

بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای

میناسادات سیدجوادی*^۱، سیدتقی امید نایینی^۲ و مجتبی صانعی^۳

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران ایران

* sadatm@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۲۰؛ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۱/۳۱)

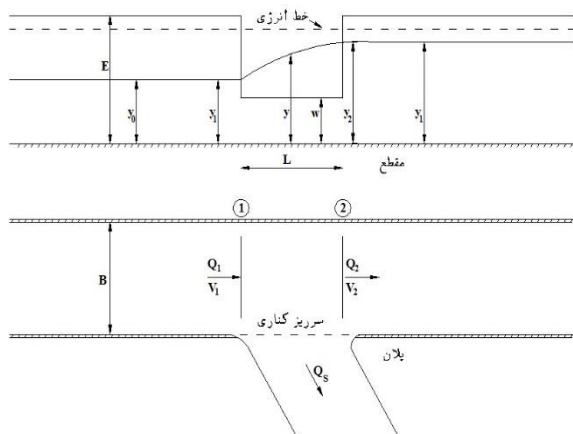
چکیده- سرریز، یک سازه هیدرولیکی است که برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پایین دست سدها استفاده می‌شود. سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که با اهداف مختلف در دستگاه‌های انتقال آب احداث می‌شوند. سرریز جانبی با ارتفاعی کمتر از ارتفاع دیواره کانال احداث شده و هنگامی که سطح آب بالا می‌آید سرریز جانبی باعث تنظیم دبی و کنترل سطح آب در کانال اصلی می‌شود. این تحقیق طی یک بررسی آزمایشگاهی در کانالی با طول ۱۰ متر، ۰/۶ متر عرض، ۰/۶ ارتفاع و ۱۶ مدل سرریز کلید پیانویی تیپ A دوزنقه‌ای با سه پایه متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر انجام شده است. سرریزهای مذکور در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که سرریز با پایه ۱۵ سانتی‌متر در هر دو حالت در نسبت بی‌بعد $0.4 < H/P < 0.2$ دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری C_M بوده و در نسبت بی‌بعد $H/P > 0.5$ سرریز با پایه ۲۰ سانتی‌متر دارای بیشترین ضریب دبی عبوری C_M می‌باشند. همچنین در شرایط آزمایشگاهی مشابه سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای ۴ برابر بیشتر از سرریز کلید پیانویی مستطیلی آب را از خود عبور می‌دهد.

کلید واژگان: ضریب دبی عبوری، سرریز جانبی، کلید پیانویی.

جانبی نشان داده شده است.

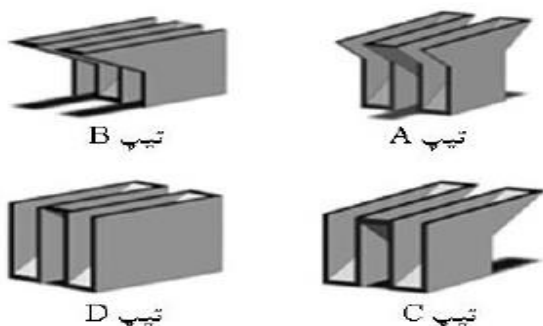
۱- مقدمه

سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که با اهداف مختلف در دستگاه‌های انتقال آب احداث می‌شوند. این سازه در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به منظور انحراف آب مازاد و یا آبیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرریز جانبی با ارتفاعی کمتر از ارتفاع دیواره کانال احداث شده و هنگامی که سطح آب بالا می‌آید سرریز جانبی باعث تنظیم دبی و کنترل سطح آب در کانال اصلی می‌شود. کنترل و انحراف سیلاب در مخازن سدها، انحراف جریان و محافظت سازه در برابر سیلاب در رودخانه‌ها از دیگر موارد کاربرد سرریزهای جانبی است. در شکل ۱ نمای ساده‌ای از سرریز



شکل ۱ نمای از سرریز جانبی

است. ساخت این نوع سرریزها به واسطه استفاده از دیواره‌های قائم ساده است، اما جریان نزدیک شونده به این نوع سرریزها، به‌ویژه جریان‌های تحتانی، پس از ورود به محدوده دو دیواره قائم تاج‌های کناری، به شدت دچار فشردگی شده و به همین علت، تاج‌های بالادست و پایین دست نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب ندارند. علاوه بر این نکات، عیب عمده این نوع سرریزها، سطح "پی" بزرگ موردنیاز برای نصب آن‌ها بر روی سدهای بتنی است (Gandoshmin et al., 2014). شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی، سرریزهای کلید پیانویی هستند که توسط مؤسسه هیدروکووپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بیسکارا الجزایر ارائه شده است. در این نوع از سرریزها، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، دهانه‌ها یک‌دورمیان شیب‌دار به سمت داخل مخزن و بیرون است. این نوع سرریزها دارای چهار تیپ مختلف به نام‌های A, B, C و D می‌باشند (Lempérière and Ouamane, 2003). به‌طور کلی سرریزهای کلید پیانویی دارای چهار تیپ مختلف هستند که تفاوت آنها در وجود یا نبود شیروانی است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تیپ A، دارای شیروانی‌های بالادست و پایین دست، تیپ B، دارای شیروانی‌های بالادست و تیپ C، دارای شیروانی‌های پایین دست هستند و تیپ D، بدون شیروانی است (Lempérière & et al, 2011). در واقع افزایش طول تاج سرریز در یک عرض ثابت آبراهه سرریز و به ازای یک‌بار آبی ثابت، دبی مؤثر این سرریزها را سه تا چهار برابر نسبت به سرریز خطی افزایش می‌دهد (Anderson & Tullis, 2012).



شکل ۲ انواع مختلف سرریز کلید پیانویی (Lempérière et al., 2011)

اجرای این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای کنگره‌ای،

در شکل ۱، y_1 ، y_2 عمق آب در بالادست و پایین دست سرریز، y_0 عمق بحران، W ارتفاع سرریز، B عرض کانال، L طول سرریز، Q_1 ، Q_2 دبی جریان در قبل و بعد از سرریز، Q_s دبی سرریز، V_1 ، V_2 سرعت جریان در قبل و بعد از سرریز است. ابریشمی (۱۳۸۷) جریان در سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با کاهش دبی است. تحقیقات زیادی بر روی این جریان انجام گرفته است. دی مارچی در سال ۱۹۳۴ برای به دست آوردن معادله‌ای جهت سرریزهای کناری و با توجه به شکل ۱ مطالعاتی انجام داد و فرضیات زیر را در نظر گرفت:

کانال مستطیلی و منشوری است، سرریز کناری دارای طول کوتاه بوده، انرژی مخصوص بین مقاطع ۱ و ۲ ثابت است. این امر معادل فرض $S_0 - S_f = 0$ یا $S_0 = 0$ و $S_f = 0$ بوده و نتایج تجربی نشان می‌دهد که یک فرض منطقی است، سرریز کناری معادل یک سرریز لبه تیز بوده که هوادهی کامل صورت گرفته و آب به صورت آزاد خارج می‌شود و ضریب تصحیح انرژی α مساوی یک است.

