

مطالعه آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی با تغییر نسبت عرض کلیدها

سید محمدحسن سعیدی^۱، مجید رحیم‌پور^{۲*}، محمد ذونعمت کرمانی^۳، محمدرضا مددی^۴

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و دانشیاران بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران
تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱

چکیده

سرریز کلید پیانویی سازه‌ای است که سطح و دبی جریان را تنظیم می‌کند 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 طبقه‌بندی می‌شود. در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر عرض کلیدهای ورودی و خروجی بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، ۱۶ مدل فیزیکی از سرریزهای کلید پیانویی نوع A و D ساخته شد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، بیش از ۳۰۰ آزمایش روی یک کانال آزمایشگاهی اجرا و نشان داده شد که به‌ازای بار آبی مشخص، سرریز نوع A، نسبت به سرریز نوع D، ظرفیت تخلیه بالاتری دارد. همچنین معلوم شد هندسه خاص سرریز نوع A، مانع تشکیل پدیده مخرب جریان موجی روی آن می‌شود. بر اساس یافته‌های پژوهش، مشخص شد که مدل سرریز با نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی برابر ۱/۶۶، در مقایسه با مدل‌های دیگر، تا ۳۰ درصد عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی

ابعاد هندسی، اندازه‌گیری جریان، مدل فیزیکی، مشخصه‌های جریان

مقدمه

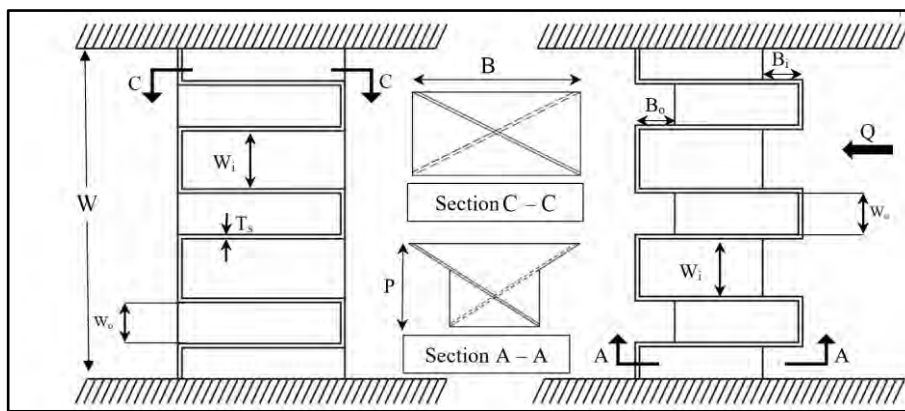
کلید پیانویی در تخلیه جریان، نسبت به کارآمدی سرریز اوجی در یک بار آبی و طول تاج برابر، حدود سه تا چهار برابر بیشتر است. ساختار جریان روی سرریزهای کلید پیانویی بسیار پیچیده است و به عوامل متعددی بستگی دارد. هندسه پیشانی، ابعاد کلیدهای ورودی و خروجی و زاویه شیب آنها، رقوم ارتفاعی اجزای سرریز، وجود دماغه‌ها، 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

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی مهمی هستند که برای تنظیم سطح آب، اندازه‌گیری جریان و تخلیه سیلاب در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها احداث می‌شوند. سرریز کلید پیانویی یکی از جدیدترین انواع سرریزهاست که به‌دلیل هندسه غیر خطی خود، 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 یافته سرریزهای زیگزاگی یا لایرنث محسوب می‌شود. مطالعات لمپیرییر و اوآمانه (Lempérière & Ouamane, 2003) نشان می‌دهد که کارآمدی سرریز

می‌شوند. سرریز کلید پیانویی نوع A در هر دو قسمت بالادست و پایین دست دارای شیروانی است. سرریزهای نوع B, C و D به ترتیب فاقد شیروانی پایین دست، فاقد شیروانی بالادست و فاقد هر دو شیروانی است. شکل ۱ به صورت شماتیک هندسه سرریزهای کلید پیانویی نوع A و D را نشان می‌دهد؛ پارامترهای هندسی این سرریزها از این قرارند:

ارتفاع سرریز (P)، عرض کل سرریز معادل با عرض کانال (W)، عرض کلید ورودی (W_i)، عرض کلید خروجی (W_o)، شیب کف کلیدهای ورودی (S_i)، شیب کف کلیدهای خروجی (S_o)، طول تاج هر حلقه سرریز (B)، ضخامت دیواره سرریز (T_s)، تعداد حلقه‌ها (N)، طول مؤثر تاج سرریز (Le) و نسبت طول تاج سرریز به عرض آن ($n=Le/W$).



