

بررسی آزمایشگاهی جریان آزاد و مستغرق در سرریزهای کلیدپیانویی

کیومرث روشنگر^{۱*}، مهدی ماجدی اصل^۲، محمدتقی اعلمی^۳ و جلال شیری^۴

۱ و ۳، ۴ به ترتیب: دانشیار گروه عمران؛ استاد گروه عمران؛ و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۹

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی (PKWs) جزء سرریزهای غیرخطی هستند که می‌توانند دبی را برای عرض مشخص و بدون افزایش بار آبی افزایش دهند. در شرایطی که سطح تماس سازه با سرریز یا فونداسیون محدود باشد، سرریزهای کلیدپیانویی با افزایش طول تاج سرریز در بالادست و پایین دست پایه، می‌توانند جایگزین مناسبی برای سرریزهای کنگره‌ای باشند. در این تحقیق، برای بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی در شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق، در مجموع ۵۵۴ آزمایش روی ۱۱ مدل فیزیکی اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در شرایط جریان آزاد و در نسبت بار آبی $H_0/P < 0.05$ ، سرریز کلیدپیانویی با نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی $1/4$ ، و در $H_0/P > 0.1$ سرریز کلیدپیانویی با نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی $1/2$ ، کارایی هیدرولیکی بیشتری نسبت به سایر سرریزها دارند. ضریب دبی این سرریزها با ثابت بودن نسبت عرض دهانه‌ها و با تغییر شیب دهانه‌ها از $1:1$ به منحنی (ربع دایره) حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. در شرایط جریان مستغرق، با کاهش نسبت بار آبی (H_0/P)، نسبت بار آبی مستغرق به بار آبی آزاد بالادست (H^*/H_0) افزایش می‌یابد. در سرریز کلیدپیانویی، با نسبت عرض دهانه‌های برابر ۱ و در مقادیر نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از 0.48 ($S < 0.48$) عمق پایین دست تأثیری بر عمق بالادست سرریز ندارد و $H^*=H_0$ است. اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی با نسبت عرض دهانه‌ها برابر ۱ باعث می‌شود که در این سرریز شروع استغراق زودتر و استغراق کامل دیرتر به وجود آید و اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی با شیب‌های منحنی شکل و نسبت عرض دهانه‌ها برابر ۱ باعث می‌شود که استغراق در این سرریز دیرتر شروع شود و حد استغراق کامل آنها تغییری نکند.

واژه‌های کلیدی

جریان آزاد و مستغرق، سرریز کلیدپیانویی، سرریز کنگره‌ای، نسبت استغراق

مقدمه

در سال‌های اخیر از سرریزها برای اندازه‌گیری سرعت و دبی جریان، تنظیم سطح آب، کنترل سیلاب، فراهم کردن ذخیره آب، انحراف جریان، و تغییر رژیم جریان در کانال‌ها یا رودخانه‌ها استفاده می‌شود. دبی جریان در سرریزها به‌طور مستقیم با طول تاج سرریز متناسب است. اگر عرض کانال یا مخزنی که سرریز روی آن اجرا می‌شود محدود باشد، یکی از راهکارهای افزایش ظرفیت جریان، افزایش طول تاج سرریز با زیگزاگ کردن سرریز در پلان است. معیار اصلی در طرح کنگره‌ای سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به ازای ارتفاع معین سطح آب در بالادست سرریز بوده است. عموماً سرریزهای غیرخطی شامل سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی هستند که در حال حاضر کاربرد آنها در سراسر جهان رو به افزایش است. این سرریزها، نسبت به سرریز خطی، باعث افزایش طول تاج سرریز در یک عرض ثابت می‌شوند و ضریب دبی جریان نسبت به سرریزهای

ابتدا بلانس در دانشگاه بریسکا (الجزایر) و لیمپیرر هیدروکوپ (فرانسه) توسعه داده است، تا کارایی سرریزهای نوع کنگره‌ای نصب شده بر سطح تماس کم را بهبود دهد (Lempérière & Ouamane, 2003). ساخت اولین نمونه سرریز کلیدپیانویی، سد گولورز در فرانسه، در سال ۲۰۰۶ و ساخت دومین نمونه سرریز کلیدپیانویی، یعنی سد سنت - مارک در فرانسه، در سال ۲۰۰۸ کامل شد (Laugier, 2007; 2009).

پارامترهای هندسی مهم (شکل ۱) برای طرح سرریز کلیدپیانویی، شامل ارتفاع سرریز (P)، افزایش ارتفاع تاج سرریز (Pp)، طول خط مرکزی تاج سرریز (Lc)، شیب کف ورودی (Si)، شیب کف خروجی (So)، طول کل سرریز (W)، عرض سرریز (B)، طول جلورفتگی تاج در بالادست یا در خروجی (Bo)، طول جلورفتگی تاج در پایین دست یا در ورودی (Bi)، عرض دهانه ورودی (wi)، عرض دهانه خروجی (wo)، ضخامت دیواره (T)، عرض سیکل که در آنجا $wu=wi+wo-T$ و تعداد سیکل‌ها (N) است. نسبت‌های مهم هندسی شامل بزرگ‌نمایی یا طول تاج سرریز به عرض سرریز ($n=Lc/W$)، نسبت طول‌های جلورفتگی بالادست به پایین دست (Bi/Bo)، نسبت عرض ورودی به عرض خروجی (wi/w_o)، و ضخامت نسبی دیواره (T/P) است. عموماً دو هندسه اصلی سرریز کلیدپیانویی مورد بررسی قرار می‌گیرد: نوع A که جلورفتگی در بالادست و پایین دست برابرند ($Bi/Bo=1$) و نوع B که دارای جلورفتگی بالادست بیشتر و بدون جلورفتگی در پایین دست است (صرف‌نظر از نوع سرریز پیانویی شکل، B_i+B_o معمولاً ثابت).

لیمپیرر و جان (Lempérière & Jun, 2005) و بارکودا و همکاران (Barcouda et al., 2006) می‌گویند $w_i/w_o=1/2$ و همکاران (Hien et al., 2006) حالت $w_i/w_o=1/5$ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که $w_i/w_o=1/2$ احتمالاً کارایی بیشتری

خطی کاهش می‌یابد ولی در این سرریزها به دلیل افزایش طول تاج سرریز، راندمان دبی سه تا چهار برابر افزایش خواهد یافت تولیس و همکاران (Tullis et al., 1995) در بسیاری از شرایط موجود، سرریزهای کلیدپیانویی جایگزین مناسب و اصلاح شده‌ای برای سرریزهای خطی و سرریزهای کنگره‌ای هستند (Ribeiro et al., 2007; Laugier et al., 2009; Lempérière 2009; Erpicum et al., 2011; Ho Ta Khanh et al., 2011; Pinchard et al., 2011).