با توجه به فرضیات بالا، معادله دینامیکی مربوط به سرریزها به شکل زیر درمی‌آید:

$$L = \frac{3B}{2C_M} \left[\frac{2E-3W}{E-W} \sqrt{\frac{E-y}{y-W}} - 3\sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{E-W}} \right] \quad (1)$$

رابطه (۱) به‌عنوان معادله De Marchi معروف است. این رابطه در انتها دارای یک ثابت انتگرال نیز هست. مقادیر y و E عمق و انرژی در بالادست و پایین دست سرریز، w ارتفاع یا همان پایه سرریز، B عرض کانال و C_M ضریب تخلیه دبی است. با توجه به عمومیت این رابطه برای به دست آوردن دیگر سرریزهای جانبی و اشکال مختلف آن نیز از این رابطه استفاده شده است (Abrishami et al., 2017). در تحقیق حاضر با توجه به دانستن عمق‌های اولیه y_1 و y_2 و در دست داشتن دبی‌های عبوری اولیه و نقاط محاسباتی می‌توان به صورت برعکس عمل کرد و مقدار C_M را به دست آورد. در این تحقیق از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای به‌عنوان سرریز جانبی استفاده شده است. پایه و اساس سرریزهای کلید پیانویی، سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند. سرریزهای کنگره‌ای غالباً با استفاده از دیواره‌های قائم ساخته شده و کارایی آن‌ها بسیار بهتر از سرریزهای خطی

مطالعاتی که بر روی این نوع از سرریزها صورت گرفته است در کانال‌های مستقیم بوده، محقیقی چون کبیری سامانی و همکاران در سال ۲۰۱۱ مطالعاتی را به منظور تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد انجام دادند. در این مطالعه برای تعیین تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی جریان، آزمایش‌های مختلفی انجام گرفت. این محققین برای بازه $0.15 < \frac{H_0}{P} < 0.6$ رابطه بهینه برای تعیین ضریب دبی عبوری از سرریزهای کلید پیانویی تیپ A را به صورت زیر ارائه دادند (Kabiri-Samani et al., 2011).

(۳)

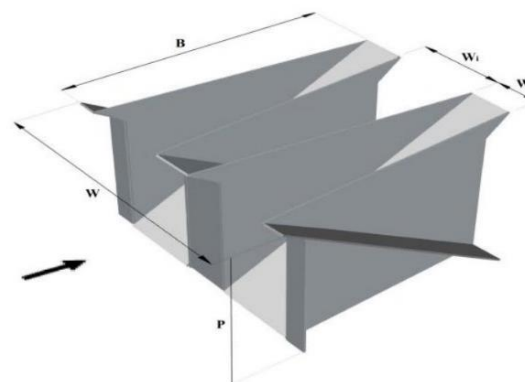
$$C_d = 0.62 \left(\frac{H_0}{P} \right)^{-0.51} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.48} \left(\frac{a}{B} \right)^{0.18} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.44} \exp \left(0.87 \frac{c}{L} \right)$$

کبیری سامانی و جواهری ظرفیت آبگذری این نوع سرریزها را در حالت کاربرد در کانال‌ها بررسی کردند و با استفاده از آنالیز ابعادی و نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ضریب آبگذری این نوع سرریزها در دو حالت آزاد و مستغرق ارائه کردند (Kabiri-Samani and Javaheri, 2012). اندرسون و تولیس در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر عمق‌های متفاوت بالادست سد و شیب‌های کناری و تأثیر آنها بر روی ضریب دبی C_d پرداختند. شیب بستری تولیدشده توسط سرریزهای کلید پیانویی با توجه برآمدگی رأس در آنها نسبت به یک سرریز کنگره‌ای مستطیلی و سرریز هم نوع مستطیلی ثابت‌شان که کمک به افزایش طول کلی تاج (L) می‌کنند (Anderson and Tullis, 2012). Lefebvre و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر روی دبی سرریزهای کلید پیانویی شکل با آنالیز عددی سه‌بعدی پرداختند. این محققین برای این منظور از سرریز کلید پیانویی شکلی که در سال ۲۰۰۳ توسط Lemperiere and Ouamane طراحی شده است (تیپ A) استفاده کردند. نتایج نشان داد که تمامی پارامترها می‌توانند تأثیر مستقیمی بر روی عملکرد این نوع از سرریزها بگذارد و از طرفی مدل نوشته‌شده می‌تواند نتایج خوبی را ارائه دهد (Lefebvre et al., 2013). مهبودی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی مطالعات آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای شکل در کانال مستقیم پرداختند. در این مطالعه

فضای کمتری نیاز داشته و بنابراین "پی" این نوع سرریزها می‌تواند ابعاد کوچک‌تری داشته باشد، به نحوی که این مزیت باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در تاج سدهای بتنی استفاده کرد. از دیگر مزیت‌های سرریزهای کلید پیانویی می‌توان به این موارد اشاره نمود: دبی مخصوص عبوری از سرریز را تا ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه بر متر افزایش می‌دهند، دبی عبوری از این نوع سرریزها حداقل ۴ برابر سرریزهای معمولی است، باعث افزایش ظرفیت مخزن می‌شوند و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده هزینه نگهداری کمتری دارند. اولین سرریز کلید پیانویی در سال ۲۰۰۶ بر روی سد گلورس در کشور فرانسه اجرا شده است (Laugier, 2007). ریبریو و همکاران دبی کل عبوری از روی سرریزهای کلید پیانویی را به یک سری عوامل هیدرولیکی و هندسی به صورت رابطه (۲) مرتبط دانسته‌اند (Ribeiro et al., 2007):

$$Q = f(\rho, g, \mu, H, L, P, W, W_i, W_o, B_i, B_o, L, S_{in}, S_{out}, t, R, \alpha) \quad (2)$$

که در آن، μ به ترتیب بیانگر جرم مخصوص و لزجت سیال بوده و g شتاب ثقل است H بیانگر هد کل جریان روی سرریز بوده و طول L_i کل تاج است. در رابطه مزبور، P ، W ، W_i ، W_o ، B_i ، B_o ، L به ترتیب بیانگر ارتفاع سرریز، عرض کل، عرض کلید ورودی، عرض کلید خروجی، طول کنسول پایین‌دست، طول کنسول بالادست و طول تاج کناری است. S_{in} و S_{out} شیب کلیدهای ورودی و خروجی بوده t ضخامت بدنه سرریز است. در شکل ۳ نمایی از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A نشان داده شده است.



