

بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای تک و دو سیکل کلید پیانویی و مقایسه آن با سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی

هادی رستمی^۱، محمد حیدر نژاد^{۲*}، محمد حسین پورمحمدی^۳
امیرعباس کمان بدست^۲ و امین بردبار^۲

۱- دانش‌آموخته دکترای تخصصی، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۳

چکیده

سرریزهای کلید پیانویی نوع جدیدی از سرریزها هستند که ظرفیت تخلیه دبی بسیار بالایی دارند و می‌توانند به‌عنوان سازه‌ای اقتصادی با کارایی بالا به‌کار گرفته شوند. این سرریزها جایگزین مناسبی برای سرریزهای خطی هستند زیرا به‌ازای بار آبی و عرض سرریز یکسان، دبی واحد عرض را در دهانه سرریزهای بدون تنظیم‌کننده افزایش می‌دهند. در این تحقیق، ضریب دبی جریان سرریز کلید پیانویی با یک سرریز زیگزاگی با پلان مستطیلی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی حدود ۳۸ درصد بیشتر است. همچنین، با افزایش بار هیدرولیکی و رسیدن به دبی استغراق، اختلاف ضریب جریان بین دو سرریز کاهش می‌یابد به‌طوری‌که این اختلاف در دبی‌های زیاد حدود ۲۴ درصد کاهش و تراز پایاب از تراز تاج سرریز به‌تدریج افزایش پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی

سرریز پلان مستطیلی، سرریز زیگزاگی، سرریز کلید پیانویی، ضریب دبی جریان

مقدمه

مقطع اختصاص داده شده برای تخلیه سیلاب هستند که در نتیجه با احداث این نوع سرریزها حجم جریان عبوری از آنها افزایش می‌یابد و نسبت به سرریزهای خطی، ارتفاع آزاد کمتری در بالادست نیاز خواهد بود. این موضوع در مواقعی که سرریز به‌عنوان سازه تخلیه سیلاب عمل می‌کند، بسیار با اهمیت است و به تسهیل عبور جریان سیلاب می‌انجامد (Crookston & Tullis 2012a). ویلمونت (Villemonte, 1947) یکی از شرایطی که ممکن است سرریزها با آن مواجه شوند را استغراق نام نهاد؛ استغراق به حالتی گفته می‌شود که عمق جریان در پایین‌دست سرریز از ارتفاع تاج آن بیشتر گردد.

استفاده از سرریزهای زیگزاگی راه حلی موثر برای افزایش جریان عبوری است. این نوع سرریزها با افزایش طول تاج در یک عرض مشخص، در مقایسه با سرریزهای مستقیم، دبی بیشتری را برای بار هیدرولیکی یکسان از خود عبور می‌دهند (Falvey, 2003). سرریزهای کلید پیانویی (PKW) نیز مانند سرریزهای چندوجهی در پلان دارای پیچ و خم هستند تا بتوانند ظرفیت تخلیه را برای عرض مشخصی از کانال سرریز افزایش دهند. این سرریزها همچنین راه‌حلی بسیار قوی برای نیازهای پروژه‌های سدسازی، مانند افزایش ظرفیت دبی مشخص یا کاهش

برای رابطه دبی- اشل سرریز کلید پیانویی ارائه کردند. بر اساس نتایج بررسی‌های این محققان، ظرفیت این نوع سرریزها عمدتاً به بلندای آب روی سرریز، طول کل تاج، ارتفاع کلیدهای ورودی و طول بال جانبی آن بستگی دارد. (Crookston & Tullis, 2012b; کورکستون و تولیس (2012c) خصوصیات تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی را در سرریزهای زیگزاگی با دو و چهار سیکل مثلثی و زاویه‌های راس مختلف به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که در دبی‌های کم، به‌دلیل تداخل کم تیغه‌های ریزشی، ضریب دبی جریان از سرریز خطی بیشتر است و به‌تدریج با افزایش دبی جریان شدت تداخل نیز بیشتر می‌شود. این موضوع منجر به کاهش ضریب دبی جریان می‌شود و مقدار آن متمایل به ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن خواهد شد.

اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2012) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی مستطیلی را مقایسه کردند. بر اساس نتایج بررسی‌های این محققان، سرریز کلید پیانویی به‌دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی، عملکرد بهتری دارد. آنها همچنین با مقایسه عملکرد سرریز کلید پیانویی تحت نسبت‌های کلید ورودی به کلید خروجی از ۰/۶۷ تا ۱/۵ (pk_{0.67} تا pk_{1.5})، به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت کلید ورودی به کلید خروجی، ضریب جریان افزایش می‌یابد. جواهری و کبیری سامانی (Javaheri & Kabiri-Samani, 2011)، برای تعیین تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی جریان، به آزمایش‌های زیادی دست زده‌اند. این محققان در تحقیقاتشان که ۲۰ مدل با مشخصات هندسی مختلف را به‌کار برده‌اند، تأثیر پارامترهای هندسی مؤثر شامل طول سرریز، ارتفاع سرریز، عرض دهانه ورودی و خروجی را بر ضریب دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی بررسی کرده‌اند و با استفاده از معادله عمومی سرریزها، معادله‌ای که کمترین خطا را داراست به‌عنوان بهترین

مطالعات تولیس و همکاران (Tullis et al., 2007) نشان می‌دهد که اثر استغراق سرریزهای زیگزاگی نیز شبیه اثر استغراق سرریزهای مستقیم است، بدین ترتیب که اگر عمق آب پایین‌دست از ارتفاع تاج تجاوز نکند، تأثیری روی عملکرد سرریز نخواهد داشت و تنها در صورتی که عمق پایاب بیشتر از ارتفاع تاج شود، میزان آبگذری سرریز شروع به کاهش می‌کند. باید توجه داشت که استفاده از سرریزهای زیگزاگی در شرایط استغراق شدید توصیه نمی‌شود. مطالعات های و تایلور (Hay & Taylor, 1970) نشان که کارایی سرریزهای زیگزاگی مستقل از نسبت (W/P) است (W عرض یک سیکل و P ارتفاع سرریز). اما مطالعات تکمیلی فالوی (Falvey, 2003) نشان می‌دهد که اگر نسبت (W/P) از حدی کمتر شود تأثیر قابل توجهی در کاهش کارایی سرریز خواهد داشت. این محققان توصیه می‌کنند که از طرح سرریزهای زیگزاگی در شرایط استغراق شدید اجتناب شود.

مطالعات آزمایشگاهی اومانی و لمپیر (Ouamane & Lempérière, 2006) نشان می‌دهد که در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد: کلید ورودی جریان‌های نزدیک‌شونده را به سمت خود می‌کشد و مشابه سرریزهای لبه تیز با بدنه شیب‌دار، جریان از روی تاج ورودی به‌صورت ریزشی به سمت پایین‌دست تخلیه می‌شود؛ الگوی دوم روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد. در این بخش، جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین دست بخش شیب‌دار کلید تخلیه می‌شود. اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2011) عملکرد هیدرولیکی دو نوع سرریز زیگزاگی مستطیلی را با سرریز کلید پیانویی مقایسه کردند. بر اساس نتایج بررسی‌های این محققان، سرریز کلید پیانویی نسبت به دو سرریز دیگر عملکرد بهتری دارد.