در کاربردهای بعضی از سرریزها، ممکن است سطح تماس سازه یا فونداسیون^۱ و عرض W محدود باشد. در چنین مواردی مزایای بعضی از سرریزهای کنگره‌ای معمولی از بین خواهد رفت و طراحی سرریزهای غیرخطی جایگزین باید بررسی شود. سرریزهای کلیدپیانویی (PK) اخیراً برای جایگزینی سرریزهای کنگره‌ای معمولی توسعه یافته‌اند. سرریز کلیدپیانویی نوعی سرریز غیرخطی است که به طور خاصی برای کنترل سازه‌هایی طراحی شده‌اند که جریان سطح آزاد با سطح تماس نسبتاً کوچک دارند. در طراحی سرریزهای کلیدپیانویی، نسبت به طراحی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای، سه تفاوت اساسی وجود دارد: ۱- سرریز کلیدپیانویی در پلان، یک طرح ساده مستطیلی دارد یعنی زاویه α آن صفر است (سرریز کنگره‌ای مستطیلی)، ۲- سرریز کلیدپیانویی در دهانه‌های ورودی و خروجی دارای شیب است و ۳- جایی که سطح تماس قابل دسترس برای کنترل سازه محدود باشد، سرریز پیانویی روی پایه قرار می‌گیرد و تاج سرریز در بالادست و پایین دست پایه‌ها می‌تواند طول تاج بیشتری را به وجود آورد (جلورفتگی)^۲. در حال حاضر، به‌طور کلی روش طراحی استاندارد سرریزهای کلیدپیانویی پذیرفته شده، موجود نیست. هرچند، هیدروکوپ، که انجمن سرریزهای سد فرانسه است، طراحی سرریز کلیدپیانویی و رابطه دبی-هد را پیشنهاد کرده است. سرریز کلیدپیانویی را

1- Footprint

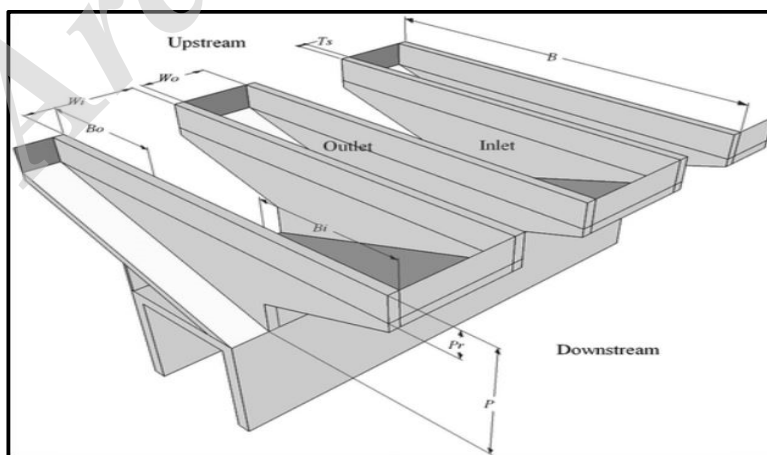
2- Over Hangs

در سرریزهای اصلاح شده و اصلاح نشده، نسبت استغراق افزایش می‌یابد و در یک عمق مشخص در پایین‌دست، سرریز اصلاح شده دارای عمق بیشتری در بالادست سرریز نسبت به سرریز اصلاح نشده است. یارمحمدی و احدیان (Yarmohammadi, & Ahadiyan, 2016) اثر دیواره‌های سپری بدون شیب به صورت مقطعی را روی تاج سرریز، دیواره‌های سپری شیب‌دار با طول‌های مختلف را روی تاج جانبی سرریز، و تأثیر ارتفاع سرریز را روی راندمان سرریز کلیدپیانویی بررسی کردند.

احدیان و افزالیان (Ahadiyan & Afzalian, 2016) تأثیر شکل هندسی پایه‌های نصب شده زیر کلیدهای خروجی را بر راندمان هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی بررسی کردند. در این تحقیق، با تغییر پارامترهای هندسی از جمله نسبت عرض دهانه‌ها، شیب دهانه‌ها، و تغییر دادن شیب‌ها به فرم منحنی و ارتفاع سرریز و همچنین اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی (الف: افزایش ارتفاع سرریز ب: نصب پشت بند^۱ به پایه‌های جلورفتگی ج: تغییر فرم تاج سرریز از حالت مسطح به ربع دایره‌ای در بالادست)، عملکرد این سرریزها در دو حالت جریان آزاد و جریان مستغرق، در کانال بررسی شده است.

دارد، اگر چه هیچ اطلاعاتی در این باره ارائه ندادند. مطالعاتی دیگر، ایامن و لیمپریه (Ouamane & Lempérière, 2006) سه سرریز پیانویی را با $w_i/w_o=1/5$ و $w_i/w_o=1$ و $w_i/w_o=0.67$ آزمودند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش این نسبت، کارایی نیز بیشتر می‌شود. دو نمونه سرریز پیانویی روی سدهای گولورس و سنت مارک با نسبت‌های w_i/w_o به ترتیب $1/43$ و $1/41$ ساخته شد (Laugier, 2007; 2009). تمامی مطالعات حاکی از آن است که نسبت های w_i/w_o بزرگتر از یک نتایج بهتری نشان می‌دهد تا نسبت‌های کمتر از یک. تختی و همکاران (Takhti et al., 2016) تأثیر دو پارامتر ارتفاع سرریز و تعداد کلیدهای سرریز و همچنین تأثیر دو پارامتر هیدرولیکی دبی و عمق بالادست سرریز را بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی را مورد بررسی قرار دادند. زرهان و فنتون (Zerihun & Fenton, 2007) و کبیری و همکاران (Kabiri-Samani et al., 2010) معتقدند با افزایش استغراق (H_d/H_o)، کارایی دماغه‌های بالادست به دلیل استغراق موضعی در بالادست دهانه‌های خروجی، کاهش می‌یابد.