شکل ۳ نمایی از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A

(مثبت) و نیز در خلاف آن (منفی)، بر روی دو سرریز کلید پیانویی با نسبت‌های $P/W_u = 1/33$ (مدل یک) و $0/5 = P/W_u$ (مدل دو) احداث شد. آزمایش‌ها بر روی یک فلوم آزمایشگاهی با عرض ۸۰ سانتی‌متر، طول ۱۰ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل یک برای زاویه‌ی منفی ۳ درجه توانایی بیشتری را در تخلیه‌ی جریان نسبت به سرریز اوجی) تقریباً در حدود $2/4$ برابر دارد. همچنین رابطه‌ی به‌دست‌آمده برای ضریب دبی (در حالت پاراپت وال شیب‌دار)، دارای ضریب تعیین برابر $0/978$ و شاخص‌های آماری خطای ریشه مربعات میانگین نرمال شده و مربعات وزنی خطا برای رابطه‌ی مذکور به ترتیب برابر $0/214$ و $0/018$ به‌دست‌آمده است. (Afzalian & Ahadian, 2015) در پژوهشی دیگر به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان سرریز کلید پیانویی در ترکیب‌های مختلف دیواره سپری پرداخته شد. در این پژوهش، اثر دیواره‌های سپری بدون شیب به‌صورت مقطعی روی تاج سرریز همچنین دیواره‌های سپری شیب‌دار با طول‌های مختلف $0/25$ تا 1 متر، بر روی تاج جانبی سرریز و نیز بررسی تأثیر ارتفاع سرریز با در نظر گرفتن دو ارتفاع سرریز با نسبت $P/W_u = 1/33$ (مدل یک) و $0/5 = P/W_u$ (مدل دو) بر راندمان سرریز کلید پیانویی موردبررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام گرفت. نتایج نشان داد که قرارگیری دیواره سپری بدون شیب روی کل تاج سرریز در مدل یک، راندمان سرریز را حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد، درحالی‌که در مدل دو تأثیر معنی‌دار بر راندمان سرریز نداشت، ضمن اینکه به‌کارگیری دیواره سپری شیب‌دار نیز در مدل یک، در بارهای آبی زیاد راندمان سرریز را بهبود می‌بخشد. همچنین مقایسه ظرفیت تخلیه سرریزهای کلید پیانویی با ظرفیت تخلیه سرریزهای خطی منتج به این موضوع می‌شود که قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر روی کل تاج سرریز در مدل یک، بیشترین مقدار افزایش (۴ برابر)، نسبت به سرریز خطی را دارا است (Yarahmadi & Ahadian, 2015) در تحقیق دیگر، برای بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی در

تجربی، پارامترهای هندسی از مدل‌های TPKW تحت شرایط جریان‌های مختلف و اثرات آن بر ضریب دبی عبوری (C_d) موردبررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که در کانال مستقیم میزان دبی عبوری و عملکرد این نوع از سرریزها از سرریزهای کلید پیانویی مستطیل شکل ۲۲ درصد بالاتر است (Mehboudi and Hosseini, 2016). اورتل در سال ۲۰۱۵ به بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی شکل تیپ A پرداخت. نتایج کلی نشان می‌دهد که ضریب بدون بعد عبوری با تغییرات کوچکی در یک کانال کوچک می‌تواند به‌سرعت تغییر کند. نتیجه کلی دیگری که به‌دست‌آمده است بدین شرح است که: در حالتی که دبی افزایش پیدا می‌کند ($H_T / P > 0.15$) ضریب دبی برای هر سه نوع تیپ سرریز برابر بوده در شرایطی که $0.15 < H_T / P < 0.40$ است قابل‌مقایسه است. باوجود مطالعات گسترده در این نوع سرریز با یک فرم پلان مستطیل شکل (RPKW)، در کانال مستقیم، تحقیق و پرداختن به سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شکل به‌صورت جانبی ضرورت پیدا کرده است. در تحقیق حاضر ضریب دبی عبوری از این نوع سرریز در حالت جانبی بررسی شده است. در تحقیقی به بررسی سرریز کلید پیانویی با پاراپت وال‌های زاویه‌دار پرداخته شده است. این بررسی به این جهت انجام شده که سرریزهای کلید پیانویی به جهت توان تخلیه‌ی بالای جریان در فصول کم‌آبی می‌توانند بیشتر استفاده شوند. لذا برای افزایش این میزان از تخلیه در این نوع از سرریز می‌توان با ساخت پاراپت وال هوایی با توان تغییر شیب امکانی برای سرریز به وجود آورد که بتواند سطح آب در بالادست خود را در صورت کاهش دبی در یک حد مشخصی ثابت نگه دارد. در پژوهش حاضر با بررسی پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر میزان تخلیه جریان از جمله نسبت P/W_u (ارتفاع سرریز، W_u عرض یک سیکل) که دارای اهمیت زیادی در کاربرد پاراپت وال در سرریزهای کلید پیانویی است، اثر شیب‌دار شدن آن موردبررسی قرار گرفت و سپس با اصلاح معادله‌ی عمومی سرریزها و تحلیل ابعادی، پارامترهای مذکور بررسی شدند. بدین منظور پاراپت وال با سه زاویه‌ی ۳، $5/5$ و 8 درجه در جهت جریان

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 $0/1 < H/P < 0/05$ ، سرریز کلید پیانویی با نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی $1/4$ و در $0/1 > H/P$ سرریز کلید پیانویی با نسبت عرض دهانه‌های ورودی به عرض دهانه‌های خروجی $1/2$ ، کارایی هیدرولیکی بیشتری نسبت به سایر سرریزها دارد. ضریب دبی این سرریزها با ثابت بودن نسبت عرض دهانه‌ها و با تغییر شیب دهانه‌ها از $1:1/5$ منحنی (ربع دایره) حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. در شرایط جریان مستغرق، با کاهش نسبت بار آبی (H/P) ، نسبت بار آبی مستغرق به بار آبی آزاد بالادست (H^*/P) افزایش می‌یابد. در سرریز کلید پیانویی، با نسبت عرض دهانه‌های برابر ۱ و در مقادیر نسبت‌های استغراق کوچک‌تر از $0/48 (S < 0/48)$ عمق پایین‌دست تأثیری بر عمق بالادست سرریز ندارد و $H^* = H$ است. اصلاح سرریزهای کلید پیانویی 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 کلید پیانویی 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 (Roshangar et al, 2018). به منظور کنترل جریان گردابه‌ای استفاده از سرریز کلید پیانویی مدور، یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است. این سرریز به صورت سازه گرداب شکن عمل می‌کند و تأثیر چشمگیری بر کاهش قدرت جریان گردابی و افزایش ضریب دبی جریان دارد. نصیری و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در اطراف سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی پرداختند. معادلات حاکم بر جریان سیال در دستگاه مختصات استوانه‌ای حل شده‌اند. برای مدل‌سازی میدان جریان اطراف سازه و درون شفت قائم از شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود و مدل آشفتگی k-ε استفاده شده است. در این تحقیق تأثیر طول، ارتفاع و زاویه قطاع‌های کلید پیانویی بر هیدرولیک جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سرریز کلید

پیانویی مدور به‌عنوان ورودی شفت‌های قائم یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است که تأثیر چشمگیری بر کاهش قدرت جریان گردابی دارد، ضمن اینکه ضریب دبی جریان را افزایش می‌دهد. سرریز کلید پیانویی علاوه بر اینکه به صورت ورودی سرریز مدور قائم عمل می‌کند، نقش گرداب‌شکن نیز دارد، به طوری که با کاهش قدرت جریان گردابی و دور کردن گرداب از شفت قائم، باعث توزیع یکنواخت جریان در محدوده‌ی اطراف شفت قائم می‌شود. این امر در تخلیه‌ی یکنواخت جریان از شفت قائم مؤثر است. در انتها بهترین هندسه‌ی ورودی کلید پیانویی برای دستیابی به بیشترین راندمان در سرریز مدور قائم پیشنهاد شده است. (Nasiri et al., 2016) سرریز کنگره‌ای دارای سه شکل کلی مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی است که مطالعه محدودی روی شکل مستطیلی انجام شده و خصوصیات هیدرولیکی آن به طور کامل مشخص نشده است. در پژوهشی رابطه دبی جریان و ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج شد و برای تعیین ضریب‌های ثابت رابطه‌ها از مدل فیزیکی استفاده شده است. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل و شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد رابطه‌ای که در آن از اکثر پارامترهای مؤثر استفاده شده نتایج دقیق‌تری پیش‌بینی می‌کند و برای طراحی پیشنهاد می‌شود. برای ارتفاع آب بالادست ثابت دبی سرریز کنگره‌ای حداکثر $2/6$ برابر دبی سرریز مستقیم و در دبی ثابت، ارتفاع آب بالادست سرریز مستقیم $1/8$ برابر ارتفاع آب بالادست سرریز کنگره‌ای است، بنابراین استفاده از سرریز کنگره‌ای برای مناطقی که محدودیت ارتفاع و دبی وجود دارد پیشنهاد می‌شود. بهترین محدوده برای نسبت H/P برای طراحی بین $0/2$ تا $0/4$ است که حداکثر ضریب دبی در این محدوده قرار گرفت. (Rezaei et al, 2015) سرریزهای زیگزاگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی است که برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در مخازن سدها استفاده می‌شود. عملکرد سرریزهای زیگزاگی در بارهای زیاد جریان، به جهت تداخل تیغه‌های جریان، تلاطم و استغراق در کلید خروجی، مطلوب نیست؛ از این رو (Hamidinia et al. (2019 در

