

# مطالعة آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با تغییر نسبت عرض کلیدها

# سيد محمدحسن سعيدي'، مجيد رحيم پور \*\*، محمد ذونعمت كرماني ، محمدرضا مددى ُ

۱، ۲ و ۳- بــهترتیـب: دانــشآموختــه کارشناســی ارشــد؛ و دانشــیاران بخــش مهندســی آب، دانشـکده کشــاورزی، دانشـگاه شــهید باهنر کرمان، کرمان، ایران ۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران تاریخ دریافت: ۱۲/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱

#### چکیدہ

سرریز کلید پیانویی سازهای است که سطح و دبی جریان را تنظیم می کند و قابلیت استقرار در مخازن سدها و کانالها را داراست. ویژگی اصلی این سرریز توانایی عبور دادن دبی زیاد بهازای بار آبی اندک است. این نوع سرریز با توجه به خصوصیات هندسی، در چهار نوع A، B، C و D طبقه بندی می شود. در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر عرض کلیدهای ورودی و خروجی بر مشخصههای هیدرولیکی جریان، ۱۲ مدل فیزیکی از سرریزهای کلید پیانویی نوع A و D ساخته شد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، بیش از ۲۰۰ آزمایش روی یک کانال آزمایشگاهی اجرا و نشان داده شد که بهازای بار آبی مشخص، سرریز نوع A، مانع تشریز نوع D، ظرفیت تخلیه بالاتری دارد. همچنین معلوم شد هندسهٔ خاص سرریز نوع A، مانع تشکیل پدیدهٔ مخرب جریان موجکی روی آن می شود. بر اساس یافتههای پژوهش، مشخص شد که مدل سرریز نوع A، مانع تشکیل پدیدهٔ مخرب کلیدهای ورودی به خروجی برابر ۲۱۲۱، در مقایسه با مدلهای دیگر، تا ۳۰ درصد عملکرد بهتری دارد.

## واژههای کلیدی

ابعاد هندسی، اندازه گیری جریان، مدل فیزیکی، مشخصههای جریان

#### مقدمه

سرریزها سازههای هیدرولیکی مهمی هستند که برای تنظیم سطح آب، اندازه گیری جریان و تخلیهٔ سیلاب در کانالها، رودخانهها و مخازن سدها احداث می شوند. سرریز کلید پیانویی یکی از جدیدترین انواع سرریزهاست که بهدلیل هندسهٔ غیر خطی خصود، طول تاج آن زیاد است و میتواند حجم قابل توجهی از جریان را بهازای بار آبی کم از روی خود عبور دهد. این سرریز در واقع حالت ارتقا یافتهٔ سرریزهای زیگزاگی یا لابیرنث محسوب می شود. مطالعات لمپیریر و اوآمانه & Lempérière می سریز می و اوآمانه که کارآمدی سرریز

\* نگارنده مسئول: Email: Rahimpour@uk.ac.ir

کلید پیانویی در تخلیهٔ جریان، نسبت به کارآمدی سرریز اوجی در یک بار آبی و طول تاج برابر، حدود سه تا چهار برابر بیشتر است. ساختار جریان روی سرریزهای کلید پیانویی بسیار پیچیده است و به عوامل متعددی بستگی دارد. هندسهٔ پیشانی، ابعاد کلیدهای ورودی و خروجی و زاویهٔ شیب آنها، رقوم ارتفاعی اجزای سرریز، وجود دماغهها، شیروانیها و سایر متغیرهای هندسی سرریزهای کلید پیانویی سبب شده است پیشبینی رفتار جریان در روبهرو شدن با این نوع سازهها دشوار شود. سرریزهای کلید پیانویی، با توجه به مشخصات هندسی خود، در چهار نوع A، B، C و D طبقهبندی

