجا هر دو مقدار ثابت ۰٫۴۲ و مقدار

## ۶- استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی

در این قسمت برای محاسبه انرژی جریان در بالادست سرریز از رابطه (13) استفاده می‌شود [26]:

$$E_0 = h_0 + V_0^2/2g + P \quad (13)$$

در رابطه بالا  $E_0$  انرژی جریان در بالادست سرریز،  $h_0$  عمق جریان در بالادست سرریز و  $V_0$  سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز می‌باشد. انرژی جریان در پایین‌دست سرریز مطابق معادله (14) می‌باشد [26]:

$$E_1 = h_1 + V_1^2/2g \quad (14)$$

در رابطه بالا  $E_1$  انرژی جریان در پایین‌دست سرریز،  $h_1$  عمق جریان در پایین‌دست سرریز و  $V_1$  سرعت متوسط جریان در پایین‌دست سرریز می‌باشد. افت انرژی و افت انرژی نسبی به کمک روابط (15 و 16) محاسبه می‌شود:

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (15)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (16)$$

شکل (۹) تغییرات استهلاك انرژی را برای سرریز کلیدپیانویی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش بار نسبی جریان، استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش بار نسبی از میزان اصطکاک جریان کاسته شده و در نتیجه استهلاك جریان کاهش می‌یابد.

شکل ۹. استهلاك انرژی در سرریز کلیدپیانویی

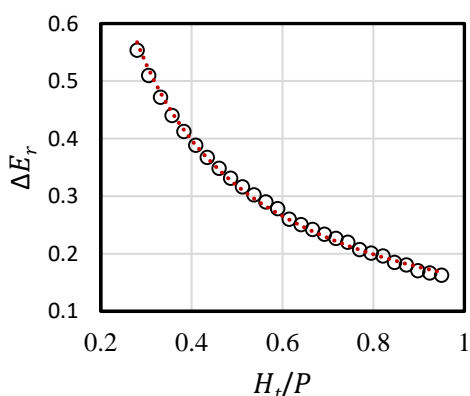


Fig. 9. Energy dissipation of PK weir

کلیدپیانویی حدود  $3/8$  تا  $6/5$  برابر و به طور متوسط  $5/15$  برابر سرریز لبه‌تیز می‌باشد. نتایج Tullis et al. [25] و Ouamane and Lempérière [7] نیز در مورد سرریزهای غیرخطی نشان داده است که سرریزهای غیرخطی آبگذری  $3$  تا  $4$  برابری نسبت به سرریزهای خطی دارند که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. رابطه زیر برای نسبت ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی به سرریز لبه‌تیز، زمانی که ضریب آبگذری سرریز لبه‌تیز تابعی از  $H_t/P$  در نظر گرفته شود، با ضریب همبستگی  $0.99$  به دست آمد:

$$rSh = 2.294 \left( \frac{H_t}{P} \right)^{-0.454} \quad (12)$$

شکل ۷. تغییرات  $rOg$  بر حسب  $H_t/P$

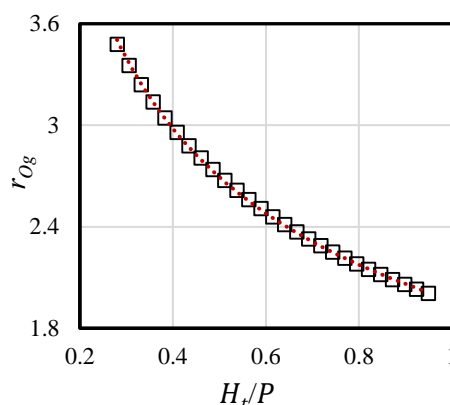


Fig. 7. Variation  $rOg$  with  $H_t/P$

شکل ۸. تغییرات  $rSh$  بر حسب  $H_t/P$

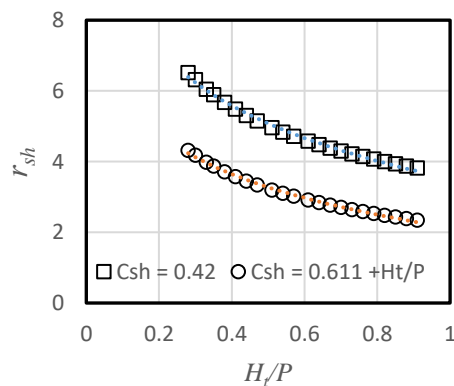


Fig. 8.  $rSh$  Versus  $H_t/P$

2. Aureli F., Maranzoni A., & Petaccia G. 2021. Review of historical dam-break events and laboratory tests on real topography for the validation of numerical models. *Water* 13(14): 1968.
3. Machiels O., Erpicum S., Archambeau P., & Dewals, B. 2013. Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(6): 506- 511.
4. Muslu Y. 2001. Numerical analysis for lateral weir flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(4): 246-253. 5.
5. Laugier F., Locgu A., Gille C., Leite Ribero M., & Boillat JL. 2009. Design and construction of a labyrinth and PK spillway at Saint-Marc dam, France. *Hydropower & Dams* 16(ARTICLE): 100-107.
6. Erpicum S., Tullis BP., Lodomez M., Archambeau P., Dewals BJ., & Piroton M. 2016. Scale effects in physical piano key weirs models. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692-698.
7. Lempérière F., & Ouamane A., 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower & Dams* 10(5): 144-149.
8. Lempérière F., & Jun G. 2005. Low cost increase of dam's storage and flood mitigation: the piano keys weir. *Proc. of 19th Congress of ICID, Beijing, China*.
9. Ouamane A., & Lempérière F., 2006. Design of a new economic shape of weir. *Proceedings of the international symposium on dams in the societies of the 21st century, International Commission on Large Dams (ICOLD), Taylor and Francis. London*.
10. Ribeiro ML., Bieri M., Boillat JL., Schleiss A., & Delorme F. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways—design of a piano key weirs. *Proceedings (on CD) of the 23rd congress of the Int. commission on large dams CIGB-ICOLD*.
11. Belaabed F., & Ouamane, A. 2011. Contribution to the study of the piano key weirs submerged by the downstream level. *Labyrinth and Piano Key Weirs—PKW 2011: 89-96*.
12. Anderson R.M., & Tullis B. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(4): 358-361.
13. 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.
14. Belzner F., Merkel J., Gebhardt M., & Thorenz, C. 2017. Piano key and labyrinth weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW.
15. Mehboudi A., Attari J., & Hosseini SA., 2017. Flow regimes over trapezoidal piano key weirs. *Labyrinth and piano key weirs III—PKW 2017, CRC Press: 65-73*.

مقادیر کمترین، بیشترین و متوسط استهلاک انرژی سرریز کلیدپیانویی در جدول (۳) اریه شده است. با توجه به این جدول، متوسط استهلاک انرژی سرریز کلیدپیانویی برابر ۰٫۲۹۳، کمترین و بیشترین مقدار استهلاک انرژی به ترتیب برابر ۰٫۱۶۲ و ۰٫۵۵ می‌باشد. با توجه به شکل (۹) رابطه زیر برای افت انرژی نسبی در سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی با ضریب همبستگی ۰٫۹۹ به دست آمد:

$$\Delta E_r = 0.1594 \left( \frac{H_t}{P} \right)^{-0.998} \quad (17)$$

جدول ۳. کمترین، بیشترین و متوسط استهلاک انرژی سرریز

کلیدپیانویی

$\Delta E_r$	$H_t/P$	Min.	Max.	Ave.
PK.Weir	0.446-0.837	0.162	0.553	0.293

Table 3. The minimum, maximum and average values energy dissipation of piano key weir

## ۷- نتایج

- ۱- متوسط ضریب آبدردی سرریز کلیدپیانویی مورد آزمایش ۰٫۴ و بیشترین آن ۰٫۵۵ است. با افزایش بار نسبی جریان روی سرریز از مقدار آن کاسته شده و به مقدار ۰٫۳ میل می‌کند.
- ۲- دبی سرریز کلیدپیانویی به طور متوسط ۲٫۵ و ۳ برابر دبی سرریز اوجی و حدود ۳/۸ تا ۶/۵ دبی سرریز لبه‌تیز است.
- ۳- روابطی برای نسبت دبی سرریز کلیدپیانویی به سرریز اوجی و سرریز لبه‌تیز به دست آمد.
- ۴- با افزایش بار نسبی جریان روی سرریز کلیدپیانویی از مقدار افت انرژی نسبی کاسته می‌شود. متوسط میزان استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی ۰٫۲۹۳ می‌باشد.
- ۵- رابطه‌ای برای افت انرژی نسبی در سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی به دست آمد.

## ۸- منابع

1. Hervouet JM., & Petitjean, A. 1999. "Malpasset dam-break revisited with two dimensional computations." *Journal of hydraulic research* 37(6): 777-788.



