

استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای

حسین سهراب زاده انزانی^{۱*}، مسعود قدسیان^۲

*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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۷

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی از جدیدترین سرریزهای غیرخطی هستند که نسبت به سرریزهای لبه تیز خطی طول تاج بیشتری دارند و برای تنظیم و کنترل جریان رودخانه‌ها، کانال‌ها و سدها به کار گرفته می‌شوند. برای بهبود ضریب آبگذری سرریزهای کلید پیانویی مطالعات فراوانی شده است، اما مقایسه‌ای بین استهلاک انرژی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای صورت پذیرفته است. در مطالعه پیش رو به بررسی و مقایسه استهلاک انرژی و ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای پرداخته می‌شود. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس و در فلومی به ارتفاع ۰/۹، عرض ۰/۷۵ و طول ۱۰ متر انجام پذیرفته است. مطابق مشاهدات آزمایشگاهی، در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای برخی تفاوت‌ها در میدان جریان مشاهده می‌شود. در هدهای خیلی کم هوادهی در هیچ یک از سرریزها مشاهده نشده و پرش هیدرولیکی نیز در انتهای کلیدهای خروجی سرریز رخ نداده است، اما با افزایش هد، پرش هیدرولیکی در انتهای کلیدهای سرریز تشکیل می‌گردد که در دبی‌های بالاتر اثری از آن یافت نمی‌شود؛ همچنین مشخص گردید سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در استهلاک انرژی عملکرد بهتری دارد تا سرریز مستطیلی، به طوری که عملکرد آن حدود ۳ درصد بیشتر از عملکرد سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است. افزون‌براین، متوسط ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای، در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، ۱۱ درصد بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، سیلاب، سرریز کلیدپیانویی، ضریب آبگذری

مقدمه

سدهای نازک قوسی و بتنی وزنی را دارند. سرریزهای کلیدپیانویی بر اساس بود یا نبود شیروانی‌های آن، به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. سرریزی را که دارای شیروانی در هر دو جهت باشد سرریز کلید پیانویی نوع *A* می‌نامند و اگر فاقد شیروانی پایین دست باشد نوع *B* است و همین‌طور سرریز فاقد شیروانی در بالادست را نوع *C* و بدون شیروانی را نوع *D* می‌نامند. لازم است گفته شود در بین سرریزهای کلید پیانویی معرفی شده، سرریز نوع *A* از نظر اجرا و پایداری کارایی بالاتری دارد (Lempérière & Vigny,

سرریزها از مهم‌ترین اجزای سدها هستند. از جدیدترین سرریزهای غیرخطی سرریزهای کلیدپیانویی هستند که نخستین بار موسسه هیدروکوپ^۱ در فرانسه آن را معرفی کرده است (Blanc & Lempérière, 2001). سرریزهای کلیدپیانویی را می‌توان نسل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای دانست. این سرریزها دارای شکل و هندسه‌های مختلفی در پلان هستند و قابلیت طراحی در شرایط گوناگون را دارند. افزون برآن، سرریزهای کلید پیانویی قابلیت نصب روی

1- Hydrocoop

دارند. این پژوهشگران می‌افزایند این دو سرریز نسبت به سرریز مستطیلی در حدود ۱۰ درصد ضریب آبگذری بیشتری دارند. اکبری و همکاران (Akbari *et al.*, 2020) با مقایسه و بررسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای اعلام کردند که در بار آبی ثابت، ارتفاع جریان در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است. اسلینگر و کروکستون (Eslinger & Crookston, 2020) با بررسی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A و آزمایش روی مدل‌هایی با نسبت‌های مختلف عرض کلیدورودی به کلید خروجی (W_i/W_o) اعلام داشتند این نسبت در استهلاك انرژی مؤثر است. با افزایش این نسبت در بازه $0.12 < W_i/W_o < 0.18$ کارایی سرریز افزایش می‌یابد، درحالی‌که در بازه $0.12 < W_i/W_o < 0.18$ و $W_i/W_o > 0.18$ میزان اتلاف انرژی ثابت می‌ماند. کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 2020) با مطالعه تجربی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی شکل گزارش می‌دهند که کارایی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر از کارایی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است. سنگ‌سفیدی و همکاران (Sangsefidi *et al.*, 2021) با بررسی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای به این نتیجه رسیدند که در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ضریب آبگذری بیشتر است تا در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی. سهراب‌زاده انزانی و قدسیان (Sohrabzadeh-Anzani & Ghodsian, 2022) با بررسی سرریز کلیدپیانویی مثلثی با دیواره جانبی شیب‌دار اعلام کردند که تراز سطح آب در بالادست سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار ۲۹ درصد افزایش می‌یابد و ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار، به‌طور متوسط ۵/۳ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی

(2011). کلیدهای ورودی و خروجی در این سرریزها سطح شیب‌دار دارند. بخش‌هایی از تاج فراتر از پایه‌های سرریز امتداد می‌یابند (Eslinger & Crookston, 2020). این سرریزها در بسیاری از نقاط دنیا روی سدها یا در مسیر رودخانه نیز به‌کار گرفته شده‌اند.

مطالعات زیادی روی ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی صورت پذیرفته است که از میان آنها می‌توان به مطالعات اریپکم و همکاران (Erpicum *et al.*, 2011)، ریبرو (Ribero, 2012)، اریپکم و همکاران (Erpicum *et al.*, 2013)، میشلز و همکاران (Machiels *et al.*, 2014)، اریپکم و همکاران (Erpicum *et al.*, 2017)، کروکستون (Crookston, 2018) و کروکستون (Crookston, 2019) اشاره کرد. لمپریه و اوامان (Lempérière and Ouamane, 2003) مناسب‌ترین تعداد کلیدهای سرریز (N)، را بین ۴ تا ۷ اعلام کردند. ذونعمت کرمانی و مهدوی میمند (Zounemat-Kermani & Mahdavi-Meymand, 2019) ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی را با ترکیب روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI-DDMs) و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLPNN) و سیستم استنتاج عصبی فاز تطبیقی (ANFIS) تعیین و به مقایسه آنها پرداختند. رضایی اهووانویی و همکاران (Rezaei Ahvanooei *et al.*, 2019) با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی می‌گویند افزایش بار آبی بالادست باعث برخورد لایه‌های جریان و استغراق موضعی سرریز می‌شود و ضریب آبگذری به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. قدسیان و احسانی‌فر (Ghodsian & Ehsanifar, 2020) با بررسی رفتار جریان در سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای نشان دادند که سرریز کلیدپیانویی مثلثی و مستطیلی حدود ۵ درصد در ضریب آبگذری اختلاف

