

بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه‌ی سرریز جانبی کلید پیانویی در مقطع ۴۵ درجه‌ی کانال قوسی

بابک قبادی^{۱*}، مجتبی صانعی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۲۲

صص: ۴۴-۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۳۱

چکیده

نوع جدیدی از سرریزهای تاج طولانی سرریزهای کلیدپیانویی هستند که به مخزن این امکان را می‌دهند تا با تراز بالاتری اجرا شوند. کاربرد سرریز کلیدپیانویی به عنوان سرریز جانبی امکان تخلیه بیشتری را فراهم می‌آورد که در کانال‌های قوسی شکل، به علت شکل هندسی کانال و تاثیر نیروی گریز از مرکز بر جریان، این موضوع مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرد. این پژوهش با بررسی آزمایشگاهی سرریز جانبی کلیدپیانویی تیپ B در مقطع ۴۵ درجه کانال قوسی شکل، روند تغییرات جریان و ضریب دبی این سرریزها را مورد بررسی قرار داده است. آزمایش‌ها در بازه مشخصی از تغییر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی صورت گرفت و تاثیر هریک از پارامترهای بی بعد بر جریان مشخص شد. شایان ذکر است که تمامی آزمایش‌ها با سرریز لبه تیز مستطیلی مقایسه شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان به بالا بودن ضریب دبی سرریز جانبی کلیدپیانویی نسبت به سرریز جانبی مستطیلی اشاره کرد. همچنین پارامترهای L/b و Fr تاثیر به سزایی بر عملکرد سرریز جانبی کلیدپیانویی در مقطع ۴۵ درجه کانال قوسی داشته است. از دیگر نتایج به دست آمده، شکل جریان در ابتدا تا انتهای سرریز جانبی کلیدپیانویی است که ارتفاع سطح جریان، در ابتدای سرریز افت چشم‌گیری داشته و در نهایت به ارتفاع اولیه خود باز می‌گردد که این موضوع در هدهای بالاتر با تغییرات کمتری همراه بوده است. این تغییر شکل‌ها هنگام استفاده از سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی، به مراتب کمتر بوده است. در پایان نتایج تاثیر تغییرات پارامتر $(h1-P)/P$ بر ضریب تخلیه سرریز جانبی کلیدپیانویی در کانال قوسی با سرریز جانبی کلیدپیانویی در کانال مستقیم که پیش‌تر مورد ارزیابی قرار گرفته بوده است، مقایسه شد که در شرایط مساوی (۵) (L/W) ، پارامتر $(h1-P)/P$ در کانال قوسی، به علت نیروی گریز از مرکز تاثیر بیشتری بر ضریب تخلیه سرریز داشته است.

واژه های کلیدی: سرریز کلیدپیانویی، سرریز جانبی، کانال قوسی شکل، ضریب تخلیه، سرریز مستطیلی لبه تیز

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

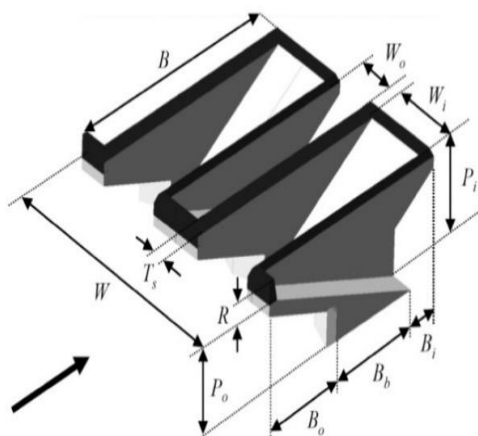
^۲ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

* نویسنده مسول مقاله: b.ghobadi@usc.ac.ir

مقدمه

در صورتی که طول تاج سرریز، عمود بر محور رودخانه، پاسخگوی انتقال سیلاب نباشد، امکان دارد که سرریز جانبی استفاده شود. این نوع سرریز یک شکاف ساخته شده در دیواره جانبی کانال اصلی به منظور توزیع بخشی از دبی کانال اصلی است. با توجه به اینکه در کانال‌های قوسی شکل رفتار جریان در مقایسه با کانال مستقیم تفاوت داشته و به علت اینکه با ورود جریان، نیروی گریز از مرکز به وجود می‌آید، شکل جریان و سطح آب در مقایسه با کانال مستقیم تفاوت داشته و در قسمت دیواره بیرونی کلنال سطح جریان بالاتر است. این امر باعث افزایش تدریجی گرادیان فشار جانبی شده و در پایان بر نیروی گریز از مرکز غالب می‌شود الگوی منحصر به فردی از جریان به نام جریان ثانویه خواهد شد که باعث پیچیدگی جریان در خم می‌شود. در نهایت با وجود جریان ثانویه و جریان اصلی باهم، جریانی به نام جریان ماریچی یا حلزونی به وجود می‌آید که با توجه به وجود سرریز جانبی و تاثیرات آن بر جریان، تعیین ضریب دبی و بررسی عملکرد هیدرولیکی آن دارای اهمیت فراوان است [۱] و [۲]. از آنجا که پیچان رودها، اغلب مناطق کوهستانی و محدودیت‌های این نواحی، می‌بایست راهکاری پیشنهاد کرد که افزایش تخلیه و کاهش حداقل بازشدگی لحاظ شود [۳]. با توجه به این که در سال‌های اخیر نوع جدیدی از سرریزهای تاج طولانی، یعنی سرریز کلیدپیانویی با توجه به ساختار منحصر به فرد آن، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته، می‌توان گفت این نوع سرریز پاسخگوی محدودیت‌ها در چنین شرایط خاصی است. این سرریزها به مخزن‌ها این امکان را می‌دهند که با تراز بالاتری اجرا شوند که این موضوع منجر به افزایش حجم ذخیره در مخزن می‌شود. از مزایای عمده این نوع سرریز نسبت به سرریز کنگره‌ای، کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و همچنین ظرفیت بالای تخلیه است. به گونه‌ای که با افزایش طول موثر برای یک عرض ثابت به خوبی می‌تواند جایگزین سرریزهای خطی باشد [۴].

نظریه‌ی سرریز کلیدپیانویی سال ۲۰۰۳ در فرانسه، توسط لمپریه و اومانه مطرح شد که این سرریز نوع اصلاح شده‌ای از سرریز کنگره‌ای است. در شکل ۱ نامگذاری قسمت‌های مختلف آن نشان داده شده است و بر این اساس P_o ارتفاع کلید خروجی^۱ و P_i ارتفاع کلید ورودی^۲، T_s ضخامت تاج جانبی^۳، W عرض کل سرریز^۴، W_o عرض کلید خروجی^۵، W_i عرض کلید ورودی^۶، B_i طول شیروانی ورودی^۷، B_o طول شیروانی خروجی^۸، B_b طول مبنا^۹ و B طول بالادست-پایین دست سرریز^{۱۰} هستند.



شکل ۱: نام‌گذاری قسمت‌های مختلف سرریز

کلیدپیانویی - تیپ A (پارالونگ و همکاران، ۲۰۱۱)

با توجه به شباهت با کلیدهای پیانو، این نوع سرریز را، کلیدپیانویی نام‌گذاری کرده‌اند و اولین بار در سال ۲۰۰۶ بر روی سد گلوریس در کشور فرانسه اجرا شد که موفقیت چشم‌گیری را به همراه داشت. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، سرریزهای کلید پیانوئی نوع اصلاح شده‌ای از سرریزهای کنگره‌ای هستند و دارای چهار تیپ مختلف هستند. وجود شیروانی در بالادست و پایین دست آن، این نوع سرریزها را نسبت به سرریزهای کنگره‌ای متفاوت ساخته است [۴] و [۵]. با توجه به شکل این شیروانی‌ها، سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان یکی از این چهار تیپ طراحی و اجرا می‌شوند که در شکل ۲ نشان داده می‌شوند.

⁵ Outlet key width

⁶ Inlet key width

⁷ Inlet overhang

⁸ Outlet overhang

⁹ Downstream overhang

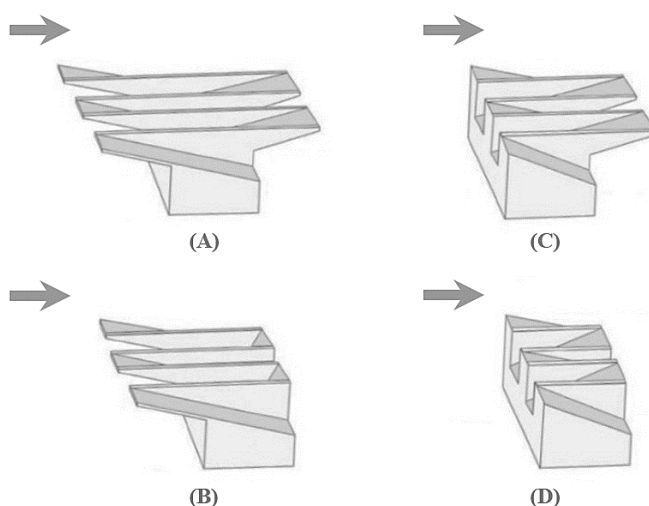
¹⁰ Upstream-downstream length of the PKW