لیت‌ریبریو و همکاران (Leite-Ribeiro et al., 2012) با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی یک معادله عمومی را

گبهارت و همکاران (Gebhardt *et al.*, 2017)، با مقایسه سرریزهای جانبی و زیگزاگی در رودخانه ایلمنا Ilmenau نشان دادند که سرریز زیگزاگی به دلیل داشتن طول تاج بیشتر می‌تواند جریان بیشتری را به‌ازای بار هیدرولیکی کمتر عبور دهد و در مقابل، هد بالادست سرریز زیگزاگی در مواقع سیلابی بیشتر از یک سرریز جانبی است. ضمن آنکه سرریز جانبی در شرایط جریان مستغرق بهتر عمل می‌کند. سجادی و همکاران (Sajadi *et al.*, 2017) اثر آرایش موانع را بر میزان استهلاک انرژی سرریزهای کلید پیانویی در دو آرایش مختلف (N) بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش دبی میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد؛ همچنین، میزان استهلاک انرژی در آرایش (۲-۲) به اندازه ۱/۱۶ درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در آرایش (۲-۳) و به اندازه ۸/۶۱ درصد بیشتر از میزان استهلاک انرژی در مدل بدون مانع است.

با اینکه در خصوص کارایی سرریز کلید پیانویی مطالعاتی صورت گرفته است ولی در مورد مقایسه سرریز کلید پیانویی با سرریزهای زیگزاگی، تحقیقات اندک است و از این رو در تحقیق حاضر به بررسی ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی و مقایسه آن با ضریب جریان سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به بررسی و مقایسه هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی با سرریز زیگزاگی با پلان مستطیلی شکل پرداخته شده است. این امر به‌صورت برداشت عمق و سرعت جریان در بالادست و پایین دست و نیز محاسبه دبی محقق شد.

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر روی یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک مجتمع آموزشی

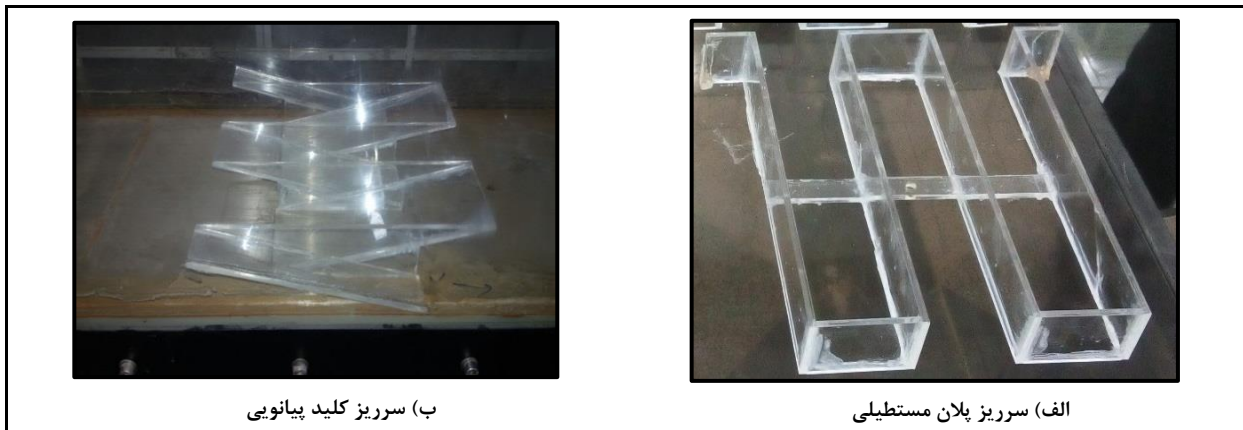
رابطه برای تعیین ضریب دبی سرریز در حالت جریان آزاد ارائه داده‌اند.

حیدرپور و همکاران (Heidarpoor *et al.*, 2006) وضعیت ضریب دبی در سرریزهای زیگزاگی با یک سیکل را که در پلان به شکل مستطیل و U بود به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار ضریب دبی در یک H/P (نسبت انرژی کل بالادست به ارتفاع سرریز) مشخص افزایش می‌یابد. همچنین، مقایسه‌ها نشان می‌دهد که افزایش طول موازی با جهت جریان در سرریزهای زیگزاگی باعث کاهش ضریب دبی و افزایش طول عمود بر جهت جریان، باعث افزایش آن می‌شود. سیسرو و همکاران (Cicero *et al.*, 2017) با مطالعه تجربی با هدف بهبود شرایط هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد و مستغرق به این نتیجه دست یافتند در شرایط جریان آزاد سرریز مقدار ضریب دبی نسبت به پارامتر H/p تغییر می‌کند. به‌طوری‌که در ابتدا با ازدیاد این نسبت ضریب دبی افزایش پیدا می‌کند و سریعاً به نقطه اوج خود می‌رسد و پس از آن با افزایش H/p مقدار ضریب دبی به شدت کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر سرریزهای کلید پیانویی در شرایط جریان مستغرق راندمان بیشتری نسبت به سرریزهای خطی دارند.

کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2017) با مطالعه تجربی ضریب دبی در سرریز جانبی کلید پیانویی از نوع C و مقایسه نتایج حاصل با آنچه از مطالعه سرریز جانبی مستطیلی به دست آمده است، به این نتیجه رسیدند که ضریب آبگذری سرریز کلید پیانویی به‌طور قابل توجهی بیشتر از ضریب آبگذری سرریز مستطیلی لبه تیز است. علاوه بر این، سرریز کلید پیانویی با طول تاج بیشتر دارای ضریب آبگذری بالاتری است اما تأثیر این پارامتر با افزایش عدد فرود و بار هیدرولیکی در بالادست کاهش می‌یابد.

مشاهده بود. پیش از آغاز آزمایش‌ها، شکاف‌های احتمالی در بندهای فلوم بررسی و از آب بند بودن آن اطمینان حاصل شد. در شکل‌های ۱ و ۲، مشخصات قسمت‌های مختلف فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق آمده است:

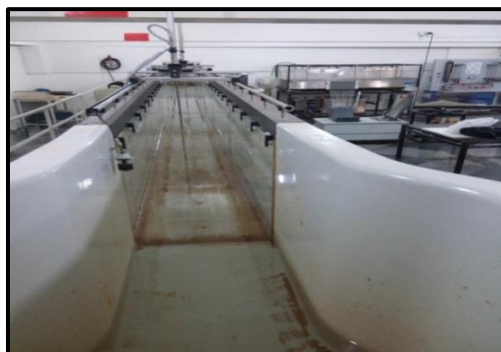
سازمان آب و برق خوزستان- ایران اجرا شد. در این تحقیق، مدل‌های آزمایشگاهی سرریز در داخل یک فلوم مستطیلی به طول ۱۰، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۶ متر بررسی شد. دیواره‌های فلوم، شفاف و از جنس شیشه ساخته شد و در نتیجه پروفیل سطح آب و شرایط جریان قابل



شکل ۱- الف) سرریز پلان مستطیلی و ب) سرریز کلید پیانویی (تحقیق حاضر)

سرانجام جریان آب پس از عبور از سرریز از طریق کانال پایین دست به مخزن پمپاژ وارد می‌شود و دوباره به چرخه بازمی‌گردد. یادآوری می‌شود که منابع خطا در ارتفاع سطح آب بالادست سرریز قبل از افت سطح آب با عمق سنج با درصد خطای ± 2 میلی‌متر و دبی جریان نیز با یک دستگاه دبی‌سنج دیجیتال با درصد خطای ۵ درصد تعیین گردید (شکل ۲).