دابلینگ (Dabling, 2014) می‌گوید با افزایش H_o/P



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی نوع A

مواد و روش‌ها

تمامی آزمایش‌ها یکسان است، رابطه ۲ به شکل رابطه ۳ ساده می‌شود.

$$Cd=f(H_0/P, H_d/P, H_d/H_0, H^*/P, w_i/w_0, S_i/S_0, CR) \quad (3)$$

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه تبریز در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸ متر با سیستم جریان آزاد اجرا شد. دیواره‌های فلوم از جنس پلاکسی‌گلاس و کف آن فلزی (گالوانیزه) است، برای تأمین دبی از پمپ با قابلیت تغییر دبی استفاده شد. فلوم در بالادست به یک منبع آرام‌کننده جریان مجهز است و برای آرام کردن تلاطم جریان آب از دو صفحه مشبک و در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از یک صفحه شناور بر سطح آب استفاده شد. جریان آب پس از عبور از طول فلوم به داخل مخزنی در پایین دست ریخته می‌شود و با یک پمپ این سیکل چرخشی تکرار می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال از دبی‌سنج آلتراسونیک نصب شده روی لوله مکش پمپ استفاده شد و برای کالیبره کردن و حصول اطمینان، روش حجمی نیز به کار گرفته شد. برای اندازه‌گیری عمق آب از عمق‌سنج با دقت (۰/۱ میلی‌متر) استفاده شد؛ این عمق‌سنج می‌توانست در طول و عرض کانال حرکت کند و ارتفاع تاج سرریز و عمق آب را در کل کانال اندازه‌گیری کند. شیب فلوم با استفاده از جک قابل تغییر بود. در این تحقیق، شیب فلوم برای تمامی آزمایش‌ها در صفر درجه (افقی) ثابت در نظر گرفته شد. تمامی مدل‌ها روی یک صفحه افقی مسطح^۱ به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری نصب شد و یک صفحه شیب‌دار^۲ با زاویه ۵ درجه نسبت به افق، کف فلوم را به صفحه افقی متصل کرده تا خطوط جریان به‌طور موازی از کف کانال به صفحه افقی جریان یابد. بر مبنای یافته‌های ویلمور (Willmore, 2004) که اثر صفحه شیب‌دار بالادست سرریزهای

پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی شامل بار آبی کل در بالادست و پایین دست سرریز، ارتفاع سرریز، عرض و شیب دهانه‌های ورودی و خروجی کلیدها، شکل تاج سرریز، و شرایط جریان نزدیک‌شونده هستند که آنها را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ نوشت:

$$Cd=f(W, L_c, H_0, H_d, H^*, P, T_s, N, CR, AF, w_i, w_0, S_i, S_0, g, \rho, \sigma) \quad (1)$$

که در آن،

W = عرض کل کانال که سرریز در آن نصب شده؛
 L_c = طول تاج سرریز؛ $H_0 = h_0 + v^2/2g$ = بار کل جریان در بالادست؛ H_d = بار کل جریان در پایین دست؛ H^* = بار کل جریان در بالادست سرریز در شرایط استغراق؛ P = ارتفاع سرریز؛ T_s = ضخامت سرریز؛ N = تعداد سیکل‌ها؛ CR = پارامتر معرف شکل تاج سرریز؛ AF = پارامتر معرف شرایط جریان نزدیک‌شونده؛ w_i و w_0 = به‌ترتیب عرض دهانه‌های ورودی و خروجی کلیدها؛ S_i و S_0 = به‌ترتیب شیب دهانه‌های ورودی و خروجی کلیدها؛ v = ویسکوزیته سیال؛ g = شتاب ثقل؛ ρ = جرم حجمی سیال؛ و σ = کشش سطحی. با آنالیز ابعادی می‌توان رابطه ۱ را به‌صورت رابطه بی بعد ۲ نوشت:

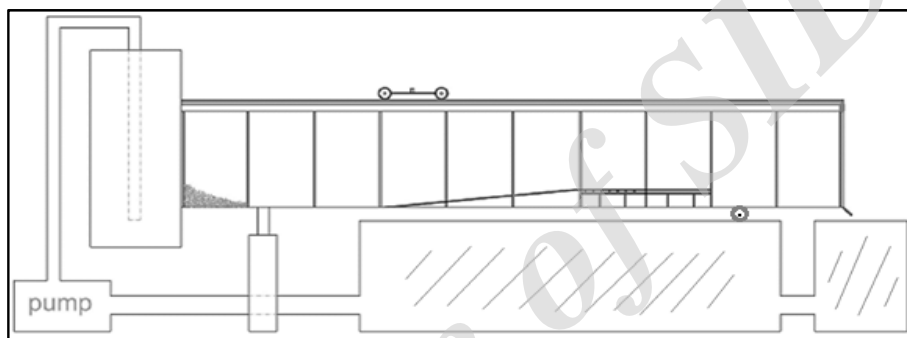
$$Cd=f(H_0/P, H_d/P, H_d/H_0, H^*/P, w_i/w_0, R_e, W_e, Fr, S_i/S_0, L_c/W, T_s/P, N, CR, AF) \quad (2)$$

بر اساس نظر انجمن مهندسی عمران آمریکا تأثیر کشش سطحی در سرریزها در حالت $W_e \geq 100$ ناچیز و تأثیر ویسکوزیته سیال در جریان‌های متلاطم بسیار کم است (Henderson, 1966). با توجه به اینکه سرریزها عمود بر جریان اصلی نصب شده‌اند، هیچ‌گونه تنگ‌شدگی در کانال ایجاد نشده است، و شرایط جریان نزدیک‌شونده، ضخامت سرریزها، تعداد سیکل‌ها و نسبت بزرگنمایی برای

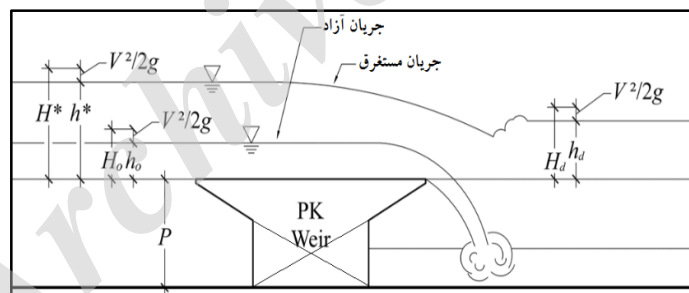
شماتیک کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی در شکل ۲ و پارامترهای هیدرولیکی در شرایط جریان آزاد و مستغرق در شکل ۳ آورده شده است. در این تحقیق، ۱۱ مدل آزمایشگاهی مختلف ساخته شد، و برای بررسی جریان آزاد (۲۲۵ آزمایش) و جریان مستغرق (۳۲۹ آزمایش) و در مجموع ۵۵۴ آزمایش اجرا شد که خلاصه‌ای از مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کلیدپیانویی در جدول ۱ ارائه شده است.

کنگره‌ای را آزمایش کرده است، نصب و هندسه این صفحه شیب‌دار تأثیری بر کارایی هیدرولیکی مدل‌های فیزیکی (نسبت به حالت نزدیک شدن افقی جریان در شرایط کاربرد در مخازن سدها) ندارد.

برای هر دبی مشخص، برای حصول اطمینان از جریان پایدار در فلوم، پارامترهای هیدرولیکی پس از ده دقیقه اندازه‌گیری شد. برای کنترل رقوم سطح آب در فلوم از یک دریچه در انتهای پایین دست فلوم استفاده شده است.