و مستقیم صورت گرفته است. این بررسی برای تأثیر طول سرریز در افزایش میزان دبی عبوری از سرریز انجام شد. در این تحقیق ۹ سرریز کلید پیانویی و ۹ سرریز کنگره‌ای و سه سرریز خطی آزمایش شدند. خصوصیات جریان که مورد آزمایش قرار گرفته است عبارت‌اند از: پروفیل سطح آب، الگوی جریان و ضریب انحنای در جریان زیربحرانی. برای به دست آوردن ضریب دبی عبوری از نتایج آزمایش‌ها از معادله دی مارچی استفاده شده است. نتایج نشان داده‌اند که میزان دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی بسیار بالاتر از سرریزهای دیگری است که در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

از جمله متغیرهای مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی جانبی عبارتند از:

الف: مشخصات فیزیکی سیال: جرم مخصوص (ρ)، لزجت دینامیکی (μ) و کشش سطحی (σ).

ب: مشخصات هیدرولیکی جریان: عمق آب در بالادست سرریز (y_1)، عمق آب در پایین دست سرریز (y_2). همچنین سرعت جریان کانال در بالادست سرریز (V_1) و سرعت جریان در پایین دست سرریز (V_2) هم با داشتن دبی‌ها و سطح مقطع جریان به عنوان متغیرهای وابسته و یا جایگزین دبی‌ها می‌توانند استفاده شوند.

ج: مشخصات هندسی کانال و سرریز: طول بازشدگی سرریز (L)، طول مؤثر سرریز (L')، زاویه کنسول‌های سرریز (δ)، زاویه قرارگیری سرریز (α)، ارتفاع سرریز (P)، طول سرریز (B)، طول کنسول پایین دست (B_i)، عرض ورودی سرریز (W_i)، عرض خروجی سرریز (W_o)، شیب کف کانال (S_0)، تعداد کنگره‌ها و هندسه آن‌ها.

د: مشخصات عمومی: شتاب ثقل (g)، C_M ضریب دبی. بر اساس متغیرهای موجود نتیجه می‌شود:

$$\phi(S_0, B, B_i, P, L, L', y_1, y_2, V_1, g, \alpha, \delta, \mu, \rho, \sigma, C_M) = 0 \quad (4)$$

بر اساس تئوری π باکینگهام، ۱۶ متغیر وجود دارد و با در نظر گرفتن y_1 (با بعد L)، V_1 (با بعد LT^{-1}) و ρ (با بعد

پژوهشی به بررسی اثر محل قرارگیری دیواره سپری بر استغراق ورودی سرریز پرداختند که برای این منظور از دیواره‌های سپری شیب‌دار با شیب‌های ($B' = 1$) و ($B' = 0.5$) و طول‌های ($B = 30cm$ و $B = 60cm$) بر روی دو مدل سرریز زیگزاگی و کلید پیانویی با مقطع دوزنقه‌ای استفاده شده است. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع و طول دیواره‌های سپری باعث کاهش ۵۰ درصدی ضریب آبگذری می‌گردد و راندمان سرریزها با افزایش دبی جریان به میزان ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. وجود این سپرها در سرریز زیگزاگی نسبت به کلید پیانویی با پلان مشابه تا ۳۰ درصد عملکرد بهتری را نشان داد. این تحقیق نشان داد که دیواره‌های سپری نصب‌شده در خروجی سرریز حدود ۵ الی ۱۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به حالت نصب دیواره‌های سپری در ورودی از خود نشان می‌دهد، همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد سرعت جریان با ضریب آبگذری رابطه مستقیم دارد از این رو افزودن دیواره سپری به سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی مشکل افت راندمان در دبی‌های بالا برای این سرریزها را به میزان ۴۰ درصد رفع می‌کند. تمامی طرح‌ها و تحقیقات مطرح‌شده در حالت مستقیم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سرریزهای کلید پیانویی به واسطه فضای کمی که اشغال می‌کنند، می‌توانند به عنوان سرریز جانبی در کنترل سیلاب، کنترل سطح آب بالادست رودخانه‌ها و تأمین آب کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار بگیرند. Mehri et al. (2018) در بررسی سرریز کلید پیانویی مستطیلی تیپ C از دو قوس ۳۰ و ۱۲۰ درجه به عنوان سرریز جانبی استفاده کردند. این تحقیق بر روی فلوم قوسی به ابعاد ۰/۵×۰/۵ متر، قوس ۲ متر و شیب ۰/۰۱ انجام شده است. آنالیز ابعادی که بر روی این تحقیق صورت گرفته است و نتیجه بر آن شد تا ضریب دبی تخلیه سرریز بررسی شود. ضریب دبی به دست آمده با درصد خطای ۰/۰۹۱ برابر با ۰/۸۸ بوده که نشان می‌دهد که این نوع از سرریز می‌تواند عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر سرریزهای متداول داشته باشد.

Karimi et al. (2018) به بررسی خصوصیات جریان سرریزهای جانبی کلید پیانویی پرداختند. این بررسی درباره مقایسه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شکل، کنگره‌ای

سانتی‌متر باشد) جزئی و قابل صرف‌نظر است (Erpicum et al., 2013). لازم به ذکر است عدد فرود بالادست سرریز در همه مدل‌های آزمایش‌شده کمتر از یک بوده است که شرایط جریان زیربحرانی را در بالادست سرریز فراهم می‌کند.

