مجله علمي - پژوهشي مهندسي عمران مدرس ، سال ۱۴۰۲ ەدورە ۲۳، شمارە صفحات ۱۲۹ تا ۱۳۸



## مقایسه آبگذری سرریز کلیدییانویی با سرریزهای اوجی و لبهتیز

حسین سهراب زاده انزانی و مسعود قدسیان\*

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

#### ghods@modares.ac.ir\*

تاريخ پذيرش ١٤٠٢/٠٣/٣١

#### چکندہ

یکی از مهمترین آثار تغییرات آب و هوایی وقوع سیلابهای ناگهانی است. ازآنجاکه حفظ سلامت سدها هنگام سیلاب ضروری میباشد، پس وجود سرریز مناسب در سدها امری غیرقابلانکار است. درواقع 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، آزمایش.ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران در فلومی به ابعاد ۰/۹ در ۱۰ در ۱۰ متر روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی صورت گرفت. نتایج نشان داد متوسط ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی ٪۰ و بیشترین میزان آن ۰/۵۰ است که با افزایش بار آبی روی سرریز از مقدار آن کاسته شده و به مقدار ۲/۳ 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 كليدى:** سرريز اوجى، سرريز لبەتيز، سرريزهاي غيرخطى، سرريز كليدېيانويى، ضريب آبگذرى

تاریخ دریافت ۱٤۰۱/۱۱/۳۰

#### ۱- مقدمه

طبق گزارش ICOLD'، تعداد ٥٦٣٩٢ سد در دنیا موجود است که از این تعداد، ۳۷٦٤۱ سد با حداقل ارتفاع ۱۵ متر می باشد که تقریباً دوسوم آنها نقش آبیاری دارند و مابقی آنها برای تولید برق، ذخیره آب و کنترل سیلاب استفاده مي شوند. تخريب سدها خطرات جبران نايذيري باقي خواهد گذاشت. در سال ۱۹۵۱ با تخریب سد مالیاست ٔ در فرانسه

٤٢١ نفر و در سال ١٩٦٣ در سد واجونت " در ايتاليا، ١٩١٠ نفر به کام مرگ کشیده شدند [1]. آخرین مورد نیز در سال ۲۰۲۰ در میشیگان<sup>٤</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 فونداسيون بزرگتر، پژوهشگران سرريزي معرفي کردند که علاوه برداشتن مزایای سرریزهای کنگرهای،

۳ Vajont

۴ Michigan

DOI: 10.22034/23.5.9 ]

<sup>1</sup> International Commission on Large Dams

۲ Malpasset

سرريز كليدپيانويي نسبت به سرريز اوجي 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 خيلي كم، سرريز كليدپيانويي شبيه به سرريز لبهتيز عمل میکند و با افزایش بار آب روی سرریز، از کارایی این سرریز کاسته شده و کارایی آن نزدیک به سرریزهای لبهپهن می شود [10]. Belaabed and Oumane با بررسی آبگذری سرریز کلیدپیانویی در حالت مستغرق نشان دادند استغراق باعث كاهش ضريب آبگذري سرريز مي شود Anderson and Tullis .[11] 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 روى سرريز کلیدپیانویی نشان دادند با افزایش نسبت طول سرریز به عرض آن، ضريب آبگذري افزايش مي يابد، اما افزايش بیشازحد این نسبت تأثیر قابلملاحظهای بر ضریب آبگذری نخواهد داشت. همچنین آنها به بررسی مشخصات هندسی همچون ارتفاع سرریز، طول و عرض کلیدها بر كارايي سرريز 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 ذوزنقهای نشان دادند سرریز کلیدپیانویی ذوزنقهای 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 خروجي برابر ۲۵, ۲ کمترين انسداد را دارد [16]. Ghodsian and Ehsanifar با مقایسه ضریب آبگذری در سه سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، مثلثی و ذوزنقهای به این نتیجه

Électricité de France (French Electricity)