شکل ۲- شماتیک از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مربوطه



شکل ۳- پارامترهای هیدرولیکی در شرایط جریان آزاد و مستغرق سرریز کلیدپیانویی

جنس پلی اتیلن و با ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده‌اند؛ برای برش دادن از CNC، برای چسباندن آنها از چسب Cyano acrylate، و برای آب‌بندی از چسب Silicon sealant استفاده شده است. سرریزها در فاصله ۷ متری از بالادست کانال نصب شده‌اند و با استقرار جریان پایدار پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده است. محدوده تغییرات دبی ۱۰ تا ۷۰ لیتر بر ثانیه است و برای محاسبه ضریب جریان (C_d) در سرریزهای کلیدپیانویی،

نسبت بزرگنمایی طول تاج سرریز ($n=L_c/W$) در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر ۴/۹۲ است؛ تعداد سیکل‌ها ۴ است و تمامی سرریزهای بررسی شده از نوع A هستند (شکل ۱)، طول جلورفتگی تاج در بالاست یا خروجی (B_o) و در پایین دست یا ورودی (B_i) برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر، طول پایه (B_c) برابر ۲۵ سانتی‌متر و طول کل سرریز (B) برابر ۵۰ سانتی‌متر است و مدل‌های سرریز از $(B=B_c+B_i+B_o=50\text{ cm})$.

از معادله عمومی جریان روی سرریزها، مطابق رابطه ۴، استفاده شده است.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_o^{3/2} \quad (4)$$

که در آن،

Q = شدت جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی
 بر حسب متر مکعب بر ثانیه؛ L = طول تاج سرریز
 بر حسب متر؛ $(H_o = h_o + v^2/2g)$ = ارتفاع انرژی کل
 جریان بالادست نسبت به تاج سرریز بر حسب متر؛
 C_d = ضریب جریان؛ و g = شتاب ثقل بر حسب
 متر بر مجذور ثانیه.

در جدول ۱ مشخصات مدل‌های فیزیکی نشان داده شده است: سه نسبت مختلف w_i/w_o (۱/۴، ۱/۲۵ و ۱) برای بررسی اثر نسبت دهانه‌های ورودی به خروجی؛ شیب دهانه‌های ورودی و خروجی در دو شیب مختلف $S = 1:1/5$ و فرم منحنی، برای بررسی اثر شیب‌های دهانه‌های ورودی و خروجی و مقایسه شیب با حالت منحنی (ربع دایره) و همچنین حالت اصلاح شده این سرریزها یعنی تأثیر همزمان افزایش ۱/۵ درصد در ارتفاع سرریز؛ تغییر فرم تاج سرریز از حالت مسطح به حالت ربع دایره‌ای؛ نصب پشت‌بند، روی ضریب دبی؛ و کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی در دو حالت جریان آزاد و جریان مستغرق.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های فیزیکی ساخته شده در این تحقیق

شماره مدل	نام مدل	w_i/w_o	P (سانتی‌متر)	$S_i=S_o$	W (سانتی‌متر)	فرم تاج	پشت‌بند	شرایط جریان
۱	Linear	-	۲۰	-	۱۰۰	مسطح	-	آزاد
۲	Linear M	-	۲۲/۳	-	۱۰۰	ربع دایره‌ای	-	آزاد
۳	PK _{1,4}	۱/۴	۲۰	۱:۱/۵	۱۰۰	مسطح	-	آزاد
۴	PK _{1,4} M	۱/۴	۲۲/۳	۱:۱/۵	۱۰۰	ربع دایره‌ای	√	آزاد
۵	RLW*	۱	۲۰	-	۱۰۰	مسطح	-	آزاد
۶	PK _{1,25}	۱/۲۵	۲۰	۱:۱/۵	۱۰۰	مسطح	-	آزاد
۷	PK _{1,25} M	۱/۲۵	۲۲/۳	۱:۱/۵	۱۰۰	ربع دایره‌ای	√	آزاد
۸	PK ₁	۱	۲۰	۱:۱/۵	۱۰۰	مسطح	-	مستغرق
۹	PK ₁ M	۱	۲۲/۳	۱:۱/۵	۱۰۰	ربع دایره‌ای	-	مستغرق
۱۰	PKC ₁	۱	۲۰	منحنی	۱۰۰	مسطح	√	مستغرق
۱۱	PKC ₁ M	۱	۲۲/۳	منحنی	۱۰۰	ربع دایره‌ای	√	مستغرق

* سرریز کنگره‌ای مستطیلی

PKC این است که در دهانه‌های ورودی و خروجی سرریز کلیدپیانویی به جای شیب از منحنی (ربع دایره) استفاده شده است (شکل ۴- ب و د). ویژگی منحنی این است که در ابتدا، شیب تند است و در امتداد جریان، شیب منحنی کمتر می‌شود.

در جدول ۱، حرف M بیانگر سرریزهای اصلاح شده است (منظور از سرریز اصلاح شده، ایجاد تغییرات در بدنه سرریز است از این قرار: الف) افزایش ارتفاع سرریز؛ ب) نصب پشت بند به پایه‌های جلورفتگی؛ و ج) تغییر فرم تاج سرریز از حالت مسطح به ربع دایره‌ای). منظور از سرریز



شکل ۴ - سرریز کلیدپیانویی

الف) سرریز کلیدپیانویی اصلاح شده، ب) جریان مستغرق PK_{1.25}، ج) جریان مستغرق و د) PK₁

نتایج و بحث

جریان آزاد روی سرریزهای کلیدپیانویی

در این بخش از تحقیق جریان آزاد روی سرریزهای کلیدپیانویی (بدون تأثیر عمق پایین دست بر شرایط جریان در بالادست سرریز)، با چهار سیکل و ارتفاع ۲۰ و ۲۲/۳ سانتی متر و با نسبت‌های مختلف w_i/w_0 و شیب‌های متفاوت در دهانه‌ها و دو نوع تاج سرریز و نصب پشت بند بررسی شده است.