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 اخیر، محققانی چند (Kabiri-Samani & Javaheri, 2011; Yarmohammadi & Ahadiyan, 2016, Khanh & Hien, 2013) بررسی هیدرولیک جریان عبوری از روی سرریزهای کلید پیانویی پرداخته‌اند و از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ بیش از ۱۰۰ مدل سرریز کلید پیانویی مطالعه شده است (Laugier, 2007; 2009). ریبیرو و همکاران (Ribeiro et al., 2012) می‌گویند ضریب تخلیه در این سرریز تابعی از چندین مؤلفه است که آن را می‌توان به صورت رابطه ۱ ارائه داد.

در سال‌های اخیر، محققانی چند (Kabiri-Samani & Javaheri, 2011; Yarmohammadi & Ahadiyan, 2016, Khanh & Hien, 2013) بررسی هیدرولیک جریان عبوری از روی سرریزهای کلید پیانویی پرداخته‌اند و از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ بیش از ۱۰۰ مدل سرریز کلید پیانویی مطالعه شده است (Laugier, 2007; 2009). ریبیرو و همکاران (Ribeiro et al., 2012) می‌گویند ضریب تخلیه در این سرریز تابعی از چندین مؤلفه است که آن را می‌توان به صورت رابطه ۱ ارائه داد.

$$C_d: f\left(\frac{Le}{W}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{P}{W_i}, \frac{t}{P}, \frac{H}{W_i}, \frac{S_i}{S_o}, Fr, Re, We\right) \quad (1)$$

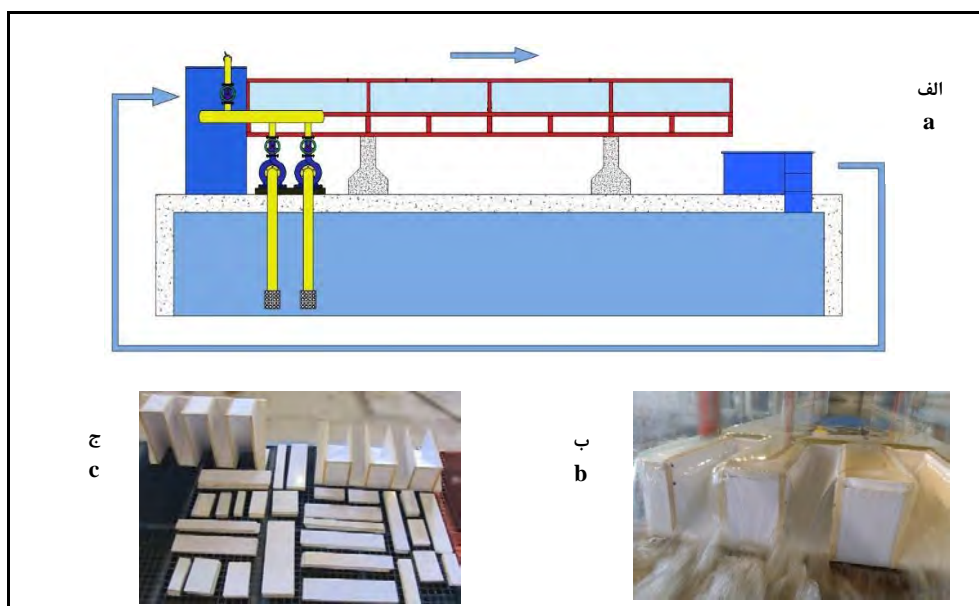
که در آن،

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مرتبط با این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی دانشگاه شهید باهنر کرمان روی یک کانال آزمایشگاهی به طول ۸ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از جنس فلز با دیواره‌های شیشه‌ای اجرا شد (شکل ۲). محدوده تغییرات دبی بین ۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد که با استفاده از شیر فلکه و تغییردهنده فرکانس برق پمپ به خوبی قابل تنظیم بود. برای هر سرریز ۷ دبی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت و آزمایش‌ها برای هر دبی سه بار تکرار شد. ۱۶ مدل سرریز نوع A و D از جنس ورقه PVC عایق به ضخامت ۱۶ میلی‌متر با نسبت‌های متفاوت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی ساخته و در داخل کانال تعبیه شد. در هر نوع از مدل‌ها، به جز نسبت W_i/W_o ، سایر پارامترها یکسان طراحی گردید. ابعاد هندسی مدل‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

تخلیه دارند. تعبیه 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). لمپریه و اوآمانه (Lempérière & Ouamane, 2003) نسبت W_i/W_o برابر ۱/۲۵ را نسبت بهینه پیشنهاد داده‌اند.

با وجود مطالعات محققان مختلف روی سرریزهای کلید پیانویی (که به تعدادی از آنها اشاره شد)، الگوی جریان عبوری از 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 می‌سازد. در پژوهش حاضر، تأثیر عرض کلیدهای ورودی و خروجی سرریز بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان بررسی شده است. علاوه بر این، وقوع جریان موجکی^۱ روی این نوع از سرریزها برای نخستین بار گزارش می‌شود.