¹ Height of the outlet entrance measured from the PKW crest

² Height of the inlet entrance measured from the PKW crest

³ Sidewall thickness

⁴ Total width of a PKW



شکل ۲: انواع تیپ‌های سرریز کلید پیانویی

مواد و روش‌ها

در بخش تئوری مسئله پارامترهای بدون بعد مورد بررسی و موثر بر ضریب آبگذری سرریزهای جانبی با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج شده که بر این اساس تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز تهیه و نصب شد. تحلیل ابعادی به منظور تعیین رابطه‌ای بین کمیت‌های فیزیکی بدون بعد در یک پدیده فیزیکی است. در مطالعات آزمایشگاهی و مدل هیدرولیکی، دانستن متغیرهای بی‌بعد کمک می‌کند تا برای انتخاب صحیح متغیرها و نحوه انجام آزمایش‌ها اطلاعات کافی به دست آید؛ به طوری که تغییرات و محدوده آن‌ها مشخص شده و بتواند نتایج حاصل را کامل و مفید کند. در این پژوهش برای به دست آوردن ضریب دبی ابتدا تمام متغیرهای موثر شناسایی می‌شوند. سپس با استفاده از تئوری π باکینگهام متغیرهای بی‌بعد مشخص می‌شوند و در نهایت با استفاده از متغیرهای بی‌بعد اصلی روابط مناسبی بیان می‌شوند. از جمله متغیرهای موثر بر ضریب دبی سرریز جانبی کلید پیانویی 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) ، سرعت جریان در کانال در بالادست سرریز (V_1) و سرعت جریان در پایین دست سرریز (V_2) نیز با داشتن دبی‌ها و

در مورد کانال‌های قوسی شکل فارس و هلیرسان (۱۹۹۳) در یک پژوهش آزمایشگاهی سرریز جانبی لبه پهن را در زاویه ۶۰ بررسی کردند و در مورد رفتار جریان ثانویه و جریان جانبی در کانال قوسی شکل ۹۰ درجه تحقیقاتی انجام دادند. برای بررسی کاربرد سرریزهای کلید پیانویی در کانال‌ها و سرریز کلید پیانویی به عنوان سرریز جانبی می‌توان به فعالیت‌ها و تحقیقات کبیری سامانی و جواهری (۲۰۱۲) اشاره کرد که ظرفیت آبگذری سرریزهای کلید پیانویی در حالت کاربرد در کانال‌ها بررسی کرده و با استفاده از آنالیز ابعادی و نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ضریب آبگذری این نوع سرریزها را ارائه کردند. دابلینگ و تولیس (۲۰۱۲) هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی واقع در کانال‌ها را مطالعه و بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در شرایط استغراق کم، سرریزهای کلید پیانویی در کانال‌ها، نسبت به سرریزهای کنگره‌ای نیاز به انرژی بالادست کمتری برای عبور یک دبی ثابت دارند.

کریمی و همکاران (۲۰۱۷) برای اولین بار از سرریز کلید پیانویی به عنوان سرریز جانبی با زاویه ۹۰ درجه در کانال مستقیم استفاده کردند که بر طبق نتایج به دست آمده این نوع سرریز در مقایسه با سرریز لبه تیز مستطیلی گذردهی بیشتری داشته و همچنین با افزایش عدد فرود در بالادست، ضریب تخلیه‌ی سرریز کلید پیانویی کاهش پیدا می‌کند.

$$C_m = \Phi_2(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{B}, \frac{P}{y_1}, \frac{B_i}{L}, \frac{W_i}{W_o}, \alpha, \delta, \frac{L'}{y_1}) \quad (3)$$

از جمله متغیرهای مهم و موثر 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. تاثیر عواملی چون دما، لزجت، درصد هوای موجود در آب و کشش سطحی (اگر عمق آب روی سرریز بیش از ۳ سانتی‌متر باشد) جزئی و قابل صرف‌نظر است.

این پژوهش به صورت آزمایشگاهی انجام شده و آزمایش‌های آن در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری صورت گرفته است. مشخصات فلوم آزمایشگاهی که تهیه و نصب شد عبارت‌ست از: عرض فلوم ۵۰ سانتی‌متر، شیب فلوم ۰.۰۰۱ عمق فلوم ۵۰ سانتی‌متر و طول فلوم ۱۴ متر. جداره‌های کانال از جنس پلاکسی‌گلاس ساخته شده است که در ابتدای کانال اصلی یک مخزن آرام‌کننده به عمق ۱.۵ متر و عرض ۲ متر قرار دارد. در ورودی کانال نیز صفحات مشبک برای آرام کردن جریان و در خروجی کانال نیز یک سرریز مثلثی برای اندازه‌گیری جریان خروجی تعبیه شده است. شایان ذکر است که از صفحات یونولیتی برای به حداقل رساندن موج‌هایی که ممکن است در سطح جریان ایجاد شود کمک گرفته شد. برای تامین دبی، پمپی به ظرفیت حدود ۵۰ لیتر بر ثانیه (در شرایط مطلوب) مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۳ طرحی از فلوم مورد نظر را نمایش می‌دهد. همچنین در تصویر ۱، نمای کلی فلوم و محیط آزمایشگاه، مشاهده می‌شود. آزمایش‌های مورد نظر در بازه مشخصی از تغییرات هندسی و هیدرولیکی صورت گرفت. می‌بایست به این نکته نیز اشاره کرد که تمامی این آزمایش‌ها، در شرایط مشابهی با سرریز لبه‌تیز مستطیلی مقایسه شده و نتایج مربوط به سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی با سرریزهای کلیدپیانویی مقایسه شده است.

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 موثر سرریز (L')، زاویه کنسول-های سرریز (δ)، زاویه قرارگیری سرریز (α)، ارتفاع سرریز (P)، طول سرریز (B)، طول کنسول پایین‌دست (B_i)، شیب کف کانال (S₀)، تعداد کنگره‌ها و هندسه آن‌ها.

د) مشخصات عمومی: شتاب ثقل (g).

بر اساس متغیرهای موجود نتیجه می‌شود:

$$\Phi(\rho, \mu, \delta, \sigma, \alpha, V_1, y_1, y_2, g, S_0, B_i, C_M, L, L', P, B) = 0 \quad (1)$$

بر اساس تئوری π باکینگهام، ۱۴ متغیر وجود دارد و با در نظر گرفتن y_1 (با بعد L)، V_1 (با بعد LT^{-1}) و ρ (با بعد LM^{-3}) به عنوان سه متغیر اصلی (تکراری)، ۱۱ متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود. با ترکیب هر یک از متغیرها با متغیرهای اصلی، یک متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود، بنابراین:

$$C_m = \Phi\left(\frac{V_1^2}{gy_1}, \frac{\mu}{\rho y_1 V_1}, \frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{B_i}{y_1}, \frac{B}{P}, \frac{L'}{y_1}, \frac{W_i}{W_o}, \alpha, \delta, S_0\right) \quad (2)$$

در هیدرولیک کانال‌های باز، وقتی که جریان آشفته باشد، تاثیر نیروهای لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز و اندک است و از آنجا که اصولاً وضعیت جریان در کانال‌ها به صورت آشفته است، از تاثیر نیروی لزجت یا همان عدد رینولدز $\left(\frac{\rho y_1 V_1}{\mu}\right)$ صرف‌نظر می‌شود. تاثیر نیروی کشش سطحی در مواقعی است که عمق آب کمتر از ۳ سانتی‌متر باشد، و از آنجا که در آزمایش‌های پیش‌رو عمق آب از ۳ سانتی‌متر بیشتر خواهد بود از تاثیر کشش سطحی یا همان عدد وبر $\left(\frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}\right)$ صرف‌نظر می‌شود. همچنین برخی محققین تاثیر شیب کف در جریان‌های زیر بحرانی را ناچیز دانسته‌اند در نتیجه از تاثیر S_0 صرف‌نظر می‌شود. همچنین با ترکیب متغیرهای بی‌بعد و در نظر گرفتن تاثیر آن‌ها در متغیرهای دیگر رابطه (۳) حاصل می‌شود.



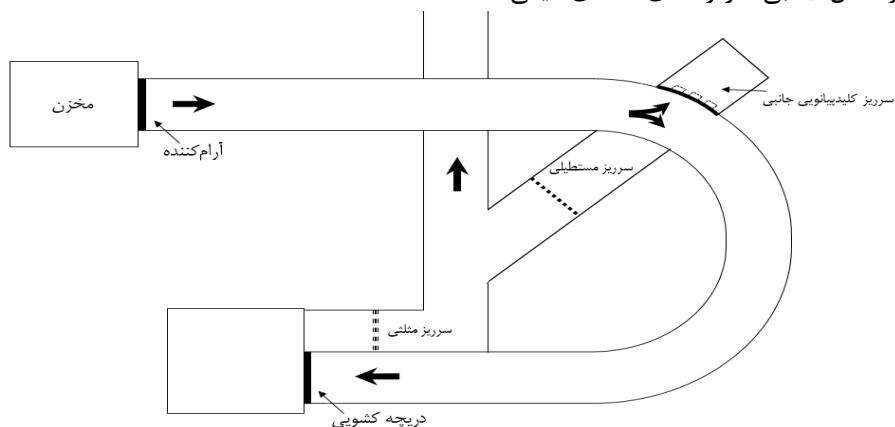
تصویر ۱: نمای کلی فلوم آزمایشگاه

سرریز کلید پیاپویی در نظر گرفته شد. مش بندی عرض کانال با در نظر گرفتن نقاطی به فاصله های مساوی پنج سانتی متر صورت گرفت. مش بندی طول کانال با توجه به ابعاد آن، به گونه ای تعیین شده که نقاط نزدیک تر به نقطه مبنا که تغییرات بیشتری داشته، در فاصله های دو و نیم سانتی متر، و با توجه به دورتر شدن این نقاط از نقطه مبنا و آرام تر شدن جریان فاصله ها به نسبت بیشتر می شوند. ردیف های افقی این مش بندی با حرف R مشخص شده که داده برداری های مربوط به کانال، از چهار ردیف در فاصله های متفاوت (با توجه به اهمیت آن ها و میزان تغییرات مشاهده شده) صورت گرفت. در قسمت جریان روی سرریز هم چهار ردیف (مطابق نمودارهای ارائه شده) داده برداری های مورد نظر صورت گرفته است. مش بندی کلی کانال در شکل ۴ نشان داده شده است.