انسداد ناشی از اجسام شناور را با نسبت‌های مختلف کلید-های ورودی به خروجی در سرریز کلید پیانویی بررسی کردند و نشان دادند در یک بار آب ثابت، کمترین انسداد مربوط به سرریزی با نسبت هندسی $\frac{W_i}{W_o} = \frac{1}{4}$ است. سهراب زاده‌انزانی و قدسیان (Sohrabzadeh-Anzani & Ghodsian, 2023a)، با بررسی استهلاک جریان روی سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج شیب‌دار و افقی می‌گویند سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی توانایی بالاتری در استهلاک نسبی انرژی دارد، به طوری که میزان استهلاک انرژی در سرریز با تاج افقی به طور متوسط ۲۴ درصد بیشتر است تا در سرریز با تاج شیب‌دار. در پژوهش‌های گذشته مطالعات بسیاری روی ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی صورت پذیرفته است. اما مقایسه‌ای بین استهلاک انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای صورت پذیرفته است، از این رو در این مقاله به این موضوع پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

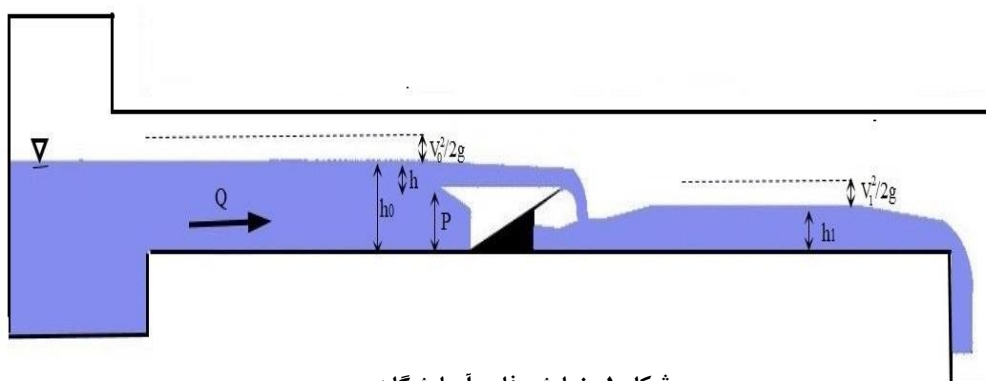
آزمایش‌ها به منظور بررسی استهلاک انرژی و ویژگی‌های جریان در پایین‌دست سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران صورت پذیرفته است. ابعاد فلوم آزمایشگاهی مورداستفاده $10 \times 0.175 \times 0.9$ متر است (شکل ۱). فلوم از یک مخزن زیرزمینی تغذیه می‌شود و دیواره‌های آن از 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 پایین‌دست می‌شود و سپس به چاه زیرزمینی می‌ریزد. سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای، که مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده

افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات سهراب‌زاده‌انزانی و قدسیان (Sohrabzadeh-Anzani & Ghodsian, 2022) نشان می‌دهد تراز سطح آب در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج شیب‌دار نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی، حدود ۸ درصد افزایش یافته است، در حالی که ضریب آبگذری سرریز با تاج شیب‌دار، به طور میانگین حدود ۷ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی افزایش یافته است.

در زمینه استهلاک انرژی، مطالعات بسیاری روی استهلاک انرژی سرریزهای متفاوت صورت گرفته است که از میان آنها مطالعات مور (Moore, 1943)، راند (Rand, 1953)، گیل (Gill, 1973)، چانسون (Chanson, 1994)، چانسون (Chanson, 1995) و چمنی (Chamani, 1995) را می‌توان نام برد.

اکبریان (Akbariyan, 2009) در خصوص سرریزهای کلیدپیانویی می‌گوید یکی از راه‌های استهلاک انرژی جریان کاربرد مانع یا زبری روی سرریز است که به واسطه آن انرژی جنبشی مستهلک می‌گردد. سیلوستری و همکاران (Silvestri et al., 2013) از مزیت‌های سرریزهای کلیدپیانویی را کاهش بیشتر انرژی نسبت به سرریزهای اوجی می‌دانند. منصور و احدیان (Mansouri & Ahadian, 2015)، احتمال انسداد در سرریزهای کلیدپیانویی را بررسی و اعلام کردند در دبی ثابت، انسداد باعث افزایش بار آب بالادست سرریز می‌شود و ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی کاهش می‌یابد. قنواتی و همکاران (Qanavati et al., 2016) استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی را با ایجاد مانع‌هایی در کلیدهای خروجی سرریز بررسی و اعلام کردند با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. پشته شیرانی و همکاران (Poshteh-Shirani et al., 2018)

است، در فاصله ۴ متری ابتدای فلوم نصب و آببندی شدند. دبی موردنظر، به کمک تابلو کنترل نصب شده در آزمایشگاه، که با تغییر دور موتور پمپها قابل تنظیم است، کنترل می-شود. عمق جریان در بالادست سرریز $(h_0 = P + h)$ و در پایین دست سرریز (h_1) با عمق سنج نقطه‌ای با دقت mm است. ± 0.1 به ترتیب در فاصله‌های $4P$ در بالادست و $10P$ در پایین دست سرریز اندازه گیری شد (Crokston, 2010; Sohrabzadeh Anzani & Ghodsian, 2023a) در اینجا h عمق آب در بالادست نسبت به تاج سرریز و P ارتفاع سرریز است.