شکل ۲- الف) شماتیک کانال آزمایشگاهی و سیکل جریان، ب) مدل سرریز و ج) اجزای آن

Fig. 2- a) Schematic representation of laboratory flume and flow recirculation, b) weir models and c) their components

جدول ۱- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در این پژوهش

Table 1- Properties of experimental models utilized in this research

پارامتر Parameter* مدل Model	P	W	Le	N	B	Ts	Bi	Bo	Wi	Wo
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

* P ارتفاع سرریز، W عرض سرریز، Le طول مؤثر تاج، N تعداد حلقه، B طول تاج هر حلقه، Ts ضخامت دیواره، Bi طول پیشانی ورودی، Bo طول 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.

پیش از هر آزمایش، سرریزها در کانال مستقر و آب‌بندی می‌شدند. در هر آزمایش، آب از مخزن زیرزمینی با دو پمپ گریز از مرکز و با قابلیت تنظیم دبی به داخل کانال هدایت می‌شود و بعد از عبور از روی سرریز، از انتهای کانال به مخزن اصلی تأمین آب برمی‌گردد. نیمرخ سطح آب با استفاده از یک سری اشل‌های مدرج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و قرائت می‌شد. برای محاسبه ضریب دبی سرریزها، از رابطه عمومی سرریزهای مستطیلی به‌صورت زیر استفاده شد (رابطه ۲):

که در آن،

دبی = Q = دبی؛ C_d = ضریب تخلیه، g = شتاب گرانش، H_t = ارتفاع کل؛ و Le = طول مؤثر تاج سرریز.

به‌منظور صحت‌سنجی رابطه ۲، یک برنامه در محیط نرم‌افزار MATLAB 2013a توسعه داده شد 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 درایه‌های آن مجذور تعداد آزمایش‌های مربوط به آن سرریز بود. شکل این رابطه به‌صورت رابطه ۳ است:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{H_{t1}}{H_{t2}}\right)^x \quad (3)$$

که در آن،

پیش از هر آزمایش، سرریزها در کانال مستقر و آب‌بندی می‌شدند. در هر آزمایش، آب از مخزن زیرزمینی با دو پمپ گریز از مرکز و با قابلیت تنظیم دبی به داخل کانال هدایت می‌شود و بعد از عبور از روی سرریز، از انتهای کانال به مخزن اصلی تأمین آب برمی‌گردد. نیمرخ سطح آب با استفاده از یک سری اشل‌های مدرج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و قرائت می‌شد. برای محاسبه ضریب دبی سرریزها، از رابطه عمومی سرریزهای مستطیلی به‌صورت زیر استفاده شد (رابطه ۲):

$$Q = C_d \sqrt{2gLe} H_t^{1.5} \quad (2)$$

بیشتر مشهود است.

شکل ۴، تغییرات ظرفیت تخلیه سرریز کلید بیانویی نوع A را در مقایسه با تحقیق اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) روی این نوع سرریز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، برای بارهای آبی کم، عملکرد سرریزها با نسبت‌های متفاوت W_i/W_o در عبور جریان تقریباً مشابه است. اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) نیز در آزمایش‌های خود نتایجی مشابه مشاهده کردند.

در بارهای آبی بالاتر، سرریز با مشخصه $PKWA1.66$ ، 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 ($5/5$ سانتی‌متر)، این سرریز توانسته است دبی 52 لیتر بر ثانیه را از روی خود عبور دهد که در مقایسه با سرریز $PKWA0.6$ ، 24 درصد بیشتر است. جدول ۲ میزان کاهش عملکرد سرریزهای مورد استفاده را در مقایسه با عملکرد سرریز $PKW A1.66$ نشان می‌دهد. مشخص است که هرچه بار آبی بیشتر باشد، اختلاف عملکرد سرریزها مشهودتر است.