ارتفاع سرریز (P)، عرض کل سرریز معادل با عرض کانال (W)، عرض کلید ورودی (W)، عرض کلید خروجی (W)، شیب کف کلیدهای ورودی (S)، شیب کف کلیدهای خروجی (S)، طول تاج هر حلقهٔ شیب کف کلیدهای خروجی (S)، طول تاج هر حلقهٔ حلقها (R)، ضحامت دیوارهٔ سرریز (Le)، تعداد حلقها (N)، طول مؤثر تاج سرریز (Le) و نسبت طول تاج سرریز به عرض آن (n=Le/W). مییشوند. سرریز کلید پیانویی نوع A در هر دو قسمت بالادست و پاییندست دارای شیروانی است. سرریزهای نوع B، C و D بهترتیب فاقد شیروانی پاییندست، فاقد شیروانی بالادست و فاقد هر دو شیروانی است. شکل ۱ بهصورت شماتیک هندسهٔ سرریزهای کلید پیانویی نوع A و D را نشان میدهد؛ پارامترهای هندسی این سرریزها از این قرارند:



شکل ۱- پلان و مقطع سرریز کلید پیانویی نوع A (سمت راست) و D (سمت چپ) Fig. 1- Plan and cross section view of piano key weir type A (right) and type D (left)

در سالهای اخیار، محققانی چند -Kabiri، در سالهای اخیار، محققانی چند -Samani & Javaheri, 2011; Yarmohammadi & Ahadiyan, 2016, Khanh & Hien, 2013) بررسای هیدرولیک جریان عباوری از روی سارریزهای ۲۰۰۹ تا ۲۰۰۹ کلید پیانویی پرداختاهاند و از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ تا بیش از ۱۰۰ مادل سارریز کلید پیانویی مطالعه شاده است (Laugier, 2007; 2009). ریبیارو همکاران است (Ribeiro *et al.*, 2012) مای گویند ضاریب تخلیه در ایان سارریز تابعی از چنادین مؤلف است که آن را

$$C_{d}: f(\frac{Le}{W}, \frac{W_{i}}{W_{0}}, \frac{P}{W_{i}}, \frac{t}{P}, \frac{H}{W_{i}}, \frac{S_{i}}{S_{o}}, Fr, Re, We) \qquad (1)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{O}} (1)$$

مطالعهٔ آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با ...

تخلیه دارند. تعبیهٔ پیشانی در سرریزهای نوع B بین ۵ تا ۱۵ درصد تأثیر بیشتری بر ضریب تخلیه دارد تا در سرریزهای نوع A (Cicero *et al.*, 2016). (Lempérière & Ouamane, مپریرره و اوآمانه (Lempérière & Ouamane) روسیت بهینه دادهاند.

با وجود مطالعات محققان مختلف روی سرریزهای کلید پیانویی (که به تعدادی از آنها اشاره شد)، الگوی جریان عبوری از روی این سازهها سهبعدی و به قدری پیچیده و غیر قابل پیشبینی است که بررسیهای آزمایشگاهی بیشتر را روی پارامترهای هندسی این نوع از سرریزها ضروری مییسازد. در پژوهش حاضر، تأثیر ضروری مییسازد. در پژوهش حاضر، تأثیر مشخصههای هیدرولیکی جریان بررسی شده است. علاوه بر این، وقوع جریان موجکی<sup>۱</sup> روی این نوع از سرریزها برای نخستین بار گزارش میشود.



آزمایش های مرتبط با این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازههای آبے دانشـــگاه شـــهید بــاهنر کرمــان روی یــک کانــال آزمایشـگاهی بـه طـول ۸ متـر، عـرض ۸۰ سـانتیمتـر و ارتفاع ۶۰ سانتیمتر از جنس فلز با دیوارههای شیشهای اجرا شد (شکل ۲). محدودهٔ تغییرات دبی بین ۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد که با استفاده از شیر فلکه و تغییردهندهٔ فرکانس برق یمپ بهخوبی قابل تنظیم بود. برای هـر سـریز ۷ دبـی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت و آزمایشها برای هر دبی سه بار تکرار شد. ۱۶ مادل ساریز نوع A و D از جنس ورقة PVC عايق به ضخامت ۱۶ ميلي متر با نسبتهای متفاوت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی ساخته و در داخل کانال تعبیه شد. در هـر نـوع از مـدلها، بـه جـز نسـبت <sup>W</sup>i/W سایر پارامترها یکسان طراحی گردید. ابعاد هندسی مدلهای مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- الف) شماتیک کانال آزمایشگاهی و سیکل جریان، ب) مدل سرریز و ج) اجزای آن Fig. 2- a) Scematic representation of laboratory flume and flow recirculation, b) weir models and c) their components