۲-۲- شرایط آزمایش‌ها

این تحقیق در فلوم آزمایشگاهی انجام شده است که دارای ۱۰ متر طول، ۰/۶ متر عرض و ۰/۶ ارتفاع است. تمامی آزمایش‌ها بر روی عرض ۰/۶ کانال انجام شده است و تغییری در طول انجام آزمایش بر روی عرض کانال صورت نگرفته است. برای جلوگیری از اغتشاش جریان در بالادست از یک آرام‌کننده در بالادست استفاده شده است و برای اندازه‌گیری جریان در بالادست از سرریز مثلثی کالیبره شده و در پایین‌دست از یک سرریز مستطیلی لبه تیز کالیبره شده استفاده شده است. برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در این آزمایش از دستگاه پروفیل سنج با حساسیت در دامنه $0.01 \pm \text{mm}$ استفاده شده است. شکل ۴ نمایی از پلان محیط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این تحقیق ۱۶ مدل سرریز تیپ A دوزنقه‌ای به کار گرفته شد که در دو حالت اصلی و معکوس بررسی شدند. سرریزهای استفاده شده دارای ضخامت ۳ میلی‌متر بوده و از جنس پلکسی گلس برای ساخت آنها استفاده شده است. با توجه به دو حالت در نظر گرفته شده برای قرارگیری سرریز، برای هر حالت و هر سرریز از دو دبی متفاوت ۳ ارتفاع متفاوت آزمایش و بررسی شده است. جدول ۱ مشخصات آزمایش‌های انجام‌شده را بیان می‌کند. در این تحقیق بنا به

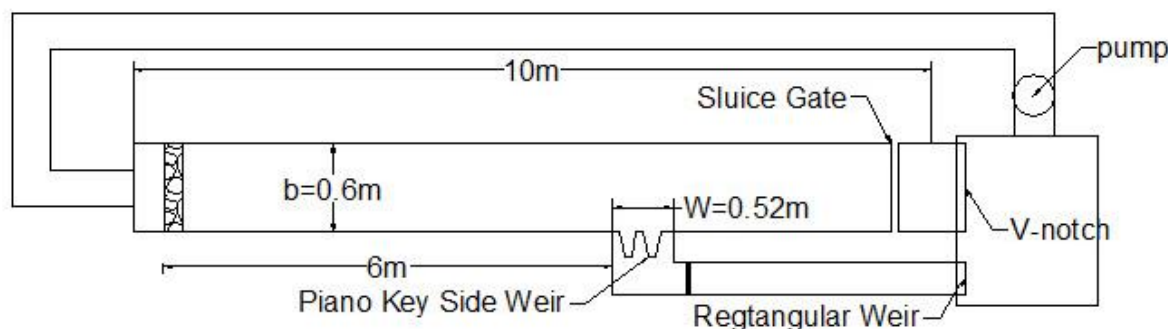
LM^3 به‌عنوان سه متغیر اصلی (تکراری)، ۱۳ متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود. با ترکیب هر یک از متغیرها با متغیرهای اصلی، یک متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود، بنابراین:

$$C_M = \phi_1 \left(\frac{V_1^2}{g y_1}, \frac{\mu}{\rho y_1 V_1}, \frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{B_i}{y_1}, \frac{B}{P}, \frac{L}{y_1}, \frac{w_i}{w_o}, \alpha, \delta, S_0 \right) \quad (5)$$

در هیدرولیک کانال‌های باز، وقتی که جریان آشفته باشد، تأثیر نیروهای لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز و اندک است و از آنجاکه اصولاً وضعیت جریان در کانال‌ها به صورت آشفته است، از تأثیر نیروی لزجت یا همان عدد رینولدز $(\rho y_1 V_1 / \mu)$ صرف‌نظر می‌شود. تأثیر نیروی کشش سطحی در مواقعی که عمق آب کمتر از ۳ سانتی‌متر باشد و از آنجاکه در آزمایش‌های پیشرو عمق آب از ۳ سانتی‌متر بیشتر خواهد بود از تأثیر کشش سطحی یا همان عدد وبر $(\sigma / \rho y_1 V_1^2)$ صرف‌نظر می‌شود (Kazemi et al., 2016). همچنین برخی محققین تأثیر شیب کف در جریان‌های زیربحرانی را ناچیز دانسته‌اند در نتیجه از تأثیر K_0 صرف‌نظر می‌شود. همچنین با ترکیب متغیرهای بی‌بعد و در نظر گرفتن تأثیر آن‌ها در متغیرهای دیگر رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$C_M = \phi_2 \left(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{B}, \frac{P}{y_1}, \frac{B_i}{L}, \frac{B}{P}, \frac{L}{y_1}, \frac{w_i}{w_o}, \alpha, \delta, \frac{L}{y_1} \right) \quad (6)$$

از جمله متغیرهای مهم و مؤثر هندسی می‌توان طول، ارتفاع، زاویه قرارگیری و نوع سرریز، عرض، شکل و شیب کانال نام برد. از متغیرهای هیدرولیکی می‌توان به دبی ورودی، دبی خروجی، نوع جریان و عمق آب اشاره کرد. تأثیر عواملی چون دما، لزجت، درصد هوای موجود در آب و کشش سطحی (اگر عمق آب روی سرریز بیش از ۳



شکل ۴ نمایی از پلان محیط آزمایشگاه

جدول ۱ مشخصات سازه‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده

Weir Type	B (cm)	P (cm)	b (m)	W (m)	W_i/W_o	L/W	$Q_1(L/s)$	Fr
PKSW	30	10,15,20	0.6	0.52	1.33-4	2.6-5.9	30 - 60	0.15-0.60
PKSW	50	10,15,20	0.6	0.52	1.33-4	2.6-5.9	30 - 60	0.15-0.60
PKSW	70	10,15,20	0.6	0.52	1.33-4	2.6-5.9	30 - 60	0.15-0.60
CSW	-	10,15,20	0.6	0.52	-	-	30 - 60	0.15-0.60



شکل ۷ نمونه سرریز با عرض ۷۰ سانتی‌متر و پایه ۱۰ سانتی‌متر

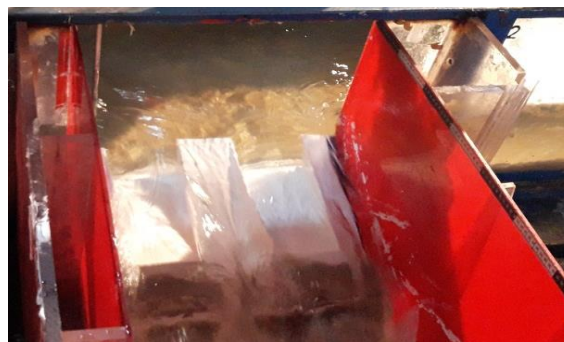
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌شده در نمودار (۱)، سرریز دارای پایه $P = 10\text{ cm}$ در حالتی که $B = 50\text{ cm}$ و $B = 70\text{ cm}$ است، میزان ضریب C_M (این ضریب با استفاده از رابطه ۱ بدست آمده است) بیشتر از حالتی است که $B = 30\text{ cm}$ است. میزان این ضریب در $0.4 < H/P < 0.5$ در حالتی که سرریز در حالت اصلی خود قرار بگیرد بین $1/9 < C_M < 1/3$ و در حالتی که $1 < H/P < 0.5$ این مقدار بین $1/7 < C_M < 0.7$ است. در بررسی سرریز به‌صورت معکوس نمودار (۲) در پایه ۱۰ سانتی‌متر میزان این ضریب در $0.4 < H/P < 0.5$ این ضریب بین $1/9 < C_M < 1/3$ و در حالتی که $1 < H/P < 0.5$ این مقدار بین $1/7 < C_M < 0.7$ می‌رسد.

در پایه $P = 15$ سانتی‌متر در کل داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های سرریز در حالت اصلی با توجه به نمودار (۱) می‌توان این استنباط را داشت که هرچه طول عرض سرریز B بیشتر باشد در نتیجه ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود و در این شرایط در $0.4 < H/P < 0.5$ ضریب دبی مقدار بیشتری خواهد داشت و می‌توان اذعان داشت که اگر نسبت $H/P > 0.5$ شود عملاً کارایی سرریز کاهش پیدا می‌کند. در $B = 50$ سانتی‌متر در نسبت $0.4 < H/P < 0.5$ ضریب دبی عبوری بین $2/1$ تا $1/36$ و از $H/P > 0.5$ مقدار C_M بین

به بررسی تأثیر جهت اصلی قرارگرفته سرریز و جهت معکوس آن برای حالت اصلی و معکوس آزمایش‌های صورت گرفته است.

