

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر شیب تاج دیواره‌های جانبی بر عملکرد سرریز کلید پیانویی مستطیلی

علی غلامی^۱، مرتضی شکری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

چکیده

سرریز کلید پیانویی، به‌عنوان یک نوع جدید از سرریزهای غیرخطی، با افزایش طول تاج نسبت به سرریزهای خطی لبه تیز، ضریب ایمنی سد، ظرفیت عبور آب و حجم ذخیره سیلاب را به طور اقتصادی و مطمئن افزایش می‌دهد. با این حال، عملکرد این سرریزها با افزایش بار آبی به دلیل استعراق در کلیدهای خروجی کاهش می‌یابد. این پژوهش تأثیر شیب تاج دیواره‌های جانبی بر ضریب تخلیه سرریز کلید پیانویی مستطیلی را بررسی می‌کند. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا، در کانالی به طول ۱۵ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام گرفت. مدل‌های آزمایشگاهی شامل سرریز کلید پیانویی مستطیلی نوع A با شیب‌های ۰، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه هستند که در جهت و خلاف جهت جریان شیب‌دار شدند و در ۹ دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان با مشارکت بیش از ۸۰ درصد طول تاج سرریز، ضریب تخلیه بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارند. ضریب تخلیه در سرریز با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان به طور متوسط ۴ درصد بیشتر از سرریز بدون شیب است. این یافته‌ها نشان می‌دهد اصلاح شیب دیواره‌های جانبی می‌تواند عملکرد سرریزها را در شرایط سیلاب و بحرانی بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز کلید پیانویی مستطیلی، شیب دیواره‌های جانبی، ضریب تخلیه، کارایی سرریز

مقدمه

که با افزایش طول کل تاج موجب افزایش ظرفیت جریان در یک عرض ثابت سرریز می‌شوند. سرریزهای کلید پیانویی نوع خاص و جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای هستند که مورد توجه و توسعه قرار گرفته‌اند (Machiels et al., 2011). اولین سرریز کلید پیانویی روی سد گولورس^۳ در کشور فرانسه ساخته شد (Crookston et al., 2019). سرریزهای کلید پیانویی بر اساس وجود یا عدم وجود شیروانی به چهار دسته تقسیم می‌شوند: نوع A (با شیروانی در بالادست و پایین دست)، نوع B (فاقد شیروانی در پایین دست)، نوع C (فاقد شیروانی در بالادست)، و نوع D (فاقد شیروانی در هر دو طرف) که سرریز کلید پیانویی نوع A از نظر اجرا و پایداری کارایی بالاتری دارند (Lempérière and Vigny, 2011). تعداد کلیدهای سرریز بین ۴ تا ۷ پیشنهاد می‌گردد (Lempérière and Ouamane, 2003). سرریزهای کلید پیانویی نوع A و B با ارتفاع و تعداد کلیدهای یکسان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کارایی سرریز کلید پیانویی نوع B حدود ۱۰ درصد بیشتر از نوع A است. همچنین مشخص شد که ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی سه تا چهار برابر بیشتر از سرریز اوجی است (Ouamane and Lempérière, 2006).

سرریزها در سدهای انحرافی و مخزنی به‌منظور عبور آب اضافی و سیلاب‌ها به کار می‌روند. این سازه‌ها باید با کارایی و اطمینان بالا طراحی شوند و همواره آماده بهره‌برداری باشند (Falvey, 2003). در حال حاضر، بسیاری از سرریزهای موجود در سراسر جهان به دلیل ظرفیت تخلیه ناکافی نیازمند بازنگری و بهبود هستند (Crookston et al., 2018). سرریزها قادرند جریان‌های فراتر از ظرفیت انتقال سدهای انحرافی را عبور داده و فرسایش رودخانه‌ها را کاهش دهند. همچنین، سرریزها در تثبیت و افزایش تراز سطح آب در کانال‌ها مؤثر بوده و به‌عنوان ابزار دقیق اندازه‌گیری دبی در سیستم‌های انتقال آب استفاده می‌شوند، که این امر برای مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب، پایش و نگهداری سیستم‌های انتقال آب، مطالعات محیط زیستی، افزایش بهره‌وری و برنامه‌ریزی توسعه‌ای اهمیت دارد (Khatsuria, 2004). یکی از انواع سرریزها، سرریزهای غیرخطی کنگره‌ای هستند

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(Email: M.Shokri@basu.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

دیواره‌های جانبی بر آگذری سرریز کلید پیلانویی مثلثی بررسی کردند. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که تراز سطح آب بالادست در سرریز کلید پیلانویی مثلثی با شیب دیواره‌های جانبی ۱۰ درجه، بیشتر از سرریز کلید پیلانویی مثلثی متعارف است، درحالی‌که بار آبی مؤثر روی سرریز شیب‌دار کمتر از حالت بدون شیب است. همچنین مشخص شد که ضریب تخلیه سرریز شیب‌دار به‌طور متوسط $5/3$ درصد بیشتر از مدل بدون شیب است (Sohrabzadeh and Ghodsian, 2022).

قدسیان و سهراب‌زاده انزانی، در پژوهشی به مقایسه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کلید پیلانویی مستطیلی با نسبت هندسی $(\frac{B}{W} = \frac{1}{3})$ با تاج افقی و سرریز با شیب ۲۰ درجه در جهت جریان پرداختند. این مطالعه در دبی‌های بین ۵۰ تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب دبی در سرریز کلید پیلانویی شیب‌دار نسبت به سرریز با تاج افقی افزایش می‌یابد. همچنین، کارایی سرریز کلید پیلانویی شیب‌دار بیشتر از سرریز با تاج افقی بود (Ghodsian and Sohrabzadeh anzani, 2023).

شاکر و همکاران در پژوهشی به بررسی تأثیر هندسه دیوار سپری بر عملکرد سرریز کلید پیلانویی مستطیلی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که دیوار سپری با هندسه‌های مثلثی و دوزنقه‌ای، در مقایسه با دیوار سپری مستطیلی، بهبود قابل توجهی در کارایی تخلیه ایجاد می‌کند (Shaker et al., 2023).

سهراب‌زاده و قدسیان، با استفاده از دیوار سپری مثلثی با شیب ۱۰ درجه روی بخشی از طول تاج دیواره‌های جانبی سرریز کلید پیلانویی مستطیلی، به بررسی ضریب تخلیه در مدل اصلاح‌شده و سرریز بدون دیوار سپری پرداختند. نتایج نشان داد ضریب تخلیه سرریز کلید پیلانویی با دیوار سپری نسبت به سرریز بدون دیوار سپری افزایش یافته است. همچنین دریافتند، سرریز کلید پیلانویی با دیوار سپری کارایی بیشتری نسبت به سرریز بدون دیوار سپری دارد (Sohrabzadeh and Ghodsian, 2024).