پارامتر										
Parameter*	Р	W	Le	Ν	В	Ts	Bi	Во	Wi	Wo
مدل										
Model										
PKWA1.66	20	80	320	3	40	1.6	10	10	14.6	8.8
PKWA1.39	20	80	320	3	40	1.6	10	10	13.6	9.8
PKWA1.25	20	80	320	3	40	1.6	10	10	13	10.4
PKWA1.1	20	80	320	3	40	1.6	10	10	12.2	11.1
PKWA0.6	20	80	320	3	40	1.6	10	10	8.8	14.6
PKWA0.72	20	80	320	3	40	1.6	10	10	9.8	13.6
PKWA0.8	20	80	320	3	40	1.6	10	10	10.4	13
PKWA0.9	20	80	320	3	40	1.6	10	10	11.1	12.2
PKWD1.66	20	80	320	3	40	1.6	-	-	14.6	8.8
PKWD1.39	20	80	320	3	40	1.6	-	-	13.6	9.8
PKWD1.25	20	80	320	3	40	1.6	-	-	13	10.4
PKWD1.1	20	80	320	3	40	1.6	-	-	12.2	11.1
PKWD0.6	20	80	320	3	40	1.6	-	-	8.8	14.6
PKWD0.72	20	80	320	3	40	1.6	-	-	9.8	13.6
PKWD0.8	20	80	320	3	40	1.6	-	-	10.4	13
PKWD0.9	20	80	320	3	40	1.6	-	-	11.1	12.2

جدول ۱- مشخصات مدلهای آزمایشگاهی مورد بررسی در این پژوهش Table 1- Properties of experimental models utilized in this research

\* P ارتفاع سرریز، W عـرض سـرریز، Le طـول مـؤثر تـاج، N تعـداد حلقـه، B طـول تـاج هـر حلقـه، Ts ضـخامت دیـواره، Bi طـول پیشـانی ورودی، Bo طـول پیشانی خروجی، Wi عرض کلید ورودی، Wo عرض کلید خروجی.

\* P: weir height, W: weir width, Le: effective length of crest, N: number of cycles, B: length of each cycle, Ts: thickness of wall, Bi: length of inlet forehead, Bo: length of outlet forehead, Wi: width of inlet key, Wo: width of outlet key.

ر بی Q = دب\_ی؛  $C_d$  =  $C_d$  - سریب تخلی ه، g = ش\_تاب  $\mathcal{P}_{-}(\text{itm}, t_t) = |$ ر تفع کل؛ و Le =  $d_{-}eb$  مـؤثر تاج سرریز. به منظور صحت سنجی رابط ۲۰، یک برنامه در محیط نرمافزار 2013 MATLAB توسعه داده شد که به کمک آن، یک تناسب دو به دو بین بار آبی و که به کمک آن، یک تناسب دو به دو بین بار آبی و دبی هر سرریز برقرار شد و بدین ترتیب یک ماتریس شکل گرفت که تعداد درایه های آن مجذور تعداد آزمایش های مربوط به آن سرریز بود. شکل این

$$\frac{Q_1}{Q_2} = (\frac{H_{t_1}}{H_{t_2}})^x$$
(٣)

که در آن،

پیش از هر آزمایش، سرریزها در کانال مستقر و که درآن، آببندی میشدند. در هر آزمایش، آب از مخزن Q =زیرزمینی با دو پمپ گریز از مرکز و با قابلیت تنظیم گرانش، دبی به داخل کانال هدایت میشود و بعد از عبور از سرریز. روی سرریز، از انتهای کانال به مخزن اصلی تأمین بهم آب برمی گردد. نیمرخ سطح آب با استفاده از محیط ن یکسری اشاهای مدرج با دقت ۲/۱ میلیمتر که به کم اندازه گیری و قرائت میشد.

> بــرای محاســبهٔ ضــریب دبــی ســریزها، از رابطــهٔ عمـومی سـرریزهای مســتطیلی بــهصـورت زیـر اســتفاده شد (رابطهٔ ۲):

> > $Q = C_d \sqrt{2g} Le H_t^{1.5} \tag{(7)}$

مطالعهٔ آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با ...