۵ Saint Marc

مشکلات آن نیز به طریقی کاهش پیدا کند. به همین دلیل موسسه هیدروکوپ' 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 لميريير در فرانسه براي بهبود سرريزهاي کنگرهاي، اين 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>1</sup>) از ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ صورت پذیرفت و سپس در سال ۲۰۰۶ این سد با سرریز كليدييانويي بازسازي شد [4]. ساخت بعدي اين نوع سرريز برای سد سینت مارک<sup>°</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 کلیدییانویی در مقایسه با سرریزهای کنگرهای، عبارتاند از كاهش ابعاد فونداسيون سرريز و ظرفيت تخليه بالاتر أنها. Lempérière and Ouamane با بررسی سرریز کلیدییانویی نوع A پیشنهاد کردند تعداد کلیدهای سرریز بین ٤ 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 کلیدییانویی کارایی سرریز نوع B را ۱۰ درصد بیشتر گزارش کردند [9]. همچنین نشان دادند که ظرفیت تخلیه

۱ Hydrocoop

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-19

۲ Biskra

۳ Roorke

رسيدند كه در H<sub>t</sub> > ۸ cm، سرريزهاى كليدپيانويي مستطیلی آبگذری بهتری نسبت به دو سرریز دیگر دارند. در اینجا  $H_t$  بار کل در بالادست سرریز است. همچنین برای نشان دادند سرریز کلیدپیانویی ذوزنقهای  $H_t < \wedge cm$ كارايي بهتري نسبت به سرريزهاي كليدپيانويي مستطيلي و مثلثى دارند [17]. Ghodsian and Sohrabzadeh Anzani با بررسی جریان روی سرریز کلیدپیانویی مثلثی با دیواره جانبی شیبدار نشان دادند که ارتفاع جریان در بالادست سرریز با تاج شیبدار نسبت به سرریز با تاج افقی، ۲۹ درصد افزایشیافته است. همچنین ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیبدار، به طور میانگین ۵/۳ درصد نسبت به سرريز كليدپيانويي با تاج افقي افزايش يافته است. آنها همچنین با بررسی آزمایشگاهی آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج شیبدار اعلام داشتند که تراز سطح آب در بالادست سرریز با تاج دیوارهای جانبی شیب-دار، نسبت به سرریز با تاج دیوارهای جانبی افقی، ۱۱،۰۲ درصد افزایش یافت. درحالی که ضریب آبگذری و کارایی سرریز با تاج دیوارهای جانبی شیبدار را به طور متوسط به ترتیب ٤،٨ درصد و ٧،٣ درصد بیش از سرریز با تاج افقى اعلام كردند [18].

با بررسی Sohrabzadeh Anzani and Ghodsian با بررسی آزمایشگاهی نشان دادند که ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیبدار ناپیوسته به طور میانگین حدود ۷ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی افزایشیافته است. ایشان کارایی سرریز با تاج شیبدار را اوا]. Sohrabzadeh Anzani and Ghodsian در تحقیق در حدود ۷ درصد بیش از سرریز با تاج افقی اعلام نمودند دیگری نشان دادند سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی دیگری نشان دادند سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج افقی میزان استهلاک انرژی در سرریز با تاج افقی به طور متوسط توانایی بیشتری در استهلاک نسبی انرژی دارد؛ بطوریکه میزان استهلاک انرژی در مواقع بحرانی مانند سیلاب 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

