

بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی اصلاح شده

کیومرث روشنگر*^۱، مهدی ماجدی اصل^۲، محمد تقی اعلمی^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲

تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۲

۱-دانشیار گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲-استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه مراغه

۳-استاد گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: kroshangar@yahoo.com

چکیده

امروزه سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور حداکثر سیل محتمل با مشکل روبرو هستند، مطرح می‌شوند. سرریزهای کلید پیانویی (PK) برای جایگزینی سرریزهای کنگره‌ای که در آنها سطح پایه سازه آنها محدود است، توسعه یافته‌اند. در این تحقیق، برای بررسی ضریب دبی و کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی، آزمایش‌هایی بر روی ۱۸ مدل فیزیکی در دو حالت فشردگی و بدون فشردگی جانبی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که در کلیه سرریزهای کلید پیانویی، ضریب دبی و کارایی سیکل در مقابل افزایش نسبت بار آبی (H_T/P) ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی اصلاح شده (افزایش ارتفاع سرریز، تغییر فرم سرریز و نصب پشت‌بند) نسبت به سرریزهای کلید پیانویی اصلاح نشده، به‌طور متوسط ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. در سرریزهای کلید پیانویی با فشردگی جانبی، سرریز PK_{1.25} در نسبت بار آبی کوچک‌تر از ۰/۱۸ بیشترین ضریب دبی را دارد و با افزایش دبی، ضریب دبی آن کاهش می‌یابد. در این سرریزها بر عکس سرریزهای بدون فشردگی جانبی، با افزایش نسبت عرض دهانه‌ها، ضریب دبی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پشت بند- سرریز کلید پیانویی- سرریز کنگره‌ای- ضریب دبی- فشردگی جانبی

Experimental Evaluation of Hydraulic Performance of Modified Piano Key Weirs

K Roushangar^{*1}, M Majedi Asl², MT Alami³

Received: 22 December 2016

Accepted: 2 June 2017

¹-Assoc. Prof., Water. Dept., Faculty of Civil Engineering., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

²-Assis.Prof., Civil. Dept., Faculty of Engineering., Univ. of Maragheh, Maragheh, Iran

³- Prof., Water. Dept., Faculty of Civil Engineering., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding Author, E-mail: kroshangar@yahoo.com

Abstract

Nowadays, Labyrinth and piano key weirs are suggested as appropriate options for modification of those weirs which are faced with the problems as passing the probable maximum flood. Piano key weirs (PKWs) have been developed for the substitution of Labyrinth weirs which their footprint areas are restricted. In this study, to evaluate the hydraulic efficiency and discharge coefficient of the PKWs, totally 377 experiments are conducted on the 18 physical models in both contracted and not contracted PK weirs. From the experimental results, in all PKWs, the discharge coefficient and the efficiency of the cycle by increase of the head water ratio (H_T/P), first increase and then decrease. Nonetheless, discharge coefficient of the modified PKWs (modified by increasing and reshaping the weir crest as well as installing the fillet) was increased by 10% when compared to the non-modified weirs. In the contracted PK weirs, the PK₁ weir at $H_T/P \leq 0.18$, has the highest discharge coefficient, but with the increasing of the discharge, the discharge coefficient decreases and at $H_T/P \geq 0.3$ reaches to the lowest magnitude. Nonetheless, in contrary to the non-contracted weirs, increasing W_i/W_0 leads to discharge coefficient reduction in the contracted weirs.

Keywords: Contracted weir, Discharge coefficient, fillet, labyrinth weirs, piano key weirs

مقدمه

مانند سرریز با تاج اوجی) می‌تواند ضریب دبی را برای یک عرض مشخص و بدون افزایش بار آبی، افزایش دهد. تفاوت سرریزهای خطی و غیرخطی در شکل و اجرای دیواره‌های آنها است. عموماً سرریزهای غیرخطی شامل سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی هستند که در حال حاضر استفاده آنها در سراسر جهان روبه افزایش است. این سرریزها باعث افزایش طول تاج سرریز نسبت به سرریز خطی در یک عرض ثابت می‌شوند و ضریب دبی جریان نسبت به سرریزهای خطی کاهش می‌یابد ولی در این سرریزها به دلیل افزایش طول تاج سرریز، دبی سه تا چهار برابر افزایش خواهد یافت (تولیس و همکاران ۱۹۹۵). در بسیاری از

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای اندازه‌گیری دبی جریان، کنترل سیل، فراهم کردن ذخیره آب، انحراف جریان و تغییر رژیم جریان در کانال‌ها یا رودخانه‌ها به کار برده می‌شوند. دبی جریان در سرریزها به طور مستقیم با طول تاج سرریز متناسب است. در صورتی که عرض کانال یا مخزنی که سرریز بر روی آن اجرا می‌شود محدود باشد، یکی از راه کارهای افزایش ظرفیت جریان، افزایش طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن سرریز در پلان است. به عنوان نمونه می‌توان به سرریز کنگره‌ای آون در کشور استرالیا و سرریز کلید پیانویی گورزادر کشور فرانسه اشاره نمود. سرریزهای غیر خطی نسبت به سرریزهای خطی