*Q*1 و *Q*2 = دبــیهــای انــدازهگیــری شــده در آزمایشــگاه؛ و H<sub>t1</sub> و H<sub>t2</sub> = بارهای آبی کل متناظر با هر دبی.

#### نتایج و بحث

بعد از اجرای آزمایشها و جمعآوری اطلاعات، نتایج بهدست آمده بههمراه تجزیه و تحلیلهای مربوطه در سه بخش عملکرد سرریزها، ضریب تخلیه و وقوع جریان موجکی روی سرریزها بهشرح زیر ارائه میشود.

#### مقايسة عملكرد سرريزها

شکل ۳، عملکرد سرریز نوع A را در مقایسه با سرریز نوع D از لحاظ قابلیت عبوردهی جریان بهازای بارهای هیدرولیکی مختلف در قالب نمودار دبی- اشل نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، در بارهای آبی کم (H<sub>1</sub><3cm) هر دو نوع سرریز عملکرد تقریبا یکسانی دارند. هر دو نوع سرریز عملکرد تقریبا یکسانی دارند. نوع A از عملکرد سرریز نوع D فاصله می گیرد و قادر است جریان بیشتری را بهازای یک بار آبی یکسان از روی خود عبور دهد. برتری سرریز نوع A در نسبتهای کم عرض کلید ورودی به خروجی

بیشتر مشهود است. شکل ۴، تغییرات ظرفیت تخلیف سرریز کلید پیانویی نوع A را در مقایسه با تحقیق اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) روی این نوع سرریز نشان میدهد. همان طور که مشخص است، برای بارهای آبی کم، عملکرد سرریزها با است، برای متفاوت Wi/Wo در عبور جریان تقریبا مشابه است. اندرسون و تولیس & Anderson مشابه مشاهده کردند.

در بارهای آبی بالاتر، سرریز با مشخصهٔ PKWA1.66، در مقایسه با دیگر سرریزها، بیشترین دبی را بهازای بار آبی یکسان از خود عبور داده که حاکی از عملکرد بهتر آن است. در بار آبی حداکثر (۵/۵ سانتیمتر)، این سرریز توانسته است دبی ۵۲ لیتر بر ثانیه را از روی خود عبور دهد که در مقایسه با سرریز ۵.PKWA0.6 ۲۶ درصد بیشتر است. جدول ۲ میرزان کاهش عملکرد سرریزهای مرود استفاده را در مقایسه با عملکرد سرریزهای مرود ماهری میدی است که هرچه بار آبی بیشتر باشد، اختلاف عملکرد سرریزها مشهودتر آبی بیشتر باشد، اختلاف عملکرد سرریزها مشهودتر





Wi/Wo شکل ۳- مقایسه دبی عبوری از روی سرریز نوع A با سرریز نوع D برای بارهای آبی و نسبتهای متفاوت Wi/Wo Fig. 3- Comparison of flow discharge over PKW-A with PKW-D for different heads and wi/wo ratios

مطالعة أزمايشگاهي سرريز كليد ييانويي با ...



شکل ۴- تغییرات ظرفیت تخلیهٔ سرریز نوع A بهازای بار آبی مختلف در مقایسه با آنچه اندرسون و تولیس ,Anderson & Tullis) 2013) بەدست آوردەاند

Fig. 4- Variations of flow discharge capacity of PKW-A for different heads in comparison with those obtained by Anderson & Tullis, 2013

جدول ۲- میزان کاهش عملکرد سرریزها (بر حسب درصد) در مقایسه با عملکرد سرریز PKWA1.66 Table 2- Reduction of weirs performance (in percentage) compared to PKW-A1.66

PKWA1.39	PKWA1.25	PKWA <sub>1.1</sub>	PKWA <sub>0.9</sub>	PKWA <sub>0.8</sub>	PKWA0.7	PKWA <sub>0.6</sub>	مدل Model
2.06	5	6.56	10.27	15.01	19.66	20.91	