العبدی و خصاف با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای جانبی کلید پیلانویی نوع B دریافتند که مدل با نسبت طول تاج به عرض سرریز $(\frac{L}{W})$ برابر با ۶، بیشترین کارایی را دارد و با کاهش نسبت $\frac{L}{W}$ به ۳ و ۴ کارایی سرریز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین بیان کردند نسبت بار کل به ارتفاع سرریز $(\frac{H_1}{P_1})$ تأثیر مهمی بر عملکرد تخلیه دارد و بهترین عملکرد زمانی است که این نسبت در محدوده $0/۳$ تا $0/۷۵$ حفظ شود (Alabedi and Khassaf, 2024).

در تحقیقات گذشته، پارامترهای مؤثر بر آگذری سرریزهای کلید پیلانویی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در هدهای بالا، تداخل جریان در کلیدهای خروجی باعث کاهش ضریب تخلیه می‌شود تا زمانی که به مقدار ثابتی برسد. با توجه به عملکرد هوشمند سرریزهای کلید پیلانویی شیب‌دار که تخلیه را بر اساس هد بالادست

ریبرو و همکاران، عملکرد سرریز کلید پیلانویی در سد اترویت^۱ را با استفاده از دیواره‌های سپری بر روی تاج سرریز مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها ثابت کرد که افزایش $۱۲/۳$ درصدی در ارتفاع سرریز با دیواره‌های سپری (۱ متر افزایش در نمونه اولیه پروتوتایپ) منجر به افزایش ۱۵ درصدی در راندمان تخلیه سرریز شد (Leite Ribeiro et al., 2009). ماکیلز، بهترین نسبت عرض کلید ورودی به خروجی را بزرگ‌تر از ۱ عنوان نمود (Machiels, 2012). اندرسون و تولیس دریافتند ضریب تخلیه سرریز کلید پیلانویی با افزایش نسبت $\frac{W_i}{W_0}$ افزایش می‌یابد. تأثیر شیروانی‌ها بر کارایی سرریز به‌مراتب بیشتر از تأثیر شیب کلیدهای سرریز بود. شیروانی‌های بالادست بسیار مؤثرتر از شیروانی‌های پایین دست بودند (Anderson and Tullis, 2012). اندرسون و تولیس، افزایش $6/6$ درصدی در ضریب تخلیه سرریز را در نتیجه افزایش $۱۳/۳$ درصدی ارتفاع با حضور دیواره‌های سپری گزارش کردند (Anderson and Tullis, 2013).

مهم‌ترین اثر دیواره‌های سپری، رساندن سرریز به ارتفاع مطلوب است (Machiels et al., 2013). افضلیان و احدیان، با بررسی سرریزهای کلید پیلانویی مستطیلی شیب‌دار در جهت جریان و خلاف جهت جریان با سه زاویه ۳، $5/5$ و ۸ درجه، دریافتند که به ازای بار آبی یکسان و ارتفاع یکسان، سرریزهای کلید پیلانویی بدون شیب بیشترین توان تخلیه را نسبت به سرریزهای کلید پیلانویی شیب‌دار و آجی دارند. همچنین، یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که با افزایش شیب دیواره‌های جانبی، طول کمتری از سرریز در گذردهی جریان مشارکت داشته و این امر موجب تداخل جریان و در نتیجه کاهش ضریب دبی می‌گردد. علاوه بر این، مشخص شد که سرریزهای کلید پیلانویی شیب‌دار در خلاف جهت جریان نسبت به سرریزهای کلید پیلانویی شیب‌دار در جهت جریان، دبی بیشتری را عبور می‌دهند (Afzalian and Ahadiyan, 2015). یک واقعیت مشهود در رابطه با سرریزهای کلید پیلانویی مستطیلی تداخل جریان گذرنده از دیواره‌های جانبی است که موجب کاهش کارایی سرریز می‌گردد. نتایج نشان داد که دیوار سپری موجب کاهش تداخل جریان در سرریزهای کلید پیلانویی مستطیلی و در نتیجه افزایش کارایی سرریز می‌شود (Yarmohammadi and Ahadiyan, 2016). بلزنی و همکاران بیان کردند سرریز کلید پیلانویی مستطیلی نوع A ضریب تخلیه بالاتری نسبت به سرریز کلید پیلانویی نوع C دارد (Belzner et al., 2017). رضایی اهانویی و همکاران با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیلانویی دریافتند افزایش بار آبی بالادست موجب تداخل جریان و استغراق موضعی و در نتیجه کاهش ضریب تخلیه سرریز می‌گردد (Rezaei Ahvanooei et al., 2019). سهراب‌زاده و قدسیان، در یک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر شیب

همین‌طور ایجاد تراز آبی موردنظر در فصول کم‌آبی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی اشاره نمود.

تحلیل ابعادی

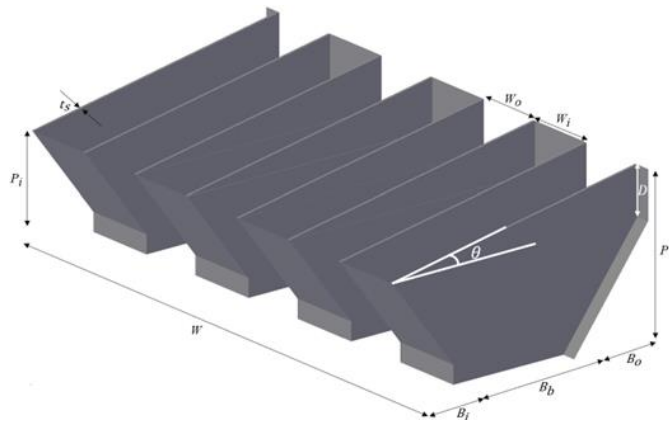
دبی آزمایشگاهی گذرنده از سرریز کلید پیاپویی با استفاده از رابطه (۱) که به رابطه عمومی سرریزها معروف است محاسبه می‌گردد:

$$C_d = \frac{Q_E}{Q_t} = \frac{Q_E}{\frac{2}{3} L \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

پارامترهای رابطه (۱) شامل C_d ضریب تخلیه سرریز، Q_E دبی تئوری گذرنده از سرریز، Q_t دبی آزمایشگاهی گذرنده از سرریز، L طول مؤثر سرریز، g شتاب ثقل، H_t بار کل در بالادست سرریز ($H_t = h + \frac{V^2}{2g}$)، V سرعت جریان و h عمق جریان روی تاج سرریز می‌باشند.

پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی با دیواره‌های جانبی شیب‌دار و بدون شیب در رابطه (۲) و همین‌طور پارامترهای هندسی مؤثر بر عملکرد سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$F(W_i, W_o, W, B_i, B_o, B, T_s, L, g, P_i, P_o, S, S_o, S_i, N, H_t, Q_E, V, \mu, \rho, \sigma, L', D, \theta) = 0 \quad (2)$$



شکل ۱- پارامترهای هندسی مؤثر بر عملکرد سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی شیب‌دار

دینامیکی، ρ جرم مخصوص آب، σ کشش سطحی، L' طول مؤثر سرریز (طول کل تر شدگی)، θ زاویه شیب تاج دیواره‌های جانبی سرریز و F نماد تابع می‌باشند. مقدار θ برابر $\tan^{-1} \frac{D}{B}$ که ارتفاع دیواره‌های اضافه‌شده به سرریز است.

برای تعیین ضریب تخلیه سرریز با استفاده از نظریه باکینگهام π و تکنیک تحلیل ابعادی رابطه (۲) به شکل رابطه (۳) به دست می‌آید:

تنظیم می‌کنند و در هدهای بالا ظرفیت بالایی دارند، توجه محققین به این نوع سرریزها جلب شده است. در تحقیقات انجام‌شده در زمینه سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب نتایج متفاوتی ارائه شده است. به‌عنوان مثال، افضلیان و احدیان، با بررسی سرریز کلید پیاپویی مستطیلی شیب‌دار در جهت جریان و خلاف جهت جریان دریافتند که سرریزهای بدون شیب دارای بیشترین توان تخلیه هستند (Afzalian and Ahadiyan, 2015). در مقابل، قدسیان و سهراب‌زاده انزانی با مقایسه سرریزهای کلید پیاپویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب به این نتیجه رسیدند که سرریزهای شیب‌دار موجب افزایش ضریب دبی می‌شوند (Ghodsian and Sohrabzadeh anzani, 2023). این تفاوت در نتایج و همچنین محدوده‌ای از دبی که توسط قدسیان و سهراب‌زاده انزانی مورد آزمایش قرار گرفته است، نشان می‌دهد که هنوز دانش کافی و جامعی درباره رفتار هیدرولیکی سرریزهای کلید پیاپویی شیب‌دار در دسترس نیست و نیاز به تحقیقات جامع‌تر و دقیق‌تر در این زمینه وجود دارد؛ بنابراین، در این پژوهش به بررسی شیب‌های مختلف و همین‌طور جهت شیب سرریز (خلاف جهت جریان و در جهت جریان) در محدوده دبی ۳/۲۵ تا ۷۲/۶۲ لیتر بر ثانیه می‌پردازیم و عملکرد کلی سرریز کلید پیاپویی شیب‌دار و بدون شیب را مورد بررسی و مقایسه قرار می‌دهیم. ازجمله کاربردهای مهم سرریزهای کلید پیاپویی شیب‌دار در سدها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌توان به ذخیره بیشتر آب در مواقع غیر بحرانی بدون نیاز به افزایش ارتفاع سد و

پارامترهای رابطه (۲) شامل، W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، W عرض کل سرریز، B_i طول شیروانی پایین‌دست، B_o طول شیروانی بالادست، $B = B_i + B_o$ طول تاج جانبی سرریز، T_s ضخامت سرریز، P_i ارتفاع سرریز در بالادست، P_o ارتفاع سرریز در پایین‌دست، S شیب کف کانال، S_o شیب کلیدهای خروجی سرریز، S_i شیب کلیدهای ورودی سرریز، N تعداد کلیدهای سرریز، μ لزجت

استفاده از یک تبدیل واگرا از جنس ورق آهنی به ۹۷ سانتی‌متر افزایش یافته بود، با چسب سیلیکون نصب و آب‌بندی شدند. برای بررسی تأثیر جهت شیب، سرریز کلید پیانویی در هر دو جهت (مثبت و منفی) با شیب‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه، شیب‌دار گردید.

عمق جریان با استفاده از عمق سنخ نقطه‌ای بادقت $\pm 1/10$ میلی‌متر، در فاصله دوبرابر ارتفاع سرریز به علت انحنای کم آب، اندازه‌گیری شد. پس از شیب‌دار نمودن سرریز و رسیدن جریان به حالت پایدار، یعنی زمانی که نوسانات جریان به حداقل رسیده بود، علامت‌هایی بر روی دیواره‌های جانبی سرریز به‌عنوان مرجع ایجاد شد. این علامت‌ها نشانگر حد نهایی جریان آب بر روی دیواره‌ها در دبی مشخص بودند که پس از ایجاد علامت‌ها و تثبیت آن‌ها، جریان آب قطع شد تا بتوان طول ترشدگی بر روی دیواره‌های جانبی را بدون تداخل جریان محاسبه کرد. این طول با استفاده از خط‌کش بادقت ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. تا قبل از فعال شدن کل سرریز کلید پیانویی شیب‌دار، مجموع طول ترشدگی دیواره‌های جانبی با طول ترشدگی کلیدهای ورودی یا خروجی سرریز، طول مؤثر سرریز را تشکیل می‌دهند که به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم در تحلیل‌های بعدی مورداستفاده قرار گرفت. مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان و در جهت جریان به ترتیب موجب افزایش ارتفاع پایین‌دست و بالادست سرریز می‌شود.

نتایج و بحث

مشاهده‌های آزمایشگاهی

در سرریزهای کلید پیانویی با دیواره‌های جانبی شیب‌دار، متناسب با هد بالادست سرریز، تخلیه جریان صورت می‌گیرد. با توجه به مشارکت تنها نیمی از کلیدها در دبی‌های پایین، هد بالادست سرریز افزایش می‌یابد و به‌عبارت‌دیگر ذخیره آب در پشت سرریز افزایش می‌یابد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد در دبی‌های پایین، سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان و در جهت جریان به ترتیب کلیدهای خروجی و کلیدهای ورودی در گذردهی جریان مشارکت دارند. با افزایش شیب دیواره‌های جانبی سرریز در دبی ثابت، هد بالادست افزایش می‌یابد. همچنین افزایش دبی در یک شیب ثابت، منجر به افزایش هد بالادست می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۲ و شکل ۳ نیز دیده می‌شود، در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان، بیشترین عمق در بالادست کلیدهای ورودی و در سرریز با شیب در جهت جریان بیشترین عمق در پایین‌دست کلیدهای ورودی دیده می‌شود. به همین جهت، می‌توان پرشی که در بالادست کلیدهای ورودی سرریز با شیب در جهت جریان ایجاد می‌شود را مشاهده کرد. این پرش در دبی و شیب زیاد، به‌وضوح قابل مشاهده است (شکل ۴).