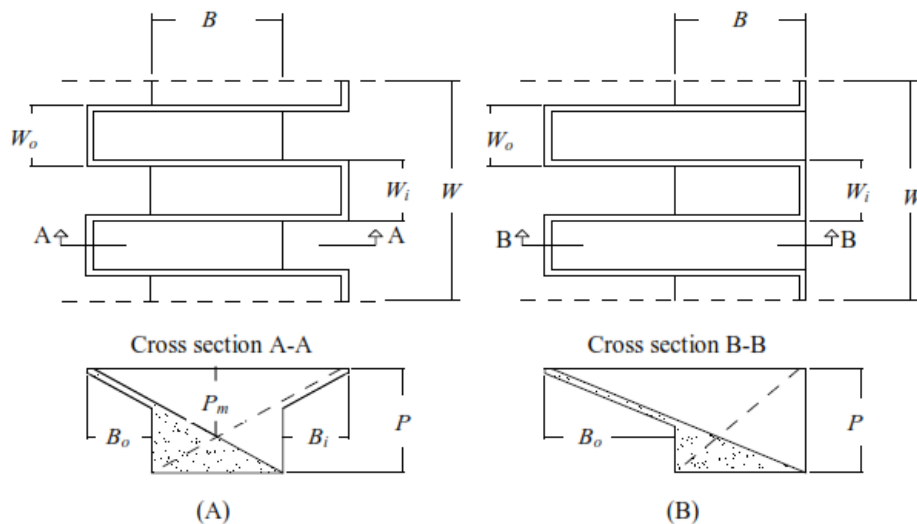
شرایط موجود، سرریزهای کلید پیاپویی جایگزین مناسب و اصلاح شده‌ای برای سرریزهای خطی و سرریزهای کنگره‌ای هستند (ریبریو و همکاران ۲۰۰۷، لمپیریر ۲۰۰۹، هوتاخان و همکاران ۲۰۱۱، لوجیه و همکاران ۲۰۰۹، پینچارد و همکاران ۲۰۱۱ و اریکیوم و همکاران ۲۰۱۱). این نوع سرریزها حساسیت کمتری نسبت به تجمع مواد شناور در سطح آب دارند. همچنین دارای سادگی ساخت، توصیه برتر اقتصادی و سهولت مدیریت بهره‌برداری در مقایسه با گزینه سرریز خطی با کنترل دریچه‌ای هستند (لمپیریر و اومین ۲۰۰۳، لوژیو ۲۰۰۷، ریبریو و همکاران ۲۰۰۹ و ورمیلین و همکاران ۲۰۱۱). در کاربردهای بعضی از سرریزها ممکن است، طول سطح تماس B و عرض W محدود باشد. (عرض سرریز کم باشد). در چنین مواردی مزایای بعضی از سرریزهای کنگره‌ای معمولی از بین خواهد رفت و طراحی سرریزهای غیرخطی جایگزین، بایستی مورد بررسی قرار گیرد. سرریزهای کلید پیاپویی (PK) اخیراً برای جایگزینی سرریزهای کنگره‌ای معمولی توسعه یافته‌اند به خصوص در مواردی که سطح تماس سازه محدود باشد. سرریز کلید پیاپویی نوعی سرریز غیرخطی است (سرریزهای خطی سرریزهایی هستند که در نمایش پلان به صورت خطی بوده و عموماً در راستای عمود بر مسیر جریان اصلی قرار گرفته و خطوط جریان با زاویه ۹۰ درجه سرریز می‌شوند و جریان را می‌توان به صورت دو بعدی بررسی نمود ولی سرریزهای غیر خطی مانند سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیاپویی در نمایش پلان به صورت زیگزاگی بوده و امتداد جریان با دیواره این سرریزها، کمتر از ۹۰ درجه می‌باشد و لذا در چنین سرریزهایی جریان به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد، یانگ ۲۰۰۵) که به طور خاص برای کنترل سازه‌هایی که جریان سطح آزاد با سطح تماس (فوندا سیون) نسبتاً کوچک دارند، ایجاد می‌شود. در حال حاضر، به طور کلی روش طراحی استاندارد برای سرریزهای کلید پیاپویی، موجود نیست؛ هرچند، هیدروکوپ، انجمن سرریزهای سد فرانسه،

طراحی سرریز کلید پیاپویی و رابطه دبی-هد را پیشنهاد کرده است. سه تفاوت اساسی در طراحی سرریزهای پیاپویی نسبت به طراحی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای وجود دارد که شامل موارد زیر است: ۱- سرریز کلید پیاپویی در پلان، یک طرح ساده مستطیلی دارد یعنی زاویه α آن صفر می‌باشد (سرریز کنگره‌ای مستطیلی) ۲- سرریز کلید پیاپویی در دهانه‌های ورودی و خروجی دارای شیب می‌باشد. ۳- جایی که سطح تماس قابل دسترس برای کنترل سازه محدود باشد، سرریز پیاپویی بر روی پایه‌ها قرار گرفته و تاج سرریز در بالادست و پایین دست پایه‌ها می‌تواند طول تاج بیشتری را به وجود آورد. سرریز کلید پیاپویی در ابتدا توسط بلانس در دانشگاه بریسا (الجزایر) و لمپیریر هیدروکوپ (فرانسه) توسعه یافته است، تا کارایی سرریزهای نوع کنگره‌ای با سطح تماس کم را بهبود دهد (لمپیریر و اویمان ۲۰۰۳). مطالعات بیش از ۱۰۰ مدل سرریز کلید پیاپویی تا سال ۲۰۰۰ انجام شده است. ساخت اولین نمونه سرریز کلید پیاپویی، سد گولورز در فرانسه است که در سال ۲۰۰۶ کامل شد. ساخت دومین نمونه سرریز کلید پیاپویی، یعنی سد سنت - مارک در فرانسه، در سال ۲۰۰۸ کامل شد (لوژیو ۲۰۰۷ و لوژیو و همکاران ۲۰۰۹). پارامترهای هندسی مهم (شکل ۱) برای طرح سرریز کلید پیاپویی، شامل ارتفاع سرریز P ، ارتفاع تاج سرریز تا مرکز کف شیب P_m ، طول خط مرکزی تاج L_c ، شیب کف ورودی S_i ، شیب کف خروجی S_o ، طول کل سرریز W ، عرض سرریز B ، طول پیش آمدگی تاج در بالادست یا در خروجی B_o ، طول پیش آمدگی تاج در پایین دست یا در ورودی B_i ، عرض دهانه ورودی w_i ، عرض دهانه خروجی w_o ، ضخامت دیواره T_s ، عرض یک سیکل که در آن $w = w_i + w_o - T_s$ و تعداد سیکل‌ها (N) است. نسبت‌های مهم هندسی شامل طول تاج سرریز به عرض سرریز $(n = L_c / W)$ ، نسبت طول‌های پیش آمدگی بالادست به پایین دست (B_i / B_o) ، نسبت عرض ورودی به خروجی (w_i / w_o) و ضخامت

ندادند. در یک مطالعه انجام شده توسط ایامن و لیمپریر (۲۰۰۶) سه سرریز پیانویی با ۱/۵ و ۱ و ۰/۶۷ w_i/w_o آزمایش شد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش این نسبت، کارایی (دبی) نیز بیشتر می شود. دو نمونه سرریز پیانویی بر روی سدهای گولورز و سنت مارک^۸ با نسبتهای w_i/w_o به ترتیب ۱/۴۳ و ۱/۴۱ ساخته شد (لوژیته ۲۰۰۷ و لوژیته و همکاران ۲۰۰۹). تمامی مطالعات حاکی از آن است که نسبت های w_i/w_o بزرگتر از یک، نتایج بهتری (ضریب دبی) از نسبت های کمتر از یک نشان می دهد.