است، ضریب تخلیـه (Cd) و نمـای Ht دو یـارامتر مهـم D نیےز برقےرار است. سےریزهای نےوع A، نسےبت ہے در تخمین دیے عبوری از روی سےریزها هسےتند. سرریزهای نوع D، بهازای بار آبی یکسان قابلیت شکل ۵ تغییرات *C*d را بهازای Ht/P نشان میدهد. مشاهده می شود که با افزایش H/P تا ۰/۱۰، مقدار Cd افـزایش مــییابـد و از ایــن نقطــه بــه بعـد (1.19</ مقدار Cd روند کاهشی پیدا میکند. این نتیجه با نتایج مشاهدات اندرسون و تولیس & Anderson) (Tullis, 2013 همخوانی دارد.

رونــد مــذکور بــرای ســرریزهای کلیــد پیـانویی نــوع عبــوردهی دبــی بــالاتری دارنــد، بــهطــوریکــه در نســـــبتهای ۲/۰، ۷/۰، ۸/۰، ۹/۰، ۱/۱، ۲/۵، ۱/۲۵ و ۱/۶۶ بــــه تر تيـــب ۱۷/۸، ۱۴/۵، ۱۳/۷، ۱۶/۲، ۱۳/۱، ۱۱، ۱۴/۳ و ۱۰/۱ درصد جریان بیشتر را توانستهاند عبور دهنــد. همــانطــور کــه در رابطــهٔ ۲ نشــان داده شــده



شکل ۵– تغییرات ضریب دبی سرریز نوع A (بالا) و نوع D (پایین) در مقابل بار آبی بهازای Wi/Woهای مختلف Fig. 5- Variations of discharge coefficient of PKW-A (top) and PKW-D (bottom) vs. flow heads for different ratios of w;/w₀

به گونه ای است که جریانی که در راستای شیب در حال حرکت است با جریان سطحی عبوری از تاج جانبی (که دارای سرعت بالایی است) تداخل می کند (شکل ۶) و باعث می شود تخلیهٔ تاج جانبی در شرایط آزاد صورت نپذیرد. در این حالت، تخلیه از تاج جانبی کم می شود و ظرفیت نهایی سرریز کاهش می یابد. به عبارت دیگر، کاهش ضریب تخلیه در دبی های بالا به علت استغراق جریان است.

در تحلیل این فرآیند می توان گفت در بارهای آبی کم، خطوط جریان بدون فشردگی و به صورت نسبتاً مشابه در طول کل تاج سرریز توزیع می شوند. بخش پایین دست تاج کلید ورودی عمدتاً با جریان تحتانی و بخش بالادست تاج کلید خروجی عمدتاً با جریان سطحی کنترل می شود. در بارهای آبی بالا، توزیع خطوط جریان به صورت فشرده است (Machiels, 2012). در واقع، هیدرولیک پدیده

#### مطالعهٔ آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با ...



شکل ۶- شماتیک الگوی جریان روی سرریز کلید پیانویی Fig. 6- Schematic representation of flow pattern over PKW

نتایج این پژوهش نشان می دهد که نمای بار آبی برای سرریز کلید پیانویی نوع A و D به طور متوسط ۱/۳ است. با انتخاب نمای ۱/۳ برای بار هیدرولیکی، نمودار تغییرات  $C_d$  در مقابل  $H_t/P$  به صورتی در می آید که در شکل ۷ دیده می شود و حاکی از پایدار شدن مقدار  $C_d$  به ازای  $H_t/P$ های مختلف است.

جـدول ۳ نشـان میدهـد کـه در تمـامی مـدلهـا میـزان انحـراف معیـار ضـریب دبـی، اگـر نمـای بـار آبـی ۱/۳ فرض شـود، بسـیار کمتـر از حـالتی خواهـد بـود کـه این نما ۱/۵ در نظر گرفته شود.

یافته های پژوهش حاضر نشان می دهد که نمای بار آبی، بر خلاف آنچه لمپریره و اوآمانه (Lempérière & Ouamane, 2003) ارائه کردهاند، ۱ نیست. به سخنی دیگر، بین بار آبی و دبی رابطهٔ خطی وجود ندارد. مشاهدات آزمایشگاهی همچنین نشان می دهد که مقادیر به دست آمده با نمای بار آبی در سرریزهای لبه تیز مستطیلی هم متفاوت است. در سرریزهای مستطیلی، این نما برابر با ۱/۵ است که در صورت پذیرفتن آن، بازهای گسترده برای ضریب تخلیه حاصل می شود (شکل ۵).