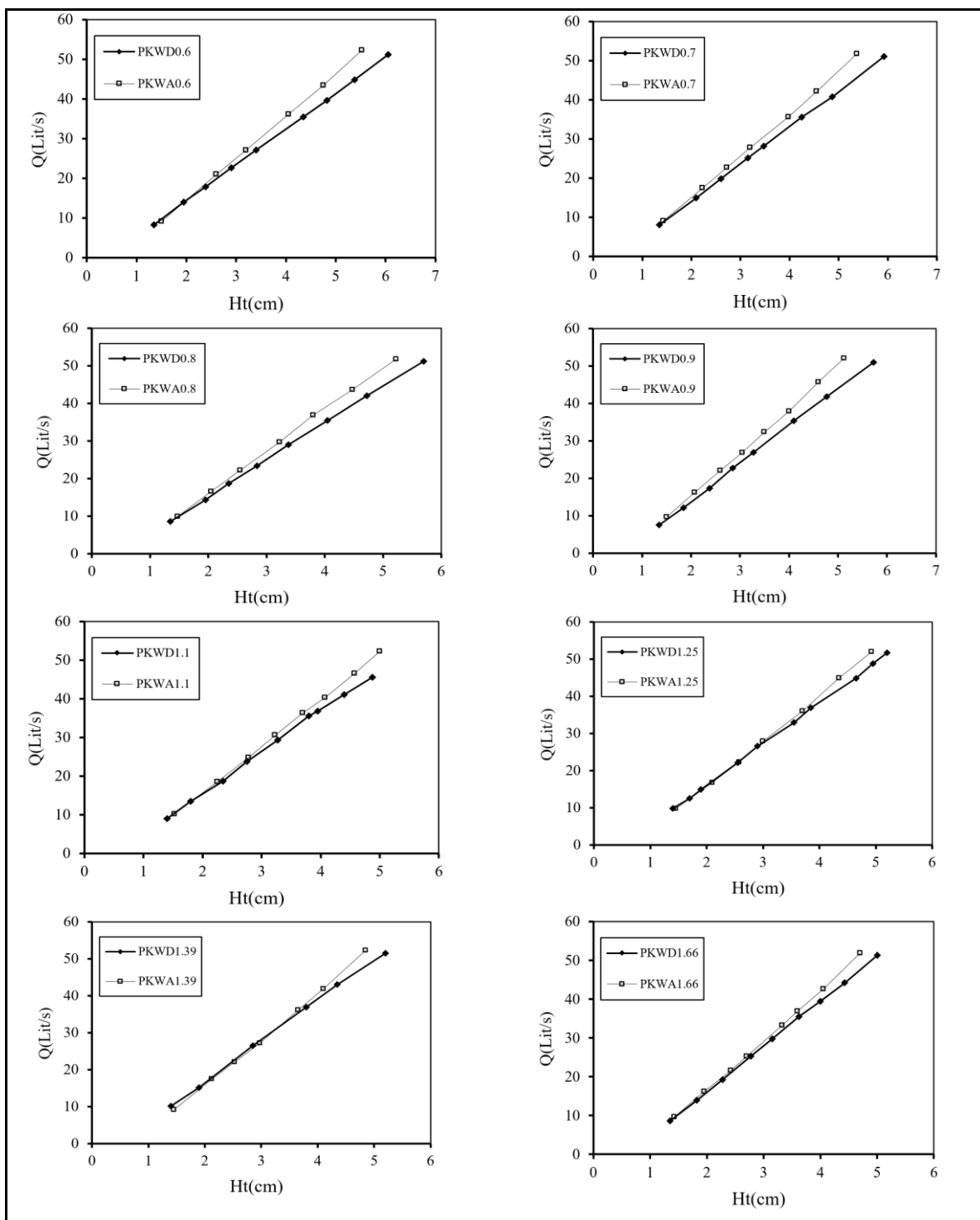
Q_1 و Q_2 = دبی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه؛
و H_{t1} و H_{t2} = بارهای آبی کل متناظر با هر دبی.

نتایج و بحث

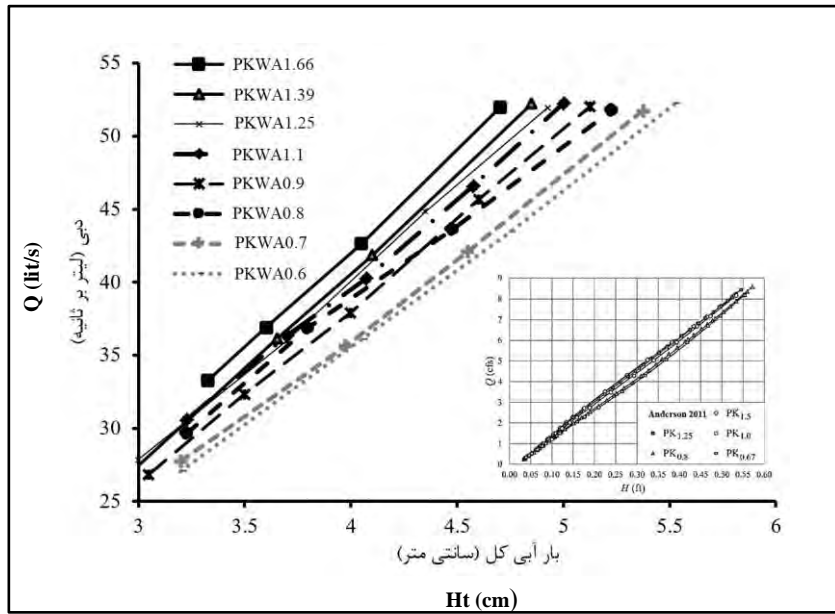
بعد از اجرای آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات، نتایج به‌دست آمده به‌همراه تجزیه و تحلیل‌های مربوطه در سه بخش عملکرد سرریزها، ضریب تخلیه و وقوع جریان موجکی روی سرریزها به‌شرح زیر ارائه می‌شود.