نسبی دیواره (T/P) است. عموماً دو هندسه اصلی سرریز کلید پیانویی مورد بررسی قرار می گیرد، نوع A که پیش آمدگی^۷ در بالادست و پایین دست برابرند و نوع B که دارای پیش آمدگی بالادست بیشتر و بدون پیش آمدگی در پایین دست است (صرف نظر از نوع سرریز پیانویی شکل، $B_i+B_o =$ معمولاً ثابت).

لیمپریر و جان (۲۰۰۵) و بارکودا و همکاران (۲۰۰۶) پیشنهاد دادند که $w_i/w_o = 1/2$ حالت بهینه است. هن و همکاران (۲۰۰۶) حالت $w_i/w_o = 1/5$ را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که $w_i/w_o = 1/2$ احتمالاً کارایی بیشتری دارد، اگر چه هیچ اطلاعاتی در مورد داده ها ارائه



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A و نوع B

H_T/P بالا، مقادیر n بالا، نتایج خوبی را از خود نشان نمی دهد همچنین آنها با بررسی سه سرریز کلید پیانویی مختلف با ثابت بودن تمامی پارامترهای هندسی به جز P و شیب کف، به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع تا ۲۵ درصد، کارایی ۶ درصد افزایش می یابد. با تغییرات دو پارامتر، معلوم نیست که افزایش کارایی مربوط به P است یا مربوط به شیب است. نصب یک پشت بند سرریز^۹ به شکل نیم استوانه ای به پایه های پیش آمدگی در بالادست سرریز، شرایط جریان ورودی به سیکل را بهبود می بخشد و کارایی سرریز را افزایش می دهد (شکل

لیمپریر و جان (۲۰۰۵) محدوده n را مابین ۴ تا ۷ پیشنهاد دادند و حداقل شیب کف ۱:۲ را توصیه کردند (عمودی-افقی). لیمپریر (۲۰۰۹) پیشنهاد مذکور را تصحیح کرد که $n=5$ تقریباً بهینه می باشد. بارکودا و همکاران (۲۰۰۶) مقدار $n=6$ را برای حالت بهینه و افزایش ۲۰ درصدی کارایی دبی (برای مقادیر H_T/P بالا) بوسیله افزایش شیب از ۱:۲ به ۲:۳ را گزارش دادند که این نتیجه شامل هر دو نوع سرریز A و B می باشد. ایامن و لیمپریر (۲۰۰۶) دریافتند که برای H_T/P های کم، مقادیر n بالا ($n=8/5$) نتایج بهتری می دهد. هر چند که در

9- Fillet

7- Ger hangs

8- Saint-Marc dam

متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸ متر با سیستم جریان آزاد انجام گردید. فلوم دارای دیواره‌های از جنس پلاکسی گلاس و کف فلزی (گالوانیزه) است که برای تامین دبی از پمپ با قابلیت تغییر دبی استفاده شد. فلوم در بالادست به یک منبع آرام کننده جریان مجهز بوده و برای آرام کردن تلاطم جریان از دو صفحه مشبک، در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از یک صفحه شناور بر روی سطح آب استفاده گردید. جریان آب پس از عبور از طول فلوم به داخل مخزنی در پایین دست ریخته شده و این سیکل چرخشی توسط پمپ تکرار گردید. برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال از دبی سنج آلتراسونیک نصب شده بر روی لوله مکش پمپ استفاده شد و برای واسنجی دبی سنج، از روش حجمی استفاده شد. برای اندازه‌گیری عمق آب از عمق‌سنج با دقت $\pm 1/8$ mm استفاده شد. این عمق‌سنج قادر بود در طول و عرض کانال حرکت کرده و ارتفاع تاج سرریز و عمق آب در کل کانال را اندازه‌گیری کند. در این تحقیق شیب فلوم برای تمامی آزمایش‌ها افقی در نظر گرفته شد. تمامی مدل‌ها بر روی یک صفحه افقی مسطح^۲ به ارتفاع ۱۰ سانتی-متری نصب گردیده و یک صفحه شیب دار^۳ با زاویه ۵ درجه نسبت به افق، کف فلوم را به صفحه افقی مسطح متصل کرده تا خطوط جریان به طور موازی از کف کانال به صفحه افقی جریان یابد. بر مبنای یافته‌های ویلمور (۲۰۰۴) که اثرات صفحه شیب‌دار بالادست سرریزهای کنگره‌ای را مورد آزمون قرار داده است، نصب و هندسه این صفحه شیب‌دار تاثیری بر روی کارایی هیدرولیکی (دبی و ضریب دبی) مدل‌های فیزیکی ندارد. در هر دبی مشخص و برای اطمینان از جریان پایدار در فلوم، اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی پس از ده دقیقه از روشن شدن پمپ انجام می‌گرفت. برای کنترل رقوم سطح آب در فلوم از یک دریچه در پایین دست فلوم استفاده شد. نمای شماتیک مجموعه آزمایشگاهی در شکل ۲ آورده شده است.