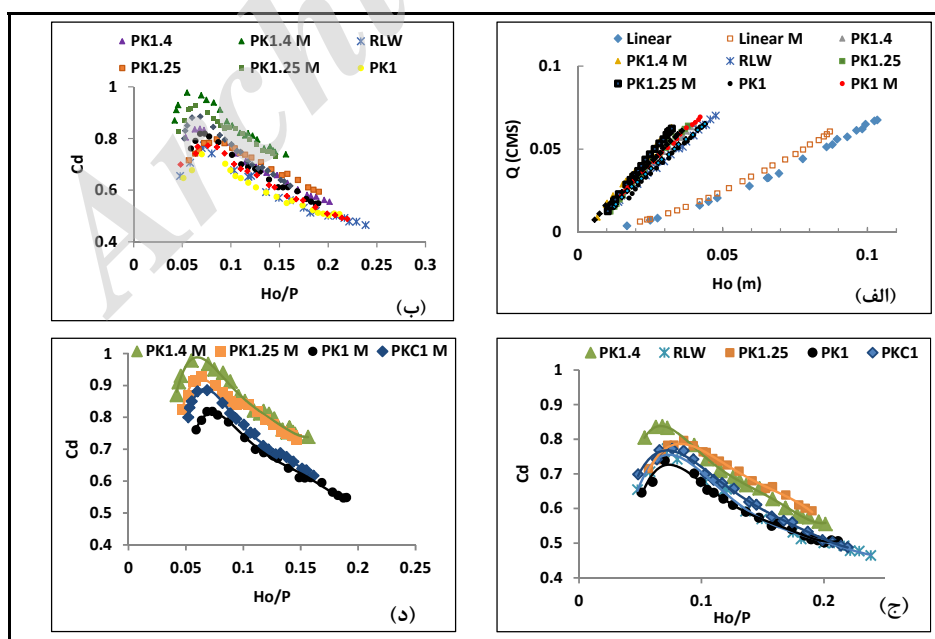
در شکل ۵- الف منحنی تغییرات دبی تمامی سرریزها نسبت به بار آبی رسم شده است. به طوری که مشاهده می‌شود به ازای یک بار ثابت، اختلاف قابل توجهی بین سرریزهای کلیدپیانویی و سرریزهای خطی وجود دارد. در بین تمامی مدل‌ها، سرریزهای PK_{1.25} و PK_{1.4M} بیشترین ظرفیت انتقال دبی را دارند. در شکل ۵- ب منحنی ضریب دبی انواع سرریزها در مقابل نسبت بار آبی (H_0/P) رسم شده به طوری که مشاهده می‌شود بیشترین ضریب دبی سرریزها در $H_0/P = 0.075$ است. مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بار آبی، ضریب دبی

سرریزهای خطی برعکس سرریزهای کلیدپیانویی افزایش می‌یابد. ضریب دبی سرریز خطی اصلاح شده^۱، با افزایش ۱۱/۵ درصد در ارتفاع سرریز و تغییر فرم تاج سرریز به ربع دایره‌ای) نسبت به سرریز خطی نرمال حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. در شکل ۵- ج تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی اصلاح نشده رسم شده است و به طوری که مشخص است در نسبت‌های کم H_0/P سرریز کلیدپیانویی PK_{1.4} بیشترین ضریب دبی را از خود نشان می‌دهد ولی با افزایش $H_0/P > 0.1$ ضریب دبی سرریز نوع PK_{1.25} بیشتر از ضریب دبی بقیه سرریزهاست که چنین پدیده‌ای در نتایج به دست آمده از تحقیقات اندرسون (Anderson, 2011) برای PK_{1.5} و PK_{1.25} در $H_T/P = 0.06$ اتفاق افتاده است و با نتایج تحقیقات ایامن و لمپرییر (Ouamane & Lempérière, 2006) نیز مطابقت دارد. بعد از سرریزهای PK_{1.25} و PK_{1.4} سرریز PKC عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای RLW و PK₁ نشان می‌دهند.

در شکل ۵- د تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی اصلاح شده نمایش داده شده است که

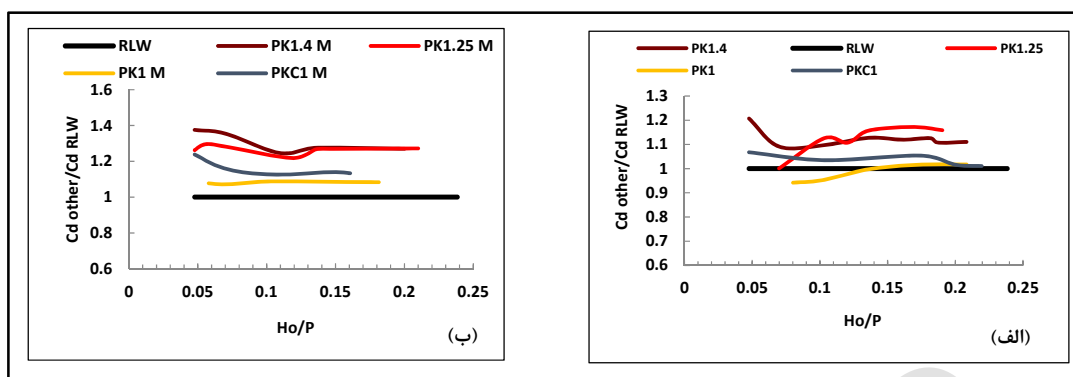
خطوط جریان در گوشه‌ها نسبت به طول فیزیکی آن کمتر است. حال آنکه برای کلیدهای ورودی با عرض بیشتر مقدار این انحنای جریان عبوری از روی سرریز تأثیر کمتری نسبت به کلیدهای خروجی دارد و در نتیجه آن طول مؤثر سرریز کاهش کمتری نسبت به طول فیزیکی آن نشان خواهد داد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که به دلیل استغراق موضعی در بالادست سیکل‌های خروجی، افزایش دبی در این سرریزها باعث کاهش کارایی دماغه‌های بالادست می‌شود ولی این پدیده در دهانه‌های پایین دست مشاهده نمی‌شود. شکل ۶- الف نشان می‌دهد که ضریب دبی تمامی سرریزهای کلیدپیانویی، نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی، بیشتر است (غیر از سرریز PK_1 و در محدوده $H_o/P < 0.1$) که بیانگر این است که وجود جلورفتگی و نسبت‌های $w_i/w_o > 1$ و شیب‌های ورودی و خروجی در دهانه‌ها روی کارایی سرریزهای کلیدپیانویی تأثیر مثبتی دارند. شکل ۶- ب تأثیر اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی را نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی (با طول تاج برابر) نشان می‌دهد.

سرریزهای $PK_{1.4}M$ ، $PK_{1.25}M$ ، $PKC_{1.4}M$ و $PKC_{1.25}M$ به ترتیب بیشترین ضریب دبی را از خود نشان می‌دهند. سرریزهای $PK_{1.4}M$ و $PK_{1.25}M$ در نسبت‌های $H_o/p > 0.15$ ضرایب دبی نزدیکی دارند و مقایسه شکل‌های ۵- ج و ۵- د نشان می‌دهد که سرریزهای اصلاح شده ۵ تا ۱۵ درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای اصلاح نشده دارند. دلیل تأثیر نسبت‌های مختلف w_i/w_o روی راندمان دبی سرریزهای کلیدپیانویی را می‌توان چنین توصیف کرد: الف- با افزایش عرض سیکل ورودی، اثر افت انرژی مربوط به جریان ورودی در سیکل‌های ورودی کاهش و در نتیجه ظرفیت انتقال جریان به سیکل ورودی افزایش می‌یابد. ب- 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 و در نتیجه استغراق موضعی در سیکل‌های خروجی نیز کمتر و ضریب دبی بیشتر می‌شود. و ج- طول مؤثر سرریز به دلیل انحنای