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 هيدروليک دانشگاه تربيت مدرس تهران صورت پذيرفته است. آزمایشها در فلومی به ابعاد ۰٫۹ × ۰٫۷۵ × ۱۰ متر انجام شد (شکل ۱). عرض فلوم از ۲ متر، با تبدیلی به صورت همگرا به عرض٧٥ سانتيمتر كاهش يافته است. فلوم از یک مخزن زیرزمینی تغذیهشده و دیوارههای فلوم از جنس شيشه لمينت انتخاب شده است تا بتوان رفتار جریان را مشاهده کرد. جریان در فلوم بعد از عبور از روی سرریز وارد مخزن خروجی در پاییندست شده و سپس به چاه زیرزمینی وارد میشود. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی که مشخصات آن در شکل (۲) نشان داده شده است در فاصله ٤ مترى ابتداى فلوم نصب و آببندى شد. دبي موردنظر، به کمک تابلو کنترل نصبشده در آزمایشگاه که با تغییر دور موتورپمپها كار مىكنند، قابل تنظيم مىباشد. عمق جريان با استفاده از عمقسنج با دقت t ۰٫۱ mm اندازه گیری شد. آزمایش ها با دبی ۵۰ تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه و با گامهای ۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. عمق جریان در فاصلههای EP و ۱۰P، به ترتیب در بالادست و پایین دست سرریز اندازه گیری شد. در اینجا P ارتفاع سرریز است. برای اندازهگیری طول مؤثر تاج سرریز، از یک خطکش با دقت hmm در هر آزمایش استفاده شد. مشخصات سرریز استفاده شده در جدول (۱) ارائه شده است.



Fig. 1. Laboratory flume

مقايسه آبگذري سرريز كليدپيانويي با سرريزهاي اوجي و ...

#### حسین سهراب زاده انزانی و مسعود قدسیان

فراسنجههای ثابت و بی تاثیر رابطه (4) را به صورت زیر می توان نوشت:

$$Cpkw = \frac{\frac{3}{2}Q}{L\sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}} = F\left(\frac{H_t}{P}\right)$$
(5)

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





(ج) 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 آزمایش های انجام شده مشاهده شد که تداخل و برخورد قسمت های جریان ریزشی از روی کلیدهای سرریز در انتهای آن رخ میدهد. با افزایش دبی و بار هیدرولیکی این تداخلات با شدت بیشتری اتفاق افتاده و درنهایت در کل سرریز مشاهده می شود. همچنین استغراق موضعی در کلیدهای خروجی رخداده و با افزایش بار هیدرولیکی بیشتر نمایان می شود.

واحد اعداد به سانتیمتر	سرريز استفادهشده (	<b>جدول ۱</b> . مشخصات
------------------------	--------------------	------------------------

است)	
------	--

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

 Table 1. Specifications of weir used (cm)

#### ۳- تحلیل ابعادی

برای تعیین دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی از رابطه  
عمومی سرریزها به صورت زیر استفاده میشود [21].  
(۱) 
$$Q = \frac{3}{2} C_{pkw} L \sqrt{2g} H_t^{1.5}$$

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

$$C_{pkw} = \frac{\frac{3}{2}Q}{L\sqrt{2g}H_t^{1.5}}$$
(۲)  
فراسنجههای هندسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در شکل  
(۲) نشان داده شده است. فراسنجههای موثر بر ضریب  
آبگذری سرریز کلیدپیانویی عبارتاند از:  
(۳) = 0 (۳)  $Q = Q$ 

 $B=B_i + B_0 + B_b$  که در این رابطه W عرض کل سرریز،  $B_b = B_i + B_0 + B_b$  طول شیروانی بالادست،  $B_i$  طول شیروانی پائیندست،  $B_o$  طول شیروانی بالادست،  $T_s$  ضخامت دیواره سرریز، P ارتفاع سرریز،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی، F نماد تابع و دبی جریان میباشند. با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه (۳) را به صورت زیر می توان نوشت:

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

در سرریزهای کلیدپیانویی چنانچه عمق جریان در بالادست تاج سرریز بیش از ۳ سانتیمتر باشد تاثیر کشش سطحی ناچیز است و در نتیجه از عدد وبر We صرفنظر میشود آو ,21 ] در تحقیق حاضر میزانهای لیم <sup>A</sup> , <sup>W</sup> م <sup>T</sup> و <sup>W</sup> در تمامی آزمایش ها دارای مقدار ثابتی است. بنابراین با حذف ۵- نتایج