شکل ۱- نمایش فلوم آزمایشگاهی

Fig. 1- Laboratory flume

جدول ۱- مشخصات سرریزهای استفاده شده

Table 1- Specifications of weirs used

نوع سرریز	ارتفاع سرریز (سانتی متر)	طول جانبی سرریز بدون بیرون زدگی (سانتی متر)	طول بیرون زدگی ورودی و خروجی (سانتی متر)	طول تاج سرریز (سانتی متر)	ضخامت تاج سرریز (سانتی متر)
Weir type	P	B_b	$B_i = B_o$	L	T_s
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
سرریز کلیدپیانویی مستطیلی	20	25	12.5	375	1
سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای	20	۲۵	12.5	345	1

بالادست، B_b طول کف سرریز، T_s ضخامت دیواره سرریز و L طول کل تاج سرریز است. مطابق رابطه ۱، پارامترهای مؤثر در تحقیق حاضر عبارتند از (Sohrabzadeh Anzani and Ghodsian, 2023a)

$$F(W, \rho, B, T_s, L, g, \mu, P, H_t, \sigma, E_1, E_0, Sh) = 0 \quad (1)$$

تحلیل ابعادی

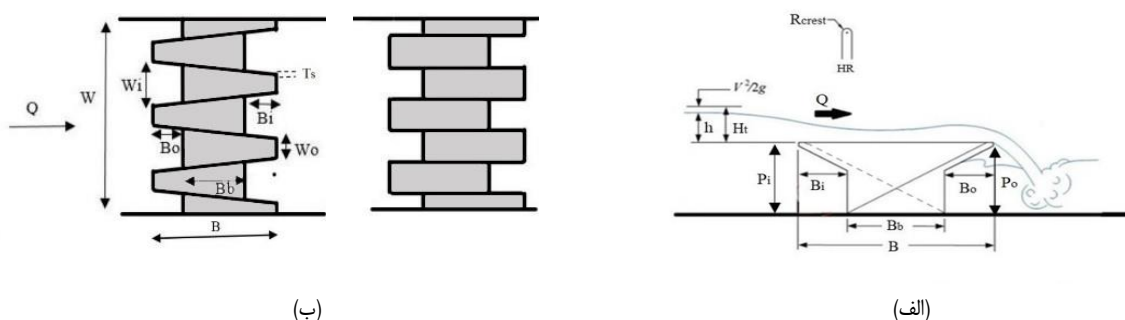
پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این شکل‌ها W عرض کل سرریز $(=W_i + W_o)$ ، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، $B (=B_i + B_0 + B_b)$ طول جانبی سرریز، B_i طول شیروانی پایین دست، B_0 طول شیروانی

مقادیر $\frac{L}{W}$ و $\frac{B}{W}$ ، $\frac{T_s}{P}$ ، $\frac{T_s}{B}$ ، $\frac{T_s}{W}$ در سرریزهای استفاده شده در این تحقیق ثابت است. اریبکم و همکاران (Epicum *et al.*, 2016) و سنگ‌سفیدی و همکاران (Sangsefidi *et al.*, 2021) با مطالعه روی سرریزهای کلیدپیاپویی اشاره می‌کنند در شرایطی که $h > 3$ cm، است می‌توان از اثر کشش سطحی و در نتیجه از عدد وبر صرف‌نظر کرد. همچنین برای جریان‌های آشفته که عدد رینولدز $Re > 25000$ است، اثر لزوجت نادیده گرفته می‌شود (Sangsefidi *et al.*, 2021; Sohrabzadeh Anzani and Ghodsain, 2023b). بنابراین، با صرف نظر کردن از پارامترهای ثابت و بی‌تاثیر، رابطه ۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = F\left(\frac{H_t}{P}, Sh\right) \quad (3)$$

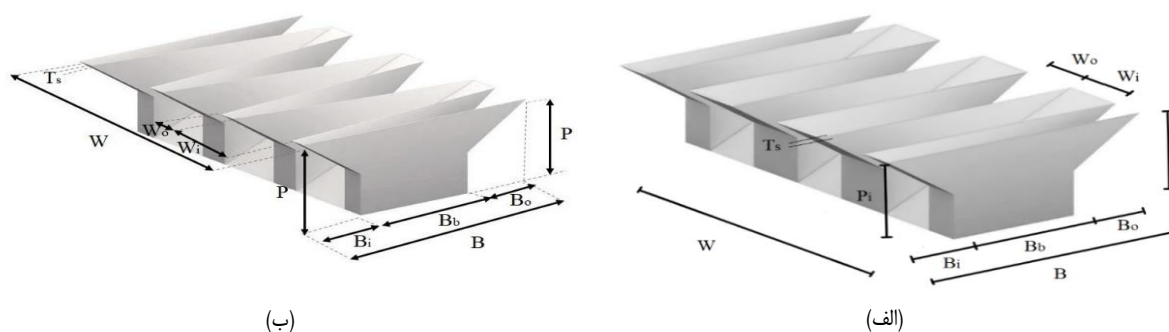
در این معادله μ لزوجت دینامیکی، H_t بارکل روی سرریز، ρ جرم مخصوص آب، σ کشش سطحی، F نماد تابع، E_1 انرژی در پایین‌دست سرریز $(E_1 = h_1 + V_1^2/2g)$ ، E_0 انرژی بالادست سرریز $(E_0 = h_0 + V_0^2/2g)$ ، g شتاب جاذبه، V_1 سرعت جریان در پایین‌دست سرریز، V_0 سرعت جریان در بالادست سرریز، و Sh معرف شکل سرریز است. با استفاده از تحلیل ابعادی و توجه به اینکه $\Delta E = E_0 - E_1$ است، رابطه ۱ را به صورت زیر می‌توان نوشت. در اینجا Re و We به ترتیب عدد وبر و عدد رینولدز هستند.