کف فلوم صاف و ثابت و بدون شیب و در حد دقت اجرایی (شیب حدود صفر) به صورت افقی در نظر گرفته شد. جریان آب ابتدا با پمپ از مخزن زمینی به سمت مخزن آرام‌کننده ورودی فلوم (بالادست فلوم) هدایت می‌شود، جریان به آرامی و با دبی کم وارد کانال می‌شود و به آرامی از روی سرریز عبور می‌کند و با تغییر در میزان دبی شرایط هیدرولیکی گذرنده از سرریز بررسی و ثبت و



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی (تحقیق حاضر)

از استغراق با بار هیدرولیکی مختلف عبور داده شد تا تأثیر پارامتر H_0/P بر عملکرد سرریزهای مورد مطالعه با دقت بالایی تعیین گردد. تغییرات دبی با توجه به آنچه گفته شد در حدود ۹۵ متر مکعب بر ساعت بود ضمن آنکه دبی عبوری از سرریز با دبی سنج دیجیتالی اندازه‌گیری شده است که منابع خطا با تکرار آزمایش و خطاهای آزمایشگاهی (دستگاه‌ها و ادوات اندازه‌گیری) از طریق کالیبراسیون آن دستگاه‌ها کاهش داده یا از بین برده شد. مشخصات دبی‌سنج دیجیتالی در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای مورد آزمایش، در جدول ۲ ارائه شده است.

در تحقیق حاضر، سرریز زیگزاگی مستطیلی و سرریز کلید پیاپویی با دو سیکل و تک سیکل در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۲). همچنین، سرریز کلید پیاپویی در دو حالت تک و دو سیکل نیز بررسی شد. سرریزهای مورد استفاده در این تحقیق از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شدند. در تمامی آزمایش‌ها، تراز بستر بالادست و پایین‌دست برابر بود و عرض کانال تخلیه ۳۰ سانتی‌متر و نسبت عرض سیکل به ارتفاع سرریزها (w/p) نیز برابر با ۳ و $۲/۵$ و ۲ لحاظ شد. ضمناً ضخامت دیواره (T_s) ، ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از هریک از سرریزها ۱۲ جریان از $۱/۴$ تا $۲۷/۸$ لیتر بر ثانیه (۵ تا ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت) قبل از استغراق تا آستانه استغراق و بعد

جدول ۱- مشخصات دبی‌سنج دیجیتالی مورد استفاده در سیستم فلوم

جنس بدنه دبی‌سنج	قطر اسمی (میلی‌متر)	فشار اسمی (بار)	دمای کاری (درجه سلسیوس)	میزان خطا (درصد)
پلی‌پورتان (Pu)	۱۰۰	۱۶	+۵۰ تا -۲۰	۵

جدول ۲- مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز کلید پیاپویی

مدل	W	w/p	L (سانتی‌متر)	T_s (میلی‌متر)	N	W/W ₀	تعداد آزمایش
سرریز کلید پیاپویی	۱۵	۲، ۲/۵، ۳	۱۴۸/۵	۵	۲	۱/۲۵	۳۶
سرریز کلید پیاپویی	۳۰	۲، ۲/۵، ۳	۱۴۸/۵	۵	۱	۱/۲۵	۳۶
زیگزاگی (پلان مستطیلی)	۱۵	۲، ۲/۵، ۳	۱۴۸/۵	۵	۲	-	۳۶

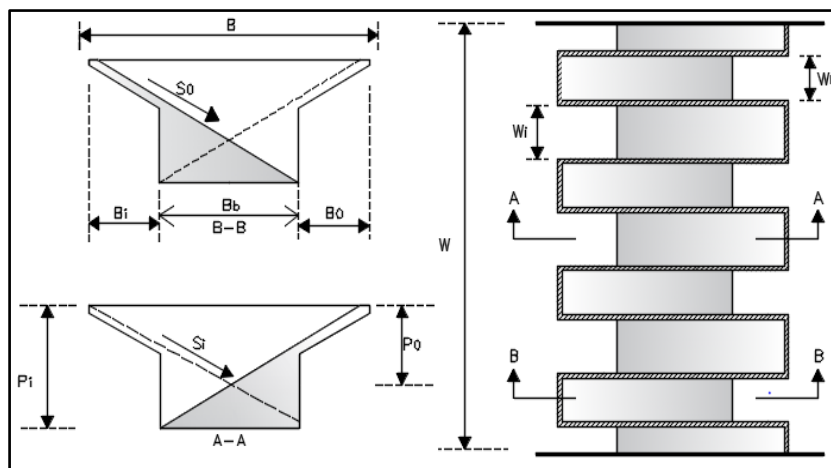
ارتفاع سرریز (P)، ارتفاع تاج سرریز تا مرکز شیب کف (P_m)، طول خط مرکزی تاج سرریز (L)، شیب کف کلید ورودی (S_i)، شیب کف کلید خروجی (S_o)، عرض سرریز (W)، طول سرریز (B)، طول کلید خروجی (B_o)، طول کلید ورودی (B_i)، عرض کلید ورودی (W_i)، عرض کلید خروجی (W_o)، ضخامت دیواره (T_s) و تعداد کلید (N).

در جدول‌های ۱ و ۲ $W=(w_i+w_o)$ عرض هر سیکل، P =ارتفاع سرریز، L =طول موثر سرریز، T_s =ضخامت سرریز و N =تعداد کلید در سرریز.

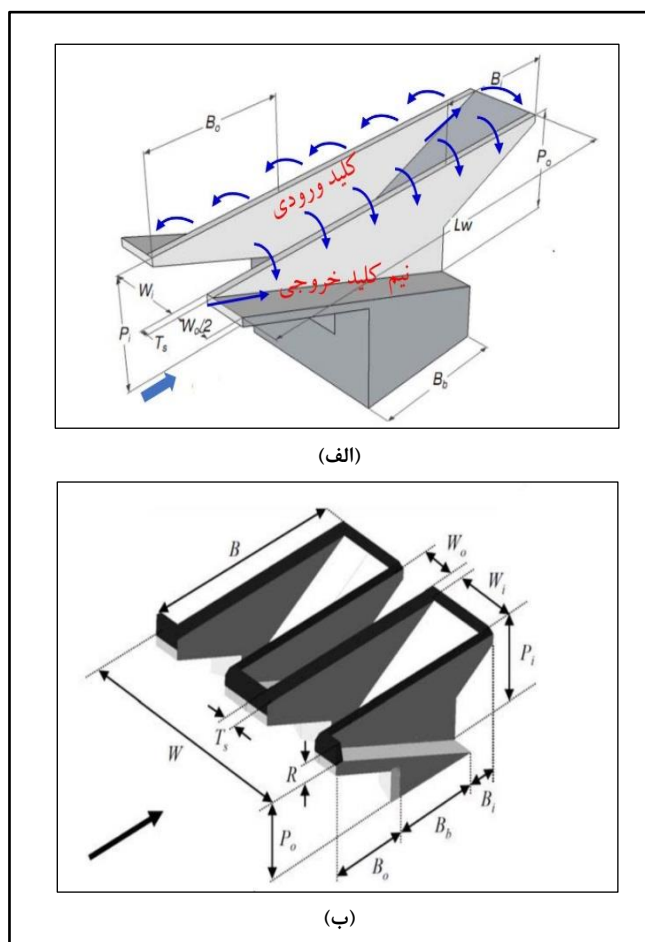
آنالیز ابعادی

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ پارامترهای مهم هندسی و نمای سه‌بعدی از سرریزهای کلید پیاپویی و مستطیلی شکل را نشان می‌دهند:

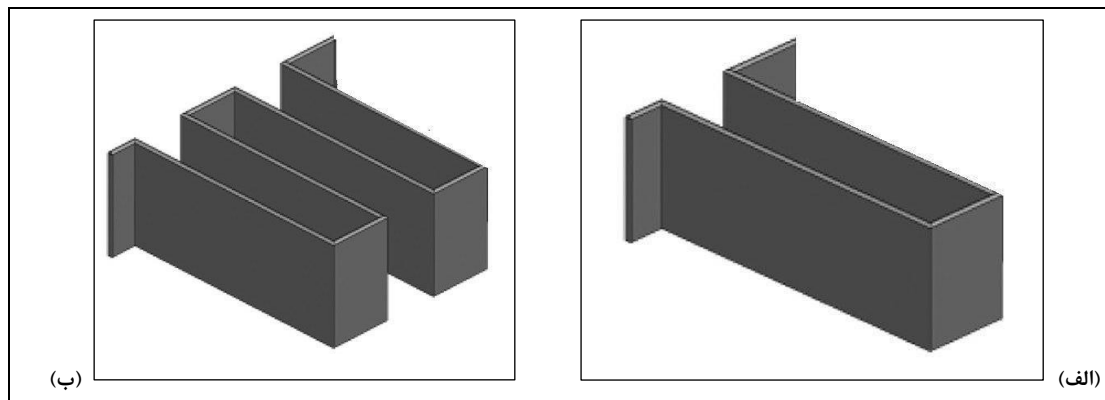
نسبت‌های هندسی مهم در طراحی سرریز کلید بیانویی: نسبت طول تاج سرریز به عرض سرریز $(n = L/W)$ ، و نسبت ضخامت دیواره به ارتفاع سرریز (B_i/B_o) ، نسبت طول ورودی به خروجی سرریز (T_s/P) ، و نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی



شکل ۳- پلان پارامترهای مهم هندسی در طراحی سرریز کلید بیانویی (تحقیق حاضر)



شکل ۴- نمای سه بعدی از سرریز کلید بیانویی
الف) تک سیکل و ب) دو سیکل (تحقیق حاضر)



شکل ۵- نمای سه بعدی از سرریز پلان مستطیلی شکل
الف) تک سیکل و ب) دو سیکل (تحقیق حاضر)

σ = کشش سطحی؛ H_0 = بار هیدرولیکی کل جریان روی بالادست سرریز؛ H_d = بار هیدرولیکی کل در پایین دست سرریز؛ S = شیب کانال؛ B = عرض کانال؛ و S_e = فاکتور تعیین کننده شکل مقطع تاج.

در این تحقیق، با توجه به ثابت بودن پارامترهای بدون بعد B_i/P ، B_o/P ، Q^2 / gP^5 ، $\mu P / \rho Q$ ، ρ ، T_s/P ، W/P ، n ، $\sigma / \rho P$ ، S_e/P و B/P از آنالیز ابعادی به روش π باکینگهام و حذف پارامترهای ثابت، تأثیر هد هیدرولیکی بر ضریب دبی جریان در سرریز زیگزاگی با پلان مستطیلی و سرریز کلید پیاپویی در ۳ ارتفاع مختلف سرریز بررسی شد (رابطه ۳):

$$C_d = f\left(\frac{H_0}{p}, \frac{P_i}{p}\right) \quad (3)$$

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش‌های هیدرولیکی سرریز زیگزاگی با پلان مستطیلی شکل و سرریز کلید پیاپویی در جدول ۳ ارائه شده است. در اینجا هریک از آنها به تفصیل بررسی می‌شود.

معادله عمومی سرریزها که تولیس و همکاران (Tullis et al., 1995) برای سرریزهای زیگزاگی به کار گرفتند (رابطه ۱):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_0^{1.5} \quad (1)$$

که در آن، Q = دبی عبوری از سرریز؛ L = طول مشخصه (مانند طول تاج سرریز)؛ g = شتاب ثقل؛ H_0 = بار هیدرولیکی کل؛ و C_d = ضریب دبی بدون بعد که با آزمایش تعیین می‌شود. به طور کلی کمیت‌های مؤثر در آگذری سرریزهای کلید پیاپویی را می‌توان به شکل رابطه ۲ ارائه داد:

$$C_d = f(Q, B_i, B_o, S_i, S_o, T_s, p, D, W, n, H_0, H_d, S_e, S, Y, V, g, \mu, \rho, \nu, \sigma) \quad (2)$$

که در آن، Y = عمق جریان در کانال؛ V = سرعت جریان در کانال؛ μ = لزجت دینامیکی؛ ρ = چگالی سیال؛ ν = لزجت سینماتیکی؛ D = ارتفاع سرریز در پایین دست؛ P = ارتفاع سرریز در بالادست؛ $W = W_i + W_o$ = عرض یک سیکل؛

جدول ۳- مشخصات سرریزهای مستطیلی دو سیکل و سرریزهای کلید پیانویی تک و دو سیکل مورد آزمایش

سرریز کلید پیانویی											
تک سیکل						دو سیکل					
w/p=۳		w/p=۲/۵		w/p=۲		w/p=۲		w/p=۲/۵		w/p=۳	
H _o /p	C _d	H _o /p	C _d	H _o /p	C _d	H _o /p	C _d	H _o /p	C _d	H _o /p	C _d
۰/۰۸	۰/۷۰	۰/۰۶	۰/۶۹	۰/۰۵	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۸۶۳	۰/۱۱۰	۰/۷۳۹	۰/۷۵۵	۰/۳۴۵
۰/۱۵	۰/۷۷	۰/۱۱	۰/۷۶	۰/۱۰	۰/۹۱	۰/۱۲۰	۰/۸۸۳	۰/۱۶۱	۰/۷۷۳	۰/۶۵۳	۰/۳۷۷
۰/۲۱	۰/۷۹	۰/۱۷	۰/۸۴	۰/۱۵	۰/۹۳	۰/۱۶۰	۰/۸۸۹	۰/۱۸۶	۰/۷۷۴	۰/۵۵۱	۰/۴۰۷
۰/۲۷	۰/۷۳	۰/۲۱	۰/۸۵	۰/۱۹	۰/۹۱	۰/۲۱۳	۰/۸۵۵	۰/۲۲۰	۰/۷۳۷	۰/۴۶۹	۰/۴۵۲
۰/۳۱	۰/۶۷	۰/۲۵	۰/۸۰	۰/۲۴	۰/۸۶	۰/۲۸۰	۰/۷۴۶	۰/۲۸۸	۰/۶۵۹	۰/۴۲۹	۰/۴۸۰
۰/۳۵	۰/۶۲	۰/۳۱	۰/۷۲	۰/۳۱	۰/۷۹	۰/۳۳۳	۰/۶۵۸	۰/۳۲۲	۰/۶۲۱	۰/۳۴۷	۰/۵۵۹
۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۳۷	۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۷۰	۰/۳۷۸	۰/۶۰۰	۰/۳۷۳	۰/۵۶۶	۰/۲۸۶	۰/۶۲۶
۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۵۹	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۴۸۰	۰/۵۱۲	۰/۴۵۸	۰/۴۹۱	۰/۲۳۵	۰/۶۹۰
۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۵۶۰	۰/۴۵۸	۰/۵۲۵	۰/۴۴۱	۰/۲۰۴	۰/۶۹۹
۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۵۸	۰/۴۴	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۶۰۰	۰/۴۴۲	۰/۵۹۳	۰/۴۲۱	۰/۱۶۳	۰/۷۰۶
۰/۶۱	۰/۴۱	۰/۶۱	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۶۳۹	۰/۴۰۸	۰/۴۷۶	۰/۳۷۱	۰/۱۳۳	۰/۶۸۶
۰/۶۹	۰/۳۸	۰/۶۵	۰/۴۱	۰/۷۰	۰/۴۲						
۰/۸۰	۰/۳۶	۰/۷۸	۰/۳۸	۰/۷۹	۰/۳۹						