جدول ۳- انحراف معیار ضریب دبی برای نمای بار هیدرولیکی در نسبتهای مختلف عرض کلیدهای ورودی به خروجی Table 3- Standard deviation (SD) of Cd for different power (n) of Ht and wi/wo ratios

1.66	1.39	1.25	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6	نسبت عرض کلید ورودی به خروجی wi/wo	
0.187	0.163	0.224	0.223	0.23	0.331	0.323	0.294	انحراف معیار ضریب دبی برای ۱/۵ SD of Cd for n=1.5	سرريز کليد
0.064	0.083	0.053	0.048	0.045	0.072	0.054	0.06	انحراف معیار ضریب دبی برای ۱/۳ SD of Cd for n=1.3	ییانویی نوع A PKW-A
0.277	0.475	0.411	0.321	0.289	0.425	0.391	0.476	انحراف معیار ضریب دبی برای ۱/۵ SD of Cd for n=1.5	سرريز کليد
0.074	0.071	0.057	0.059	0.070	0.076	0.067	0.095	انحراف معیار ضریب دبی برای ۱/۳ SD of Cd for n=1.3	پیانویی نوع D PKW-D

مطالعة أزمايشگاهي سرريز كليد ييانويي با ...

جريان موجكي شکل ۸ نیمرخ طولی جریان در سرریز نوع D را در مقایسه با سرریز نوع A نشان میدهد. نیمرخ جریان روی سرریز نوع D به صورت موج است.

$$Q = C_d \sqrt{2g} L_e H^{1.3} \tag{(f)}$$



شکل ۸- سطح جریان هنگام عبور از تاج سرریزهای نوع A و D Fig. 8- Proile of water surface passing over PKW-A and PKW-D

مــدل ســريز كليــد پيـانويي نــوع D (مــدلهـاي PKWD0.6 و PKWD1.66 و PKWD0.6 در دبـــــهــای مختلـــف نشان داده شده است. مبدأ مختصات در بالادست سرریز و در فاصلهٔ ۱۵ سانتیمتر از آن در نظر گرفته شده است. در اینجا نیز مشخص است که نیمرخ جریان در دبیهای پایین (کمتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه) روند طبیعے خود را دارد کے ہنگام روبہ رو شدن جریان زیربحرانی با مانع رخ میدهد. به عبارت دیگر، در اثر وجود سرریز در مسیر جریان زیربحرانی، انرژی مخصوص جریان کاهش می یابد و سطح آب هنگام عبور از روی سرریز پایین میآید. کاهش عمق آب روی تاج سرریز همچنان ادامه پیدا میکند و تا رسیدن به عمیق بحرانی، پروفیل M2 روی سرریز شکل می گیرد. با افزایش دبی جریان، جریان موجکی روی سے ریز شےکل مے گیے د. مشاہدات آزمایشے گاہی در شکل ۹، نیمرخ طولی سطح جریان برای دو نشان می دهد با افزایش دبی جریان، موقعیت

این یدیده ییش از این روی سرریزهای لبه پهن مستطیلی با نام جریان موجکی گزارش شده بود (Madadi et al., 2013). در پــژوهش حاضــر، ايــن پدیدہ برای اولین بار روی سرریزهای کلید پیانویی نوع D نیےز مشاہدہ شد. جریان موجکی روی سرریز کلید پیانویی نوع A بەروشىنی قابىل دیىدن نبود. بىر اساس یافت۔ ہای این یے ژوهش، جریان مے جکی روی سر, یزهای کلید ییانویی نوع D در محدودهٔ رابطهٔ ۵ شـکل مـی گیرد. این رابطـه را اولـین بار چانسون (Chanson, 1996) برای شکل گیری جریان موجکی روی سرریزهای لبهیهن مستطیلی ارائه داده بود:

$$\frac{Le}{(H_t - P)} > 1.5 - 3 \tag{(a)}$$

شکل گیری موجک بـهسـمت پـاییندسـت جریـان تغییـر ورودی بــه خروجــی، ابعـاد جریــان مــوجکی کــاهش مکــان میدهــد. بــا افــزایش نســبت عــرض کلیــدهای مییابد.