شکل (۵) تغییرات دبی بر حسب بار کل برای تحقیق حاضر و نتایج [22] Anderson and Tullis را نشان می دهد. با توجه به این شکل، روند افزایشی دبی با افزایش بار کل در هر دو تحقیق مشابه یکدیگر می باشد. اختلاف در مقادیر به علت اختلاف در ابعاد هندسی سرریز و شرایط آزمایشگاهی علت اختلاف در ابعاد هندسی سرریز و شرایط آزمایشگاهی آرمایش های تحقیق حاضر و تحقیق Anderson and Tullis [22] را نشان می دهد.



**جدول ۱** مشخصات سرریزهای استفاده شده در تحقیق حاضر و

تحقيق اندرسون و توليس (۲۰۱۳)

Researcher	W/B	P/W	L/W	$B_i/B_o$	$W_i/W_o$	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 wairs used by Anderson and						

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

شکل (٦) تغییرات ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی را نشان میدهد. روند کاهشی ضریب آبگذری با افزایش بار کل برای دادهها مشخص است. عبور جریان از روی سرریز کلیدپیانویی، از تاج بالادست و پاییندست 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  $3/\cdot \ge \frac{H}{p}$  با شیب زیادی اتفاق میافتد و برای مقادیر $\frac{H}{p}$  بالاتر از  $3/\cdot$ ، از شیب آن کاسته شده و شکل ۳. عبور جریان از روی سرریز



Fig. 3. Flow over the weir

در دبیهای بیش از ۱۲۰ لیتر بر ثانیه جریانی به صورت شکل (٤) روی سرریز تشکیل میشود. جریان در سرریز های کلیدپیانویی به دو قسمت تقسیم میشود. بخشی از جریان به کلیدهای ورودی وارد شده و بخشی دیگر به کلید های خروجی می ریزد. جریان از کلیدهای خروجی به طور مستقیم به پائیندست سرریز هدایت میشوند؛ اما جریان در کلیدهای ورودی خود به دو بخش تقسیم میشوند. بخشی به پائیندست هدایت و بخشی از طریق دیوارههای جانبی به کلیدهای خروجی مجاور خود وارد میشود. در کلیدهای خروجی سه قسمت جریان با یکدیگر برخورد میکند: جریانی که از کلیدهای ورودی و از طریق دیوارههای جانبی خود کلیدهای خروجی وارد میشوند و جریان عبوری از خود کلیدهای خروجی در خور د این سه قسمت جریان با یکدیگر در کلیدهای خروجی منجر د این سه قسمت جریان با یکدیگر در کلیدهای خروجی و پایین دست آن میشود.

**شکل ٤**. اغتشاش جریان روی سرریز



Fig. 4. Flow disturbance on the weir

DOI: 10.22034/23.5.9

متغیر ضریب آبگذری سرریز لبهتیز با استفاده از رابطه بالا استفاده شده است. با تقسیم دبی سرریز کلیدپیانویی (رابطه

حسين سهراب زاده انزاني و مسعود قدسيان

۱) بر دبی سرریز اوجی (رابطه 7) و دبی سرریز لبهتیز (رابطه 8) روابط زیر را خواهیم داشت:

$$r_{Og} = \frac{Q_{Pkw}}{Q_{Ogee}} = \frac{\frac{2}{3}C_{pkw}L\sqrt{2g}H_t^{\frac{3}{2}}}{\frac{2}{3}C_{Ogee}W\sqrt{2g}H_t^{\frac{3}{2}}} =$$

$$\frac{C_{pkw}}{C_{Ogee}}\frac{L}{W}$$
(9)

$${}_{h} = \frac{Q_{Pkw}}{Q_{Sh}} = \frac{\frac{2}{3}C_{pkw}L\sqrt{2g}H_{t}^{\frac{3}{2}}}{\frac{2}{3}C_{sh}W\sqrt{2g}H_{t}^{\frac{3}{2}}} \qquad \qquad = \frac{C_{pkw}}{C_{sh}}\frac{L}{W}$$
(10)