سرریز مستطیلی شکل دو سیکل					
w/p=۳		w/p=۲/۵		w/p=۲	
H _o /p	C _d	H _o /p	C _d	H _o /p	C _d
۰/۱۰۰	۰/۴۸۴	۰/۱۰۰	۰/۵۴۵	۰/۰۸۷	۰/۶۰۵
۰/۱۵۰	۰/۵۳۷	۰/۱۴۲	۰/۵۸۹	۰/۱۳۳	۰/۶۴۳
۰/۱۹۰	۰/۵۳۴	۰/۲۱۷	۰/۵۲۱	۰/۱۸۷	۰/۶۱۰
۰/۲۴۰	۰/۵۰۱	۰/۲۸۳	۰/۴۷۷	۰/۲۲۷	۰/۵۷۵
۰/۳۰۰	۰/۴۳۸	۰/۳۹۲	۰/۳۹۶	۰/۲۹۳	۰/۴۹۷
۰/۳۸۰	۰/۳۷۰	۰/۴۵۰	۰/۳۶۷	۰/۳۶۰	۰/۴۳۱
۰/۴۴۰	۰/۳۴۰	۰/۵۱۷	۰/۳۲۳	۰/۴۲۷	۰/۳۹۵
۰/۵۰۰	۰/۳۲۵	۰/۶۰۰	۰/۳۰۱	۰/۴۹۳	۰/۳۵۷
۰/۵۶۰	۰/۳۰۴	۰/۷۳۳	۰/۲۷۶	۰/۵۸۷	۰/۳۱۹
۰/۶۲۰	۰/۲۸۴	۰/۸۱۷	۰/۲۶۳	۰/۶۲۷	۰/۳۱۲
۰/۶۸۰	۰/۲۷۵			۰/۶۹۳	۰/۲۸۹
۰/۷۶۰	۰/۲۵۹				

است که با سرریز کلید پیانویی دو سیکل مقایسه شده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که در کلیه موارد، با افزایش نسبت بار هیدرولیکی تا حدود ۰/۱۷ ($H_o/P < 0/17$)، ضریب جریان افزایش می‌یابد و در این نسبت به حداکثر خود می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش تدریجی بار هیدرولیکی است و در واقع نشان دهنده گذر از مرحله هوادهی کامل و ورود به

مقایسه ضریب جریان در سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی تحت تأثیر بار هیدرولیکی در این تحقیق عملکرد هیدرولیکی سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی با سرریز کلید پیانویی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. یادآوری می‌شود که سرریز کلید پیانویی به صورت تک و دو سیکل و سرریز پلان مستطیلی مورد آزمایش در این تحقیق دارای ۲ سیکل

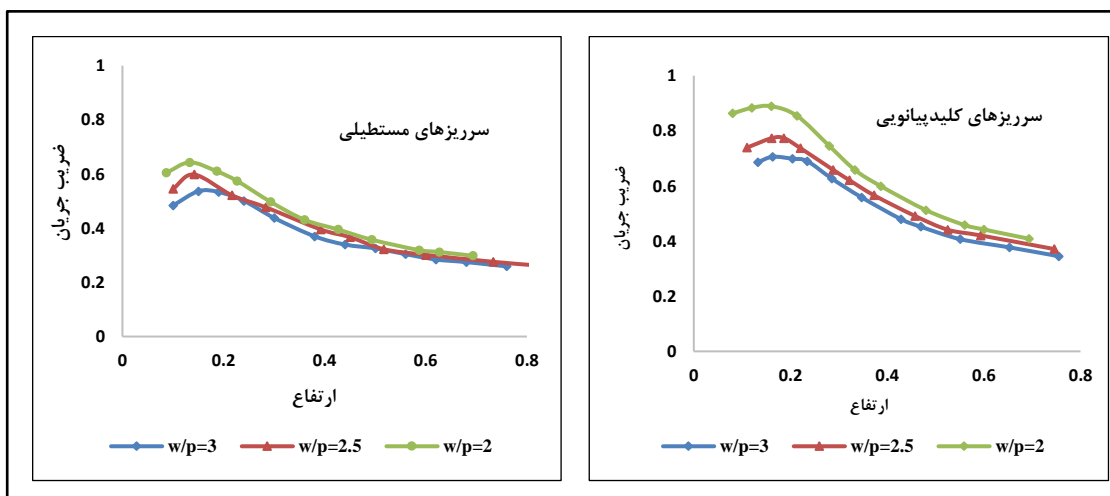
به تدریج با افزایش دبی جریان شدت تداخل بیشتر می‌شود. این موضوع به کاهش ضریب دبی جریان می‌انجامد و مقدار آن متمایل به ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه‌پهن می‌گردد.

بر اساس شکل ۷ مشخص می‌شود در سرریز کلید پیانویی، با افزایش ارتفاع سرریز (P) به میزان ۵۰ درصد یعنی از ۵ به ۷/۵ سانتی‌متر ($w/p=3$ تا $w/p=2$) ضریب جریان حدود ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، در سرریز پلان مستطیلی نیز با افزایش همین مقدار در ارتفاع سرریز یعنی از ۵ به ۷/۵ سانتی‌متر ($w/p=3$ تا $w/p=2$) ضریب جریان حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده در این خصوص با نتایج تحقیقات حیدرپور و همکاران (Heidarpoor et al., 2006) همخوانی دارد که وضعیت ضریب دبی در سرریزهای زیگراگی با یک سیکل را که در پلان به شکل مستطیل و U بود به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار ضریب دبی در H_o/P (نسبت انرژی کل بالادست به ارتفاع سرریز) مشخص افزایش می‌یابد.

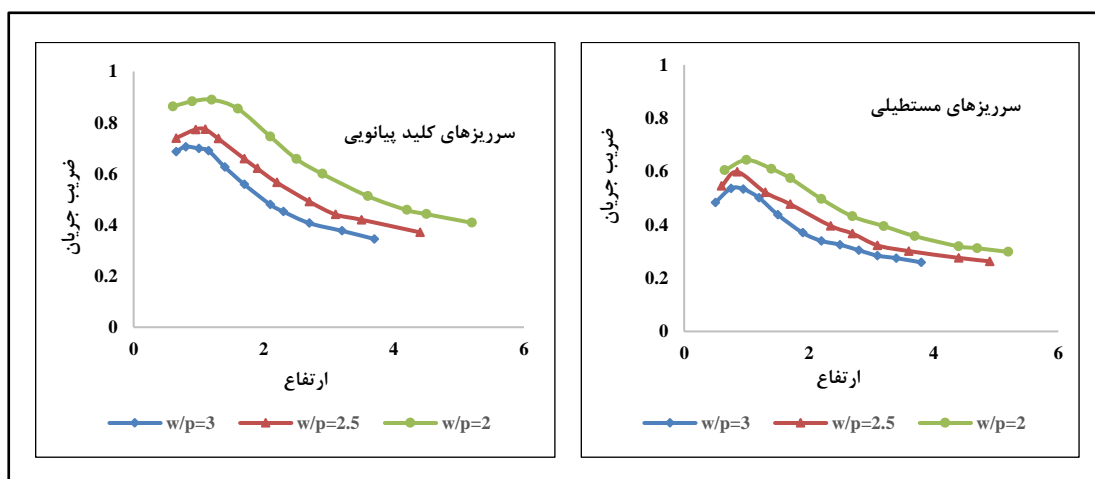
در هر دو نوع سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی با نزدیک شدن به دبی استغراق تأثیر ارتفاع سرریز بر ضریب جریان کاهش می‌یابد به طوری که در دبی‌های پس از استغراق، افزایش ارتفاع سرریز تأثیر چندانی بر ضریب جریان نداشته است. در این حالت هر دو سرریز مانند یک برآمدگی در برابر جریان عمل می‌کنند و باعث ایجاد افت در جریان می‌شوند که در این حالت سرریز پلان مستطیلی، نسبت به سرریز کلید پیانویی، افت انرژی بیشتری ایجاد می‌کند. آستانه استغراق در سرریز کلید پیانویی در نسبت $(H_o/P > 0/54)$ و در سرریز پلان مستطیلی در نسبت $(H_o/P > 0/61)$ اتفاق افتاده است. H_o ارتفاع آب روی سرریز و P ارتفاع سرریز است).