$$F\left(\frac{Q}{L\sqrt{gH^3}}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{W_i}{W}, \frac{W}{B_o}, \frac{L}{W}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{B}{W}, \frac{H_t}{P_i}\right) \quad (3)$$

اگر هد آب بیش از ۲/۵ سانتی‌متر باشد، تأثیر کشش سطحی را می‌توان نادیده گرفت (Machiels et al., 2011)؛ بنابراین باتوجه‌به اینکه در این پژوهش، هد آب در آزمایش‌ها بیش از ۲/۵ سانتی‌متر بوده است، از تأثیر نیروی کشش سطحی یا عدد وبر $(\frac{\rho V^2 L}{\mu})$ صرف‌نظر می‌شود. با توجه به اینکه عدد رینولدز $(\frac{\rho V L}{\mu})$ در تحقیق حاضر در محدوده‌ی جریان آشفته بوده، از عدد رینولدز می‌توان صرف‌نظر کرد. همچنین مقدار نسبت‌های $\frac{B_i}{B_o}$ و $\frac{W_i}{W_o}$ در تمام آزمایش‌های انجام‌شده برابر ۱ است. نسبت‌های $\frac{L}{W}$ ، $\frac{W_i}{W}$ ، $\frac{T_s}{B}$ ، $\frac{B}{W}$ ، $\frac{W}{B_i}$ ، $\frac{T_s}{P_o}$ و شیب کلیدهای ورودی و خروجی سرریز در تمامی آزمایش‌ها ثابت است. در این پژوهش میزان N و S به ترتیب برابر ۴ و صفر است. بنابراین با حذف پارامترهای ثابت، رابطه (۳) را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۴) نمایش داد:

$$C_d = \frac{Q}{L\sqrt{gH^3}} = F\left(\frac{H_t}{P_i}, \frac{L'}{L}, \theta\right) = 0 \quad (4)$$

باتوجه‌به رابطه (۳) ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار به نسبت‌های θ ، $\frac{L'}{L}$ و $\frac{H_t}{P_i}$ وابسته است. لازم به ذکر است پارامترهای θ و $\frac{L'}{L}$ برای سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب به ترتیب ۰ و ۱ می‌باشند و از رابطه (۳) حذف می‌گردد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بوعلی سینا انجام شدند. این آزمایشگاه مجهز به کانالی با دیواره‌ها و کف شیشه‌ای به طول ۱۵ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر است. جریان آب با استفاده از یک شیر کنترل در محدوده دبی ۳/۲۵ تا ۷۲/۶۲ لیتر بر ثانیه تنظیم شده و از طریق مخزنی که زیر کانال قرار دارد، وارد کانال می‌شود. پس از عبور از سرریز، آب مجدداً به داخل مخزن بازمی‌گردد. برای ساخت سرریز کلید پیانویی مستطیلی نوع A با ۴ سیکل و ضخامت ۵ میلی‌متر، ابتدا قطعات موردنیاز برای ساخت سرریز و قطعاتی برای شیب‌دار نمودن آن در نرم‌افزار اتوکد^۱ طراحی شدند. سپس این قطعات با استفاده از صفحات پی‌وی‌سی^۲ با ضخامت ۵ میلی‌متر و برش لیزری تهیه شدند. قطعات با استفاده از چسب ۳-۲-۱ مونتاز شدند.

مدل‌های ساخته‌شده در یک متر انتهایی کانال که عرض آن با

1- AutoCAD
2- PVC

شکل ۶ و شکل ۷ تداخل جریان در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با دیواره‌های جانبی شیب‌دار و سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب را دبی‌های یکسان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب‌دار نمودن سرریز موجب کاهش تداخل جریان و در نتیجه افزایش کارایی سرریز می‌گردد.

مشاهدات آزمایشگاهی در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار خلاف جهت جریان نشان می‌دهد، تا قبل از فعال شدن کلیدهای ورودی تداخل جریان زیر کلیدهای ورودی به شکل برآمدگی ایجاد می‌شود و با افزایش دبی ارتفاع برآمدگی افزایش می‌یابد (شکل ۵).

جدول ۱- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در جهت جریان

مدل	$S_i=S_o$	θ	L (cm)	$B_i=B_o$ (cm)	B_B (cm)	P_o (cm)	P_i (cm)	W_o (cm)	W_i (cm)	W (cm)
سرریز کلید پیانویی مستطیلی	۵۳°	۰°	۴۹۳	۱۲/۵	۲۵	۲۰	۲۰	۱۲/۵	۱۲/۵	۹۷
		۵°	۴۹۴/۵	۱۲/۵	۲۵	۲۰	۲۴/۴	۱۲/۵	۱۲/۵	۹۷
		۷/۵°	۴۹۶/۴	۱۲/۵	۲۵	۲۰	۲۶/۶	۱۲/۵	۱۲/۵	۹۷
		۱۰°	۴۹۹/۲	۱۲/۵	۲۵	۲۰	۲۸/۸	۱۲/۵	۱۲/۵	۹۷



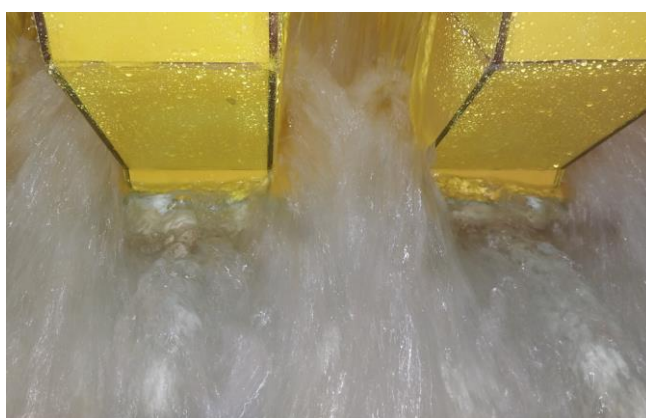
شکل ۲- سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه در جهت جریان