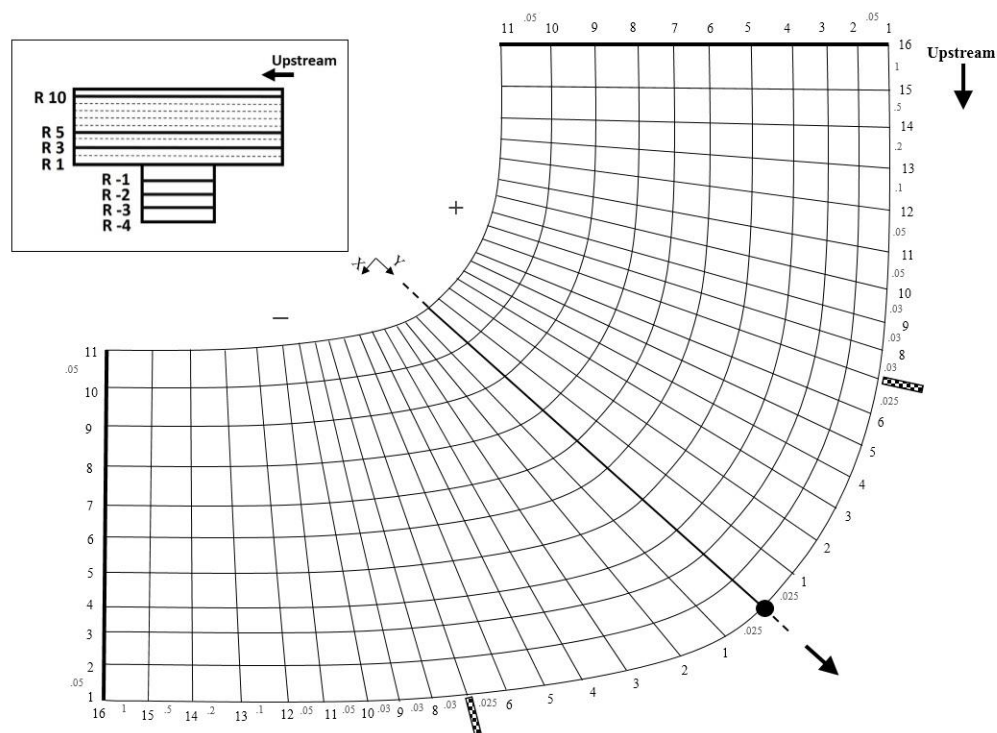
از سایر وسایل مورد استفاده، می توان به پوینت گیج (ثابت و متحرک)، چسب سیلیکون (به منظور نصب سرریزها در کانال)، تیغ کاتر، پروژکتور، گچ و سیمان (در موارد خاص) اشاره کرد. مقدار دبی عبوری از سرریز جانبی، به کمک سرریز مستطیلی کالیبره شده و همچنین مقدار دبی عبوری از انتهای کانال اصلی، توسط سرریز مثلثی کالیبره شده به دست آمد که دبی در واحد عرض سرریز جانبی را می توان به صورت رابطه ی (۴) نشان داد:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (4)$$

Q برابر با دبی عبوری از سرریز بوده و C_d ، L و H به ترتیب برابر با ضریب دبی، طول تاج توسعه یافته و ارتفاع آب بر روی سرریز هستند و در نهایت g شتاب گرانش است. در فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی نقطه ی مبنا، مرز بین کانال اصلی و کانال جانبی، در راستای نقطه ی میانی



شکل ۳: طرح فلوم آزمایشگاهی و جانمایی بخش های مختلف



شکل ۴: مش بندی کانال و تعیین محدوده اندازه گیری پروفیل سطح آب

نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که پروفیل سطحی جریان به صورت غیرخطی بوده و از الگوی جریان در سرریزهای جانبی پیروی می‌کند. به طوری که در نقطه ورودی و ابتدای سرریز افت محسوسی شکل گرفته و با نزدیک‌تر شدن به لبه انتهایی سرریز، جریان سعی بر جبران این تغییر را دارد تا دوباره به ارتفاع اولیه برسد. در شکل‌های ۶ و ۷ نیز، مشاهده می‌شود که در انتهای سرریز افزایش ارتفاعی (شبیه به قله) صورت گرفته و از آن پس ارتفاع سطح آب و شکل جریان دوباره به حالت عادی خود باز می‌گردد. آزمایش‌های مورد نظر، در بازه مشخصی از تغییرات هندسی و هیدرولیکی صورت گرفته است که از این تغییرات می‌توان به بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی در هدهای مختلف اشاره کرد. این تغییر هدها علاوه بر این که بر پارامترهای مختلف تاثیرگذار بوده، بر روی شکل جریان و پروفیل سطحی نیز تاثیر به‌سزایی داشته است. با افزایش هد، از شدت میزان افت صورت گرفته در ابتدای لبه‌ی ورودی سرریز کاسته شده و در نهایت تغییر شکل‌هایی که از الگوی سرریزهای جانبی پیروی می‌کنند ملایم‌تر صورت می‌گیرند. در کل می‌توان گفت با افزایش هد جریان، میزان دبی بیشتری از سرریزهای کلیدپیانویی خارج شده و تغییر

نتایج و بحث

در این بخش به تحلیل پروفیل سطحی و شکل جریان، ضریب سرریز و پارامترهای موثر و در پایان به مقایسه نتایج تاثیر $(h_1 - P)/P$ بر ضریب سرریز در کانال قوسی شکل، با کانال مستقیم پرداخته می‌شود.

پروفیل سطحی و تغییرات شکل جریان بر روی سرریز کلیدپیانویی و مقایسه آن با سرریز لبه‌تیز مستطیلی

با توجه به این که داده‌برداری پروفیل سطح آب برای تمامی آزمایش‌ها صورت گرفت و حجم زیاد این نتایج و نمودارها، و همچنین با توجه به محدودیت‌های ارائه همه‌ی نتایج در این مقاله، به بررسی دو گروه (به نمایندگی از نتایج مربوط به پروفیل سطحی سرریزهای کلیدپیانویی و سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی) پرداخته می‌شود.

• سرریز کلیدپیانویی (P: 0.18 m | L: 0.35 m)

(h: 0.05 m)

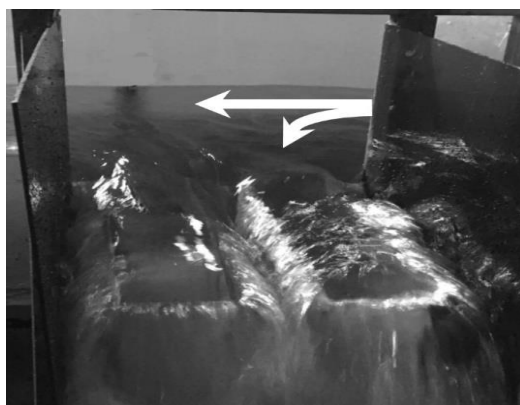
شکل‌های ۵، ۶ و ۷ هر سه مربوط می‌شوند به یک آزمایش، که در آن سرریز کلیدپیانویی تیپ B، به عرض ۰.۳۵ متر، ارتفاع ۰.۱۸ متر و با هد آب روی سرریز ۰.۰۵ متر مورد بررسی قرار گرفته و در حالت‌های گوناگون

که از بالا دست وارد سرریز می شود، توسط فلش مشخص شده است. نکته مهمی که در مورد این آزمایش می توان به آن اشاره کرد، این است که همانند سایر پروفیل های سرریز جانبی، ابتدای آن شاهد کاهش ارتفاع هستیم (ناحیه a) و به مرور، سطح جریان دوباره سعی در بازگشت به ارتفاع اولیه ی خود را دارد (ناحیه b). اما در قسمت انتهایی و خروجی سرریز کلیدپیانویی این شکل جریان تغییر کرده و کاملاً برعکس می شود. امتداد کلیدی که کاهش ارتفاع داشته (نقطه c)، ارتفاع جریان به مراتب بیشتر شده و می توان گفت به این قسمت و این کلید، در برابر (ناحیه d) فشار بیشتری وارد می شود. این امر در دی های بالاتر، به مراتب از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و می بایست به آن توجه زیادی کرد.

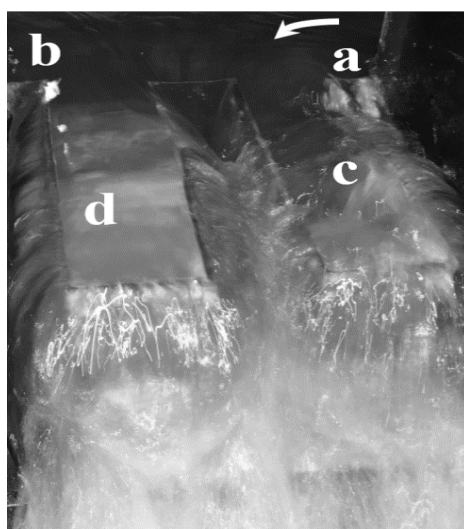
شکل ها در مقایسه با هدهای کمتر، آرام تر بوده و اختلاف ارتفاعات سطح جریان، کمتر است.