مرحله چسبندگی جزئی است. در این مرحله، سرریز به صورت آزاد عمل می‌کند و جریان ریزشی از روی تاج آن با فاصله‌ای مناسب نسبت به بدنه سرریز به پایین دست منتقل می‌شود این امر موجب می‌گردد که احتمال ایجاد کاویتاسیون به طور چشمگیر کاهش یابد. همچنین مطابق نتایج این تحقیق در نسبت‌های کم بار هیدرولیکی در هر دو سرریز، بیشترین ضریب جریان مشاهده می‌شود. بر اساس شکل ۶، بیشترین ضریب جریان (حدود ۰/۸۸) در سرریز کلید پیانویی در نسبت بار هیدرولیکی $H_o/P < 0/17$ و نسبت $w/p=2$ (عرض سیکل به ارتفاع سرریز) اتفاق افتاده است. همچنین، بیشترین ضریب جریان در سرریز با پلان مستطیلی (حدود ۰/۶۴) در نسبت $H_o/p=0/14$ و نسبت $w/p=2$ (عرض سیکل به ارتفاع سرریز) صورت پذیرفته است. در هر دو نوع سرریز (پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی)، با افزایش نسبت ارتفاع سرریز (P) ضریب جریان افزایش می‌یابد. همچنین، در هر دو نوع سرریز با افزایش بار هیدرولیکی ضریب جریان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در دبی استغراق به حداقل خود می‌رسد به طوری که در سرریز کلید پیانویی در نسبت‌های بار هیدرولیکی کمتر از ۰/۱۷ ضریب جریان صعودی و در این نسبت به حداکثر خود می‌رسد و پس از آن ضریب جریان کاهش می‌یابد. در سرریز پلان مستطیلی نیز در نسبت‌های بار هیدرولیکی کمتر از ۰/۱۴ ضریب جریان صعودی و پس از آن نزولی می‌شود.

نتیجه به دست آمده در این بخش با نتایج به دست آمده از تحقیقات کورکستون و تولیس (Crookston & Tullis, 2012a) متناسب است. همچنین، بررسی‌های کورکستون و تولیس (Crookston & Tullis, 2012b; 2012c) نشان می‌دهد که در دبی‌های کم در سرریزها ضریب جریان، به دلیل تداخل کم تیغه‌ها در جداره دیواره از سرریز خطی بیشتر است و



شکل ۶- تأثیر نسبت ارتفاعی (H_0/p) بر ضریب دبی جریان در سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی



شکل ۷- تأثیر دبی جریان بر ضریب دبی C_d در سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی

گرفته شد. شکل ۸، مقایسه ضریب جریان در سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی را در شرایط ارتفاعی مختلف نشان می‌دهد.

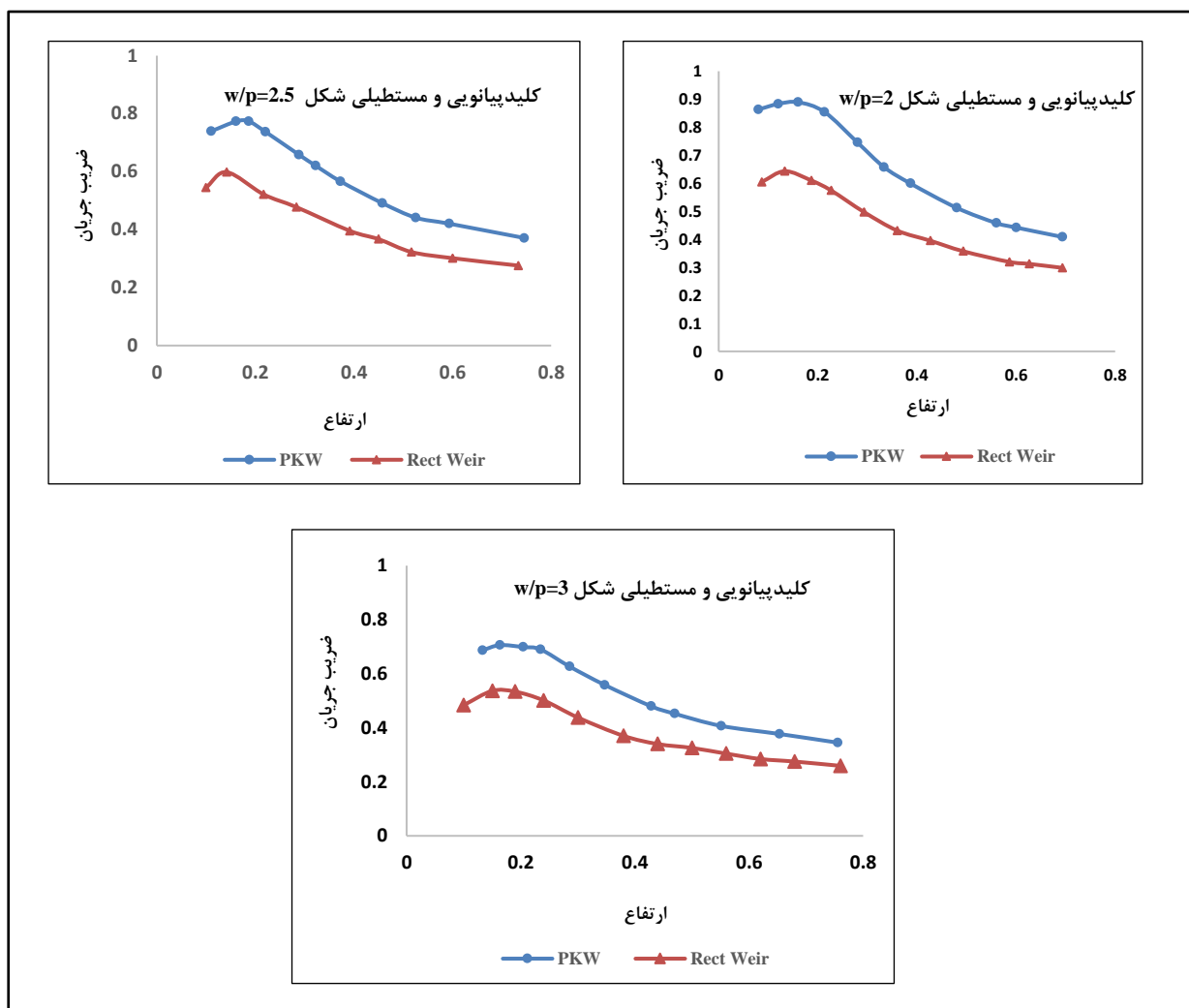
از شکل ۸ نتیجه‌گیری می‌شود که ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی به‌طور محسوس بیشتر از ضریب جریان در سرریز با پلان مستطیلی است به‌طوری که این اختلاف در بار هیدرولیکی کم، زیاد است و به تدریج با نزدیک شدن به دبی استغراق این اختلاف کاهش می‌یابد. در دبی استغراق و دبی‌های پس از استغراق هر دو سرریز مانند مانع در برابر

بررسی و مقایسه ضریب جریان C_d در سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی در نسبت ارتفاعات مختلف

برای بررسی ضریب جریان در دو سرریز کلید پیانویی و پلان مستطیلی از هر مدل سرریز، سه ارتفاع ساخته شد و این سرریزها در نسبت‌های ارتفاعی مساوی بررسی شدند. یادآوری می‌شود که عرض سیکل (w) در هر دو سرریز ۱۵ سانتی‌متر، تعداد سیکل‌ها $N=2$ و ارتفاع سرریزها ۵، ۶ و $7/5$ سانتی‌متر (۳، $2/5$ ، ۲) $w/p=$ در نظر

مستطیلی است. این اختلاف، با افزایش بار هیدرولیکی، کمتر می‌شود و در دبی‌های استغراق و بعد از استغراق به حداقل خود می‌رسد. به‌طوری‌که در دبی‌های پس از استغراق که هر دو سرریز مانند یک برجستگی عمل می‌کنند و باعث افت انرژی می‌شوند، سرریز پلان مستطیلی افت انرژی بیشتری به‌وجود می‌آورد.