شکل ۵- منحنی تغییرات ضریب دبی انواع سرریزها نسبت به بار آبی

الف) منحنی تغییرات ضریب دبی در مقابل نسبت بار آبی، ب) تمامی سرریزها، ج) سرریزهای اصلاح نشده و د) سرریزهای اصلاح شده



شکل ۶- تغییرات ضریب دبی سرریزهای مختلف نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی

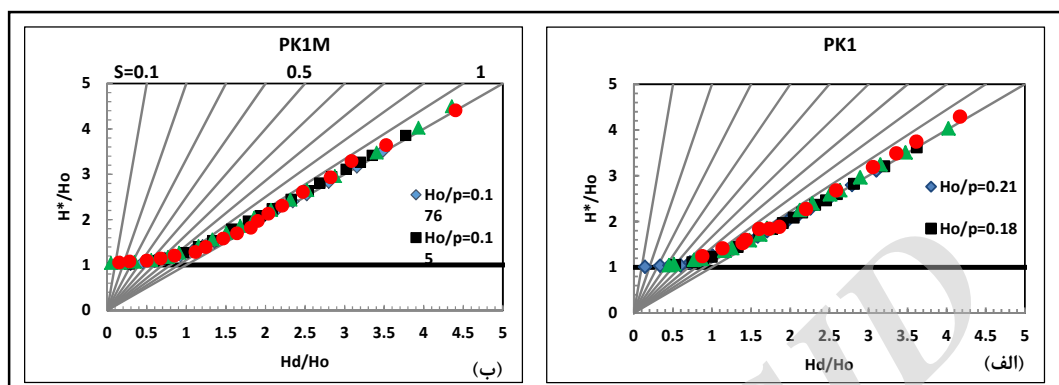
($S < 0.33$) مشاهده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی PK_1 باعث می‌شود که در این سرریزها استغراق زودتر از سرریزهای بدون اصلاح شده شروع شود. همچنین، اصلاح این سرریزها باعث می‌شود که در این سرریزها استغراق کامل دیرتر از سرریزهای اصلاح نشده به‌وجود آید؛ به‌عبارتی، سرریز PK_1M نسبت به سرریز PK_1 در مقادیر بالای H_d/H_0 به استغراق کامل می‌رسد. در شکل ۸، نمودار H_d/H_0 در مقابل H^*/H_0 برای سرریزهای PKC_1 و PKC_1M رسم شده است. به‌طوری‌که مشخص است با کاهش مقدار H_0/P ، مقدار H^*/H_0 افزایش می‌یابد به این صورت که در مقادیر کم H_0/P ، سرریزهای PKC_1 و PKC_1M مانند سرریزهای PK_1 و PK_1M استغراق بیشتری نسبت به مقادیر بالای H_0/P دارند. با توجه به شکل ۸- الف برای سرریز PKC_1 و در مقادیر نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از $0.33/0.33$ ($S < 0.33$) عمق پایین‌دست تأثیری بر عمق و جریان آزاد بالادست ندارد و $H^*=H_0$ است.

همین شرایط در شکل (۸- ب) برای سرریز PKC_1M در نسبت‌های استغراق کمتر از $0.41/0.41$ ($S < 0.41$) مشاهده می‌شود. از این رو می‌توان گفت که اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی PKC_1 باعث می‌شود که استغراق در این سرریزها دیرتر شروع و حد استغراق کامل آنها تقریباً با هم برابر شود. روابط جریان مستغرق

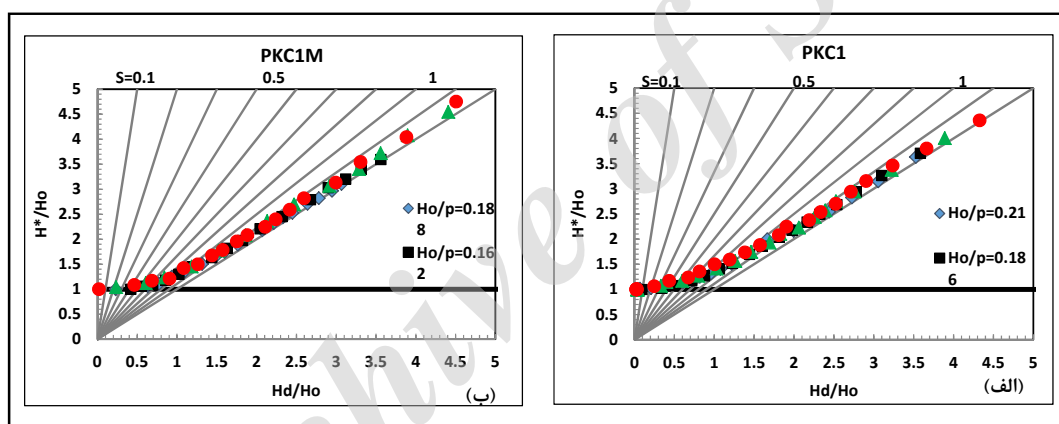
جریان مستغرق روی سرریزهای کلیدپیانویی

در این بخش از تحقیق، برای بررسی تأثیر جریان مستغرق (تیغه ریزشی جریان و شرایط جریان در بالادست سرریز تحت تأثیر عمق جریان در پایین‌دست قرار می‌گیرد) بر کارایی سرریز کلیدپیانویی، چهار مدل PK_1 ، PK_1M ، PKC_1 و PKC_1M و برای هر مدل چهار نسبت مختلف H_0/P انتخاب و مجموعاً ۳۲۹ آزمایش اجرا شد. در شکل ۷، نمودار دو پارامتر بدون بعد H^*/H_0 و H_d/H_0 به‌ازای مقادیر مختلف H_0/P برای سرریزهای PK_1 و PK_1M رسم شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو سرریز با کاهش نسبت H_0/P ، مقدار H^*/H_0 (برای مقادیر ثابت H_d/H_0) افزایش می‌یابد. به‌عبارتی دیگر، در مقادیر کم H_0/P هر دو سرریز کلیدپیانویی استغراق بیشتری نسبت به مقادیر بالای H_0/P دارند و به‌ازای مقدار ثابت H_d/H_0 ، عمق آب در بالادست سرریز برای مقادیر پایین H_0/P ، بیشتر از مقادیر بالای H_0/P است. این نتایج با نتایج بررسی‌های دابلینگ (Dabbling, 2014) مطابقت دارد. به‌طوری‌که از شکل ۷ مشخص است، دامنه تغییرات این اختلاف‌ها بسیار اندک است. با توجه به شکل ۷- الف در مقادیر نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از $0.48/0.48$ ($S < 0.48$) عمق پایین‌دست تأثیری بر عمق و جریان آزاد بالادست ندارد و $H^*=H_0$ است. چنین حالتی در شکل ۷- ب برای سرریز PK_1M در نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از $0.33/0.33$

سرریزهای کلیدپیانویی به همراه پارامترهای آماری برای شکل‌های ۷ و ۸ نیز در جدول ۲ آورده شده است که دقت مناسبی است. این روابط با داده‌های آزمایشگاهی در حد بسیار