21. Pfister M., Battisacco E., De Cesare, G. & Schleiss, A.J. 2013. Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano Key weirs. In labyrinth and piano key weirs II—PKW 2013; CRC press: Paris, France, pp. 73–82.
22. Anderson R.M. & Tullis B.P. 2013 Piano key hydraulics and labyrinth weir comparisons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 139, 246-253. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000530](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000530).
23. Ribeiro M.L., Pfister M., Schleiss A.J., & Boillat J.L. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 400-408.
2۴. Hager W.H., & Schleiss A.J. 2009. *Constructions hydrauliques, écoulements stationnaires (Hydraulic structures, steady flow). Traité de Génie Civil. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.*
2۵. Tullis J.P., Amanian N., & Waldron D. 1995. Design of labyrinth spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 121(3), 247-255.
1۶. Poshteh-Shirani M., Rahimpour M., & Ahmadi M.M. 2018. The effect of upstream overhang on debris blocking and discharge capacity of piano Key weirs. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering* 30(2). (In Persian)
17. Ehsanifar, A., and Ghodsian, M. 2020, Experimental study of flow over type A rectangular, triangular and trapezoidal piano key weirs”, 18th Iranian hydraulic conference, University of Tehran, Iran (In Persian).
18. Ghodsian M., & Sohrabzadeh Anzani H. 2022. Laboratory analysis of flow over rectangular piano key weir with sloped side walls. *Modares Civil Eng. Journal of Nov 5*. (In Persian)
19. Sohrabzadeh Anzani H., & Ghodsian M. 2022. Experimental study of the effect of sidewall slope over triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*. 17.(4): 17-30. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2022.326177.1581>
2۰. Sohrabzadeh Anzani H., & Ghodsian, M. 2023. Energy dissipation of triangular piano key weir. *Journal of Hydraulics*. <http://doi.org/10.30482/JHYD.2023.365692.1622>

# Comparison of discharge capacity of piano key weir with ogee and sharp crest weirs

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

1. Ex. M.Sc. Student of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environment Engineering, Tarbiat Modares University

2. Professor of Hydraulics, Faculty of Civil and Environment Engineering, Tarbiat Modares University

\* ghods@modares.ac.ir

## Abstract

One of the most significant effects of climate change is the occurrence of sudden or flash floods. Since maintaining the safety of dams during floods is essential, the presence of suitable spillways in dams is undeniable. Spillways are responsible for transferring water from the dam reservoir downstream. Among the existing spillways, the piano key weir, a typical long-crested weir, represents an advanced type of labyrinth weir. The aim of the present study is to investigate the discharge capacity of the piano key weir and compare it with the discharge capacity of the ogee spillway and the sharp-crested weir.

## Experiments

Experiments were conducted using a piano key weir in the hydraulic laboratory of the Faculty of Civil and Environmental Engineering at Tarbiat Modares University in Tehran. The experiments covered various discharges and flow depths. A rectangular piano key spillway was installed and sealed at a distance of 4 meters from the beginning of the flume, where minimal flow disturbance is observed. The desired discharge, controlled by a panel that operates by changing the speed of the pump, was measured. The flow depth was measured using a point gauge with an accuracy of  $\pm 0.1$  mm. The experiments covered discharges ranging from 50 liters per second to 180 liters per second in 5-liter per second increments. To measure the effective length of the spillway crest, a ruler with an accuracy of  $\pm 1$  mm was used in each experiment. The specifications of the piano key weir are presented in Table 1. All the experiments were conducted under free flow conditions. The discharge coefficients for the rectangular piano key weir were obtained based on the measured discharges and flow depths. The discharge of the ogee spillway and the sharp-crested weir was estimated using conventional weir equations.

## Results

The variations of discharge versus total upstream head showed an almost linear increasing trend of discharge with the total head. At  $H_t/P = 0.28$ , the discharge through the rectangular piano key is almost 4 times the discharge of the ogee spillway. With an increase in the total head on the piano key spillway, the relative energy dissipation decreases. The obtained discharge coefficients for the rectangular piano key weir varied between 0.3 and 0.55. The average discharge coefficient for this weir was 0.4. The average discharge of the piano key weir is about 2.5 times that of the ogee spillway and about 3 to 5 times that of the sharp-crested weir. The average energy dissipation of the piano key weir is about 0.3. A relationship for the relative energy dissipation in the piano key spillway was derived. New equations for relative discharge of the piano key weir to the sharp-crested weir and that to the ogee spillway were obtained. According to the results, the piano key weir performs better than the ogee spillway and the sharp-crested weir. Therefore, in circumstances where the design discharge of the dams has increased, the piano key weir is a better alternative than the ogee spillway due to its higher efficiency.

**Keywords:** Ogee spillway, Sharp-crest weir, Piano key weir, Discharge coefficient.