جریان عمل می‌کنند. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که در دبی‌های پس از استغراق نیز سرریز پلان مستطیلی به‌دلیل شکل هندسی خود افت جریان بیشتری به‌وجود می‌آورد. در نسبت $w/p=3$ (ارتفاع سرریز ۵ سانتی‌متر)، مشاهده می‌شود که در مقادیر بار هیدرولیکی حدود $0/17$ ($H_0/P=0/17$) ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی حدود $31/7$ درصد بیشتر از ضریب جریان در سرریز پلان



شکل ۸ - ضریب جریان در سرریز پلان مستطیلی و سرریز کلید پیانویی در نسبت‌های ارتفاعی مختلف

به آرامی توسط کلیدهای ورودی دارای شیب خاص به پایین دست سرریز هدایت می‌شود و این امر افت انرژی کمتری و از نظر سازه‌ای نیز فشار کمتری روی سرریز

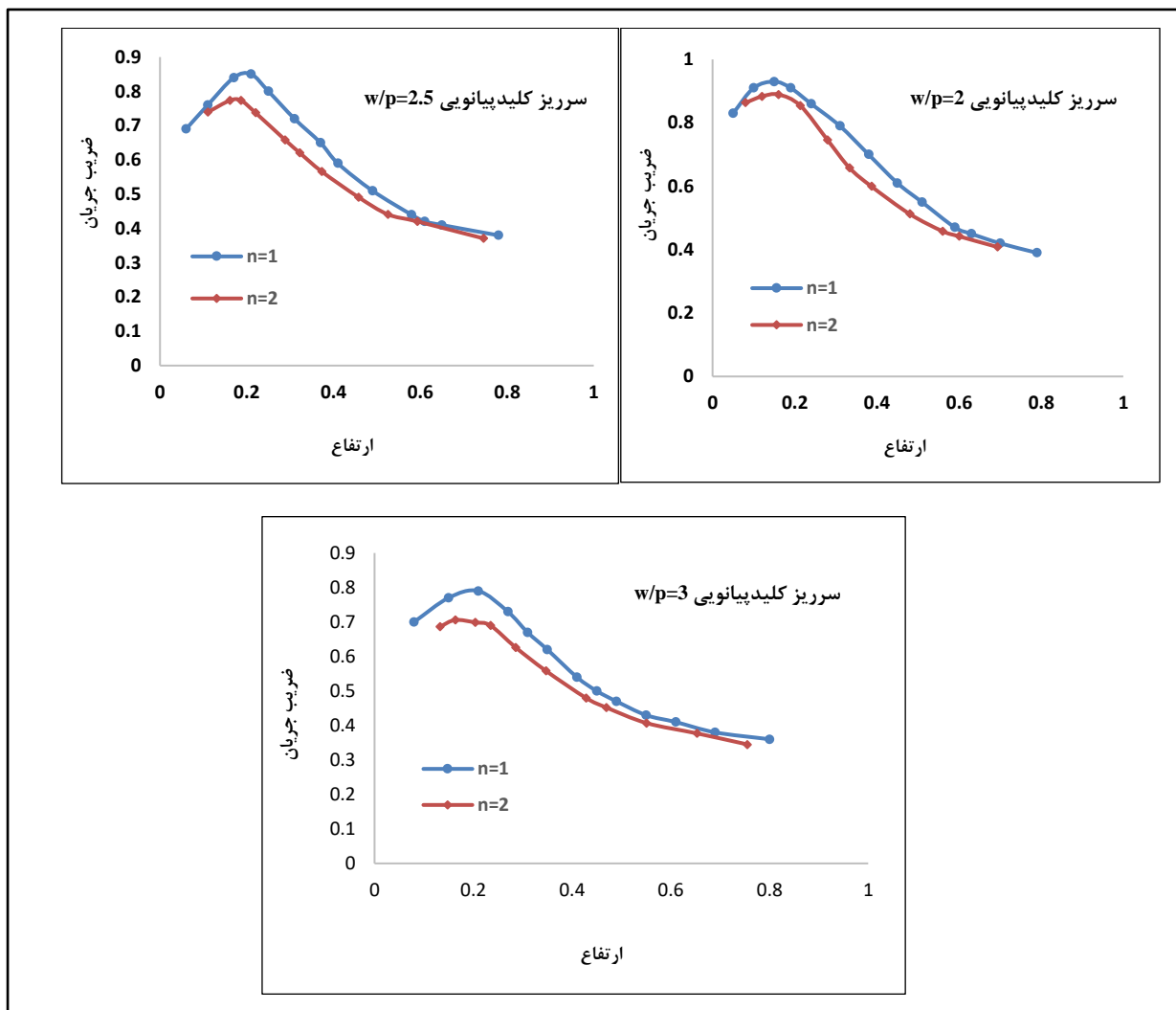
کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی، نسبت به زیگزاگی، مطلوب‌تر است زیرا طراحی این سرریز (کلید پیانویی) به‌گونه‌ای است که جریان نزدیک‌شونده به سرریز

به‌همراه خواهد داشت در صورتی که در سرریزهای زیگزاگی، جریان نزدیک‌شونده به سرریز با اعمال فشار به بدنه قائم سیکل‌های ورودی موجب ایجاد افت انرژی می‌شود و با افزایش تدریجی بار هیدرولیکی، این افت افزایش می‌یابد و سرانجام موجب کاهش چشمگیر ضریب دبی می‌شود. در $w/p=2/5$ نیز حالت مشابهی وجود دارد که در مقادیر بار هیدرولیکی حدود $0/17$ ، $(H_0/P=0/17)$ ، ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی حدود $29/3$ درصد از ضریب جریان سرریز پلان مستطیلی بیشتر است. با افزایش نسبت بار هیدرولیکی، این اختلاف کاهش می‌یابد. در $w/p=2$ نیز در مقادیر بار هیدرولیکی حدود $0/17$ ،

به‌همراه خواهد داشت در صورتی که در سرریزهای زیگزاگی، جریان نزدیک‌شونده به سرریز با اعمال فشار به بدنه قائم سیکل‌های ورودی موجب ایجاد افت انرژی می‌شود و با افزایش تدریجی بار هیدرولیکی، این افت افزایش می‌یابد و سرانجام موجب کاهش چشمگیر ضریب دبی می‌شود. در $w/p=2/5$ نیز حالت مشابهی وجود دارد که در مقادیر بار هیدرولیکی حدود $0/17$ ، $(H_0/P=0/17)$ ، ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی حدود $29/3$ درصد از ضریب جریان سرریز پلان مستطیلی بیشتر است. با افزایش نسبت بار هیدرولیکی، این اختلاف کاهش می‌یابد. در $w/p=2$ نیز در مقادیر بار هیدرولیکی حدود $0/17$ ،

بررسی و مقایسه ضریب جریان Ca در سرریز کلید پیانویی (تک سیکل، دو سیکل)

در این بخش، سرریزهای کلید پیانویی در نسبت‌های ارتفاعی یکسان و در تعداد سیکل مختلف بررسی شده‌اند که نتایج به‌دست آمده از این بررسی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ - ضریب جریان Ca در سرریز کلید پیانویی (تک و دو سیکل) در ارتفاعات مختلف