شکل ۳- سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان



شکل ۴- سرریز کلید بیانویی مستطیلی با شیب ۷/۵ درجه در جهت جریان



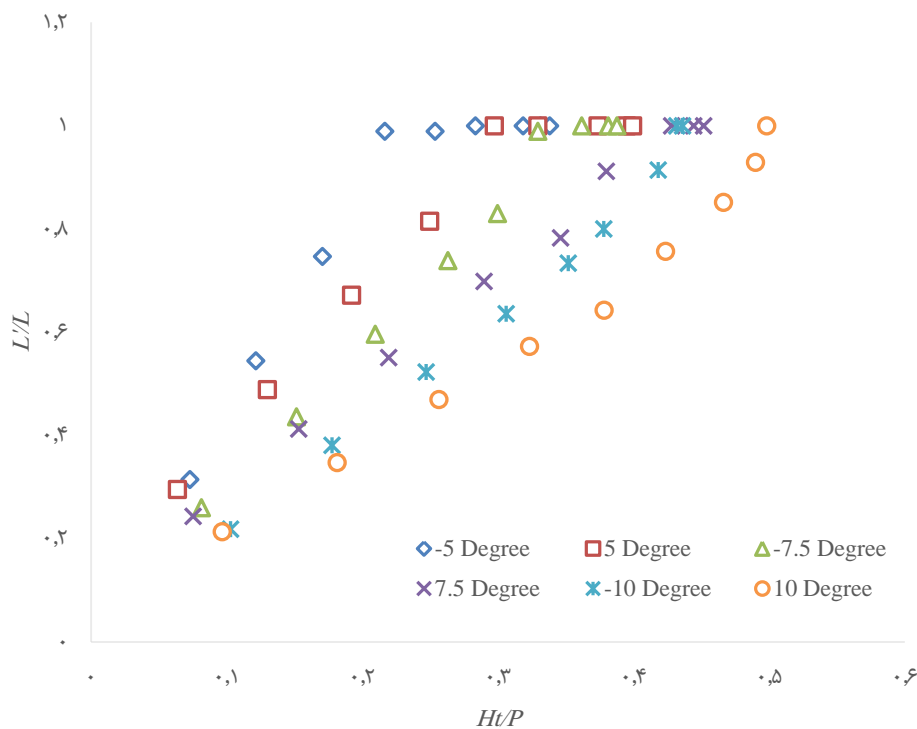
شکل ۵- تداخل جریان زیر کلیدهای ورودی در سرریز کلید بیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان



شکل ۶- تداخل جریان در کلیدهای خروجی سرریز کلید بیانویی مستطیلی بدون شیب



شکل ۷- تداخل جریان در کلیدهای خروجی سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان



شکل ۸- نسبت L'/L در مقابل نسبت H/P_i برای سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با تاج شیب‌دار

۰/۸ افزایش می‌یابد. درحالی‌که سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در جهت جریان، در تمام نسبت‌های L'/L ضریب تخلیه کمتری نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب‌دارند (شکل ۸).

ضریب تخلیه

در سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار، طول مؤثر تاج سرریز ثابت نبوده و با افزایش هد آب، طول مؤثر سرریز نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین، استفاده از رابطه عمومی سرریزها که در رابطه (۱) بیان شده

طول مؤثر

در دبی‌های پایین، تنها نیمی از کلیدهای سرریز در عبور جریان مشارکت می‌کنند؛ بنابراین نسبت طول ترشدگی به طول کل تاج سرریز (L'/L) یکی از پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه است. با افزایش شیب دیواره‌های جانبی، هد بالاتری برای فعال شدن تمام تاج سرریز موردنیاز است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان در مقایسه با سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب، در نسبت‌های L'/L بالاتر از

پارامترهای رابطه (۵)، Q_t دبی تئوری گذرنده از سرریز، Q_{wi} دبی گذرنده از کلیدهای ورودی، Q_{wo} دبی گذرنده از کلیدهای خروجی و Q_{sw} دبی گذرنده از دیواره‌های جانبی سرریز می‌باشند. معادلات اصلاح شده به همراه شرایط استفاده از هر کدام در جدول ۲ ارائه شده است.

است، برای محاسبه ضریب تخلیه این نوع سرریزها مناسب نیست و نیاز به اصلاحاتی در این معادله وجود دارد. به منظور دقیق تر کردن محاسبات، دبی تئوری سرریز به سه قسمت مطابق رابطه (۵) تقسیم می‌شود (Afzalian and Ahadiyan, 2015).

$$Q_t = Q_{wi} + Q_{wo} + Q_{sw} \quad (۵)$$

جدول ۲- معادلات اصلاح شده برای برآورد دبی تئوری سرریزهای کلید پیانویی شیب دار (Afzalian and Ahadiyan, 2015)

Q_t	نسبت هد کل به ارتفاع دیواره‌های اضافه شده	
	جهت شیب سرریز	(H/D)
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_i}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nBH}^{2.5}$	<1	خلاف جهت جریان
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_i}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nB} [H^{2.5} - (H-D)^{2.5}] + \frac{2}{3}\sqrt{2gnw_o}(H-D)^{1.5}$	>1	
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_o}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nBH}^{2.5}$	<1	در جهت جریان
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_o}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nB} [H^{2.5} - (H-D)^{2.5}] + \frac{2}{3}\sqrt{2gnw_i}(H-D)^{1.5}$	>1	

کارایی سرریز

کارایی سرریز کلید پیانویی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد (Sangsefidi et al., 2021).

$$\varepsilon = C_d \times \frac{L}{W} \quad (۶)$$

پارامترهای رابطه (۶)، ε کارایی سرریز، L طول کل تاج سرریز، W عرض کل سرریز و C_d ضریب تخلیه سرریز، نامیده می‌شوند. با افزایش هد آب، کارایی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان، با شیب کاهشی کمتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در جهت جریان ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در خلاف جهت جریان عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در جهت جریان دارند. نتایج در تحقیق حاضر نشان می‌دهد سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵- درجه کارایی بالاتری دارد. در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ می‌توان تغییرات کارایی سرریز کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار را مشاهده نمود.