PKWD1.66 Fig. 9- Flow surface profile in different flow discharges: a) PKWD0.6 and b) PKWD1.66

نتيجهگيري

داراست. - در سرریز مشخص، با کاربرد معادلهٔ عمومی سرریزهای لبهتیز مستطیلی، ضریب تخلیه در دبیهای مختلف روندی ثابت ندارد و مقدار آن نیز ثابت نیست. اگر این رابطه اصلاح شود، میتوان مقادیر ثابت بارای این ضریب تعییین کرد. مقادیر ثابت بارای این ضریب تعییمن کرد. در پژوهش حاضر، نمای ۱/۳ باری سرریز نوع A و D بهترین نمای بار آبی باری محاسبهٔ دبی معرفی شدهاست.

عبوردهی جریان از روی هر دو نوع سرریز A و D

در این پژوهش با اجرای آزمایش روی ۱۶ مدل سرریز کلید پیانویی و بررسی نمودارهای دبی اشل آنها و یافتهها و دادههای اندازه گیری شده، نتایج زیر بهدست آمد:

- نسبت عـرض کلیـدهای ورودی بـه عـرض کلیـدهای خروجـی پـارامتر بسـیار مـؤثری در ظرفیـت تخلیـهٔ سـریزهای کلیـد پیـانویی است و وجـود پیشـانی نیـز می توانـد در بـالا بـردن عملکـرد سـریز نقـش داشـته باشـد. بـر اسـاس یافتـههـای ایـن پـژوهش، سـریز بـا مشخصـه 1.66=Wi<sub>Wo</sub> بهتـرین عملکــرد را در

مطالعهٔ آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با ...

افزایش می یابد. با افزایش نسبت عرض کلیدهای نمی شود زیرا در این سرریزها، در مقایسه با ورودی به عـرض کلیـدهای خروجـی، مـوج ضـعیفتـری 🚽 سـرریزهای نـوع D ، پیشـانی وجـود دارد و جـای پـی در

دارد که با افزایش میران دبی، ابعاد این موج نیز نامیده می شود، روی سریزهای نوع A دیده ایجاد می شود. این پدیده که جریان موجکی آنها کوتاه است.

#### قدرداني

از داوران گرامی مقاله بهدلیل دیدگاههای سازنده و ارزشمندشان قدردانی میشود.

مراجع

- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2011). Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. In International Conference of Labyrinth and Piano Key Weirs. Feb. 9-11. At Liège, Belgium.
- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2013). Piano Key Weir hydraulics and labyrinth weir comparison. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139, pp. 246-253.
- Chanson, H. (1996). Free-surface flows with near-critical flow conditions. Canadian Journal of Civil Engineering, 23(6), pp. 1272-1284.
- Cicero, G. M., Vermeulen, J., & Laugier, F. (2016). Influence of some geometrical parameters on Piano Key Weir discharge efficiency. In 6<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. June 27-30. Portland.
- Kabiri-Samani, A., & Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(1), pp. 114-120.
- Khanh, M., & Hien, T. C. (2013). Research on the discharge capacities of Piano Key weirs type A, D and rectangular labyrinth (in Vietnamese). In 13th Conference on Science and Technology. Nov. 27 - 29. HCMUT-Faculty of Civil Engineering, Vietnam.
- Laugier, F. (2007). Design and construction of the first Piano Key Weir spillway at goulours dam. International Journal of Hydropower Dams, 13, pp. 94-100.
- Laugier, F. (2009). Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. International Journal Hydropower Dams, 15(5), pp. 100-107.
- Lempérière, F., & Ouamane, A. (2003). The Piano Keys Weir: a new cost effective solution for spillways, hydropower and dams. Official Journal of the International Hydropower Association, 10, pp. 144-149.
- Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs (M. S. Thesis) Université de Liege, Liege, Belgium.
- Machiels, O., Pirotton, M., Archambeau, P., Dewals, B., & Erpicum, S. (2014). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research, 52(3), pp. 326-335.
- Madadi, M. R., Dalir, A. H., & Farsadizadeh, D. (2013). Control of undular weir flow by changing of weir geometry. Flow Measurement and Instrumentation, 34, pp. 160-167.
- Ribeiro, M. L., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., Singhal, G., & Sharma, N. (2012). Discharge capacity of Piano Key Weirs. Journal Hydraulic Engineering, 138, pp. 199-203.