شکل ۷- منحنی تغییرات H^*/H_0 نسبت به H_d/H_0 و S برای سرریزهای PK_{1M} و PK_1



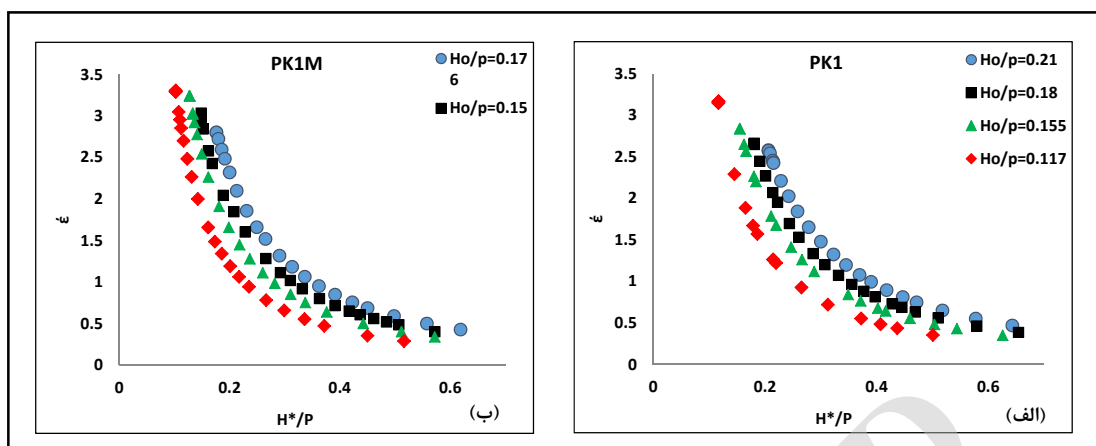
شکل ۸- منحنی تغییرات H^*/H_0 نسبت به H_d/H_0 و S برای سرریزهای PK_{C1M} و PK_{C1}

سرریز افزایش می‌یابد که علت آن را با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان چنین بیان کرد که با کاهش H_0/P ، استغراق سرریز در یک H_d/H_0 مشخص بیشتر از مقادیر بالای H_0/P است و از این‌رو با افزایش استغراق ضریب دبی و کارایی سرریزها کاهش می‌یابد. دابلینگ (Dabling, 2014) نیز نتایج مشابهی را برای سرریزهای کلیدپیانویی مورد مطالعه خود ارائه داده است. در شکل ۹ مشخص است که کارایی سرریزها در $H^*/P < 0.3$ با شیب بیشتر و در محدوده $0.3 < H^*/P < 0.6$ با شیب ملایم‌تری کاهش یافته است و در محدوده $H^*/P > 0.6$ نمودارها تقریباً افقی‌اند و کارایی آنها به کمتر از 0.5 رسیده است.

برای مقایسه کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی PK_1 و PK_{1M} در نسبت‌های مختلف H_0/P ، از کارایی سیکل (É) استفاده شده است که ویلمور (Willmore, 2004) آن را برای نشان دادن کارایی سرریزهای کنگره‌ای ارائه داد و مقدار آن در رابطه ۵ آورده شده که در آن $M = L_0/W$ نسبت بزرگنمایی است.

$$\dot{\epsilon} = C_d \times M \quad (5)$$

در شکل ۹، کارایی سرریزهای PK_1 و PK_{1M} در مقابل H^*/P و برای چهار نسبت H_0/P رسم شده است. به طوری که مشاهده می‌شود، با افزایش H_0/P کارایی هر دو



شکل ۹- منحنی تغییرات ϵ نسبت به H^*/H_0

جدول ۲- معادلات ضریب دبی جریان مستغرق سرریزهای کلیدپیانویی بررسی شده در این تحقیق

نوع سرریز	معادله	RMSE	R ²	محدوده جریان
PK1	$\frac{H^*}{H_0} = 1.090789 + 0.351776 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^2 - 0.3987 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^3 - 0.72005 * \left(\frac{H_0}{P}\right)$	0.0331	0.998	$0.11 < H_0/p < 0.21$ $S_i = S_o = 1$
PK1M	$\frac{H^*}{H_0} = 1.05435 + 0.34163 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^2 - 0.3665 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^3 - 0.33981 * \left(\frac{H_0}{P}\right)$	0.0500	0.997	$0.10 < H_0/p < 0.18$ $S_i = S_o = 1$
PKC1	$\frac{H^*}{H_0} = 1.070208 + 0.258161 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right) + 0.219162 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^2 - 0.02094 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^3 - 0.64559 * \left(\frac{H_0}{P}\right)$	0.04194	0.998	$0.10 < H_0/p < 0.21$ $S_i = S_o = \text{Curve}$
PKC1M	$\frac{H^*}{H_0} = 0.776838 + 0.197185 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right) + 0.250993 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^2 - 0.02424 * \left(\frac{H_d}{H_0}\right)^3 + 1.018047 * \left(\frac{H_0}{P}\right)$	0.044198	0.998	$w_i/w_o = 1$ $0.10 < H_0/p < 0.2$ $S_i = S_o = \text{Curve}$

نتیجه گیری

نشده در $H_0/P < 0.1$ سرریز PK_{1.4} و در $H_0/P > 0.1$ سرریز PK_{1.25} کارایی هیدرولیکی بیشتری نسبت به سایر سرریزها دارند. با ثابت بودن w_i/w_o ضریب دبی سرریز PKC حدود ۳ درصد بیشتر از ضریب دبی سرریزهای PK با شیب ۱:۵ است. در سرریزهای کلیدپیانویی اصلاح

در این تحقیق تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی در شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق در کانال بررسی شده است. در شرایط جریان آزاد، سرریزهای کلیدپیانویی اصلاح

استغراق کوچک‌تر از 0.48 ($S < 0.48$) عمق پایین‌دست تأثیری بر عمق و جریان آزاد بالادست ندارد و $H^* = H_0$ است. چنین حالتی برای سرریز PK_1M در نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از 0.33 ($S < 0.33$) مشاهده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی PK_1 باعث می‌شود که در این سرریزها استغراق زودتر شروع شود و نیز اینکه استغراق کامل دیرتر به‌وجود آید. برای سرریز PKC_1 و در مقادیر نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از 0.33 ($S < 0.33$) عمق پایین‌دست تأثیری بر عمق و جریان آزاد بالادست ندارد ($H^* = H_0$) و چنین شرایطی برای سرریز PKC_1M در نسبت‌های استغراق کمتر از 0.41 ($S < 0.41$) مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که اصلاح سرریزهای کلیدپیانویی PKC_1 باعث می‌شود که استغراق در این سرریزها دیرتر شروع شود، حد استغراق کامل آنها تقریباً با هم برابر است.