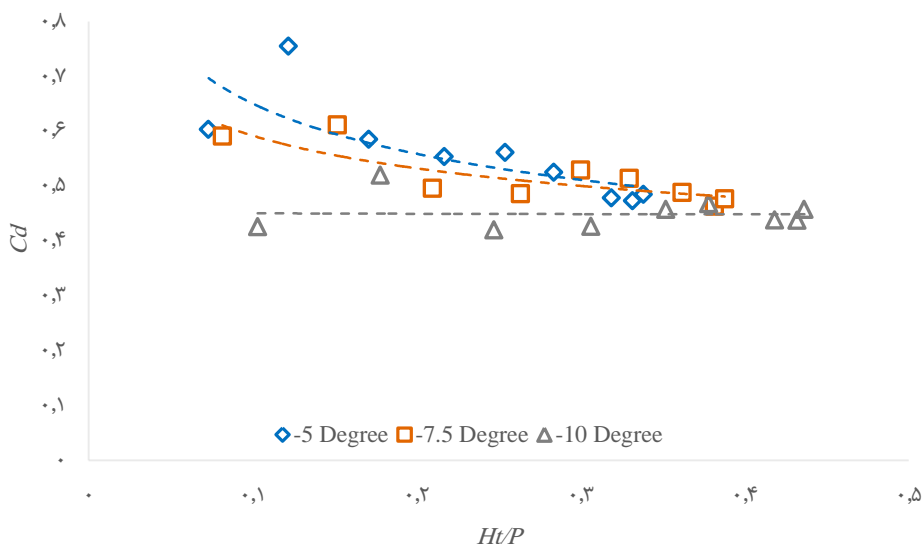
مقایسه سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب

از سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار انتظار می‌رود که در هدهای پایین ضریب تخلیه و کارایی پایینی داشته باشند و با افزایش هد و فعال شدن تمام کلیدهای سرریز نسبت به سرریزهای کلید پیانویی بدون شیب، ضریب تخلیه افزایش یابد. نتایج حاکی از آن است سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب در نسبت‌های $\frac{H_t}{p}$ کمتر از ۰/۱۷

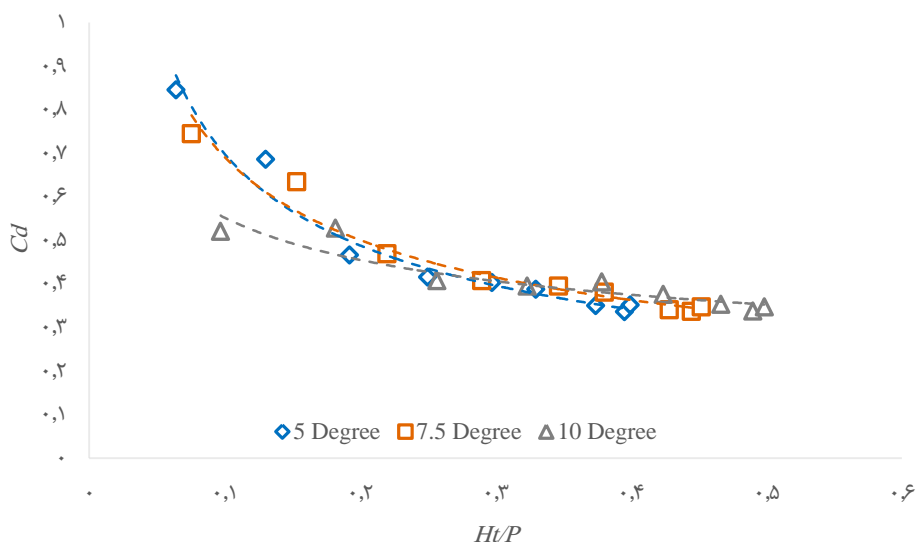
پس از انجام آزمایش‌ها بر روی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار و باتوجه به نتایج تحقیق افضلیان و احدیان، می‌توان نتیجه گرفت که سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان به علت طول مؤثر بیشتر، عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای با شیب در جهت جریان دارند (Afzalian and Ahadiyan, 2015). بررسی تغییرات ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با تاج شیب‌دار در خلاف جهت جریان و در جهت جریان، نشان می‌دهد که افزایش شیب در سرریزهای با شیب مثبت (در جهت جریان) نسبت به سرریزهای با شیب منفی (در خلاف جهت جریان) تفاوت زیادی در ضریب تخلیه ایجاد نمی‌کند؛ اما با بررسی دقیق تر می‌توان گفت با افزایش شیب، ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. این کاهش ضریب تخلیه به علت طول مؤثر کمتر و افزایش تداخل جریان با افزایش شیب سرریز است. به علاوه، طبق نتایج تحقیق ماکیلز و همکاران، درحالی که سرریز کلید پیانویی دارای ارتفاع مطلوب باشد، دیواره‌های سپری تأثیری در ظرفیت تخلیه سرریز ندارند (Machiels et al., 2013). در نتیجه، به طور متوسط بیشترین ضریب تخلیه در سرریز کلید پیانویی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان مشاهده می‌شود. در شکل ۹ و شکل ۱۰ می‌توان تغییرات ضریب تخلیه در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار را مشاهده نمود.

پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان به طور متوسط ۴ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب است. در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ مقایسه‌ای بین سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب از نظر ضریب تخلیه و کارایی سرریز انجام شده است.

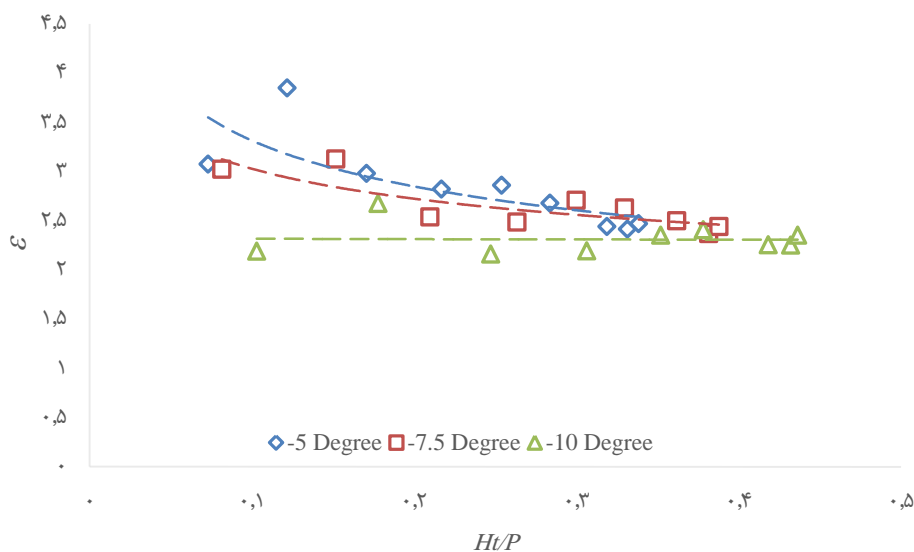
ضریب تخلیه و کارایی بیشتری نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان دارد و با افزایش نسبت $\frac{H_t}{P}$ به بیش از ۰/۱۷ و در نتیجه مشارکت ۸۰ درصد طول تاج سرریز در گزردهی جریان، ضریب تخلیه و کارایی سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان در مقایسه با سرریز کلید پیانویی بدون شیب افزایش می‌یابد. ضریب تخلیه سرریز کلید