Yarmohammadi, B., & Ahadiyan, J. 2016. Experimental study of flow hydraulic in Piano Key Weirs at different parapet wall. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), pp. 47-58. (in Persian)



# Experimental Study of Piano Key Weir by Changing Width Ratio of the Keys

## S. M. H. Saeidi, M. Rahimpour<sup>\*</sup>, M. Zounemat-Kermani and M. R. Madadi

\* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: Rahimpour@uk.ac.ir Received: 13 March 2019, Accepted: 22 June 2019

## **Extended Abstract**

#### Introduction

Piano key weir (PKW) is a hydraulic structure that can be installed at dams and canals for regulating the flow surface and discharge. The main feature of this weir is the ability to pass a large flow of water over a small head.

Regarding its geometrical properties, this weir is classified into four types of A, B, C and D. PKW with symmetrical upstream and downstream overhangs is classified as Type A, one with only upstream overhangs as Type B, one with only downstream overhangs as Type C, and one without overhangs as Type D.

Despite various studies on piano key weirs (some of which were mentioned in the text), the flow behaiviour over these structures is very complex, unpredictable and three-dimensional.

So further laboratory investigations on PKWs are needed. In the present study, the effect of the width of the inlet and outlet keys on the hydraulic characteristics of these weirs is investigated. In addition, the occurrence of undular flow on these types of weirs is reported for the first time. To achieve the aims of this study, more than 300 experiments were conducted at a laboratory flume.

#### Methodology

The experimental tests of this research were conducted in the hydraulic & water structures laboratory of Shahid Bahonar University of Kerman, on a laboratory flume with 8 m length, 80 cm width and 60 cm height, having glass walls and metal bottom.

The flow discharge was adjusted in a range of 5 to 60 liters per second by a valve. In total, 16 physical models of PKW-A and PKW-D weirs were constructed to investigate the effect of width of inlet and outlet keys on the hydraulic characteristics of flow over such weirs. Seven discharges were tested for each model of weirs, and experiments were repeated three times for each discharge.

## **Results and Discussion**

The results demonstrated that at low water loads (Ht <3cm), both types of weirs have almost the same performance. But as the water load increases, the performance of PKW-A weir deviates from the type PKW-D weir, i.e. it was able to pass larger discharges for an identical flow head. The superiority of PKW-A weir was more evident in small inlet-to-outlet ratios of keys.

For low flow heads, the performance of weirs with different Wi/Wo ratios in terms of discharge capacity is almost similar. Anderson and Tullis (2013) found similar results in their experiments.

At higher flow heads, the PKW-A1.66, compared to other models, had the largest discharge capacity in same flow heads, indicating its better performance. At maximum flow head (5.5cm), this weir was able to discharge 52 liters per second, which is 24% more than PKW-A0.6 weir. Similar trend exists for D-type piano key weirs.

It was observed that undular flow is formed on D-type piano key weirs. Although, this phenomenon was previously observed on rectangular broad-crested weirs (Chanson, 1976; Madadi *et al*, 2013), but for the piano key weirs, this is the first report on formation of undular weir flow above D-type PKW.

#### Conclusions

According to the results of this study, the ratio of the width of the inlet keys to the width of the outlet keys is a very effective parameter in the discharge capacity of the piano key weirs, and the presence of a forehead can also play a role in enhancing the performance of the weir.

Also, the results indicated that for a given head, not only the A-type PKW has more discharge capacity comparing to D-type weir, but also due to its special geometry, the undular flow phenomenon cannot be formed above such weir. Furthermore, the PKW weir with inlet to outlet key width ratio of 1.66 demonstrated 30% higher performance comparing to the other investigated models.

Keywords: Flow Characteristics, Flow Measurement, Geometrical Dimensions, Physical Model