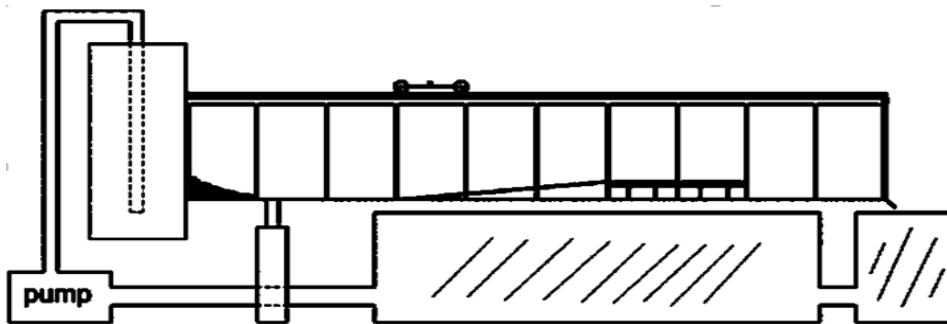
۳-د). بارکودا و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که با نصب پشت بند در بالادست سرریز و بهبود تاج سرریز، کارایی به مقدار کمی افزایش می‌یابد. هر دو سد گولورس و سنت مارک از پشت بند سرریز استفاده نمودند با اینکه هیچ اطلاعاتی در حالت بدون پشت‌بند سرریز در مورد کارایی دبی منتشر نگردیده است (لوژی ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹). شکل تاج سرریز یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر روی کارایی دبی است. نتایج مطالعه بارکودا و همکاران (۲۰۰۶)، ریبیرو و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که اگر بالادست تاج ربع دایره‌ای باشد، کارایی بیشتر خواهد بود هرچند که نسبت تغییرات کارایی دبی در تاج‌های مختلف را ارائه ندادند. تاثیر اضافه کردن دیواره لبر روی تاج نرمال سرریز کلید پیانویی توسط ریبیرو و همکاران (۲۰۰۹) به عنوان بخشی از مطالعه مدل سرریز پیانویی اترویت^۱ ارزیابی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دیواره به تاج سرریز کلید پیانویی حدود ۱۲/۳ درصد (یک متر در نمونه اصلی)، ۱۵ درصد کارایی دبی نسبت به حالت بدون دیواره افزایش می‌یابد. با وجود مطالعات قبلی که در بالا اشاره شد، یک روش طراحی استاندارد قابل قبول برای سرریزهای کلید پیانویی وجود ندارد که بخشی از علت آن مربوط است به تعداد زیاد پارامترهای هندسی (مانند شکل تاج، دیواره، B_i/B_o ، W_i/W_o ، شیب کف و پیش آمدگی و غیره) و محدودیت درک تاثیر آنها بر روی کارایی سرریز کلید پیانویی. در این تحقیق با تغییر پارامترهای هندسی و اصلاح سرریزهای کلید پیانویی (الف: افزایش ارتفاع سرریز ب: نصب پشت بند به پایه‌های پیش آمدگی ج: تغییر فرم تاج سرریز)، عملکرد این سرریزها در دو حالت بدون فشردگی جانبی و فشردگی جانبی (شکل ۳)، در کانال مورد بررسی قرار گرفته و با سرریزهای خطی مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه تبریز و در فلومی به طول ۱۰

1 - Batforn 2
1 - Rmp 3

1 - Prapet wall 0
1 - froit 1



شکل ۲- نمای شماتیک از فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_T^{\frac{3}{2}} \quad [1]$$

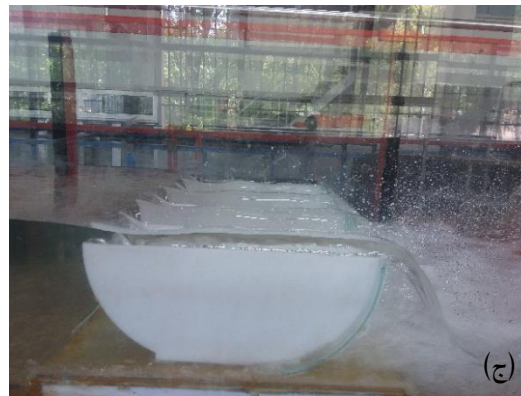
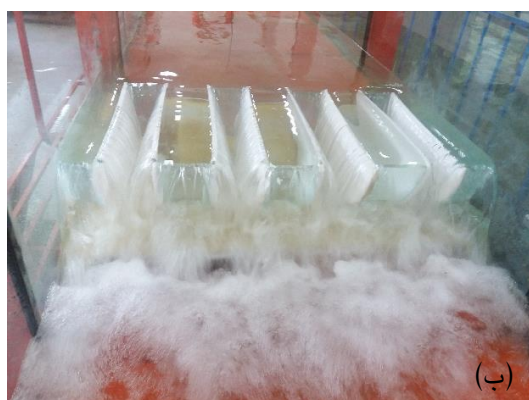
که در این رابطه Q ، دبی عبوری از روی سرریز کلید پیانویی بر حسب متر مکعب بر ثانیه، L طول تاج سرریز بر حسب متر، H_T ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز بر حسب متر، C_d ضریب دبی و g شتاب ثقل است. در جدول (۱)، مشخصات ۱۸ مدل آزمایشگاهی پیاده شده در فلوم آورده شده است.

همان‌گونه که از جدول ۱ مشخص است، چهار نسبت مختلف w_i/w_o (۱/۴، ۱/۲۵، ۱ و ۰/۷۵) برای بررسی اثر نسبت دهانه‌های ورودی به خروجی انتخاب گردیده و شیب دهانه‌های ورودی و خروجی در سه حالت مختلف، $S=1:1$ و $S=1:5$ و فرم منحنی وار (ربع دایره) بررسی شده است. حالت اصلاح شده سرریزهای کلید پیانویی (تأثیر همزمان افزایش ۱۱/۵ درصدی ارتفاع سرریز و تغییر فرم تاج سرریز از حالت مسطح به حالت ربع دایره‌ای، نصب پشت بند) و به تعداد ۲ و ۴ سیکل مورد بررسی قرار گرفته و در پایان تأثیر فشردگی جانبی سرریزها بر روی ضریب دبی و کارایی هیدرولیکی این سرریزها بررسی گردیده است. در جدول ۱، حرف M بیانگر سرریزهای اصلاح شده است^{۱۴} و منظور از سرریز PKC این است که در دهانه‌های ورودی و خروجی سرریز کلید پیانویی به جای شیب از منحنی (ربع دایره) استفاده شده است (شکل ۳-ب و ج). ویژگی منحنی این است که در ابتدا، شیب تند بوده و در امتداد جریان، شیب منحنی کمتر می‌شود.

در این تحقیق ۱۸ مدل آزمایشگاهی مختلف ساخته شده و در مجموع ۳۷۷ آزمایش انجام گردید که خلاصه‌ای از مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کلید پیانویی در جدول ۱ ارائه شده است. نسبت بزرگ‌نمایی طول تاج سرریز ($n=L_o/W$) در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر ۴/۹۲ است و تمامی سرریزهای بررسی شده از نوع A بوده (شکل ۱) که طول پیش‌آمدگی تاج در بالاست یا خروجی (B_o) و در پایین دست یا ورودی (B_i) برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر و طول پایه (B) برابر ۲۵ سانتی‌متر و طول کل سرریز (B_i) برابر ۵۰ سانتی‌متر است ($B_i = B + B_i + B_o = 50\text{cm}$). در این تحقیق سرریزهای کلید پیانویی در دو حالت بررسی شد: الف- بدون فشردگی جانبی که در این حالت ۴ سیکل در کل عرض کانال نصب و اجرا شد. ب- با فشردگی جانبی که در این حالت کانال از هر دیواره ساحلی ۲۵ سانتی‌متر فشرده شده و تعداد ۲ سیکل در ۵۰ سانتی‌متر باقیمانده در وسط کانال نصب و بررسی گردید (شکل ۳-الف و ب). مدل‌های سرریز از جنس پلی‌اتیلن و با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شد. سرریزها در فاصله ۷ متری از بالادست کانال نصب شدند و بعد از استقرار جریان پایدار، اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی انجام پذیرفت. محدوده تغییرات دبی ۱۰ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه بوده و برای محاسبه ضریب جریان (C_d) در سرریزهای کلید پیانویی از معادله عمومی جریان روی سرریزها مطابق رابطه زیر استفاده شده است (تولیس و همکاران ۱۹۹۵).