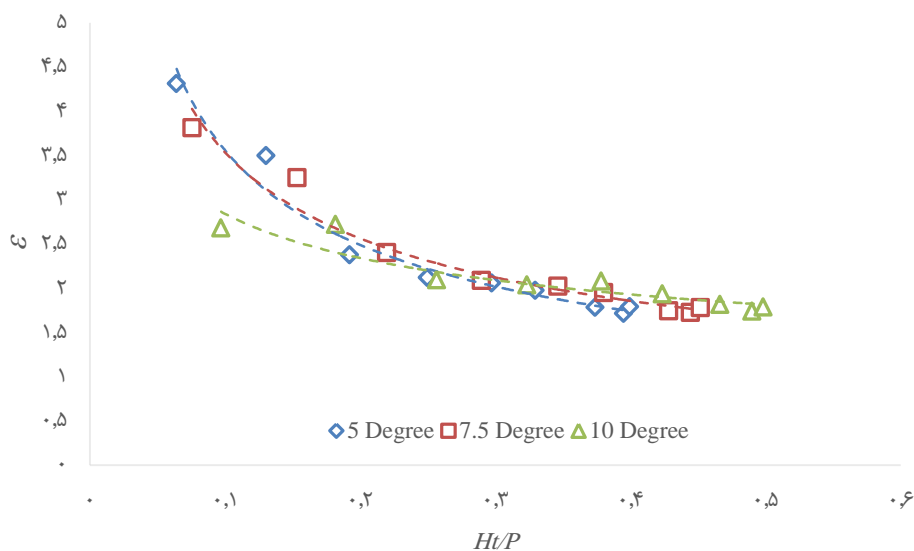
شکل ۹- ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار خلاف جهت جریان



شکل ۱۰- ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در جهت جریان



شکل ۱۱- کارایی سرریزهای کلید پیلانویی مستطیلی شیب‌دار خلاف جهت جریان



شکل ۱۲- کارایی سرریزهای کلید پیلانویی مستطیلی شیب‌دار در جهت جریان

رابطه ضریب تخلیه

در تحلیل ابعادی ضریب تخلیه تابعی از نسبت‌های بدون بعد $\frac{H_t}{P}$ و $\frac{L'}{L}$ و $\theta = \tan^{-1} \frac{D}{B}$ معرفی شد. لذا با استفاده از نرم‌افزار SPSS، رابطه‌ی (۷) جهت برآورد ضریب تخلیه بدست آمد.

$$C_d = -0.114 + (1.310 \times \frac{H_t}{P}) + (-1.924 \times (\frac{H_t}{P})^2) + (-0.78 \times \log(\frac{H_t}{P})) + (-0.061 \times \frac{L'}{L}) + (-0.114 \times (\frac{L'}{L})^2) + ((-2.062) \times \frac{D}{B}) \quad (7)$$

$$+(3.477 \times (\frac{D}{B} \times \frac{L'}{L}))$$

پارامترهای رابطه (۷)، $\frac{H_t}{P}$ هد آب روی تاج سرریز به ارتفاع سرریز، $\frac{D}{B}$ بیانگر ارتفاع دیواره‌های نصب‌شده به عرض تاج سرریز و $\frac{L'}{L}$ طول تر شدگی به طول کل سرریز، می‌باشند.

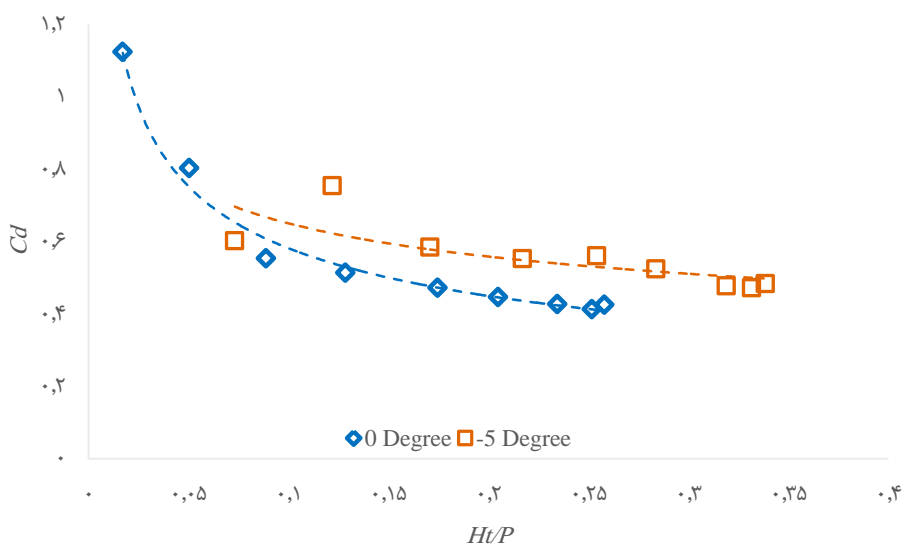
همچنین جهت تعیین بهترین رابطه علاوه بر R^2 (ضریب تعیین)، از تابع خطای RMSE (خطای جذر میانگین مربعات) و MSE (خطای میانگین مربعات) که به صورت معادلات (۸) و (۹) می‌باشند، استفاده شده است. مقدار R^2 هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد و

در این روابط $(C_d (obs))$ ، ضریب تخلیه آزمایشگاهی، $cal(C_d)$ ، ضریب تخلیه محاسبه شده و n تعداد داده‌ها می‌باشند. در ادامه شکل ۱۵ محدوده خطای بدست آمده از رابطه ی (۷) را برای سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب، نشان می‌دهد.