۳- بحث و نتایج

همان‌طور که در جدول (۱) اشاره شده است در این تحقیق سه پایه متفاوت ($P = 10, 15, 20\text{ cm}$) و سه عرض متفاوت ($B = 30, 50, 70\text{ cm}$) در تیپ A سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بررسی شده است. نمونه‌ای از سرریزهای با عرض‌های متفاوت استفاده شده در پایه ۱۰ سانتی‌متر در اشکال ۵ تا ۷ نمایش داده شده است.

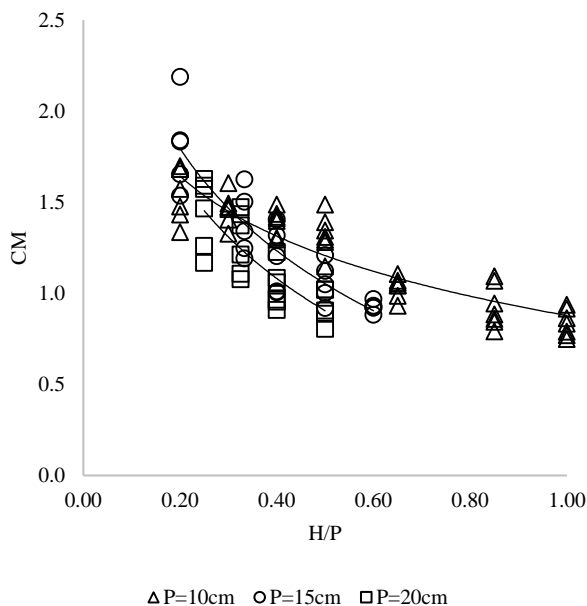


شکل ۵ نمونه سرریز با عرض ۳۰ سانتی‌متر و پایه ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۶ نمونه سرریز با عرض ۵۰ سانتی‌متر و پایه ۱۰ سانتی‌متر

در پایه $P = 20 \text{ cm}$ اگر $B = 30 \text{ cm}$ باشد مقدار C_M بین همان مقادیر $1/6$ تا $0/93$ تغییر می‌کند و تفاوت زیادی بین حالتی که $B = 50 \text{ cm}$ و $B = 30 \text{ cm}$ است مشاهده می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بین حالتی که $B = 30 \text{ cm}$ و $B = 50 \text{ cm}$ است مقدار ضریب C_M متفاوت است و ضریب C_M در حالتی که $B = 50 \text{ cm}$ است مقدار بیشتری دارد.

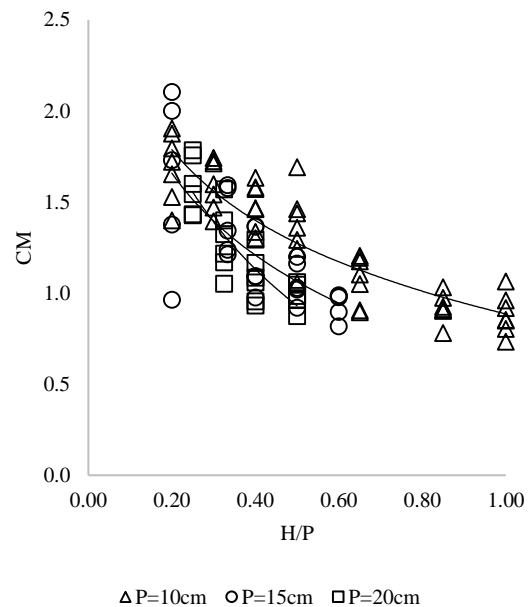


نمودار ۲ ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز

برای بررسی و صحت اینکه این تحقیق و بررسی مورد تأیید می‌تواند باشد و میزان ضریب دبی عبوری C_d در بررسی حاضر بهبود یافته است نتایج تحقیق حاضر با شرایط مشابه مقایسه شد. در مقایسه نتایج سرریزها با یکدیگر سرریز کلید پیانویی مستطیل شکل و سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در دو طول یکسان ۲ و $3/4$ متر مقایسه شدند.

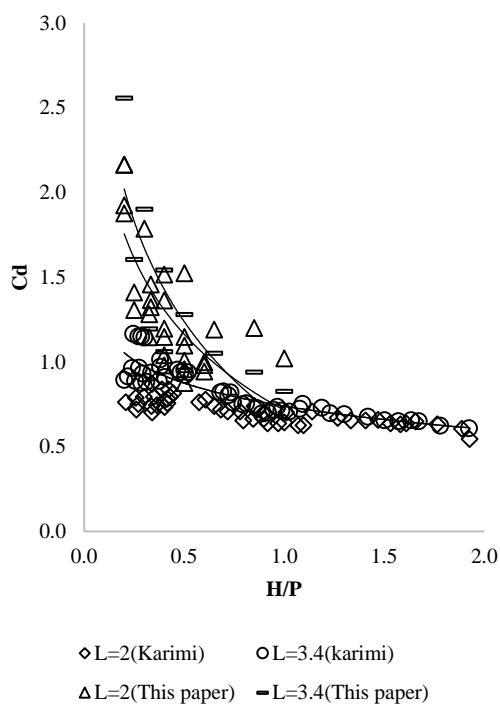
نمودار ۳ نشان‌دهنده مقایسه این دو طول در حالتی است که سرریزهای این تحقیق در حالت اصلی قرار گرفته‌اند. در مقایسه بین ضریب C_d همان‌طور که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد می‌توان گفت این ضریب در بررسی حاضر بالاتر است. بدین صورت که در $0/2 < H/P < 0/4$ در حالتی که طول کل سرریز برابر ۲ متر باشد ضریب دبی عبوری C_d بین $2/68$ تا $1/01$ در سرریز دوزنقه‌ای بوده، که در نسبت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $0/87$ تا $0/7$ است. در مقایسه بعدی که در حالتی است که

$1/2$ تا $0/98$ متغیر است و در $B = 30$ سانتی‌متر در نسبت $0/4 < H/P < 0/2$ ضریب دبی عبوری در حالت اصلی سرریز بین $0/96$ تا $1/73$ است و از $H/P > 0/5$ مقدار C_M بین $1/02$ تا $0/82$ متغیر است. همان‌طور که دیده می‌شود در پایه $P = 15$ سانتی‌متر به دلیل کاهش طول موثر سرریز، کارایی سرریز نیز کاهش پیدا می‌کند.



نمودار ۱ ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۱ سرریز

در پایه $P = 20$ در کل داده‌های به‌دست‌آمده می‌توان برآورد داشت که هرچه طول عرض سرریز (B) بیشتر باشد در نتیجه ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود. اگر B برابر 70 سانتی‌متر باشد در نسبت $0/4 < H/P < 0/2$ ضریب دبی عبوری (C_M) بین $1/78$ تا $1/29$ است و بهتر است گفته شود در این نمونه از سرریزها H/P بالاتر از $0/4$ محاسبه‌پذیر نیست، البته در این باره نیز باید این نکته ذکر شود که مقدار ضریب C_M در حالتی که سرریز به‌صورت معکوس قرار می‌گیرد مقدار کمتری دارد. اگر ضریب C_M را در حالتی که $B = 50 \text{ cm}$ است بررسی کنیم می‌توان این برداشت را کرد که مقدار C_M بین $1/76$ تا $1/06$ در حال نوسان است و افت تقریباً زیادی بین زمانی که $B = 50 \text{ cm}$ تا $B = 70 \text{ cm}$ در حالتی که $H/P = 0/2$ است رخ می‌دهد و حدود $0/2$ واحد این مقدار کمتر می‌شود. البته در این مورد نیز مقدار C_M در حالت معکوس کمتر از حالت اصلی است.