این امر افت انرژی کمتری و از نظر سازه‌ای نیز فشار کمتری روی سرریز به‌همراه خواهد داشت در صورتی که در سرریزهای زیگزاگی، جریان نزدیک‌شونده به سرریز با اعمال فشار به بدنه قائم سیکل‌های ورودی موجب ایجاد افت انرژی می‌شود و با افزایش تدریجی بار هیدرولیکی، این افت افزایش می‌یابد و سرانجام موجب کاهش چشمگیر ضریب دبی می‌شود. این سرریزها باید به گونه ای طراحی شوند که دامنه قرارگیری سرریز در مرحله هوادهی کامل تا جزئی افزایش یابد؛ این امر به‌طور مستقیم با تاج سرریز و نوع آن ارتباط مستقیم دارد که می‌توان با تمهیداتی برای این بخش از سرریز و استفاده از زائده‌های خاص در طول تاج سرریز به این موضوع مهم نیز دست یافت و ضریب دبی سرریز را افزایش داد. با مقایسه ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی نتیجه‌گیری می‌شود که ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی در تمامی حالات در دبی‌های قبل از استغراق و بعد از استغراق نسبت به سرریز پلان مستطیلی بیشتر است به‌طوری که در نسبت $w/p=2$ (بیشترین ارتفاع سرریز) بیشترین اختلاف مشاهده شده و ضریب جریان در سرریز کلید پیانویی حدود $3/38$ درصد از ضریب جریان سرریز پلان مستطیلی بیشتر بوده است. با افزایش ارتفاع سرریز (کاهش نسبت w/p) ضریب جریان افزایش می‌یابد به‌طوری که با افزایش 50 درصد در ارتفاع سرریز کلید پیانویی (از 5 به $7/5$ سانتی‌متر)، ضریب جریان 26 درصد افزایش می‌یابد. در خصوص سرریز زیگزاگی پلان مستطیلی نیز با افزایش 50 درصد در ارتفاع سرریز، ضریب جریان حدود 20 درصد افزایش نشان می‌دهد.

در شکل ۹، دیده می‌شود که با افزایش نسبت بار هیدرولیکی، ضریب دبی کاهش یافته اما در مقادیر کمتر نسبت بار هیدرولیکی به دلیل چسبندگی جریان، ضریب دبی به‌طور چشمگیر افزایش یافته است؛ به تدریج با پیشرفت همین روند، سرریز در مرحله هوادهی کامل قرار می‌گیرد که ضریب دبی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که سرریز با $W/P=2$ نسبت به دیگر سرریزها دارای ضریب دبی بیشتری است. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که سرریز با $W/P=2/5$ ، نسبت به $W/P=3$ ، ضریب دبی بیشتری دارد. در قسمتی از شکل ۹، ضریب دبی با شیب نسبتا ملایم کاهش می‌یابد، علت این امر افزایش نسبت بار هیدرولیکی و به تبع آن ایجاد استغراق موضعی در دماغه‌های ورودی و خروجی سرریز و به تدریج در تمام طول تاج سرریز است که کارایی هیدرولیکی آن را کاهش داده است. از سوی دیگر، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد سیکل در سرریزهای کلید پیانویی ضریب آبگذری به ازای تمامی مقادیر از نسبت بار هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه گفته شد، استفاده از سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی از آن نظر با اهمیت است که در مقایسه با دیگر سرریزها (خطی) طول تاج بیشتری دارد. کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای زیگزاگی مطلوب‌تر است زیرا طراحی این نوع سرریز (کلید پیانویی) به‌گونه‌ای است که جریان نزدیک‌شونده به سرریز به آرامی توسط کلیدهای ورودی دارای شیب خاص به پایین دست سرریز هدایت می‌شود و

قدردانی

نویسندگان مقاله از مجتمع آموزشی سازمان آب و برق خوزستان برای در اختیار قرار دادن آزمایشگاه و نیز از راهنمایی‌های آقای مهندس مظفر رستمی قدردانی می‌کنند.

مراجع

- Anderson, R. M. and Tullis, B. P. 2011. Influence of Piano KeyWeir geometry on discharge. Labyrinth and Piano Key Weirs, PKW 2011 – Erpicum *et al.* (Eds.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-68282-4.
- Anderson, R. M. and Tullis, B. P. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. J. Hydraul. Eng. 138(4): 358-361.
- Cicero, G. M., Laugier, F. and Vermeulen, J. 2017. Synthesis of Piano Key Weir experimental studies at LNHE, Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum *et al.* (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
- Crookston, B. M. and Tullis, B. P. 2012a. Discharge efficiency of reservoir application specific labyrinth weirs. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 138(6): 773-776.
- Crookston, B. M. and Tullis, B. P. 2012b. Arced labyrinth weirs. J. Hydraul. Eng. ASCE. 138(6): 555-562.
- Crookston, B. M. and Tullis, B. P. 2012c. Labyrinth weirs: nappe interference and local submergence. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 138(8): 757-765.
- Falvey, H. T. 2003. Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. ASCE Press, USA.
- Gebhardt, M., Merkel, J., Belzner, F. and Thorenz, C. 2017. A comparison of side weirs and labyrinth weirs at Ilmenau river. Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum *et al.* (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
- Hay, N. and Taylor, G. 1970. Performance and design of labyrinth weirs. J. Hydraul. Div. ASCE. 96(2): 2337-2357.
- Heidarpoor, M., Mousavi, F. and Roshani-Zarmehri, A. R. 2006. Labyrinth weirs with rectangular and U-shape plan-forms. J. Agric. Sci. Nat. Resour. 10(3A): 1-11. (in Persian)
- Javaheri, A. and Kabiri-Samani, A. 2011. Determination of PKW discharge coefficient in free flow condition. The First International Conference and the Third National Conference on Dam and Hydroelectric Plants. Feb. 8-9. Tehran, Iran. (in Persian)
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili, M. 2017. Experimental study of discharge coefficient of a Piano Key SideWeir, Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum *et al.* (Eds) © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-05010-5.
- Leite-Ribeiro, M., Pfister, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J. and Laugier, F. 2012. Piano key weirs as efficient spillway structure. 24th ICOLD Congress on Large Dams, Kyoto, Japan.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. 2006. Design of a new economic shape of weir. Proceeding of International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century. June 18. Barcelona, Spain.
- Sajadi, S. M., Ahadian, J. and Ghanavati, M. 2017. Effect of baffled outlet keys at piano key weir on dissipating energy. Irrig. Drain. Strut. Eng. Res. 18(69): 77-92. (in Persian)

Tullis, B., Young, J. and Chandler, M. 2007. Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. J. Hydraul. Eng. 133(3): 248-254.

Tullis, P., Amanian, N. and Waldron, D. 1995. Design of labyrinth weir spillways. J. Hydraul. Eng. ASCE. 121(3): 247-255.

Villemonte, J. R. 1947. Submerged weir discharge studies. Eng. News Record. 139(26): 54-56.

Laboratory Study of Discharge Coefficients of One and Two-Cycle Piano Key Weirs and Comparison with Rectangular Labyrinth Weir

**H. Rostami, M. Heidarnejad*, M. H. Purmohammadi,
A. A. Kamanbedast and A. Bordbar**

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: mo_he3197@yahoo.com

Received: 5 April 2017, Accepted: 13 January 2018

Piano key weirs (PKWs), a new type of weirs with a very high discharge capacity, can be used as high performance economic structures. This type of weirs is a good alternative to linear weirs, because they increase the discharge per unit width at the span of non-regulated weirs for the same water load and weir width. In this study, the discharge coefficient of piano key weirs was compared with that of a rectangular labyrinth weir. The results showed 38% increase in the discharge coefficient of the piano key weirs as compared to that of the rectangular labyrinth weir. The difference between the discharge coefficients of the weirs was reduced by increasing hydraulic load when reaching the submergence discharge. The difference was reduced about 24% at high discharges. In addition, the tailwater level was gradually increased from the weir crown level.

Keywords: Discharge Coefficient, Labyrinth Weir, Piano Key Weir, Weir with a Rectangular-Shaped Plan