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



شکل ۲- سرریز کلیدپیاپویی: الف) در پلان ب) مقطع A-A

Fig. ۲- PKW schematic: a) in plan b) section view A-A



شکل ۳- سه بعدی سرریز کلیدپیاپویی و پارامترهای هندسی آن: الف) مستطیلی و ب) دوزنقه

Fig. 3- Geometric parameters of PK weir a) rectangular b) Trapezoidal

مشاهدات آزمایشگاهی

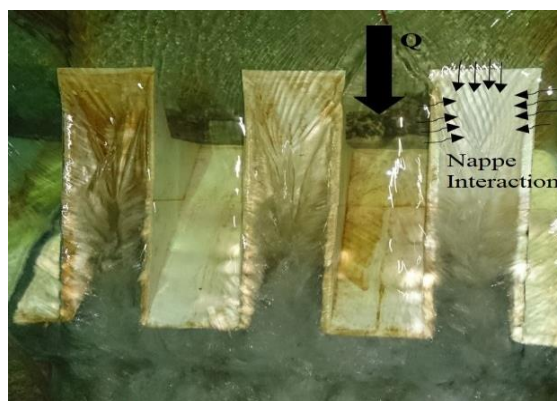
در مطالعه حاضر مشخصات جریان در بالادست سرریزهای کلیدپیانویی یکنواخت است و سطح آب بدون اغتشاش مشاهده شده است. جریان ورودی به سرریز با خطوطی منحرف می شود که در امتداد کلیدهای ورودی و خروجی و از روی دیواره سرریز عبور می کنند. انحراف جریان به کاهش دبی بر واحد عرض در کلیدهای ورودی می انجامد. این مسئله در حالی است که شتاب و سرعت موضعی افزایش می یابد. طبق مشاهدات آزمایشگاهی، این امر با کاهش ارتفاع سطح آب و افزایش تلاطم همراه می شود. پیشانی بالایی و طول شیروانی بالادست سرریز، به اتلاف انرژی از طریق برخورد جریان با سرریز کلیدپیانویی کمک و به عنوان مانعی عمل می کند که جریان را به سمت بالا یا پایین هدایت می کند. لایه های برشی دوگانه ای که به واسطه برخورد جریان به پیشانی و شیروانی بالایی سرریز ایجاد می گردد، با افزایش بار افزایش می یابد و بخشی از آن که روی تاج بالایی سرریز رخ می دهد نیز با افزایش بار به قسمت پایینی سرریز گسترش می یابد.

جریان در کلیدهای خروجی، برآیندی از برهم کنش سه قسمت است. برهم کنش جریان خروجی از تاج های جانبی

با جریان ورودی از بالادست به کلیدهای خروجی است که با هم برخورد دارند (شکل ۴). این برخورد منجر به افزایش سطح موضعی (استغراق موضعی) جریان و آشفتگی قابل توجهی شده که با خروج از کلیدهای خروجی به پایین دست هدایت و بلافاصله گسترده می شود. با افزایش بار جریان، جریان در کلیدهای خروجی (فضای بین دو دیواره موازی در کلید خروجی) افزایش می یابد و اتلاف انرژی نیز محدود می شود.

مطابق مشاهدات آزمایشگاهی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه ای، برخی تفاوت ها در میدان جریان مشاهده شده است. برای مثال در $H/P \leq 0.15$ ، هوادهی در هیچ یک از سرریزها مشاهده نشد و پرش هیدرولیکی نیز در انتهای کلیدهای خروجی سرریز رخ نداد. با افزایش بار جریان، طول جت از هر کلید خروجی افزایش یافته است. دیده شد جریان پس از خروج از سرریز و برخورد به بستر پایین دست منحرف می شود. جریان فوق بحرانی خروجی از انتهای سرریز، با یک پرش هیدرولیکی ضعیفی در محدوده $0.15 < H/P < 0.45$ همراه می شد.

مقادیر افت انرژی، افت انرژی نسبی و انرژی باقی مانده نسبی در سرریزهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۴- برخورد جریان در کلیدهای خروجی

Fig.4- Flow collision in the output Key

جدول ۲- مقادیر افت انرژی، افت انرژی نسبی و انرژی باقی مانده نسبی در سرریزهای مختلف

Table 2- Values of energy loss, relative energy loss, relative residual energy of different weirs

Q (L/s)	سرریز کلیدپیانویی مستطیلی			سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای		
	Rectangular PK weir			Trapezoidal PK		
	E_1/E_0	ΔE	ΔE_r	E_1/E_0	ΔE	ΔE_r
۳۰	0.52	1.8	0.94	0.05	1.9	0.94
۴۰	0.1	1.6	0.9	0.07	2.1	0.92
۶۰	0.14	2	0.85	0.13	2.5	0.86
۸۰	0.18	2.6	0.81	0.19	3.5	0.8
۱۰۰	0.22	3.3	0.77	0.21	4.3	0.78
۱۲۰	0.25	4	0.75	0.23	4.6	0.76
۱۳۰	0.26	4.2	0.73	0.24	5	0.75
۱۴۰	0.27	4.5	0.72	0.25	5.3	0.74
۱۵۰	0.28	4.9	0.71	0.27	7.6	0.73

نتایج

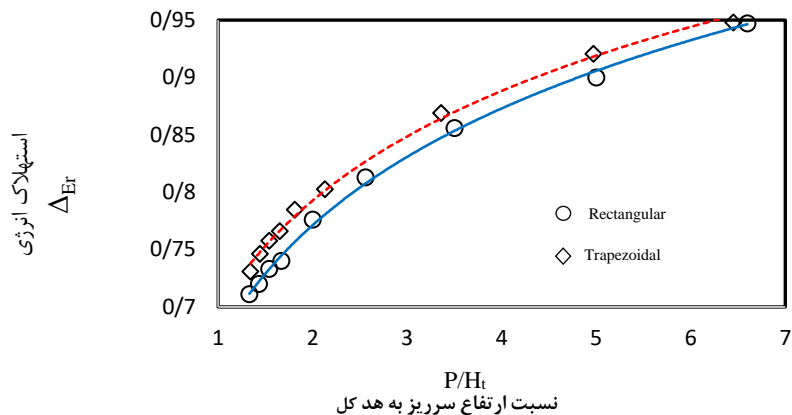
استهلاک جریان کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت، به تبع آن شتاب افزایش خواهد یافت و جریان مسیر طولانی‌تری را برای جدایی از سرریز طی می‌کند. در سرریز کلیدپیانویی مستطیل، ناحیه جدایی جریان از سرریز بیش از سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای است، از این رو شیب کاهش میزان استهلاک نسبی انرژی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی بیش از سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای است. دلیل دیگر روند کاهش، ورود هوا در دبی‌های پایین به زیر تیغه جریان است که موجب کاهش تنش برشی می‌شود و نیروی برشی حاصل کاهش می‌یابد. این موضوع به کاهش استهلاک نسبی انرژی منجر می‌شود. به همین دلیل روند کاهش میزان استهلاک انرژی با افزایش دبی در هر دو سرریز مشاهده می‌گردد. سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای در استهلاک انرژی عملکرد بهتری دارد، بطوریکه استهلاک انرژی در این سرریز حدود ۳ درصد بیشتر از استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است.