شده (با افزایش $11/5$ درصد در ارتفاع سرریز، تغییر فرم تاج سرریز و نصب پشت‌بند) حدود 5 تا 15 درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی اصلاح نشده مشاهده می‌شود. ضریب دبی سرریز $PK_{1.4}M$ بیشتر از ضریب دبی بقیه سرریزهاست و برتری این سرریز نسبت به سرریز $PK_{1.25}M$ در مقادیر $0.1 < H_0/P < 0.1$ کمتر می‌شود. سرریز PKC_1M نسبت به سرریز PK_1M با ضریب $1:1/5$ راندمان بهتری دارد. ضریب دبی تمامی سرریزهای مورد آزمایش نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی بیشتر است غیر از سرریز PK_1 و در محدوده $0.13 < H_0/P < 0.13$. کارایی سیکل سرریزهای کلیدپیانویی $2/5$ تا 4 برابر کارایی سیکل سرریزهای خطی است. در هر دو سرریز PK_1 و PK_1M ، با کاهش نسبت H_0/P مقدار H^*/H_0 (برای مقادیر ثابت H_d/H_0) افزایش می‌یابد. به‌عبارتی دیگر، در مقادیر کم H_0/P هر دو سرریز استغراق بیشتری نسبت به مقادیر بالای H_0/P دارند. در سرریز PK_1 و مقادیر نسبت‌های

مراجع

- Ahadiyan, J. and Afzalian, A. R. 2016. Effect of piers geometric on the hydraulic properties of Piano Key weirs. *J. Water Soil Conserv.* 23(2): 267-277.
- Anderson, R. M. 2011. Piano Key weir head discharge relationships. M.Sc. Thesis. Utah State University, Logan, UT.
- 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. Proceeding of the 22nd Congress of ICOLD. Barcelona, Spain.
- Dabling, M. R. 2014. Nonlinear weir hydraulics. M. Sc. Thesis. Utah State University, Logan, UT.
- Erpicum, S., Nagel, V. and Laugier, F. 2011. Piano Key weir design of raviege dam. Proceeding of International Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs (PKW). CRC Press.
- Henderson, F. M. 1966. Open Channel Flow. Macmillan, New York, USA.
- Ho Ta Khanh, M., Sy Quat, D. and Xuan Thuy, D. 2011. P. K. weirs under design and construction in Vietnam. Proceeding of International Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs (PKW). CRC Press.
- Hien, T. C., Son, H. T. and Khanh, M. H. T. 2006. Results of some Piano Keys weir hydraulic model tests in Vietnam. Proceeding of the 22nd Congress of ICOLD. Barcelona, Spain.
- Kabiri-Samani, A. R., Ansari, A. and Borghei, S. M. 2010. Hydraulic behaviour of flow over an oblique weir. *J. Hydraul. Res.* 48(5): 669-673.

- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. and Boillat, J. L. 2009. Design and construction a labyrinth PKW spillway at St-Marc dam, France. *Int. J. Hydropower Dam.* 15(5): 100-107.
- Laugier, F. 2007. Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *Int. J. Hydropower Dam.* 13(5): 94-100.
- Lempérière, F. 2009. New Labyrinth weirs triple the spillways discharge. Available at: <http://www.hydrocoop.org>.
- Lempérière, F. and Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Int. J. Hydropower Dam.* 9(5): 144-149.
- Lempérière, F. and Jun, G. 2005. Low cost increase of dams storage and flood mitigation: the Piano Keys weir. *Proceeding of 19th Congress of ICID.* Beijing, China.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. 2006. Design of a new economic shape of weir. *Proceeding of the International Symposium of Dams in the Societies of the 21st Century,* Barcelona, Spain.
- Pinchard, T. Boutet, J. M. and Cicero, G. M. 2011. Spillway capacity upgrade at Malarce dam: design of an additional Piano Key Weir spillway. *Proceeding of the International Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs (PKW).* CRC Press.
- Ribeiro, M. L., Boillat, J. L., Schleiss, A., Laugier, F. and Albalat, C. 2007. Rehabilitation of St-Marc dam-experimental optimization of a Piano Key Weir. *Proceeding of 32nd Congress of IAHR.* Vince, Italy.
- Takhti, F. 2016. The study of geometrical and hydraulic parameters on long-crested weir discharge coefficient (Piano Keys) in free flow mode. M. Sc. Thesis- Bu-Ali-Sina University. Hamedan, Iran. (in Persian)
- Tullis, P., Amanian, N. and Waldron, D. 1995. Design of labyrinth weir spillways. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 121(3): 247-255.
- Willmore, C. M. 2004. Hydraulic Characteristics of Labyrinth Weirs. All Graduate Plan B and other Reports. 851.
- Yarmohammadi, B. and Ahadiyan, J. 2016. Experimental study of flow hydraulic in Piano Key Weirs at different parapet wall. *J. Irrig. Sci. Eng.* 39 (4): 47-58. doi:10.22055/jise.2016.12495.
- Zerihun, Y. T. and Fenton, J. D. 2007. A Boussinesq-type model for flow over trapezoidal profile weirs. *J. Hydraul. Res.* 45(4): 519-528.

Experimental Evaluation of Free and Submerged Flow over Piano Key Weirs

K. Roshangar*, M. Majedi, M. T. Aalami and J. Shiri

* Corresponding Author: Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
Email: kroshangar@yahoo.com

Received: 27 December 2016, Accepted: 20 August 2017

The piano key weirs (PKWs) are type of nonlinear weirs which can increase the discharge for a given width without the increase in head water. In piano key the length of weir crest in both upstream and downstream can be increased and therefore can be considered to be a suitable substitution for the labyrinth weirs, with a relatively small footprint. In this study, in order to evaluate the Hydraulic performance of PKWs of free & submerged flow, totally 554 experiments are conducted on 11 physical models. Results showed that in the free flow the PK₁₋₄ (inlet over outlet key width; $w_i/w_o=1.4$) in the head water ratio of $0.5 \leq H_0/P \leq 1$ and the PK_{1,25} in $H_0/P \geq 0.1$ as compared with other weirs, has higher Hydraulic performance. In the case of constant values for the w_i/w_o ratio and changing of the floor slope from 1:1.5 to the curve (a quarter of the circle; PKC) the discharge coefficient of these weirs increased about 3 percent. In the condition of submerged flow the value of the submerged upstream head over the free flow of upstream head (H^*/H_0) increased by decreasing the submerged upstream head ratio (H_0/P). For the PK₁ weir and in the submergence values lower than 0.48, the downstream depth had no effect on upstream depth of weir, and $H^*=H_0$. The modifying of PK₁ causes a decrease the modular submergence range in this weir and occurrence of the full submergence with a little delay. Modifying of PKC₁, lead to an increase in the modular submergence range and no change in the full submergence.

Keywords: Free and Submergence Flow, Labyrinth Weir, Piano Key Weir, Submergence Ratio