جدول ۱- مشخصات مدل‌های فیزیکی ساخته شده در این تحقیق.

شماره مدل	نام مدل	w_i/w_o	$P_{(cm)}$	$S_i:S_o$	W	فرم تاج	پشت‌بند	تعداد سیکل
۱	Linear	-	۲۰	-	۱۰۰	مسطح	-	-
۲	Linear M	-	۲۲/۳	-	۱۰۰	ربع دایره‌ای	-	-
۳	PK _{1,4}	۱/۴	۲۰	۱:۱/۵	۱۰۰	مسطح	-	۴
۴	PK _{1,4} M	۱/۴	۲۲/۳	۱:۱/۵	۱۰۰	ربع دایره‌ای	✓	۴
۵	RLW	۱	۲۰	-	۱۰۰	مسطح	-	۴
۷-۶	PK _{1,25}	۱/۲۵	۲۰	۱:۱/۵	۵۰-۱۰۰	مسطح	-	۲-۴
۸	PK _{1,25} M	۱/۲۵	۲۲/۳	۱:۱/۵	۱۰۰	ربع دایره	✓	۴
۱۱-۱۰-۹	PK ₁	۱	۲۰	۱:۱/۵-۱:۱/۵-۱:۱	۵۰-۵۰-۱۰۰	مسطح	-	۲-۲-۴
۱۲	PK ₁ M	۱	۲۲/۳	۱:۱/۵	۱۰۰	ربع دایره	-	۴
۱۴-۱۳	PKC ₁	۱	۲۰	منحنی	۵۰-۱۰۰	مسطح	✓	۴-۲
۱۵	PKC ₁ M	۱	۲۲/۳	منحنی	۱۰۰	ربع دایره	-	۴
۱۷-۱۶	PK _{0,75}	۰,۷۵	۲۰	۱:۱/۵- ۱:۱	۵۰-۵۰	مسطح	✓	۲-۲
۱۸	PKC _{0,75}	۰,۷۵	۲۰	منحنی	۵۰	مسطح	-	۲



شکل ۳- (الف) فشرده‌گی جانبی در کانال، (ب و ج) سرریز کلید پیمانویی منحنی‌وار PKC و (د) سرریز اصلاح شده.

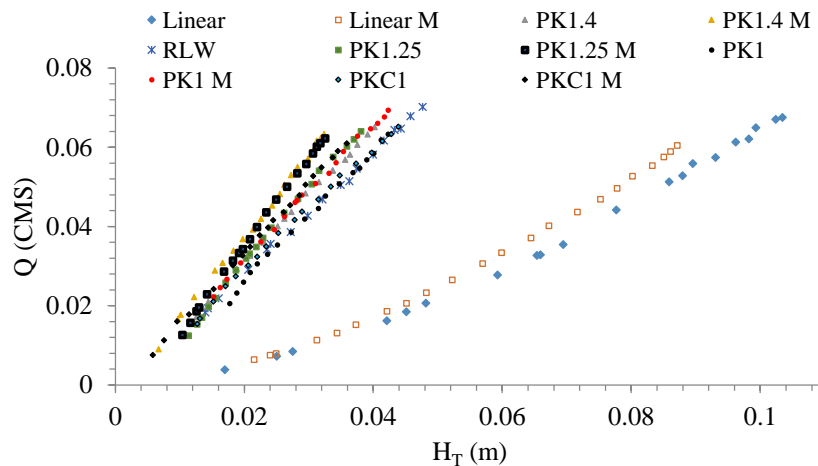
نتایج و بحث

سرریزهای کلید پیانویی در کانال

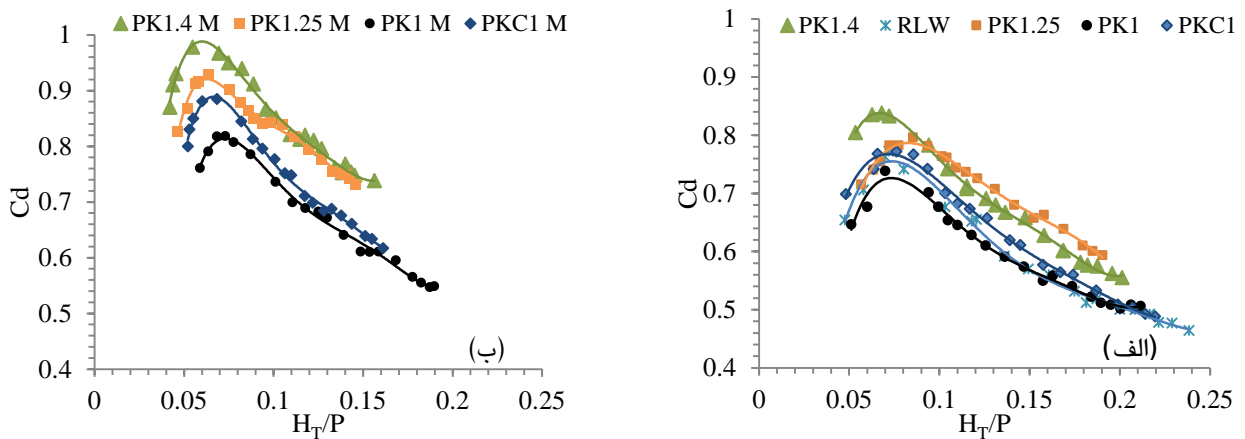
در این بخش از تحقیق سرریزهای کلید پیانویی نصب شده در تمام عرض کانال ($W=1\text{ m}$) و به تعداد چهار سیکل و ارتفاع ۲۰ و $22/3$ سانتی‌متر و با نسبت‌های مختلف w_i/w_o و شیب‌های متفاوت در دهانه‌ها و دو نوع تاج سرریز و نصب پشت‌بند مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۴ منحنی تغییرات دبی تمامی سرریزها نسبت به بار آبی ترسیم شده است. به طوری که مشاهده می‌شود به ازاء یک بار ثابت، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین سرریزهای کلید پیانویی و سرریزهای خطی وجود دارد که به عنوان نمونه در بار آبی ۴ سانتی‌متر، دبی سرریز خطی و سرریز کلید پیانویی نوع PK_{1M} به ترتیب ۱۵ و ۶۰ لیتر بر ثانیه است و در بین تمامی مدل‌ها، سرریزهای $PK_{1.25M}$ و $PK_{1.4M}$ بیشترین ظرفیت انتقال دبی را دارند. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که بیشترین ضریب دبی سرریزها در $H_T/P=0.075$ بوده و با افزایش نسبت بار آبی، ضریب دبی سرریزهای خطی برعکس سرریزهای کلید پیانویی افزایش می‌یابد. ضریب دبی سرریز خطی اصلاح شده^۵ (با افزایش $11/5$ درصدی ارتفاع سرریز و تغییر فرم تاج سرریز به ربع دایره‌ای) نسبت به سرریز خطی نرمال حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. در شکل ۵-الف تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی بدون اصلاح شده ترسیم شده است و به طوری که مشخص است در نسبت‌های کم H_T/P سرریز کلید پیانویی $PK_{1.4}$ بیشترین ضریب دبی را از خود نشان می‌دهد ولی با افزایش 0.1 $H_T/P >$ ضریب دبی سرریز نوع $PK_{1.25}$ بیشتر از بقیه سرریزها است که چنین پدیده‌ای در نتایج اندرسون (۲۰۱۱) برای $PK_{1.5}$ و $PK_{1.25}$ در $H_T/P=0.6$ اتفاق افتاده است و با نتایج ایامن و لمپریر (۲۰۰۶) مطابقت دارد. بعد از سرریزهای $PK_{1.25}$ و $PK_{1.4}$ سرریز PK_C عملکرد بهتری نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی (RLW)