در این تحقیق افت انرژی و افت انرژی نسبی به کمک رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه گردید (Eslinger & Crookston, 2020; Sohrabzadeh-Anzani & Ghodsian, 2023a).

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (4)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (5)$$

شکل ۵ تغییرات استهلاک انرژی را برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و ذوزنقه‌ای نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در یک مقدار ثابت P/H_t ، بیشترین مقدار نسبی استهلاک انرژی به سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای متعلق است. روشن است که استهلاک نسبی انرژی در سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای بیشتر است. با افزایش بار نسبی جریان، میزان استهلاک نسبی انرژی در هر دو سرریز کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش بار و سرعت جریان، از میزان اصطکاک جریان در سرریزها کاسته می‌شود و در نتیجه

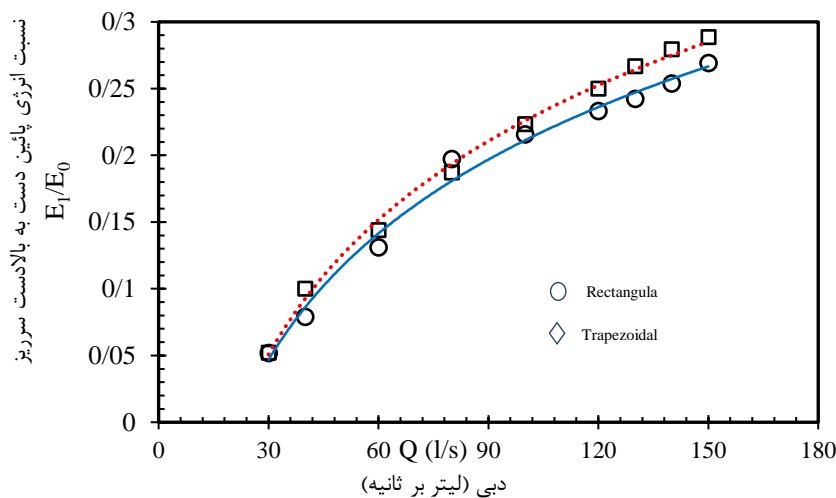


شکل ۵- استهلاک انرژی نسبی در برابر P/H_t

Fig. 5- Relative energy dissipation versus P/H_t

طول تاج سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای است و نسبت عرض دهانه کلیدهای ورودی به خروجی (W_i/W_o) در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر و تداخل جریان روی آن کمتر است (Ghodsian and Ehsanifar, 2020)، اما به دلیل آنکه طول ناحیه جدایش جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر است تا در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، بنابراین انرژی باقی مانده در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای به طور متوسط ۷/۵ درصد کمتر از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است. طبق شکل ۶، تا پیش از حدود ۶۰ لیتر بر ثانیه، میزان تفاوت ناچیز است، اما با افزایش شدت تفاوت افزایش می‌یابد.

شکل ۶ منحنی انرژی باقی مانده سرریز کلیدپیانویی نسبت به دبی سرریز را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش دبی، نسبت E_1/E_0 افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، انرژی باقی مانده نسبی بیشتری در هر دو سرریز در دبی‌های بالا رخ می‌دهد. در هر دو سرریز، شیب افزایشی نسبت E_1/E_0 در دبی‌های کم، بیشتر از شیب افزایش آن در دبی‌های زیاد است. دلیل این امر استغراق موضعی در بالادست سرریز و کاهش هوادهی در دبی‌های زیاد است. طبق شکل ۶، تا پیش از حدود ۶۰ لیتر بر ثانیه، تفاوت انرژی باقی مانده در دو سرریز ناچیز است، اما با افزایش دبی این تفاوت بین دو سرریز افزایش می‌یابد. اگرچه طول تاج سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در حدود ۸ درصد بیش از



شکل ۶- انرژی باقی مانده نسبی در برابر دبی

Fig. 6- Relative residual energy versus discharge

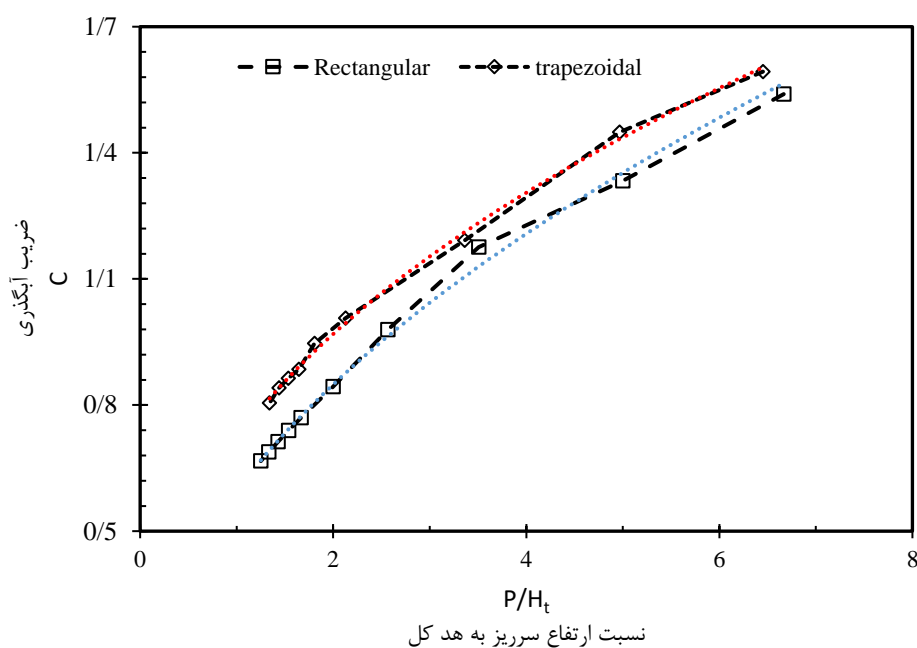
ضریب آبگذری

در این قسمت ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای مقایسه می‌شود. برای این منظور با استفاده از رابطه ۶ ضریب آبگذری محاسبه شده است:

$$C = \frac{Q}{WH_t^{1.5}} \quad (6)$$

که در آن Q دبی عبوری از سرریز، C ضریب آبگذری، W عرض کل سرریز و H_t بار کل روی سرریز است. روند تغییرات ضریب آبگذری (C) مطابق شکل ۷ است. مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط ضریب آبگذری در جدول ۳ داده شده است. با توجه به این جدول بیشترین ضریب متوسط