در روابط بالا W طول تاج سرريز اوجی و سرريز لبهتيز و برابر عرض کل فلوم (۷۵ سانتیمتر) در نظر گرفته شده است. در روابط (9 و 10)، rOg و rSh به ترتيب معرف افزایش دبی جریان سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجي و سرريز لبهتيز مي باشند. تغييريذيري هاي rOg و rSh برحسب بار نسبی جریان به ترتیب در شکلهای (۷ و ۸) مشاهده می شود. براساس شکل (۷) برای ۲۸ · ۰ = <sup>H</sup><sub>t</sub> دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی حدود ۳،۵ برابر دبی عبوري از سرریز اوجي ميباشد. با افزايش بار نسبي، ميزان rOg کاهش می یابد و در نهایت به عدد ۲ نزدیک می شود. این موضوع نشاندهندهی بازده بالای سرریز کلیدییانویی نسبت به سرریز اوجی در بارهای نسبی کم میباشد. طبق شکل (۷)، دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی حدود ۲ تا ۳،۵ برابر و به طور متوسط ۲،۵ برابر سرریز اوجی میباشد. با توجه به شکل ۷ رابطه زیر برای نسبت افزایش ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی به سرریز اوجی با ضریب همبستگی ۹۹.۰ به دست آمد:

$$rOg = 1.966 \left(\frac{H_t}{p}\right)^{-0.454}$$
(11)

در شکل (۸) نیز مشخص است دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی حدود ۲۰۳ تا ٤ برابر و به طور متوسط ۳ برابر سرریز لبهتیز است. اگر ضریب آبگذری سرریز لبهتیز ثابت و برابر ۱۶/۲ در نظر گرفته شود دبی عبوری از سرریز ضریب آبگذری به مقدار ۰/۳ نزدیک می شود. بیشترین ضریب آبگذری با توجه به شکل (٦)، برابر ۰،۰۵٤، کمترین مقدار آن برابر ۰،۳۱ و متوسط آن برابر ۰،۶ می باشد. با توجه به شکل (٦) رابطه زیر برای ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی با ضریب همبستگی ۰٫۹۹ به دست آمد:

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

شکل ٦. 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 (7) استفاده شده است.

$$Q_{ogee} = \frac{2}{3} C_{ogee} W \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}}$$
(7)

دبی عبوری از سرریز لبهتیز نیز از رابطهی (8) محاسبه می-شود.

$$Q_{sh} = \frac{2}{3} C_{sh} W \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}}$$
(8)

در رابطههای (7 و 8)، W طول تاج سرریز و  $C_{ogee}$  ضریب آبگذری سرریز اوجی است که مقادیر آن از نمودار ارائهشده توسط USBR استخراجشده است.  $C_{sh}$  ضریب آبگذری Mager and و Ribero et al. [23] و Riber and و Hager and سرریز لبهتیز است که [24] Riber et al. [24] در نظر گرفتند. این ضریب براساس رابطه Csh + Ht/P ایز قابل محاسبه است. در اینجا هر دو مقدار ثابت 2/۶ و مقدار  $E_0 = h_0 + V_0^2/2g + P$ 

 $E_1 = h_1 + V_1^2 / 2g$ 

۶- استهلاک انرژی سرریز کلیدییانویی

سرريز از رابطه (13) استفاده مي شود [26]:

سرريز مطابق معادله (14) مي باشد [26]:

(13)

(14)