مقایسه عملکرد سرریزها

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. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بارهای آبی کم ($H_t < 3\text{cm}$) هر دو نوع سرریز عملکرد تقریباً یکسانی دارند. ولی با افزایش بار آبی، عملکرد سرریز نوع A از عملکرد سرریز نوع D فاصله می‌گیرد 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



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



شکل ۴- تغییرات ظرفیت تخلیه سرریز نوع A به ازای بار آبی مختلف در مقایسه با آنچه اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) به دست آورده اند

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

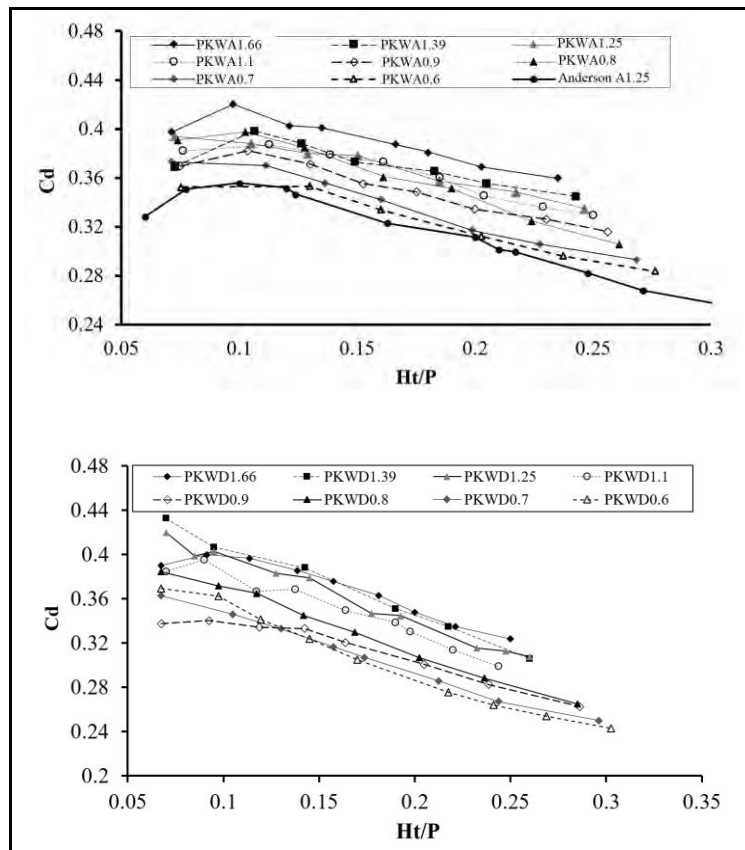
جدول ۲- میزان کاهش عملکرد سرریزها (بر حسب درصد) در مقایسه با عملکرد سرریز PKWA1.66

Table 2- Reduction of weirs performance (in percentage) compared to PKW-A1.66

PKWA _{1.39}	PKWA _{1.25}	PKWA _{1.1}	PKWA _{0.9}	PKWA _{0.8}	PKWA _{0.7}	PKWA _{0.6}	مدل Model
2.06	5	6.56	10.27	15.01	19.66	20.91	

است، ضریب تخلیه (C_d) و نمای H_t دو پارامتر مهم در تخمین دبی عبوری از روی سرریزها هستند. شکل ۵ تغییرات C_d را به ازای H/P نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش H/P تا ۰/۱، مقدار C_d افزایش می یابد و از این نقطه به بعد ($H_t/P > 0.1$) مقدار C_d روند کاهشی پیدا می کند. این نتیجه با نتایج مشاهدات اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) همخوانی دارد.

روند مذکور برای سرریزهای کلید پیمانویی نوع D نیز برقرار است. سرریزهای نوع A، نسبت به سرریزهای نوع D، به ازای بار آبی یکسان قابلیت عبوردهی دبی بالاتری دارند، به طوری که در نسبت های ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱/۱، ۱/۲۵، ۱/۳۹ و ۱/۶۶ به ترتیب ۱۷/۸، ۱۴/۵، ۱۳/۷، ۱۶/۲، ۱۳، ۱۱، ۱۴/۳ و ۱۰/۱ درصد جریان بیشتر را توانسته اند عبور دهند. همان طور که در رابطه ۲ نشان داده شده