آبگذری برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای است. مطابق مشاهدات آزمایشگاهی، دلیل این امر اغتشاش کمتر جریان در این سرریز است. با توجه به این مسئله که نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی (W_i/W_o) در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است تا در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، اغتشاش کمتری روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای مشاهده می‌شود. متوسط ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی مستطیلی ۱۱ درصد بیشتر است که در دبی‌های پایین این عدد (ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی) افزایشی به میزان ۱۶ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۷- ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی

Fig. 7- The discharge coefficient of the PK weirs

جدول ۳- مقادیر ضریب آبگذری سرریزهای مختلف

Table 3- Discharge coefficient values of different weirs

نوع سرریز	نسبت ارتفاع به هد کل سرریز	ضریب آبگذری کمینه	ضریب آبگذری متوسط	ضریب آبگذری بیشینه
Weir type	$\frac{P}{H_t}$	Minimum discharge coefficient	Average discharge coefficient	Maximum discharge coefficient
سرریز کلیدپیانویی مستطیلی	1.25-6.6	0.67	0.94	1.54
سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای	1.3-6.45	0.8	1.06	1.6

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \left[a \left(\frac{P}{H_t} \right)^3 + b \left(\frac{P}{H_t} \right)^2 + c \left(\frac{P}{H_t} \right) + d \right]^e \quad (7)$$

رابطه استهلاك انرژی

برای تعیین انرژی نسبی مستهلک‌شده در سرریز کلیدپیانویی، رابطه ۷ پیشنهاد می‌شود. این رابطه در واقع ارتباط بین انرژی مستهلک‌شده (ΔE_T) و پارامترهای مشخص‌شده در قسمت تحلیل ابعادی را نشان می‌دهد. رابطه پیشنهادی به‌منظور محاسبه استهلاك نسبی انرژی برای سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای، به ترتیب دارای شاخص آماری R^2 ، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۸ است.

در این رابطه، پارامترهای a ، b ، c ، d و e ثابت‌های تجربی هستند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر آنها مطابق جدول ۴ به دست آمده‌اند. محدوده مورد استفاده از رابطه ۷ برای سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای به ترتیب $1/25 < P/H_t < 6/6$ و $1/3 < P/H_t < 6/45$ است.

برای تعیین انرژی نسبی مستهلک‌شده در سرریز کلیدپیانویی، رابطه ۷ پیشنهاد می‌شود. این رابطه در واقع ارتباط بین انرژی مستهلک‌شده (ΔE_T) و پارامترهای مشخص‌شده در قسمت تحلیل ابعادی را نشان می‌دهد. رابطه پیشنهادی به‌منظور محاسبه استهلاك نسبی انرژی برای سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای، به ترتیب دارای شاخص آماری R^2 ، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۸ است.

جدول ۴- مقادیر ثابت در رابطه ۷ [$\times 10^{-2}$]

Table 4. Constant values in Eq. (7) [$\times 10^{-2}$]

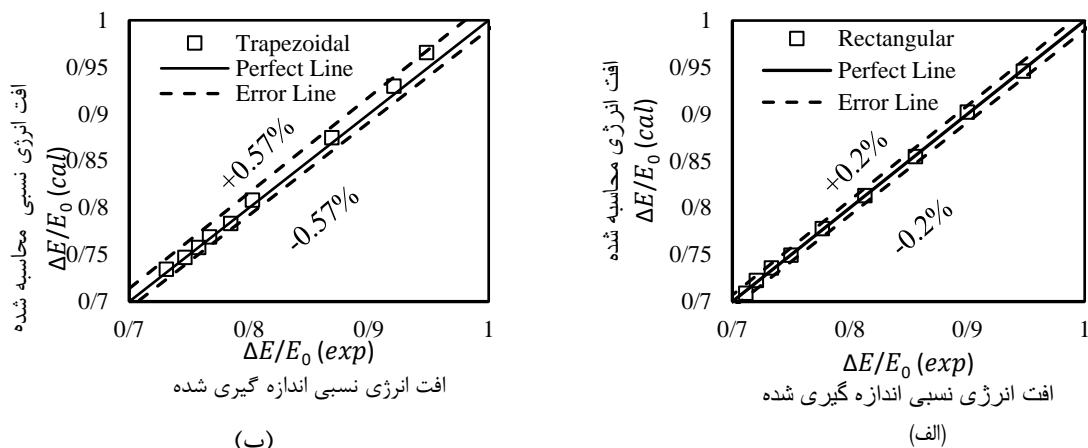
نوع سرریز	a	b	c	d	e	R^2
Weir type						
سرریز کلیدپیانویی مستطیلی	0.1	-0.9	12.5	-9.2	12.3	0.999
سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای	-0.1	1.9	3.2	-3.3	9.7	0.998

در این رابطه، $\Delta E/E_{0cal}$ و $\Delta E/E_{0exp}$ به ترتیب مقادیر محاسبه شده و واقعی استهلاك نسبی انرژی هستند و N بیانگر تعداد داده‌ها است. شکل ۸ مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده استهلاك نسبی انرژی را نشان می‌دهد. این شکل و میزان درصد خطای متوسط نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی، استهلاك نسبی انرژی را با دقت بالا نسبت به مقادیر آزمایشگاهی محاسبه می‌کند.

محاسبه درصد خطای متوسط \bar{E} با استفاده از رابطه ۸، محاسبه شد و برای سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۵۷ درصد است.