تصویر ۲، توزیع و پخش جریان در کانال و سرریز جانبی را نمایش می دهد. با توجه به ساختار خاص سرریزهای کلیدپیانویی، جریان شکل گرفته بر روی این سرریزها به عنوان سرریز جانبی، به سه بخش اصلی تقسیم می شود. جریان وارد شونده به کلیدهای ورودی، جریانی که از کلیدهای خروجی تخلیه می شود و در نهایت جریانی که از دیواره های موازی، خارج می شود.

با توجه به تصویر ۳ مشاهده می شود که توزیع جریان بر روی قسمت های مختلف و هرکدام از کلیدهای سرریز کلیدپیانویی به صورت یکنواخت نبوده و فشارهای وارده بر هر قسمت از این سازه، با یکدیگر تفاوت دارند. جریانی



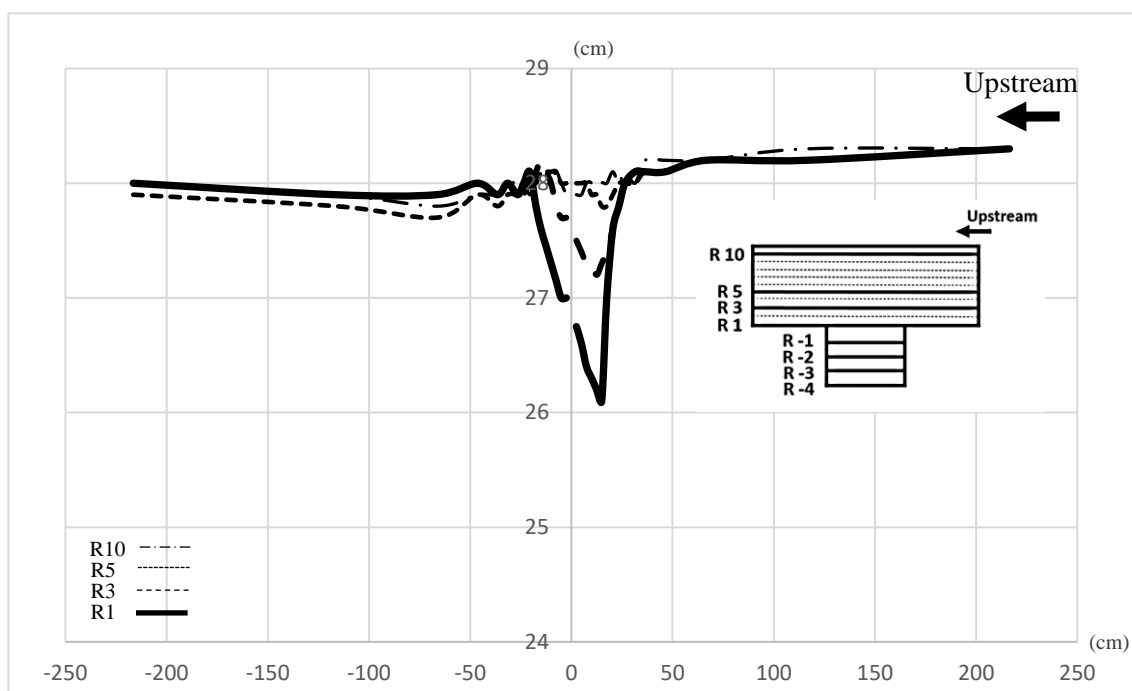
تصویر ۲: جریان در کانال اصلی و سرریز جانبی



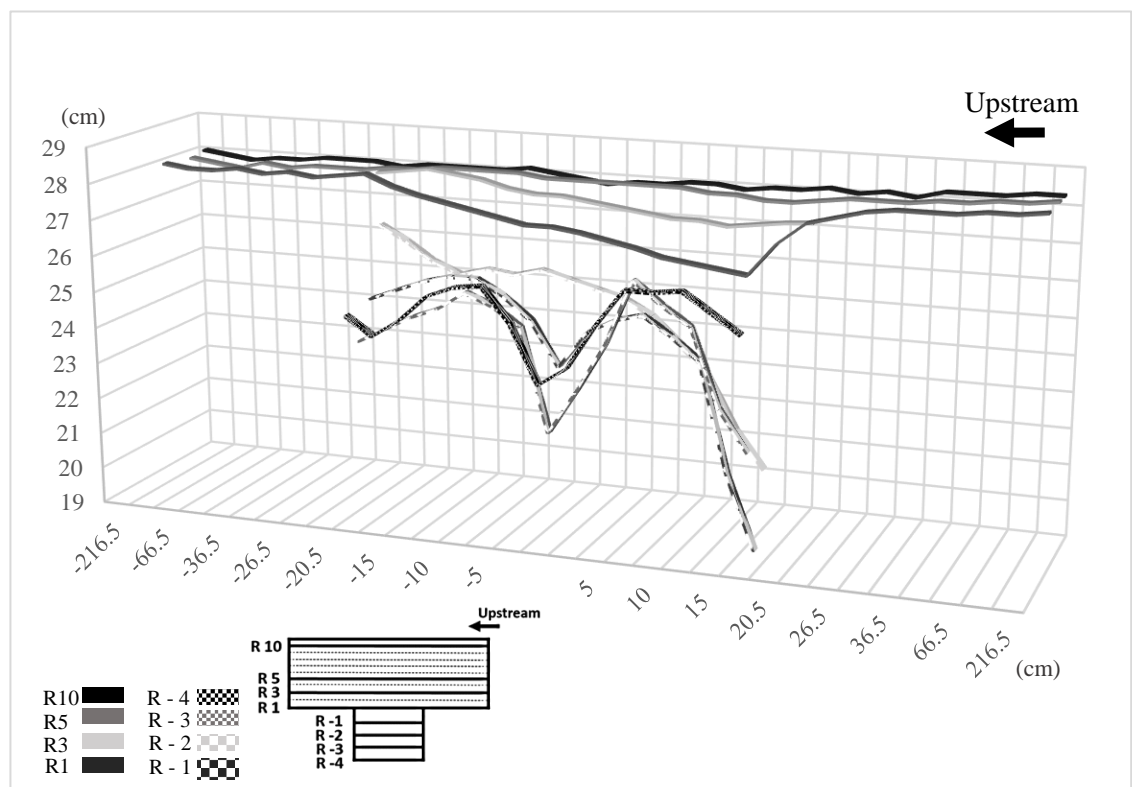
تصویر ۳: اختلاف ارتفاع های جریان در قسمت های مختلف سرریز کلید پیانویی

و d تحمل می کنند که این موضوع خود می تواند موضوع پژوهش دیگری باشد و به طور مفصل بررسی شود.

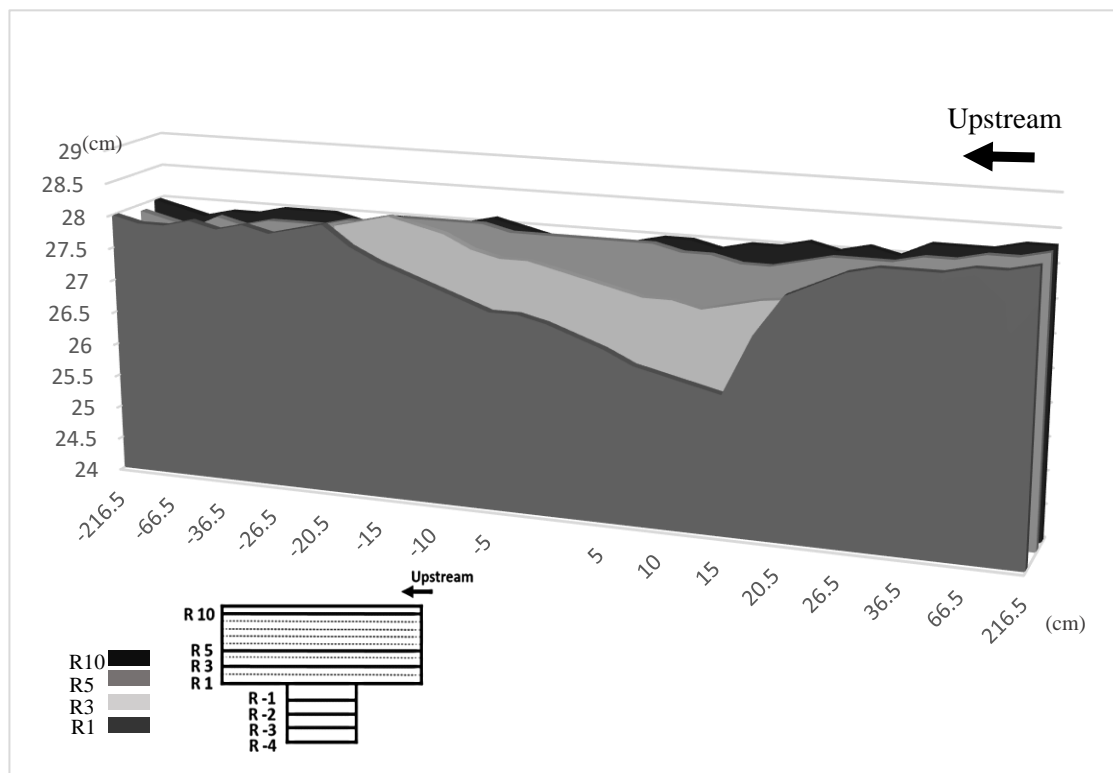
با توجه به این موضوع، در مجموع می توان گفت که نواحی b و c فشار نسبتاً بیشتری را در مقایسه با نواحی a



شکل ۵: نمودار دوبعدی پروفیل سطح آب - $h: 0.1 \text{ m}, P: 0.18 \text{ m}, L: 0.35 \text{ m}$



شکل ۶: نمایش سه بعدی سطح آب - $h: 0.1 \text{ m}, P: 0.18 \text{ m}, L: 0.35 \text{ m}$



شکل ۷: پروفیل سطح آب به صورت سه بعدی - $h: 0.1 \text{ m}$, $P: 0.18 \text{ m}$, $L: 0.35 \text{ m}$

کلیدپیانویی این اتفاق می افتد. تصویر ۴، سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز، و این کاهش اختلاف را نشان می دهد.