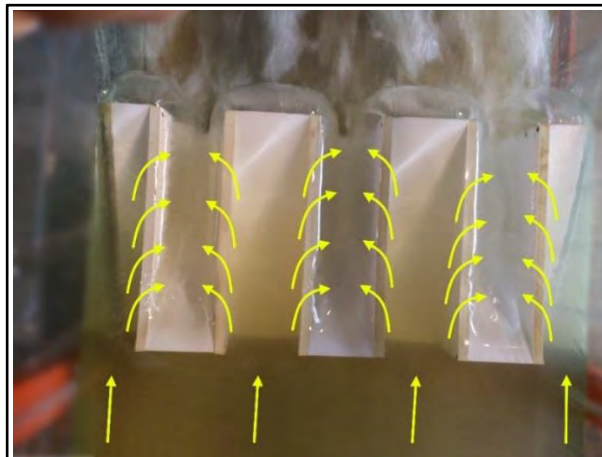


شکل ۵- تغییرات ضریب دبی سرریز نوع A (بالا) و نوع D (پایین) در مقابل بار آبی به‌ازای W_i/W_o های مختلف

Fig. 5- Variations of discharge coefficient of PKW-A (top) and PKW-D (bottom) vs. flow heads for different ratios of w/w_0

به‌گونه‌ای است که جریانی که در راستای شیب در حال حرکت است با جریان سطحی عبوری از تاج جانبی (که دارای سرعت بالایی است) تداخل می‌کند (شکل ۶) و باعث می‌شود تخلیه تاج جانبی در شرایط آزاد صورت نپذیرد. در این حالت، تخلیه از تاج جانبی کم می‌شود و ظرفیت نهایی سرریز کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، کاهش ضریب تخلیه در دبی‌های بالا به‌علت استغراق جریان است.

در تحلیل این فرآیند می‌توان گفت در بارهای آبی کم، خطوط جریان بدون فشردگی و به‌صورت نسبتاً مشابه در طول کل تاج سرریز توزیع می‌شوند. بخش پایین‌دست تاج کلید ورودی عمدتاً با جریان تحتانی و بخش بالادست تاج کلید خروجی عمدتاً با جریان سطحی کنترل می‌شود. در بارهای آبی بالا، توزیع خطوط جریان به‌صورت فشرده است (Machiels, 2012). در واقع، هیدرولیک پدیده



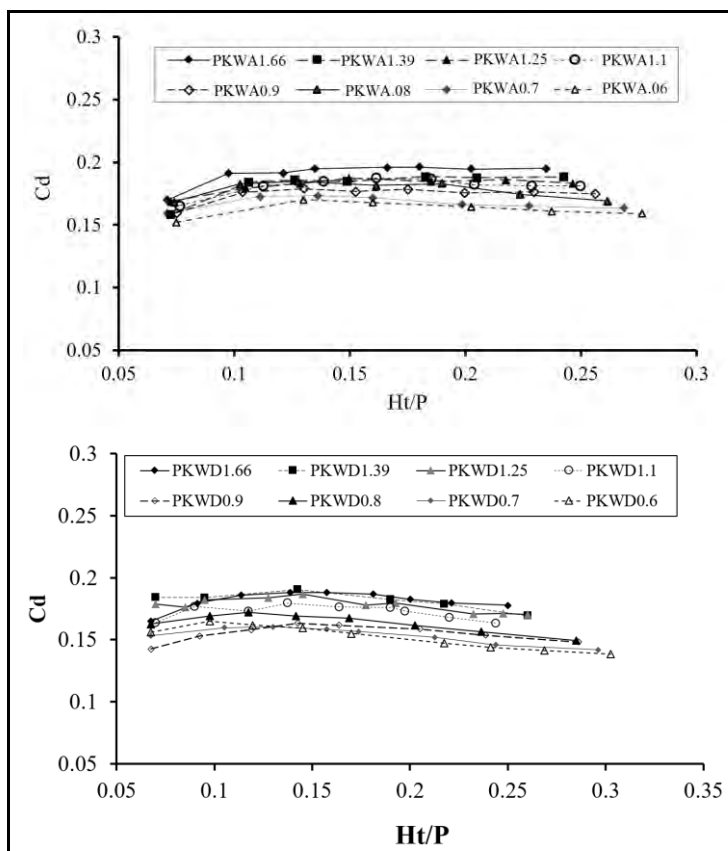
شکل ۶- شماتیک الگوی جریان روی سرریز کلید بیانویی