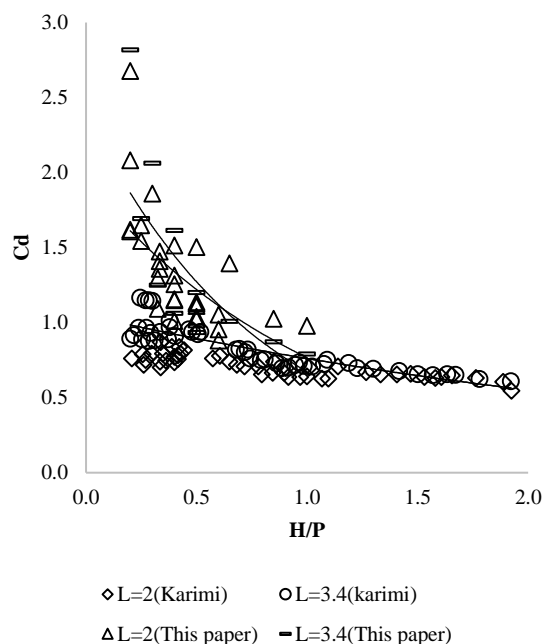


نمودار ۴ ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز دوزنقه‌ای با سرریز مستطیلی

نمودار ۴ نشان‌دهنده مقایسه این دو طول در حالتی است که سرریزهای این تحقیق در حالت معکوس قرار گرفته‌اند. در مقایسه بین ضریب C_d همان‌طور که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد این ضریب در بررسی حاضر بالاتر است بدین‌صورت که در $0.4 < H/P < 0.2$ در حالتی که طول کل سرریز برابر ۲ متر باشد ضریب دبی عبوری C_d بین 0.17 تا 0.98 در سرریز دوزنقه‌ای بوده که در نسبت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین 0.87 تا 0.7 است. در مقایسه بعدی در حالتی که سرریزها دارای طول برابر $3/4$ متر هستند ضریب دبی عبوری C_d بین $2/56$ تا $1/06$ در سرریز دوزنقه‌ای بوده که در نسبت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $1/17$ تا $0/88$ است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در عبور دبی در حالت جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت مستطیلی خواهد داشت.

در بررسی این دو سرریز در حالتی که $H/P > 0.5$ باشد، اگر طول کل سرریز برابر ۲ متر باشد ضریب دبی عبوری C_d بین $1/52$ تا $0/88$ در سرریز دوزنقه‌ای بوده که در

سرریزها دارای طول برابر $3/4$ متر هستند ضریب دبی عبوری C_d بین $2/82$ تا $1/06$ در سرریز دوزنقه‌ای بوده، که در نسبت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $1/17$ تا $0/88$ است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در عبور دبی در حالت جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت مستطیلی خواهد داشت.



نمودار ۳ مقایسه ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۱ سرریز دوزنقه‌ای با سرریز مستطیلی

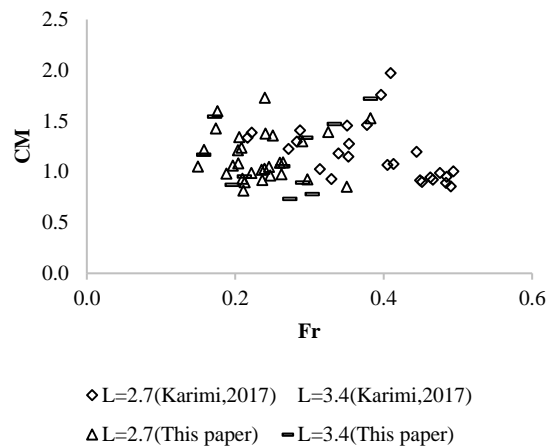
در بررسی این دو سرریز در حالتی که $H/P > 0.5$ باشد، اگر طول کل سرریز برابر ۲ متر باشد ضریب دبی عبوری C_d بین $1/5$ تا $0/88$ در سرریز دوزنقه‌ای بوده که در نسبت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $0/78$ تا $0/55$ است، مقایسه دیگر در حالتی است که سرریزها دارای طول برابر $3/4$ متر هستند ضریب دبی عبوری C_d بین $1/2$ تا $0/79$ در سرریز دوزنقه‌ای بوده که در نسبت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $0/96$ تا $0/61$ است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در عبور دبی در حالت جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت مستطیلی خواهد داشت.

حالتی که سرریز دارای پایه ۱۵ سانتی‌متر است در نسبت بی‌بعد $0.4 < H/P < 0.2$ ، میزان ضریب دبی عبوری $2/2 = C_M$ بوده در حالت بی‌بعد $0.5 > H/P$ سرریز با پایه ۲۰ سانتی‌متر با ضریب دبی عبوری $1/63 = C_M$ دارای بیشترین میزان دبی عبوری هستند.

۵- فهرست علائم

W	ارتفاع سرریز
P	ارتفاع سرریز
B	عرض کانال
L	طول بازشدگی سرریز
L'	طول مؤثر سرریز
δ	زاویه کنسول‌های سرریز
α	زاویه قرارگیری سرریز
B	طول سرریز
B_i	طول کنسول پایین‌دست
w_i	عرض ورودی سرریز
w_o	عرض خروجی سرریز
L_t	طول کل تاج سرریز
Q_1	دبی جریان قبل از سرریز
Q_2	دبی جریان بعد از سرریز
Q_s	دبی سرریز
y_1	عمق آب در بالادست سرریز
y_2	عمق آب در پایین دست سرریز
y_c	عمق بحرانی
y_t	عمق پایاب
V_1	سرعت جریان قبل از سرریز
V_2	سرعت جریان بعد از سرریز
S_f	شیب خط انرژی
S_0	شیب کف کانال
α	ضریب تصحیح انرژی
g	شتاب ثقل
C_M	ضریب دبی عبوری
	رابطه De Marchi

حالت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $0.78/0.55$ است، مقایسه دیگر در حالتی است که سرریزها دارای طول برابر $3/4$ متر هستند ضریب دبی عبوری C_d بین $1/28$ تا 0.83 در سرریز ذوزنقه‌ای بوده که در حالت مشابه آن در سرریز مستطیلی این ضریب بین $0.96/0.61$ است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای در عبور دبی در حالت جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت مستطیلی خواهد داشت. در مقایسه دیگری که با شاخص بی‌بعد عدد فرود صورت گرفت نشان داده شد در بررسی حاضر میزان دبی عبوری بیشتر از حالتی است که سرریز به شکل مستطیلی است. نمودار ۵ این نتیجه را نشان داده است.



نمودار ۵ ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان گفت سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای در حالت جانبی عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر سرریزهای استفاده شده در این زمینه دارد. در مقایسه بین پایه‌های متفاوت در این بررسی نتیجه نهایی بدین‌صورت است که سرریز با پایه ۱۵ سانتی‌متر در شرایطی که به‌صورت اصلی قرار بگیرد، در نسبت بی‌بعد $0.4 < H/P < 0.2$ دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری $2/1 = C_M$ است و در نسبت بی‌بعد $0.5 > H/P$ سرریز با پایه ۲۰ سانتی‌متر دارای ضریب دبی عبوری $1/79 = C_M$ دارای بیشترین میزان دبی عبوری هستند. این مقادیر در حالت معکوس نیز صادق است و در

Kabiri-Samani, A., Borghei, S.M. and Esmaili, H. (2011). Hydraulic performance of labyrinth side weirs using vanes or piles. *Water Management*. 164(5): 229-241.