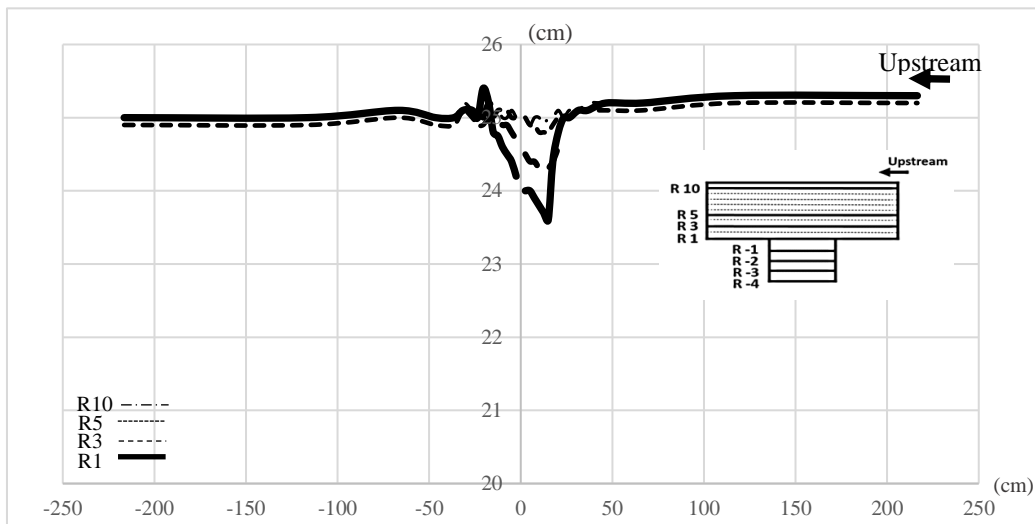


تصویر ۴: کاهش اختلاف ارتفاع در نقاط ابتدایی و انتهایی در سرریز مستطیلی

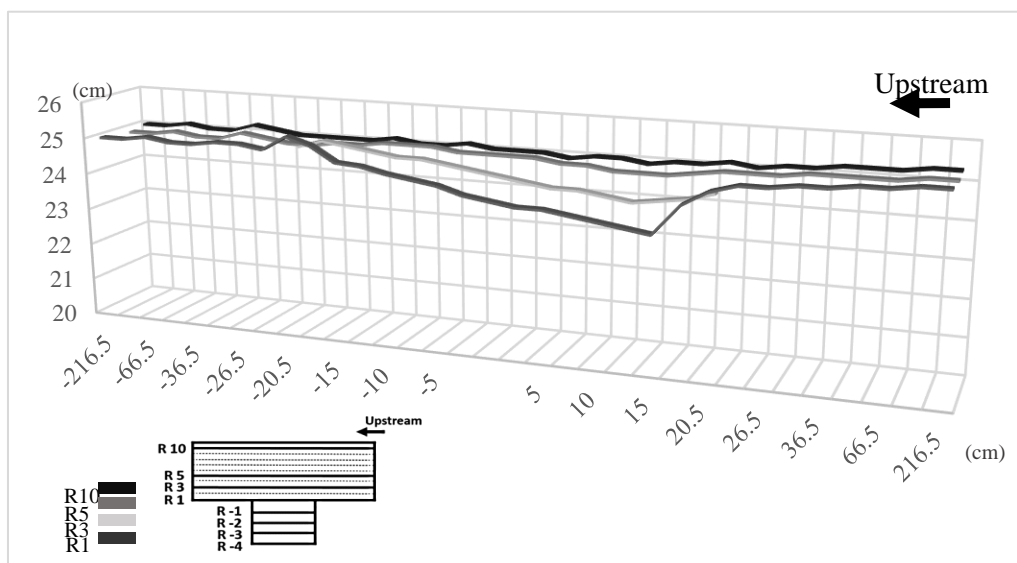
• سرریز لبه تیز مستطیلی ($P: | L: 0.35 \text{ m}$)

($h: 0.1 \text{ m}$ 0.15 m)

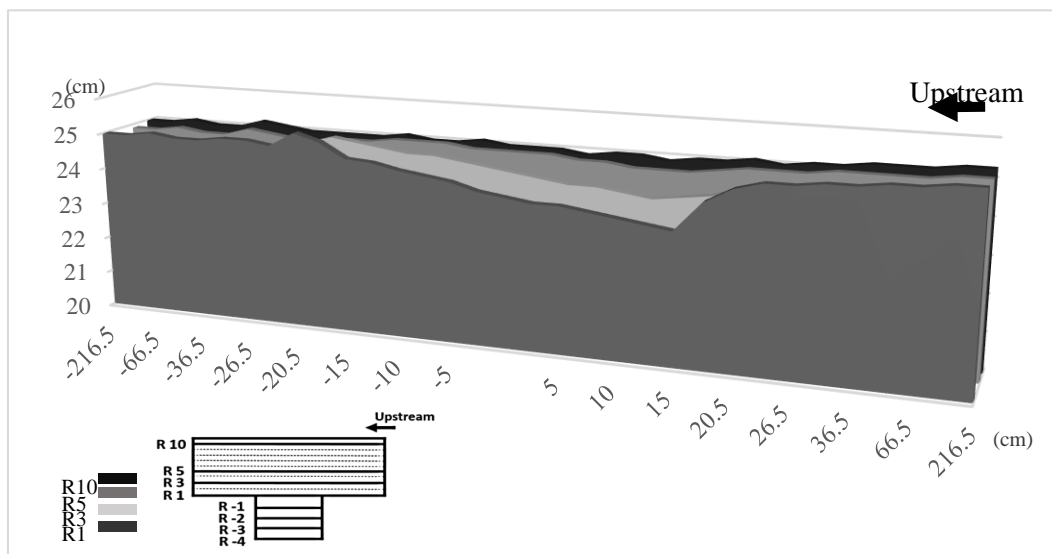
شکل های ۸، ۹ و ۱۰ هر سه مربوط می شوند به یک آزمایش، که در آن سرریز لبه تیز مستطیلی، به عرض ۰.۳۵ متر، ارتفاع ۰.۱۵ متر و با هدا آب روی سرریز ۰.۱ متر مورد بررسی قرار گرفته و در حالت های گوناگون نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، پروفیل شکل گرفته در ناحیه مرز کانال اصلی و کانال جانبی (R1) در حالتی که از سرریز مستطیلی استفاده می شود، شیب بسیار کمتری (در مقایسه با حالت استفاده از سرریز کلیدپیانویی) داشته است. همچنین با در نظر گرفتن نمودارهای مربوط به سرریز کلیدپیانویی، رابطه مستقیم افزایش دبی خروجی از کانال جانبی با توجه به افزایش هدهای مختلف، در حالت کاربرد سرریز مستطیلی هم صادق است، اما با نسبت کمتری در مقایسه با سرریز



شکل ۸: نمودار دوبعدی پروفیل سطح آب - $h: 0.1 \text{ m}$, $P: 0.15 \text{ m}$, $L: 0.35 \text{ m}$



شکل ۹: نمایش سه بعدی سطح آب - $h: 0.1 \text{ m}$, $P: 0.15 \text{ m}$, $L: 0.35 \text{ m}$



شکل ۱۰: پروفیل سطح آب به صورت سه بعدی - $h: 0.1 \text{ m}$, $P: 0.15 \text{ m}$, $L: 0.35 \text{ m}$

ضریب سرریز جانبی کلیدپیانویی در کانال قوسی و مقایسه آن با سرریز لبه تیز مستطیلی به همراه روابط ارائه شده

تعیین ضریب سرریز به صورت مشاهداتی، با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته به کمک رابطه‌ی (۱) به دست آمد. اما در مورد محاسبه‌ی این ضریب به صورت محاسباتی می‌بایست به کمک پارامترهای بی‌بعد ارزیابی‌های لازم صورت می‌گرفت تا ضریبی، با موثرترین پارامترها انتخاب شود. از آنجایی که می‌بایست ضریب همبستگی (RSQ) میان ضریب سرریز مشاهداتی و ضریب سرریز محاسباتی ارزیابی می‌شد و در نهایت بهترین حالت ممکن که نزدیک‌تر به یک بود انتخاب می‌شد،

جدول‌های ۱ و ۳ ارائه شده است و نتایج نهایی را نمایش می‌دهد. اما با توجه به تاثیر ناچیز بعضی پارامترها و با توجه به اینکه همواره اولویت، با ارائه‌ی رابطه‌ای ساده‌تر و کوتاه‌تر است، جدول‌های اصلاح شده ۲ و ۴ پیشنهاد شده است که ضریب همبستگی (RSQ) و SSE آن‌ها اندکی تغییر کرده است. همچنین تاثیر عدد فرود و $(h1-P)/P$ بر تغییرات ضریب سرریز بررسی شده که در نهایت نتایج مربوط به سرریز کلیدپیانویی با نتایج سرریز لبه تیز مستطیلی مقایسه می‌شود. شایان ذکر است که $(h1-P)/P$ نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع سرریز است و از پارامترهای بی‌بعد مهمی است که تاثیر تغییر آن بر ضریب تخلیه سرریز بررسی می‌شود.