Fig. 6- Schematic representation of flow pattern over PKW

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نمای بار آبی برای سرریز کلید بیانویی نوع A و D به‌طور متوسط $1/3$ است. با انتخاب نمای $1/3$ برای بار هیدرولیکی، نمودار تغییرات C_d در مقابل H/P به‌صورتی در می‌آید که در شکل ۷ دیده می‌شود و حاکی از پایدار شدن مقدار C_d به‌ازای H/P های مختلف است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها میزان انحراف معیار ضریب دبی، اگر نمای بار آبی $1/3$ فرض شود، بسیار کمتر از حالتی خواهد بود که این نما $1/5$ در نظر گرفته شود.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که نمای بار آبی، بر خلاف آنچه لمپریره و اوآمانه (Lempérière & Ouamane, 2003) ارائه کرده‌اند، ۱ نیست. به‌سختی دیگر، بین بار آبی و دبی رابطه خطی وجود ندارد. مشاهدات آزمایشگاهی همچنین نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست آمده با نمای بار آبی در سرریزهای لبه تیز مستطیلی هم متفاوت است. در سرریزهای مستطیلی، این نما برابر با $1/5$ است که در صورت پذیرفتن آن، بازه‌ای گسترده برای ضریب تخلیه حاصل می‌شود (شکل ۵).



شکل ۷- نمودار تغییرات Cd در مقابل Ht/P به ازای نمای بار هیدرولیکی ۱/۳
 Fig. 7- Variations of Cd vs. Ht/P for Ht with power of 1.3

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

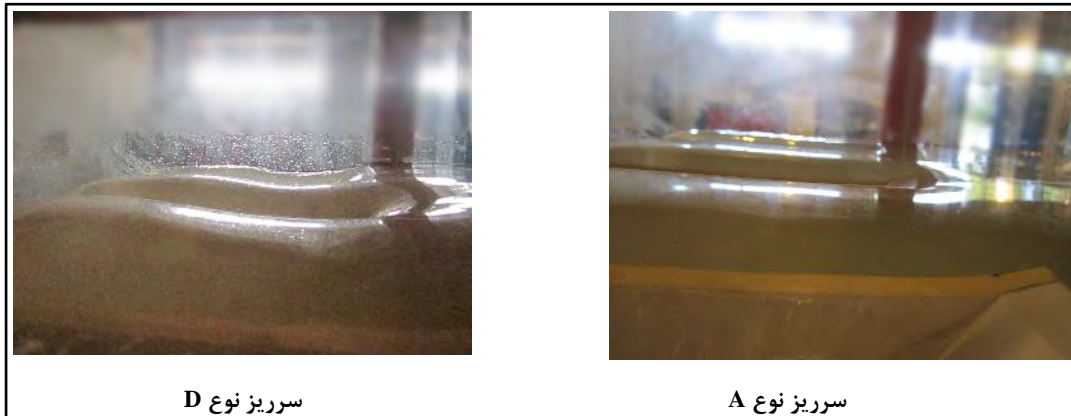
1.66	1.39	1.25	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6	نسبت عرض کلید ورودی به خروجی wi/wo	
0.187	0.163	0.224	0.223	0.23	0.331	0.323	0.294	انحراف معیار ضریب دبی برای ۱/۵ SD of Cd for n=1.5	سرریز کلید
0.064	0.083	0.053	0.048	0.045	0.072	0.054	0.06	انحراف معیار ضریب دبی برای ۱/۳ SD of Cd for n=1.3	پیانویی نوع A PKW-A
0.277	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	سرریز کلید
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

جریان موجکی

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.

بنابراین، رابطه ۴ بهترین رابطه برای محاسبه جریان عبوری از روی سرریز کلید پیانویی ارائه می‌شود. پیشتر پارامترهای این رابطه تعریف شده‌اند.