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\frac{\Delta E}{E_{0cal}} - \frac{\Delta E}{E_{0exp}}}{\frac{\Delta E}{E_{0cal}}} \right| \frac{100}{N} \quad (8)$$

استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیمانویی مستطیلی و دوزنقه ای



شکل ۸- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده استهلاک انرژی سرریز کلید پیمانویی: الف) مستطیلی و ب) دوزنقه ای

Fig. 8- Comparison of measured and calculated energy dissipation for the PKWs: a) rectangular and b) trapezoidal

مستطیلی و دوزنقه ای را برای دبی های مختلف نشان می دهد. برابر این جدول، بیشترین میزان افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز کلید پیمانویی مستطیلی ۰/۹۴۸ درصد و در پایین دست سرریز کلید پیمانویی دوزنقه ای ۰/۴۶ درصد است و می توان گفت در مقایسه با افت انرژی محاسبه شده برای این سرریزها ناچیز است.

میزان افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریزهای استفاده شده با استفاده از رابطه ۹ به دست آمد (Toozandehjani and Kashefipour, 2012). در این رابطه، y_1 و y_2 به ترتیب عمق پیش از پرش هیدرولیکی و پس از آن هستند. جدول ۵ میزان افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریزهای کلید پیمانویی

$$E_j = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2y_1} \quad (9)$$

جدول ۵- درصد افت انرژی در پرش هیدرولیکی پایین دست سرریزهای کلید پیمانویی مستطیلی و دوزنقه ای

Table 5. Energy loss due to hydraulic jump downstream of rectangular and trapezoidal PKW

Q (L/s)	سرریز کلید پیمانویی مستطیلی (%)	سرریز کلید پیمانویی دوزنقه ای (%)
	Rectangular PK weir (%)	Trapezoidal PK (%)
۳۰	0.405	0.460
۴۰	0.1066	0.314
۶۰	0.948	0.204
۸۰	0.1083	0.213
۱۰۰	0.1340	0.287
۱۲۰	0.1666	0.277
۱۳۰	0.1619	0.304
۱۴۰	0.1712	0.310
۱۵۰	0.1941	0.299

نتایج

۳- در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای برخی تفاوت‌ها در میدان جریان مشاهده شده است. در محدوده $H/P \leq 0.15$ ، هوادهی هیچ یک از سرریزها مشاهده نشد و پرش هیدرولیکی نیز در انتهای کلیدهای خروجی سرریز رخ نداد. در محدوده $0.15 < H/P < 0.45$ ، پرش هیدرولیکی ضعیفی در انتهای کلیدهای سرریز تشکیل - گردید.

۴- رابطه ۷ به منظور تعیین استهلاک انرژی نسبی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با دقت بالا به دست آمد.

نتایج به دست آمده از این مطالعه آزمایشگاهی روی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای عبارت- اند از:

۱- سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با وجود کمتر بودن طول تاج آن به میزان ۸ درصد، به طور متوسط حدود ۳ درصد عملکرد بهتری در استهلاک انرژی نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی دارد.

۲- متوسط ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی حدود ۱۱ درصد بیشتر است.

مراجع

- Akbaryan, 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. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. 138(4): 358-361.
- Akbari, M., Karami Moghadam, M., Sabzevari, T., & Ghadampour, Z. 2020. Experimental study of effect of sidewall angle and weir height on total head and discharge coefficient in trapezoidal piano key weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 21(79), 93-110. (in persian).
- Blanc, P. and Lempérière, F. 2001. Labyrinth spillways have a promising future. *International Journal on Hydropower & Dams*, 8(4), 129-131.
- Chanson, H. 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*. IAHR, 32, 213-218.
- Chanson, H. 1995. Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs, and spillways; Pergamon: Oxford, UK.
- Chamani, M., & Rajaratnam, N. 1995. Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*. IAHR, 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. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 145.
- Crookston, B.M., Anderson, R.M., & Tullis, B.P. 2018. Free-flow discharge estimations for piano key weir geometries. *Journal of Hydro-environmental Research*. 19, 160-167.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G., & Schleiss, A.J. 2013. Labyrinth and piano key weirs II—PKW 2013; CRC Press: London, UK.

- Eslinger, K. & Crookston, B.M. 2020. Energy dissipation of type a piano key weirs. *Water*. 28; 12(5):1253.
- Erpicum, S., Laugier, F., Boillat, J.L., Pirotton, M., Reverchon, B., & Schleiss, A.J. 2013. Labyrinth and piano key weirs—PKW; CRC Press: London, UK.
- Erpicum, S., Laugier, F.; Ho Ta Khanh, M.; Pfister, M. 2017. Labyrinth and piano key weirs III—PKW 2017; CRC Press: London, UK.
- Ghodsian, M. Ehsanifar, A. 2020. Experimental investigation of flow over piano key weir with rectangular, triangular and trapezoidal plans. 18th Iranian Hydraulic Association Conference. Tehran. Iran. (In Persian).
- Ghodsian, M., & Sohrabzadeh Anzani, H. 2023. Experimental study on flow over rectangular piano key weirs with sloped 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*. IAHR, 17, 289–302.
- Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N., & Ranjan, S. 2020. Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. *Journal of Applied Water Science*. 10: 1–9.
- Leite Ribeiro, M. Pfister, M. Schleiss, A.J., & Boillat, A.L. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*. IAHR, 50, 400–408.
- Lempérière, F. & Ouamane, A. 2003. The piano key weir: A new cost-effective solution for spillways. *Journal of Hydropower and Dams*, 10, 144–149.
- Lempérière, F. & Vigny, J. 2011. General comments on labyrinth and piano keys weirs—The future. In Proc. Int. Conf. Labyrinth Piano Key Weirs-PKW2011, London Taylor Fr., London: Taylor & Francism. 289-94.
- Moore, W.L. 1943. Energy loss at the base of free overfall. *Trans. ASCE* 1943, 108, 1343–1360.
- Machiels, O., Pirotton, M., Archambeau, P., Dewals, B.J., & Erpicum, S. 2014. Experimental parametric study and design of piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*. IAHR, 52, 326–335.
- Mansouri, K. & Ahadiyan, J. 2015. Obstruction of piano key weirs in debris flow in individual experiments system. *Irrigation Science Engineering*. 5(3): 163-172. (In Persian).
- 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*. 44-33: (2)30. (In Persian).
- Qanavati, M., Sajjadi, S. M., and Ahadiyan, J. 2016. The effect of block height on flow hydraulic behaviour in rectangular piano key weir with baffled outlet key. The 3rd International Conference on Geographical Science. Nov. 3. Shiraz University. Shiraz, Iran. (In Persian).
- Rand, W. 1953. Flow geometry at straight drop spillways. *Proc. ASCE*. 81, 1–13.
- Rezaei Ahvanooei, A., Mousavi, SF., & Karami, H. 2019. Improvement of hydraulic performance of nonlinear piano-key weirs in plan. *Modares Civil Engineering journal*, 19(4): 71-82. (In Persian).
- Ribeiro, M. L., Pfister, M., Schleiss, A. J., and Boillat, J. L. 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 50(4), 400-408.