جدول ۱: نتایج مربوط به ضرایب موثر در ضریب دبی و ضریب همبستگی سرریز کلیدپیانویی

A1	Alfa L/b	Beta L/Rc	Gama Fr	Teta (h1-P)/P	Landa Pd/B	SSE	RSQ
1.72	0.85	0.06	0.69	0	0.03	0.33	0.85

جدول ۲: نتایج اصلاح شده مربوط به ضرایب موثر در ضریب دبی و ضریب همبستگی سرریز کلیدپیانویی

A1	Alfa L/b	Gama Fr	SSE	RSQ
1.16	0.74	0.45	0.56	0.75

جدول ۳: نتایج مربوط به ضرایب موثر در ضریب دبی و ضریب همبستگی سرریز مستطیلی لبه تیز

A1	Alfa L/b	Beta L/Rc	Gama Fr	Teta (h1-P)/P	Landa Pd/B	SSE	RSQ
3.09	0.91	0	0.51	0.35	0	0.74	0.51

جدول ۴: نتایج اصلاح شده مربوط به ضرایب موثر در ضریب دبی و ضریب همبستگی سرریز مستطیلی لبه تیز

A1	Alfa L/b	Gama Fr	SSE	RSQ
2.09	0.66	0.51	0.92	0.38

ضریب سرریز مشاهداتی و ضریب سرریز محاسباتی نزدیک به هم بوده و در مقایسه با سرریزهای مستطیلی لبه تیز در شکل ۱۴ اختلاف کمتری داشته‌اند. در شکل ۱۲ تاثیر پارامتر $(h1-P)/P$ بر ضریب سرریز نمایش داده شده است که در سرریزهای جانبی کلیدپیانویی با افزایش نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع سرریز، ضریب آن کاهش یافته که این موضوع در سرریزهای جانبی لبه تیز مستطیلی (مطابق شکل ۱۵)، برعکس بوده؛ یعنی با افزایش نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع آن، ضریب سرریز هم افزایش پیدا کرده است. نحوه تغییرات ضریب تخلیه در سرریز جانبی کلیدپیانویی در اعداد فرود مختلف برای دامنه تقریبی ۰.۱۵ تا ۰.۴۵ مطابق شکل ۱۳ برای سه سرریز با عرض‌های مختلف نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود، ضریب سرریز هم افزایش می‌یابد. مطابق با شکل ۱۶ که مربوط می‌شود به سرریز لبه تیز مستطیلی، در همین بازه تقریبی، این روند در این نوع سرریزها هم صادق است.

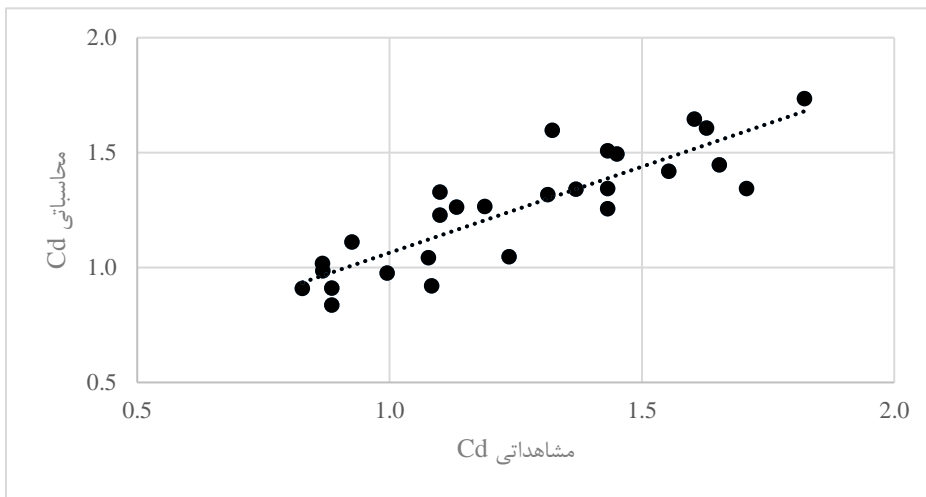
• نتایج مربوط به سرریز کلیدپیانویی

رابطه پیشنهادی ضریب سرریزهای جانبی کلید پیانویی در کانال قوسی با زاویه ۴۵ درجه به شرح زیر است:

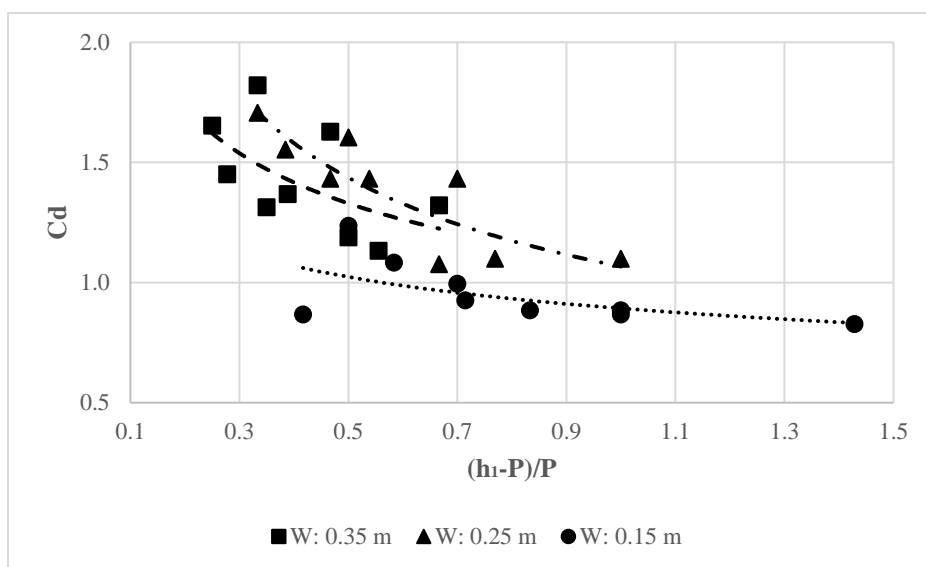
$$Cd = 1.16 \frac{L^{0.74}}{b} Fr^{0.45} \quad (5)$$

در این رابطه Cd ضریب سرریز بوده، Fr عدد فرود و L/b نسبت عرض سرریز به عرض کانال است.

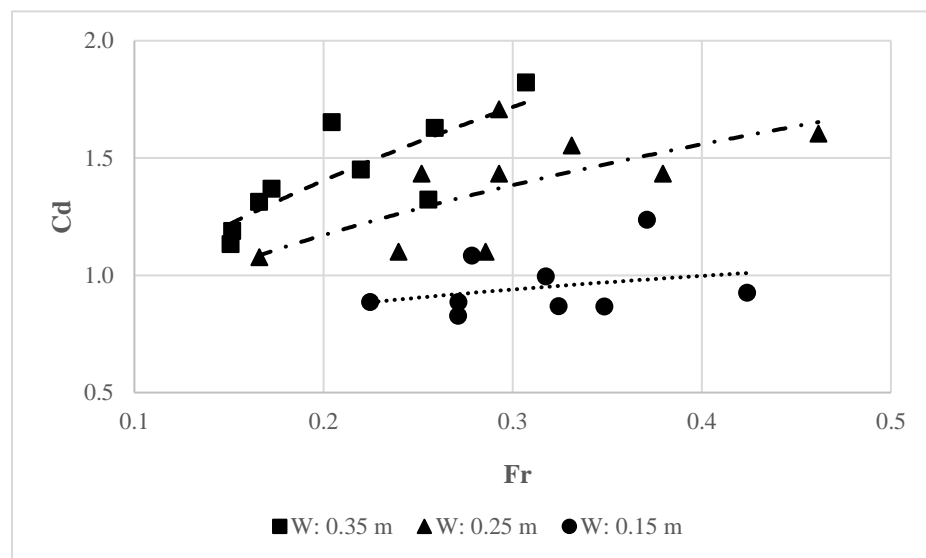
پارامترهای L/b و Fr بیشترین تاثیر را در تعیین ضریب سرریز دارند. با توجه به این موضوع نمی‌توان گفت سایر پارامترهای بی‌بعد اثری نداشته‌اند و یا اینکه بتوان آن‌ها را نادیده گرفت؛ اما همان‌گونه که پیش‌تر هم گفته شد، در ارائه‌ی روابط همواره سعی بر این است که رابطه‌ای خلاصه و با در نظرگیری میزان اهمیت و تاثیر هرچه بیشتر این پارامترها، پیشنهاد شود. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که بر طبق نتایج به دست آمده، در سرریزهای جانبی کلیدپیانویی در مقطع ۴۵ درجه کانال قوسی،



شکل ۱۱: مقایسه ضریب سرریز محاسباتی و مشاهداتی سرریز کلیدپیانویی



شکل ۱۲: نمودار تغییرات ضریب سرریز با نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع آن - سرریز کلیدپیانویی