Kabiri-Samani, A.R. and Javaheri, A. (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over the piano key weirs. *J. Hydraulic Res.* 50(1), 114-120.

Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili, M. (2017). Experimental study of discharge coefficient of a Piano Key Side Weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW*. 109-116.

Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili Ghazizadeh, M.R. (2018). Side Weir Flow Characteristics: Comparison of Piano Key, Labyrinth, and Linear Types. *J. Hydraul. Eng.* 144(12): 1-13.

Kazemi, J., Sanei, M., and Azhdari Moghadam, M. (2016). The effect of the scale on the profile of the water surface in an Ogee Weir with curvature in plan and with converging lateral walls. *Journal of Applied Research of Irrigation and Drainage Structures Engineering*. 17(66): 119-136. (In Persian)

Laugier, F. (2007). Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *Int. J. Hydropower & Dams*. 14(5): 94-101.

Lefebvre, V., Vermeulen, J. and Blancher, B. (2013). Influence of geometrical parameters on PK-Weirs discharge with 3D numerical analysis Labyrinth and piano key weirs-PKW. CRC press, London. 49-56.

Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Int. J. Hydropower & Dams*. 10(5): 144-149.

Lempérière, F., Vigny, J.P. and Ouamane, A. (2011). General comments on Labyrinths and Piano Key Weirs: The past and present. *Labyrinth and Piano Key Weirs*. London. 17-24.

Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B., Archambeau, P., and Piroton, M. (2011). Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. *J. Hydraulic Research*. 49(3): 359-366.

Mehboudi, A., Attari, J., and Hosseini, S.A. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *J. Flow Measurement and Instrumentation*. Elsevier. 50, 65-72.

Mehri, Y., Soltani, J., Saneie, M., and Rostami, M. (2018). Discharge Coefficient of a C-Type Piano Key Side Weir at 30° and 120° Sections of a Curved

$$L = \frac{3B}{2C_M} \left[\frac{2E-3W}{E-W} \sqrt{\frac{E-y}{y-W}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{E-W}} \right]$$

۶- منابع

Abrishami, J. and Hosseini, M. (2017). Hydraulic open canals. Mashhad University Press, 19th edition. (In Persian)

Afzalian, A., and Ahadian, J. (2015). Piano Key Weir with Angular Parameters. *National Science and Irrigation Engineering*, 38(2): 91-102. (In Persian)

Anderson, R., and Tullis, B. (2012). Piano Key Weir: Reservoir versus channel application. *J. Irrig. Drain Eng.* 138(8): 773-776.

Anderson, R.M. (2011). Piano key weir head discharge relationships. All Graduate Theses and Dissertations, Utah State University.

Anderson, R. M., and Tullis, B.P. (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *J. Irrig. Drain Eng.* 139(3): 246-253.

Aydin, M.C., and Emiroglu, M.E. (2013). Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *J. Flow Measurement and Instrumentation*. 29: 1-8.

Bilhan, O., Emiroglu, M. and Miller, C.J. (2016). Experimental Investigation of Discharge Capacity of Labyrinth Weirs with and without Nappe Breakers. *J. Mechanics*. 6(7): 207-221.

Cicero, G.M., Delisle, J., Lefebvre, R., and Vermeulen, V. (2013). Experimental and numerical study of the hydraulic performance of a trapezoidal Piano Key weir. In: proceeding of labyrinth and piano key weirs. London. UK. 265-272.

Crookston B .M .and Tullis, B.P. (2013). Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. *J. Irrig. Drain Eng.* 139: 363-370.

Erpicum, S., Silvestri, A., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M., Colombié, M., and Faramond, L. (2013). Escouloubre Piano Key weir: Prototype versus scale models, Labyrinth and Piano Key weirs II. CRC press. London. 65-72.

Gandoshmin, A. and Norouzi, B. (2014). 3D hydrodynamics of curved piano key overflows on plan. *Journal of Hydraulics*. 9(3): 61-79. (In Persian)

Hamidinia, M., Heidarnejad, M., Pourmohammadi, M.H., Masjedi, A. and Bordbar, A. (2019). Numerical modeling of the flow field around vertical circular weirs with piano key input. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3): 543-553. (In Persian)

Channel.J. Civil Engineering. 4(7): 1702-1713.

Nasiri, S., Kabiri Samani, A.R. and Asghari, K. (2016). Numerical modeling of the flow field around vertical circular with piano key weir. J. Hydraulic Res. 11(1): 53-66. (In Persian)

Oertel, M. (2016). Sensitivity Analysis for Discharge Coefficients of Piano Key Weirs. Hydraulic Structures and Water System Management. 6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland, 557-565.

Oertel, M. (2015). Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models. 36th IAHR World Congress the Hague. Netherlands.

Ouamane, A. and Lempérière, F. (2006). Design of a new economic shape of weir. Proc. Int. Symp. Dams in the Societies of the 21st Century. Barcelona, 463-470.

Rezaei, M., Amedi, A. and Aqajani Mazandarani, Q. (2016). Experimental study of rectangular Labyrinth Weir. Journal of Water and Soil. 29(6): 1438-1446 (In Persian).

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. Proc. of 32nd Congress of IAHR. Vince. Italy.

Roshangar, K., Majediasl, M., Alami, M.T., and Shiri, J. (2018). Evaluation of the effect of arc-cycle angular variations on discharge coefficient of Labyrinth arches and arc Piano key. Iranian Journal of Soil and Water Research. 49(2): 341-351. (In Persian)

Yarahmadi, B. and Ahadian, J. (2015). Hydraulic Experimental Piano Key Weir Flow in Different Blend Spacers. National Science and Irrigation Engineering. 39(4): 47-58. (In Persian)

Experimental study of discharge coefficient of a Trapezoidal Piano Key Side Weir

Mina Sadat Seyedjavad^{1*}, Seyed Taghi Omid Naeini² and Mojtaba Sanei³

1- PhD student, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Soil and Water Conservation Research Institute, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Tehran, Iran

*sadatm@ut.ac.ir

Abstract

Spillway is a hydraulic structure that is used for passing excess water and floods from upstream to downstream of dams. The spillways are of a variety of hydraulic structures that are constructed for various purposes in water transfer systems. The lateral overflow is constructed with an elevation less than the height of the wall of the canal, and when the surface of the water rises, lateral overflows will regulate the flow rate and control the water level in the main channel. The tests were carried out in a rectangular channel 10 m long, 0.6 m wide, and 0.6 m high and 16 Model piano key weir type A trapezoid with different pillars 10, 15 and 20 cm is conducted. The above-mentioned spillways have been investigated in two cases. The results show that the overflow with a pillar of 15 cm in both cases has a maximum flow rate coefficient in the ratio of $0.2 < H/p < 0.4$, and in a ratio of $H/P > 0.5$, the inflow with a base of 20 cm they have the highest flow rate. Also, in similar laboratory conditions, the spillway of a trapezoidal piano key exceeds 4 times the rectangular weir.

Keywords: Piano key weirs, Discharge coefficient.