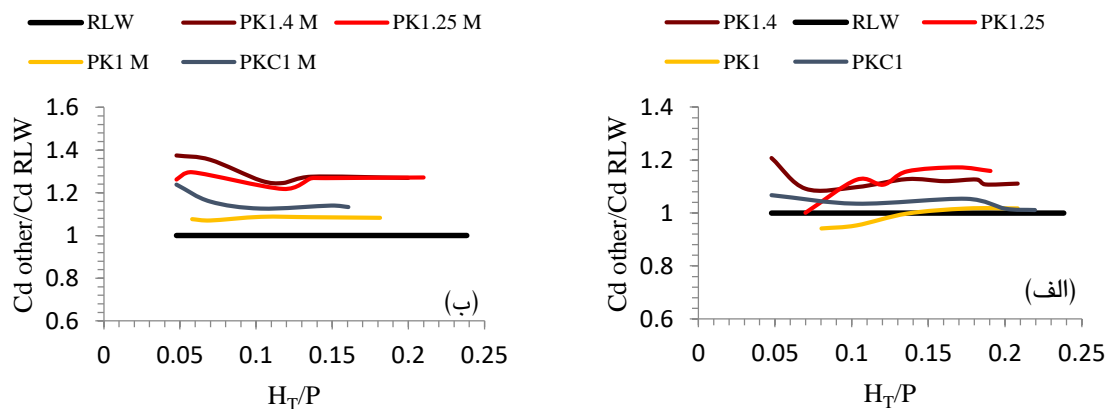
و PK_1 نشان می‌دهد. در شکل ۴-د تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی اصلاح شده نمایش داده شده است که به ترتیب سرریزهای $PK_{1.25M}$ ، $PK_{1.4M}$ ، PK_{1M} و $PK_{1.25M}$ بیشترین ضریب دبی را از خود نشان می‌دهند. سرریزهای $PK_{1.25M}$ و $PK_{1.4M}$ در نسبت‌های $H_T/P > 0.15$ دارای ضرایب دبی نزدیکی می‌باشند و مقایسه شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان می‌دهد که سرریزهای اصلاح شده ۵ تا ۱۵ درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای اصلاح نشده دارند. دلیل تاثیر نسبت‌های مختلف w_i/w_o بر روی راندمان دبی سرریزهای کلید پیانویی را می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش عرض سیکل ورودی، اثر افت انرژی مربوط به جریان ورودی در سیکل‌های ورودی کاهش می‌یابد و در نتیجه ظرفیت انتقال جریان در سیکل ورودی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عرض سیکل ورودی، عرض سیکل خروجی کاهش می‌یابد (با $w_i+w_o =$ مقدار ثابت) و با کاهش عرض خروجی، جریان بیشتری به سمت سیکل ورودی مجاور وارد شده و دبی دهانه خروجی کمتر شده و در نتیجه استغراق موضعی در سیکل‌های خروجی کمتر و ضریب دبی افزایش می‌یابد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که افزایش دبی در این سرریزها باعث کاهش کارایی دماغه‌های بالادست به دلیل استغراق موضعی در بالادست سیکل‌های خروجی می‌شود ولی این پدیده در دهانه‌های پایین دست مشاهده نگردید. شکل ۶-الف نشان می‌دهد که ضریب دبی تمامی سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی بیشتر است (غیر از سرریز PK_1 و فقط در محدوده $H_T/P < 0.1$) که بیانگر این است که وجود پیش‌آمدگی و نسبت‌های $w_i/w_o > 1$ و شیب‌های ورودی و خروجی در دهانه‌ها، بر روی کارایی سرریزهای کلید پیانویی تأثیر مثبتی دارند و شکل ۶-ب تأثیر اصلاح سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی (با طول تاج برابر) را نشان می‌دهد.



شکل ۴- منحنی تغییرات دبی انواع سرریزها نسبت به بار آبی.



شکل ۵- منحنی تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت بار آبی (الف)، سرریزهای اصلاح نشده (ب) سرریزهای اصلاح شده.