- Sohrabzadeh-Anzani, H. Ghodsian, M. 2022. Experimental study of the effect of sidewall slope over triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*. Iranian Hydraulic Association, 17(4), 17-30. (In Persian).
- Sohrabzadeh-Anzani., H. & Ghodsian, M. 2023a. Energy dissipation of triangular piano key weir. *Journal of Hydraulic*, Iranian Hydraulic Association, 18(3), 183. (In Persian).
- Sohrabzadeh-Anzani, H., & Ghodsian, M. 2023b. Laboratory investigation of the discharge coefficient of the rectangular piano key weir with a discontinuous sloping crest. *Journal of Hydraulics*. Iranian Hydraulic Association, Oct 16. 1613. (In Persian).
- Silvestri, A., Archambeau, P., Piroton, M., Dewals, B., Erpicum, S. 2013. Comparative analysis of the energy dissipation on a stepped spillway downstream of a piano key weir. *Labyrinth and piano key weirs II*, CRC Press: London, UK. 111-120.
- Sangsefidi, Y., Tavakol-Davani, H., Ghodsian, M., Mehraein, M., & Zarei, R., 2021. Hydrodynamics and free-flow characteristics of piano key weirs with different plan shapes. *Water*, 13(15), 2108.
- Toozandehjani, M., & Kashefipour, M. 2012. Investigation of the head loss of ogee spillway and the length of hydraulic jump due to the conffliction of the stream lines over the body of ogee spillway. *Irrigation and Water Engineering*, 2(4), 1-13.
- Qanavati, M., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. 2016. The effect of block height on flow hydraulic behaviour in rectangular piano key weir with baffled outlet key. *The 3rd International Conference on Geographical Science*. Nov. 3. Shiraz University. Shiraz, Iran. (In Persian).
- Zounemat-Kermani, M. & Mahdavi-Meymand, A. 2019. Hybrid meta-heuristics artificial intelligence models in simulating discharge passing the piano key weirs. *Journal of Hydrology* 569: 12-21.

Original Research

Energy Dissipation of Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs

***Hossein, Sohrabzadeh-Anzani, Masoud Ghodsian**

*Tarbiat Modares University, Email: sohrabzadeh@modares.ac.ir

Received: 14 May 2023 Accepted: 15 August 2023

<https://doi.org/doi.org/10.22092/IDSER.2023.361138.1531>

Extended Abstract

Introduction

Piano key weirs (PKWs) are a kind of non-linear weirs, initially introduced by Hydrocoop in France (Blanc and Lempérière, 2001). PKWs include the inlet and outlet keys as well as the inclined bottom. Due to their high compatibility with the site and their economic and hydraulic performance, PKWs have been used in different countries including North America, Europe, Asia, and Australia (e.g., Malarce Dam, France, Lake Peachtree Dam, GA, USA, Dakmi 2 and Van Phong Barrage, Vietnam).

There is a wide range of studies addressing the discharge coefficient of PKWs, but the energy dissipation of rectangular and trapezoidal PKWs has not been compared so far. Hence, in this paper the energy dissipation of these weirs is evaluated and compared.

Methodology

Tests were conducted in the hydraulic laboratory of Tarbiat Modares University, Tehran to assess the energy dissipation and flow properties downstream of rectangular and trapezoidal PKWs. Tests were performed using a flume with 10 m length, 0.75 m width, and 0.9 m height (Fig. 1). The water was provided by an underground sump. PK weir was installed and sealed at 4 m away from the flume inlet, so the minimum flow turbulence was achieved. The discharge was adjusted by changing the speed of the pumps using a control panel. The upstream and downstream flow depths were measured at $4P$ (Crookston, 2010) and $10P$ (Eslinger and Crookston, 2010) away from the weir upstream and downstream, respectively, using digital point gage with an accuracy of ± 0.1 mm. The weir specifications are listed in Table 1. Experiments were conducted for various discharges and approach flow depths.

Results

The flow field upstream of PKWs was almost uniform and no turbulence was observed on the water surface. The flow deviated near the PKW with streamlines along the inlet and outlet keys and over the weir walls. Flow deviation led to an increased unit discharge in the outlet keys. Meanwhile, the local velocity was increased, leading to a positive acceleration. The observations showed that this was accompanied by water level decline, and increased downstream turbulence.

Energy Dissipation of Rectangular and Trapezoidal Piano Key Weirs

The flow jet passing over the crest was accompanied by the interaction of three colliding jets. This interaction was the result of the collision between the flow nappies from lateral crests and the approach flow in the outlet keys (Fig. 4). The resulting interactions led to significant turbulence, and expansion of flow at the downstream. As the head increased, the outlet key discharge was increased, and energy dissipation was decreased. Figure 5 shows variations of the energy dissipation for rectangular and trapezoidal PKWs. The relative energy dissipation by trapezoidal PKW was more than that of rectangular PKW, by average of about 3%. Figure 6 shows the residual energy of the PKW versus discharge for rectangular and trapezoidal PKWs. It is clear that as the discharge increased, E_1/E_2 increased. Furthermore, the ascending rate of E_1/E_2 was higher for lower discharges. This is due to the local submergence upstream of the weir at higher discharge.

Conclusion

1. Despite the length of the used crest of trapezoidal PKW being less than rectangular PKW, energy dissipation of trapezoidal PKW is higher than that of rectangular PKW.
2. The average discharge coefficient for trapezoidal PKWs is higher than that for rectangular PKW.
3. The flow characteristics is different for rectangular and trapezoidal PKWs. For $H_t/P \leq 0.15$, no aeration is occurred. For $0.15 < H_t/P < 0.45$, a weak hydraulic jump is formed at the end of the weir outlet keys.
4. New equation was obtained for estimation of energy dissipation.

Keywords: Energy dissipation, Flood, Piano key weir, Discharge coefficient.