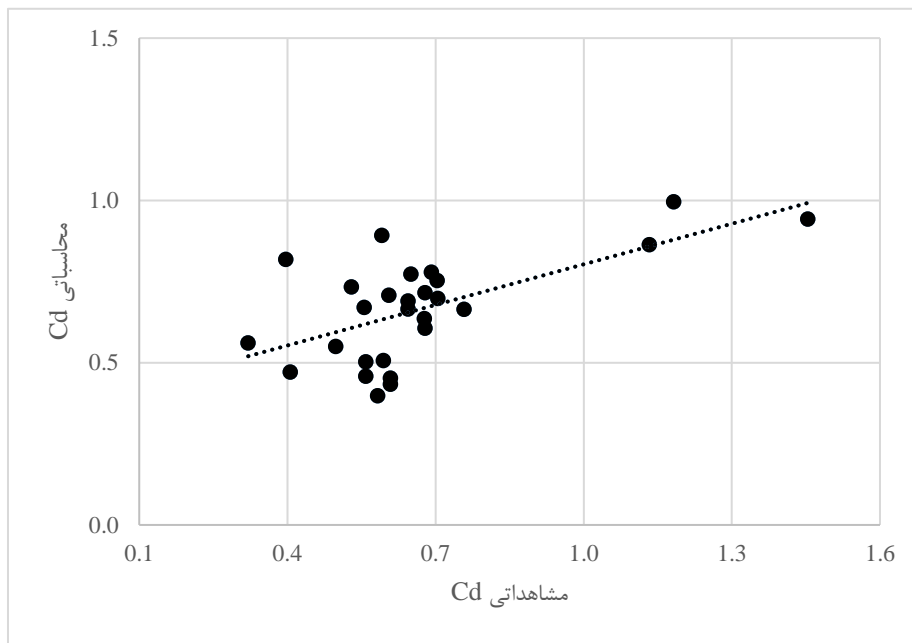
شکل ۱۳: نمودار تغییرات ضریب سرریز با عدد فرود - سرریز کلیدپیانویی

در این رابطه Cd ضریب سرریز بوده، Fr عدد فرود و L/b نسبت عرض سرریز به عرض کانال است.

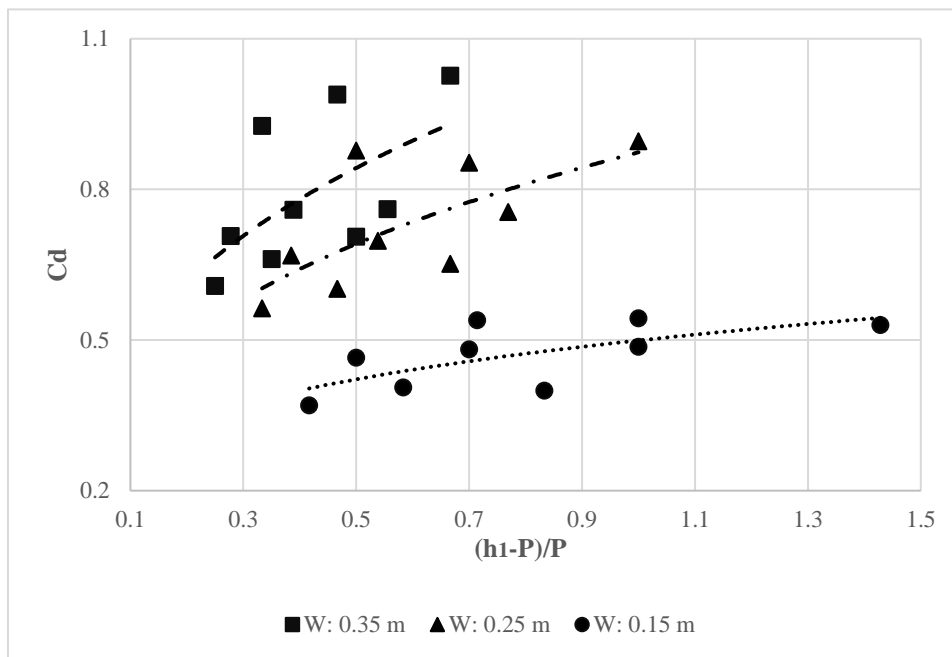
● نتایج مربوط به سرریز لبه تیز مستطیلی

رابطه پیشنهادی ضریب سرریزهای جانبی لبه تیز مستطیلی در کانال قوسی با زاویه ۴۵ درجه به شرح زیر است:

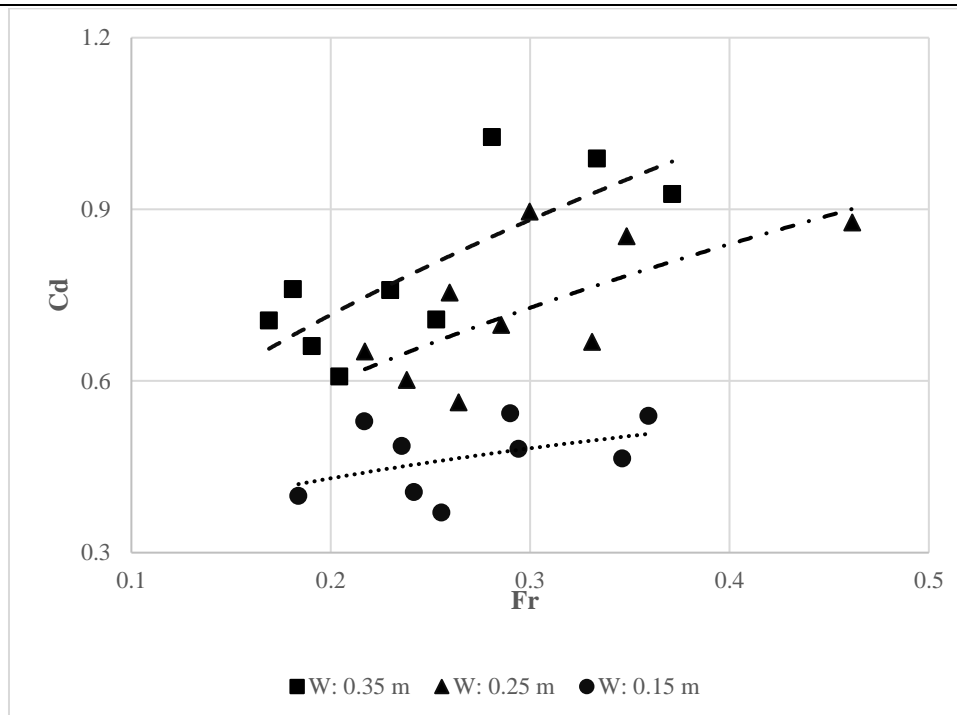
$$Cd = 2.09 \frac{L^{0.66}}{b} Fr^{0.51} \quad (۶)$$



شکل ۱۴: مقایسه ضریب سرریز محاسباتی و مشاهداتی - سرریز مستطیلی لبه تیز



شکل ۱۵: نمودار تغییرات ضریب سرریز با نسبت هد آب روی سرریز به ارتفاع آن - سرریز مستطیلی لبه تیز

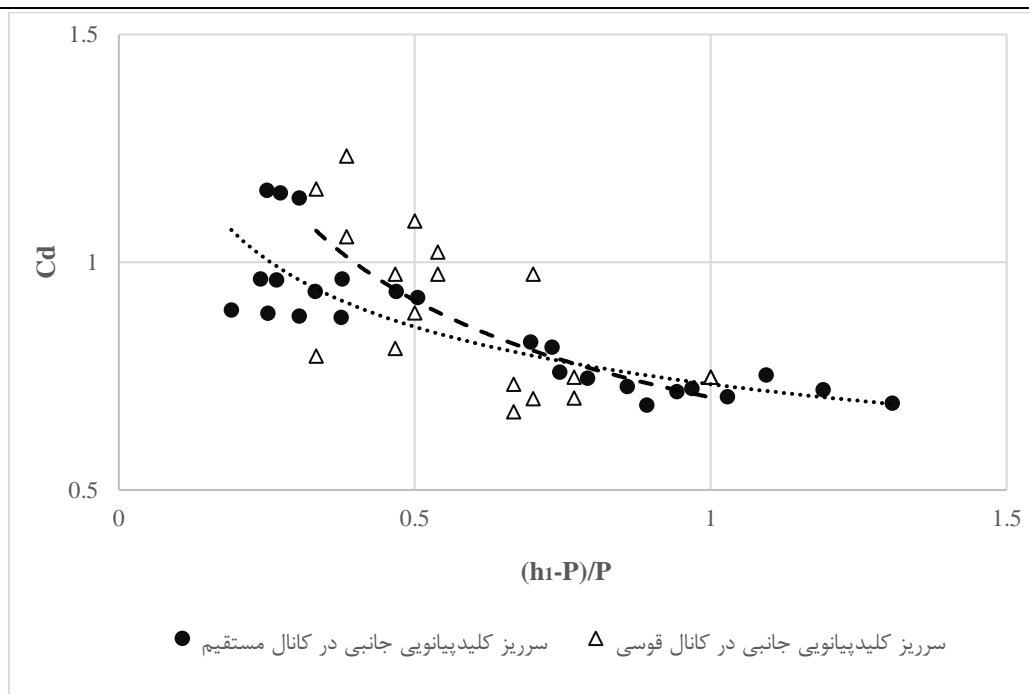


شکل ۱۶: نمودار تغییرات ضریب سرریز با عدد فرود - سرریز مستطیلی لبه تیز

مقایسه‌ی نتایج تاثیر $(h1-P)/P$ بر Cd سرریز جانبی کلیدپیانویی و لبه تیز مستطیلی در کانال قوسی با کانال مستقیم