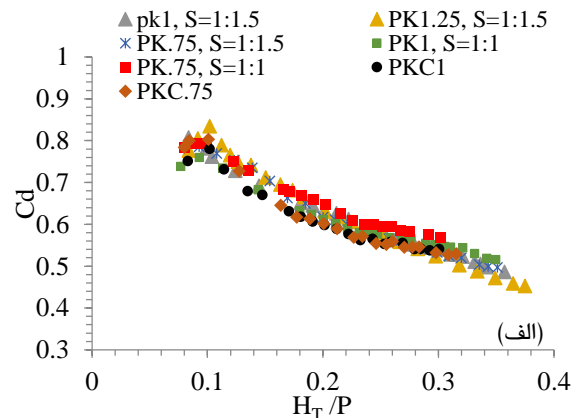
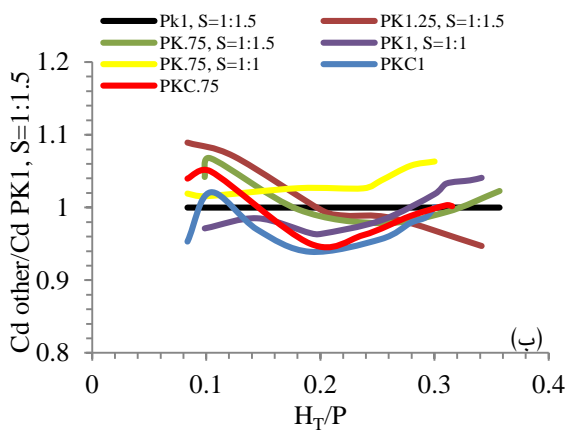


شکل ۶- تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید بیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی (الف)، سرریزهای اصلاح نشده (ب) سرریزهای اصلاح شده.

ورودی به دهانه ورودی هم بیشتر از حالت $w_i/w_o < 1$ است به عبارتی جریان بیشتری به کلیدهای خروجی، سرریز می شود، لذا در چنین حالتی دهانه‌های خروجی زودتر به حالت استغراق موضعی رسیده و باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. ولی در شرایط $w_i/w_o < 1$ عرض دهانه‌های خروجی بیشتر بوده و استغراق موضعی کمتر اتفاق افتاده و در نتیجه کارایی سرریز در این حالت بیشتر از حالت $w_i/w_o > 1$ است. شکل ۷-ب تغییرات ضریب دبی سرریزهای مختلف نسبت به سرریز PK_1 با شیب ۱:۱/۵ (شاهد) را نشان می‌دهد. به طوری که مشاهده می‌شود سرریز $PK_{0.75}$ با شیب ۱:۱ در $H_T/P > 0.2$ دارای بیشترین ضریب دبی بوده و سرریز $PK_{1.25}$ در دبی‌های کم دارای ضریب دبی بیشتری بوده ولی با افزایش دبی، کارایی هیدرولیکی آن کاهش چشمگیری داشته است. ضریب دبی سایر سرریزها در $H_T/P > 0.3$ نسبت به سرریز شاهد بیشتر بوده و روند افزایشی دارند.

سرریزهای کلید پیانویی با فشردگی جانبی در کانال

در این بخش از تحقیق سرریزهای کلید پیانویی نصب شده در کانال (دو سیکل) با فشردگی ۲۵ سانتی‌متر از هر دیواره ساحلی و ارتفاع سرریزها ۲۰ سانتی‌متر و با نسبت‌های مختلف w_i/w_o و شیب‌های متفاوت در دهانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۷-الف تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در مقابل نسبت بار آبی را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشخص می‌شود که در دبی‌های کم ضریب دبی سرریز $PK_{1.25}$ بیشتر از بقیه سرریزها است ولی با افزایش دبی، ضریب دبی این سرریز کاهش یافته به طوری که در $H_T/P > 0.3$ کمترین ضریب دبی را دارد که علت آن را با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی (شکل ۳-الف) می‌توان چنین بیان نمود که در دبی‌های بیشتر، جریان ورودی از سمت دیواره‌های ساحلی به اولین دهانه خروجی زیاد بوده (عمود بودن جهت جریان نسبت به تاج سرریز) و در شرایط $w_i/w_o > 1$ جریان



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت بار آبی (الف). تغییرات ضریب دبی سرریزهای مختلف نسبت به سرریز PK_1 با شیب ۱:۱/۵ (ب).

$$\dot{E} = C_d \times M \quad [2]$$

در شکل ۸ تغییرات کارایی سیکل به صورت تابعی از نسبت بار آبی (H_T/P) نشان داده شده است. به طوری که مشاهده می‌شود کارایی سرریزهای کلید پیانویی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سرریزهای خطی بیشتر بوده (برعکس ضریب دبی) به طوری که کارایی سیکل

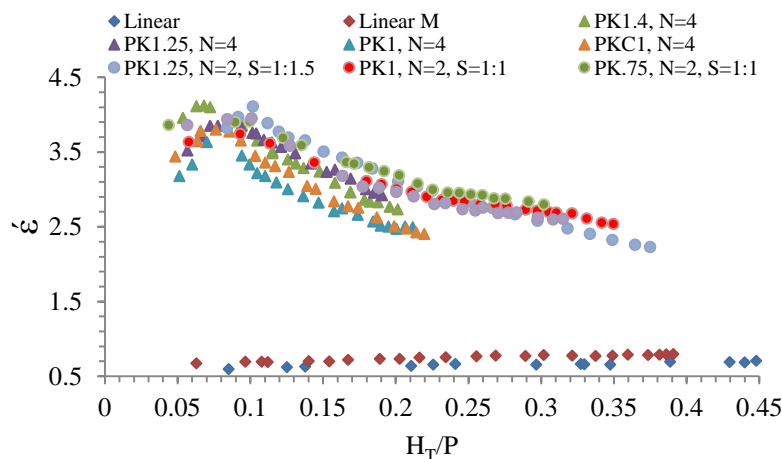
مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی

با فشردگی و بدون فشردگی جانبی

برای مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی با فشردگی و بدون فشردگی جانبی از پارامتر کارایی سیکل (\dot{E}) (ویلمور ۲۰۰۴) استفاده شد (رابطه ۲). در محاسبه این پارامتر، $M=L/W$ نسبت بزرگنمایی است:

جهت جریان آب از سمت دیواره‌های ساحلی به سمت سیکل‌های خروجی با زاویه حدود ۹۰ درجه بوده در حالی که در سرریزهای بدون فشردگی جانبی جریان نزدیک شونده با زاویه کمتر وارد سیکل‌ها می‌شود لذا ضریب دبی و کارایی هیدرولیکی سرریزهای با فشردگی جانبی بیشتر از سرریزهای بدون فشردگی جانبی است.