$$Q = C_d \sqrt{2g} L_e H^{1.3} \quad (4)$$



شکل ۸- سطح جریان هنگام عبور از تاج سرریزهای نوع A و D

Fig. 8- Profile of water surface passing over PKW-A and PKW-D

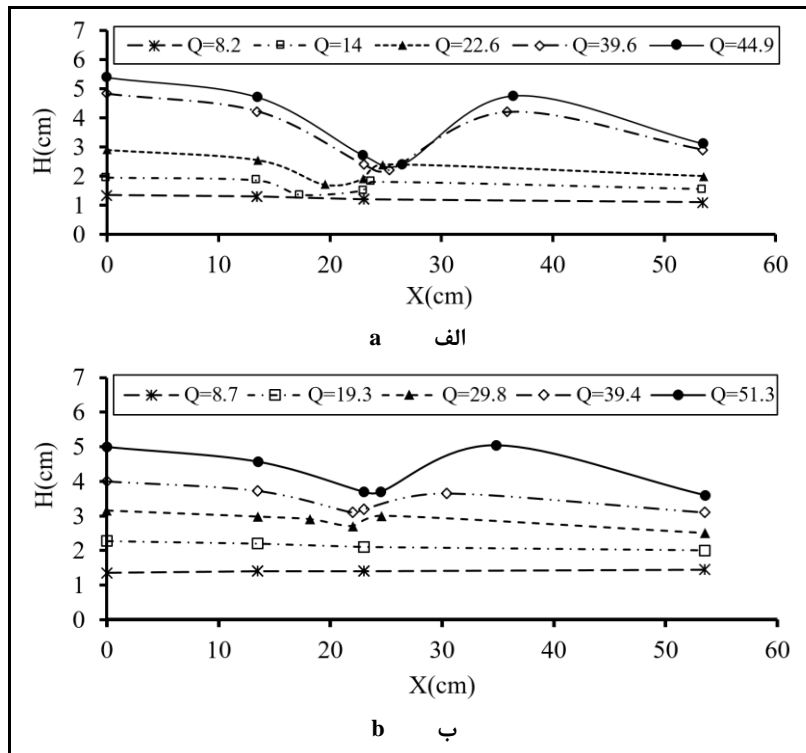
مدل سرریز کلید پیانویی نوع D (مدل‌های PKWD0.6 و PKWD1.66) در دبی‌های مختلف نشان داده شده است. مبدأ مختصات در بالادست سرریز و در فاصله ۱۵ سانتی‌متر از آن در نظر گرفته شده است. در اینجا نیز مشخص است که نیمرخ جریان در دبی‌های پایین (کمتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه) روند طبیعی خود را دارد که هنگام روبه‌رو شدن جریان زیربحرانی با مانع رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، در اثر وجود سرریز در مسیر جریان زیربحرانی، انرژی مخصوص جریان کاهش می‌یابد و سطح آب هنگام عبور از روی سرریز پایین می‌آید. کاهش عمق آب روی تاج سرریز همچنان ادامه پیدا می‌کند و تا رسیدن به عمق بحرانی، پروفیل M2 روی سرریز شکل می‌گیرد. با افزایش دبی جریان، جریان موجکی روی سرریز شکل می‌گیرد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان، موقعیت

این پدیده پیش از این روی سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی با نام جریان موجکی گزارش شده بود (Madadi *et al.*, 2013). در پژوهش حاضر، این پدیده برای اولین بار روی سرریزهای کلید پیانویی نوع D نیز مشاهده شد. جریان موجکی روی سرریز کلید پیانویی نوع A به روشنی قابل دیدن نبود. بر اساس یافته‌های این پژوهش، جریان موجکی روی سرریزهای کلید پیانویی نوع D در محدوده رابطه ۵ شکل می‌گیرد. این رابطه را اولین بار چانسون (Chanson, 1996) برای شکل‌گیری جریان موجکی روی سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی ارائه داده بود:

$$\frac{Le}{(H_t - P)} > 1.5 - 3 \quad (5)$$

در شکل ۹، نیمرخ طولی سطح جریان برای دو

شکل‌گیری موجک به سمت پایین دست جریان تغییر ورودی به خروجی، ابعاد جریان موجکی کاهش مکان می‌دهد. با افزایش نسبت عرض کلیدهای می‌یابد.



شکل ۹- نیمرخ سطح جریان در دبی‌های مختلف: الف) سرریز PKWD0.6 و ب) سرریز PKWD1.66
Fig. 9- Flow surface profile in different flow discharges: a) PKWD0.6 and b) PKWD1.66

نتیجه‌گیری

عبوردهی جریان از روی هر دو نوع سرریز A و D داراست.

- در سرریز مشخص، با کاربرد معادله عمومی سرریزهای لبه تیز مستطیلی، ضریب تخلیه در دبی‌های مختلف روندی ثابت ندارد و مقدار آن نیز ثابت نیست. اگر این رابطه اصلاح شود، می‌توان مقادیر ثابت برای این ضریب تعیین کرد. در پژوهش حاضر، نمای $1/3$ برای سرریز نوع A و D بهترین نمای بار آبی برای محاسبه دبی معرفی شده است.

- جریان روی سرریزهای نوع D نیمرخ موجی شکل

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

- نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی پارامتر بسیار مؤثری در ظرفیت تخلیه سرریزهای کلید پیانویی است و وجود پیشانی نیز می‌تواند در بالا بردن عملکرد سرریز نقش داشته باشد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، سرریز با مشخصه $Wi/W_0 = 1.66$ بهترین عملکرد را در

دارد که با افزایش میزان دبی، ابعاد این موج نیز نامیده می‌شود، روی سرریزهای نوع A دیده افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی، موج ضعیف‌تری ایجاد می‌شود. این پدیده که جریان موجکی نمی‌شود زیرا در این سرریزها، در مقایسه با سرریزهای نوع D، پیشانی وجود دارد و جای پی در آنها کوتاه است.

قدردانی

از داوران گرامی مقاله به دلیل 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 *6th 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., Piroton, 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*, 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 behaviour 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 ($H_t < 3\text{cm}$), 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 W_i/W_o 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