در این قسمت برای محاسبه انرژی جریان در بالادست

در رابطه بالا  $E_0$  انرژی جریان در بالادست سرریز،  $h_0$  عمق

جریان در بالادست سرریز و ۷۵ سرعت متوسط جریان در

بالادست سرریز می باشد. انرژی جریان در پایین دست

کلیدپیانویی حدود ۲/۸ تا ۲/۵ برابر و به طور متوسط ۵/۱۵ برابر سرریز لبه تیز میباشد. نتایج [25] Tullis et al. [25] و و[7] Uuamane and Lempérière نیز در مورد سرریزهای غیرخطی نشان داده است که سرریزهای غیرخطی آبگذری ۳ تا ٤ برابری نسبت به سرریزهای خطی دارند که با نتایج ۳ تحقیق حاضر همخوانی دارد. رابطه زیر برای نسبت ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی به سرریز لبه تیز، زمانی که ضریب آبگذری سرریز لبه تیز تابعی از Ht/P در نطر گرفته شود، با ضریب همبستگی ۹۹,۰ به دست آمد:  $rSh = 2.294 \left(\frac{H_t}{P}\right)^{-0.454}$ 

 $H_t/P$  شکل ۷. تغییرات  $r_{Og}$  بر حسب

 $h_1$  در رابطه بالا  $E_1$  انرژی جریان در پایین دست سرریز،  $h_1$  عمق جریان در پایین دست سرریز و  $V_1$  سرعت متوسط جریان در پایین دست سرریز می باشد. افت انرژی و افت انرژی نسبی به کمک روابط (15 و 16) محاسبه می شود:  $\Delta E = E_0 - E_1$ (15)

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

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



Fig. 9. Energy dissipation of PK weir



**Fig. 7.** Variation  $r_{Og}$  with  $H_t/P$ 



Fig. 8. r<sub>Sh</sub> Versus H<sub>t</sub>/P

حسین سهراب زاده انزانی و مسعود قدسیان

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., & Pirotton 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.

1<sup>°</sup>. Anderson R.M., & Tullis B. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering 138(4): 358-361.

1°. 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.

1<sup>¢</sup>. Belzner F., Merkel J., Gebhardt M., & Thorenz, C. 2017. Piano key and labyrinth weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. 1<sup>a</sup>. 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 ۱۹۳۰، کمترین و بیشترین مقدار استهلاک انرژی به ترتیب برابر ۱۹۲۲، و ۵۵،۰ میباشد. با توجه به شکل (۹) رابطه زیر برای افت انرژی نسبی در سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی با ضریب همبستگی ۹۹,۰ به دست آمد:

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

جدول ۳. کمترین، بیشترین و متوسط استهلاک انرژی سرریز

كليدپيانويي						
$\Delta E_r$	$H_t/P$	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 آبگذری سرریز کلیدپیانویی مورد
 آزمایش ۶۰۰ و بیشترین آن ۰،۰۵ است. با افزایش بار نسبی
 جریان روی سرریز از مقدار آن کاسته شده و به مقدار ۳۰۰ میل میکند.
 ۲-دبی سرریز کلیدپیانویی به طور متوسط ۲۰۰ و ۳ برابر
 دبی سرریز اوجی و حدود ۳/۸ تا ۲۰۰ دبی سرریز لبهتیز

۳–روابطی برای نسبت دبی سرریز کلیدپیانویی به سرریز اوجی و سرریز لبهتیز به دست آمد. ٤– 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.

دوره بيست و سوم / شماره ٥ / سال ١٤٠٢

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

21. Pfister M., Battisacco E., De Cesare, G. & Schleiss, AJ. 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 RM. & Tullis BP. 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.

23. Ribeiro M.L., Pfister M., Schleiss AJ., & Boillat JL. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(4), 400-408.

2<sup>¢</sup>. Hager W.H., & Schleiss A.J. 2009. Constructions hydrauliques, ecoulements stationeries (Hydraulic structures, steady flow). Traité de Génie Civil. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.

2<sup>4</sup>. Tullis JP., Amanian N., & Waldron D. 1995. Design of labyrinth spillways. Journal of hydraulic engineering, 121(3), 247-255. 1<sup>7</sup>. 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 slopped 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

2 · . 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 Ht/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 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.