سرریزهای کلید پیانویی در $H_T/P=0/1$ و $H_T/P=0/3$ به ترتیب حدود ۵ و ۳/۵ برابر سرریزهای خطی است. در دبی‌های کم، فشردگی جانبی تأثیری بر روی کارایی هیدرولیکی سرریزها نداشته ولی در نسبت‌های $H_T/P > 0/15$ سرریزهای کلید پیانویی با فشردگی جانبی دارای کارایی هیدرولیکی بهتری نسبت به سرریزهای بدون فشردگی است. در سرریزهای با فشردگی جانبی



شکل ۸- تغییرات کارایی سیکل (ϵ) بصورت تابعی از H_T/P .

سرریز نسبت به سرریز $PK_{1.25}M$ در مقادیر $H_T/P > 0/1$ کمتر می‌شود. سرریز $PKC_{1.4}M$ نسبت به سرریز $PK_{1.25}M$ با شیب ۱:۱/۵ دارای راندمان بهتری است. ضریب دبی تمامی سرریزهای مورد آزمایش نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی بیشتر بوده (غیر از سرریز PK_1 و در محدوده $H_T/P < 0/13$) و علت آن را می‌توان چنین بیان کرد که وجود پیش‌آمدگی در بالادست سرریزهای کلید پیانویی باعث بهتر شدن شرایط جریان ورودی و باعث کاهش افت جریان ورودی به سیکل‌ها می‌شود و همچنین به دلیل وجود شیب در کلیدهای ورودی و خروجی، ضریب دبی این سرریزها افزایش می‌یابد. در سرریزهای کلید پیانویی با فشردگی جانبی، سرریز $PK_{1.25}$ در $H_T/P < 0/18$ بیشترین ضریب دبی را داشته ولی با افزایش دبی، ضریب دبی آن کمتر شده و در $H_T/P > 0/3$ کمترین ضریب دبی را دارد. به‌طور کلی در سرریزهای کلید پیانویی با فشردگی جانبی برعکس سرریزهای بدون فشردگی جانبی، با افزایش w_i/w_o

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی بر روی سرریزهای کلید پیانویی در دو حالت فشردگی جانبی و بدون فشردگی جانبی در کانال مورد بررسی قرار گرفته و با سرریزهای خطی مقایسه گردید. در سرریزهای کلید پیانویی بدون فشردگی جانبی و اصلاح نشده در $H_T/P < 0/1$ سرریز $PK_{1.4}$ و در $H_T/P > 0/1$ سرریز $PK_{1.25}$ کارایی هیدرولیکی بیشتری نسبت به سایر سرریزها دارد. که چنین پدیده‌ای در نتایج اندرسون (۲۰۱۱) برای $PK_{1.25}$ و $PK_{1.5}$ در $H_T/P = 0/6$ اتفاق افتاده است و با نتایج ایامن و لمپریر (۲۰۰۶) مطابقت دارد. در صورت ثابت بودن w_i/w_o ضریب دبی سرریز PKC حدود ۳ درصد بیشتر از سرریزهای PK با شیب ۱:۱/۵ است. در سرریزهای کلید پیانویی اصلاح شده، حدود ۵ تا ۱۵ درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی اصلاح نشده مشاهده می‌شود. ضریب دبی $PK_{1.4}M$ بیشتر از بقیه سرریزها بوده و برتری این

با فشردگی جانبی بیشتر از سرریزهای بدون فشردگی جانبی است.

ضریب دبی کاهش می‌یابد. کارایی سیکل سرریزهای کلید پیانویی حدود ۲ تا ۵ برابر سرریزهای خطی بوده و در دبی‌های زیاد، کارایی سیکل سرریزهای کلید پیانویی

منابع مورد استفاده

- Anderson RM, 2011. Piano key weir head discharge relationships. M.Sc. thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Barcouda M, Cazaillet O, Cochet P, Jones B A, Lacroix S, Laugier F, Odeyer C and Vingny J P, 2006. Cost-effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or P.K. weirs. Proc. of the 22nd Congress of ICOLD., Barcelona, Spain.
- Erpicum S, Nagel V and Laugier F, 2011. Piano Key Weir design of Raviege dam. Pp. 43-50 Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press.
- Ho Ta Khanh M, Sy Quat D and Xuan Thuy D, 2011. P.K. weirs under design and construction in Vi-etnam. Pp. 225-232, Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press.
- Hien TC, Son HT and Ho Ta Khan M, 2006. Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam. Proc. of the 22nd Congress of ICOLD, Barcelona, Spain.
- Laugier F, Lochu A, Gille C, Leite Ribeiro M and Boillat JL, 2009. Design and construction a labyrinth PKW spillway at St-Marc dam, France. *Hydropower & Dams* 15(5), Pp. 100-107.
- Laugier F, 2007. Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *Hydropower & Dams* 13(5), Pp.94-100.
- Lempérière F, 2009. New Labyrinth weirs triple the spillways discharge. <<http://www.hydrocoop.org>> (Feb. 8, 2009).
- Lempérière F, Ouamane A, 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hydropower & Dams* 9(5), Pp.144-149.
- Lempérière F, Jun G, 2005. Low Cost Increase of Dams Storage and Flood Mitigation: The Piano Keys weir. Proc. of 19th Congress of ICID, Beijing, China.
- Lempérière F, Ouamane A, 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hydropower & Dams* 9(5), Pp. 144-149.
- Ouamane A, Lempérière F, 2006. Design of a new economic shape of weir. Pp. 463-470. Proc. of the International Symposium of Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain.
- Pinchard T, Boutet JM, Cicero GM, 2011. Spillway capacity upgrade at Malarce dam: Design of an additional Piano Key Weir spillway. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, Pp. 233-240.
- Ribeiro ML, Boillat JL, Schleiss A, Laugier F and Albalat C, 2007. Rehabilitation of St-Marc dam – experimental optimization of a piano key weir. Proc. of 32nd Congress of IAHR, Vince, Italy.
- Ribeiro ML, Bieri M, Boillat JL, Schleiss AJ, Delorme F and Laugier F, 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways – Design of Piano Key weirs. Proc. of 23rd Congress of ICOLD, Brasilia, Brazil.
- Tullis P, Amanian N and Waldron D, 1995. Design of labyrinth weir spillways. *J.of Hydr. Eng., ASCE*, 121(3), Pp. 247-255.
- Vermeulen J, Laugier F, Faramond L and Gilles C, 2011. Lessons learnt from design and construction of EDF first Piano Key Weirs. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, Pp. 215-224.
- Willmore C, 2004. Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. M.Sc. report, Utah State University, Logan, Utah.
- Young J C, 2005. Submergence effects on head-discharge relationship for labyrinth and sharp-crested linear weirs. M.Sc. thesis, Utah State University, Logan, Utah.