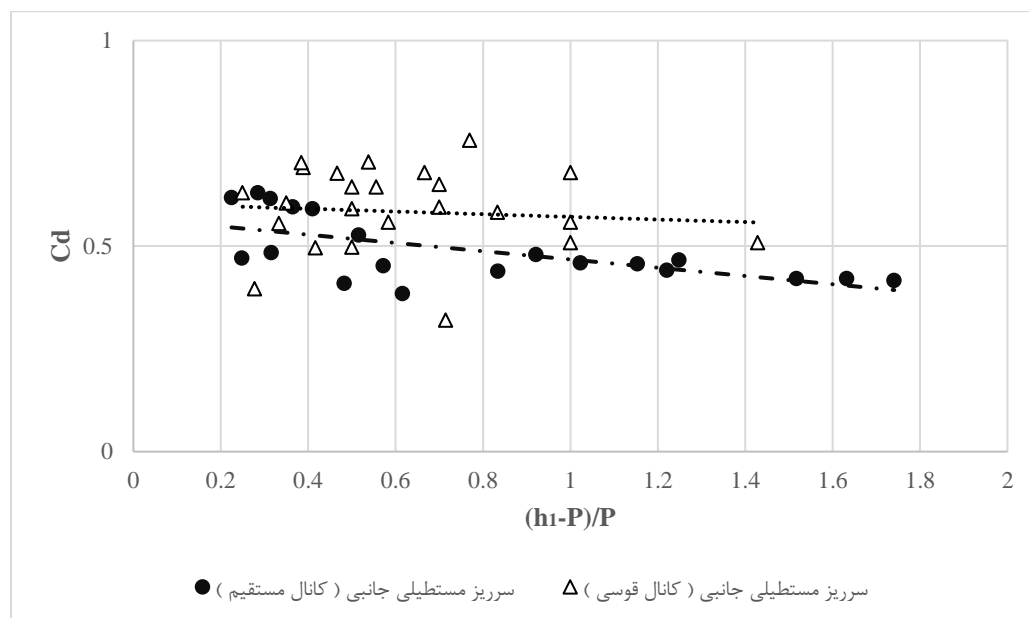
قوسی و نوع جریان در این کانال، نتایج مربوط به آن را نسبت به کانال مستقیم کمی متفاوت ساخته است. این اختلاف در شکل ۱۸ که مربوط می‌شود به مقایسه سرریز لبه تیز مستطیلی جانبی در کانال مستقیم و کانال قوسی هم به وجود آمده که کمتر از سرریز کلیدپیانویی است؛ اما باز هم تاثیر نیروی گریز از مرکز مشخص است. این نتایج تاثیر $(h1-P)/P$ بر ضریب تخلیه را نشان می‌دهد که در حالت کاربرد سرریز کلیدپیانویی، نسبت به سرریز مستطیلی تاثیر بیشتری داشته و در حالتی که کانال قوسی مورد بررسی قرار می‌گیرد، تاثیر آن به مراتب پررنگ‌تر است.

برای اولین بار کریمی و همکاران (۲۰۱۷) از سرریز کلیدپیانویی به عنوان سرریز جانبی در کانال مستقیم استفاده کردند. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها در کانال مستقیم و کانال قوسی است. با توجه به نمودارهای بالا، مشاهده می‌شود که رفتار سرریزها در هر دو حالت کانال مستقیم و کانال قوسی به طور تقریبی شبیه به یکدیگر بوده و هردو از الگویی نسبتاً مشابه پیروی می‌کنند. شکل ۱۷ مربوط می‌شود به تاثیر پارامتر $(h1-P)/P$ در دامنه حدود ۰.۳ تا ۱.۳ بر ضریب تخلیه سرریز کلیدپیانویی جانبی در کانال قوسی و کانال مستقیم با $(L/W):5$ و دلیل اندک اختلافی که بین دو نمودار شکل گرفته، نیروی گریز از مرکز است. با توجه به شکل کانال



شکل ۱۷: مقایسه نتایج Cd و $(h1-P)/P$ سرریز کلیدپیانویی جانبی در کانال قوسی با کانال مستقیم

(کریمی و همکاران ۲۰۱۷)



شکل ۱۸: مقایسه نتایج Cd و $(h1-P)/P$ سرریز مستطیلی جانبی در کانال قوسی با کانال مستقیم (کریمی و همکاران ۲۰۱۷)

فرد سرریزهای کلیدپیانویی که طول موثری بیشتر از سرریزهای معمولی دارند، ضریب تخلیه آن‌ها نیز بیشتر از سرریزهای مستطیلی بوده و در نهایت دبی بیشتری را تخلیه می‌کند که این امر بر روی شکل جریان و پروفیل سطحی نیز تاثیرگذار است. به گونه‌ای که با توجه به پیروی از الگوی جریان در سرریزهای جانبی و اختلاف ارتفاعات

نتیجه گیری

این پژوهش با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی تیپ B به عنوان سرریز جانبی در مقطع ۴۵ درجه کانال قوسی، به صورت آزمایشگاهی صورت گرفت و تمامی نتایج آن در شرایطی مشابه، با سرریز مستطیلی لبه تیز مقایسه شد. با توجه به ساختار خاص و منحصر به

neuro-fuzzy methodology. KSCE Journal of Civil Engineering, 20(7), 2999-3005.

3) Emiroglu, M. E., Kaya, N., & Agaccioğlu, H. 2009. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. Journal of irrigation and drainage engineering, 136(1), 37-46.

4) Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J. L., Leite Ribeiro, M. and A. J. Schleiss. 2011. A naming convention for the Piano Key weirs geometrical parameters. Proceeding of international conference on Labyrinth and Piano Key weirs, Liège B, 271-278. CRC Press.

5) A.R. Afzalian and J. Ahadiyan. 2014. Piano key weir with sloped parapet wall, Journal of Irrigation Science & Engineering (in Persian)

6) Lempérière, F., and Ouamane, A., 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways, Int.J. Hydropower and Dams, Vol. 10, No.5, PP.144-149.

7) M. Karimi, J. Attari, M. Saneie, M.R. Jalili Ghazizadeh. 2017. Experimental study of discharge coefficient of a Piano Key Side Weir, in: Proc. 3rd Int. Work. Labyrinth Piano Key Weirs, Vietnam, pp. 109-116.

8) M. Karimi, J. Attari, M. Saneie, M.R. Jalili Ghazizadeh. 2018. Side Weir Flow Characteristics: Comparison of Piano Key, Labyrinth, and Linear Types, J. Hydraul. Eng. 144, 4018075. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001539.

9) Kabiri-Samani, A.; Javaheri, A. 2012. Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(1), 114-120.

10) A. Saghari, K. Hosseini, M. Sanei. 2019. Experimental study of trapezoidal piano key side weirs in a curved channel, Flow Measurement and Instrumentation, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101640>.

شکل گرفته، در این ترکیب خاص و شرایط آن، این امر بیشتر نمایان شده و تاثیر بیشتری بر این تغییر در ارتفاعات سطحی داشته است.

نحوه‌ی توزیع جریان و فشارهای وارده به قسمت‌های مختلف سرریز کلیدپیانویی یکسان نبوده و این موضوع می‌تواند به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد تا قسمت‌هایی که متحمل فشار بیشتری هستند تقویت شوند. از نکات دیگری که می‌توان در مورد افزایش طول موثر در سرریزهای کلیدپیانویی به آن اشاره کرد، سهولت در جانمایی سرریزها در شرایطی که با محدودیت‌های هندسی و فیزیکی مواجه است اشاره کرد. یکی از نتایج مهم این پژوهش تعیین پارامترهای بی‌بعد موثر بر ضریب دبی است که L/b و Fr بیشترین تاثیر را در تعیین ضریب سرریز دارند. با توجه به تغییرات پارامتر Fr در دامنه‌ی تقریبی (۰.۱۵ تا ۰.۴۵)، تغییرات ضریب سرریز لبه تیز مستطیلی بین ۰.۳۵ تا ۱.۰۵ بوده است؛ در صورتی که ضریب سرریز جانبی کلید پیانویی در همین دامنه‌ی تقریبی Fr یعنی (۰.۱۵ تا ۰.۴۵) بین ۰.۸ تا ۱.۹ بوده که این مقدار، به مراتب بیشتر از آن است. همچنین تغییرات ضریب سرریز جانبی کلید پیانویی با توجه به پارامتر $(h1-P)/P$ در بازه‌ی تقریبی (۰.۲۵ تا ۱.۴۵) بین ۰.۸ تا ۱.۹ بوده که همین نمودار در همین بازه‌ی تقریبی برای سرریز لبه‌تیز مستطیلی، بین ۰.۳ تا ۱.۰۵ است.

مقایسه‌ی ضریب سرریز جانبی کلید پیانویی در کانال قوسی شکل و کانال مستقیم با $(L/W:5)$ ، با توجه به تاثیر پارامتر $(h1-P)/P$ صورت گرفت. در دامنه‌ی تقریبی (۰.۲ تا ۱.۳)، ضریب سرریز بین ۰.۶۵ تا ۱.۳ نشان داده می‌شود. در هر دو حالت، نمودار از الگوی مشابهی پیروی می‌کند؛ با این تفاوت که با توجه به نیروی گریز از مرکز در کانال قوسی شکل، تاثیر پارامتر $(h1-P)/P$ بر تخلیه‌ی سرریز اندکی بیشتر است.

منابع

1) Gholami, A., Akbar Akhtari, A., Minatour, Y., Bonakdari, H., & Javadi, A. A. 2014. Experimental and numerical study on velocity fields and water surface profile in a strongly-curved 90 open channel bend. Engineering Applications of computational Fluid Mechanics, 8(3), 447-461.

2) Shamshirband, S., Bonakdari, H., Zaji, A. H., Petkovic, D., & Motamedi, S. 2016. Improved side weir discharge coefficient modeling by adaptive