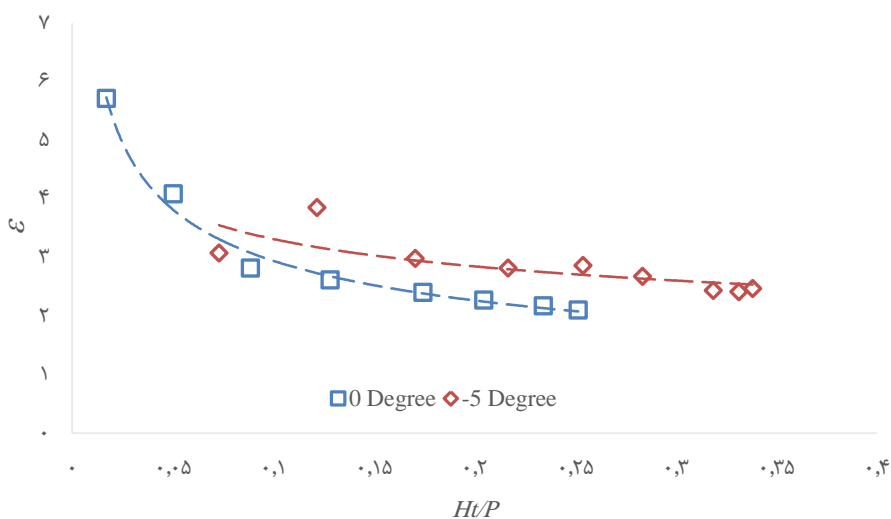
همین‌طور RMSE و MSE هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند بیانگر دقت بیشتر رابطه ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_d (obs) - C_d (cal))^2}{n}} \quad (۸)$$

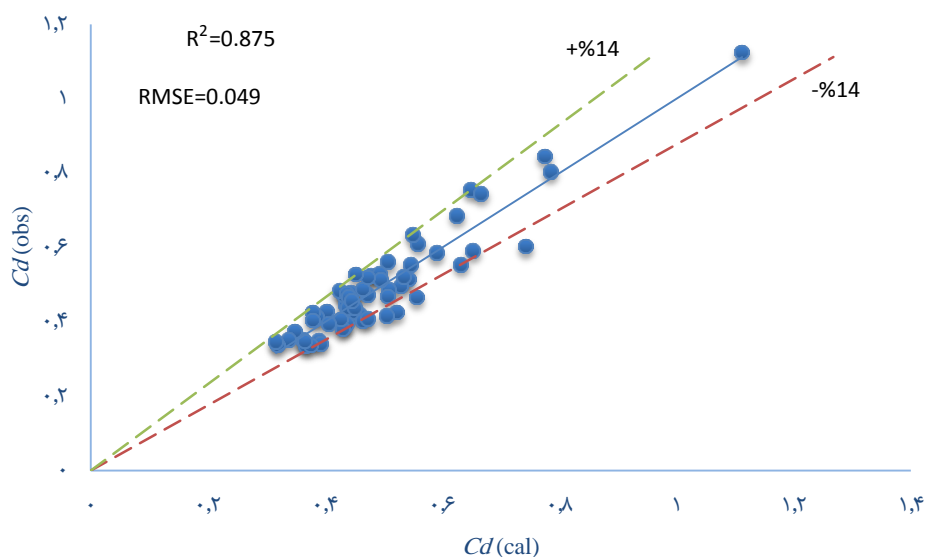
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (C_d (obs) - C_d (cal))^2}{n} \quad (۹)$$



شکل ۱۳- مقایسه ضریب تخلیه سرریز کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب



شکل ۱۴- مقایسه کارایی سرریز کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب



شکل ۱۵- مقایسه ضریب تخلیه اندازه‌گیری شده (C_d (obs)) و محاسباتی (C_d (cal)) از رابطه (۷) برای سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب

نتایج و بحث

جریان را بیشتر کند و آبگذری سرریز را کاهش دهد. در این صورت اگر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی در سرریز کلید پیانویی شیب‌دار بزرگ‌تر از ۱ باشد علاوه بر اینکه آبگذری در دبی‌های پایین کاهش یافته، در دبی‌های بالا نیز آبگذری کاهش می‌یابد؛ بنابراین باتوجه به اینکه نسبت کلیدهای ورودی به خروجی در تحقیق افضلیان و احدیان ۱/۵ است آبگذری در سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در مقایسه با سرریز کلید پیانویی بدون شیب کاهش می‌یابد. اما در تحقیق حاضر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی در سرریزهای کلید پیانویی، برابر ۱ است و مطابق شکل ۶ و شکل ۷ شیب‌دار نمودن سرریز، موجب کاهش تداخل جریان می‌گردد و ضریب تخلیه با شیب کاهشی کمتری کاهش می‌یابد؛ بنابراین با بررسی عملکرد کلی سرریز کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب هم در دبی‌های پایین و هم در دبی‌های بالا نتایج نشان داد سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان پس از فعال شدن ۸۰ درصد سرریز، ضریب تخلیه به طور متوسط ۴ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی بدون شیب است.

نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش‌ها مختلف بر روی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب نتایج زیر حاصل گردید:
۱- در دبی‌های بالا و با فعال شدن ۸۰ درصد طول تاج در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در خلاف جهت جریان، ضریب تخلیه و کارایی سرریز نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب افزایش می‌یابد.

ماکیلز، بهترین نسبت عرض کلید ورودی به خروجی را بزرگ‌تر از ۱ عنوان نمود (Machiels, 2012). یک واقعیت مشهود در رابطه با سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی تداخل جریان گذرنده از دیواره‌های جانبی است که موجب کاهش کارایی سرریز می‌گردد (Yarmohammadi and Ahadiyan, 2016). هدف استفاده از سرریز کلید پیانویی را می‌بایست مدنظر قرارداد در سرریزهای کلید پیانویی بدون شیب هدف افزایش آبگذری در دبی‌های پایین است به همین علت نسبت عرض کلید ورودی به خروجی بزرگ‌تر از ۱ می‌تواند مؤثر باشد. با افزایش دبی تداخل جریان در کلیدهای خروجی موجب کاهش آبگذری می‌گردد. افزایش ارتفاع سرریز می‌تواند در دبی‌های بالا تداخل جریان در کلیدهای خروجی را کاهش دهد و منجر به افزایش آبگذری هم در دبی‌های پایین و هم در دبی‌های بالا شود.

اما در سرریز کلید پیانویی شیب‌دار هدف کاهش آبگذری و ذخیره آب در دبی‌های پایین است و با غیرفعال نمودن نیمی از کلیدها به این هدف دست می‌یابیم. در سرریزهای کلید پیانویی با شیب در جهت جریان عمده تداخل لایه‌های جریان از پایین دست سرریز شروع می‌شود و با افزایش هد آب به سمت بالادست سرریز منتقل می‌شود. اما در سرریزهای کلید پیانویی با شیب خلاف جهت جریان، تداخل لایه‌های جریان از بالادست سرریز شروع و با افزایش هد آب به سمت پایین دست سرریز منتقل می‌گردد.

بنابراین، تداخل جریان در سرریز کلید پیانویی شیب‌دار نیز باید موردتوجه قرار گیرد که عرض کمتر کلیدهای خروجی می‌تواند تداخل

- energy dissipators. CRC Press.
- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A., Delorme, F. and Laugier, F. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways—design of a piano key weirs. Proceedings (on CD) of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB-ICOLD.
- Lempérière, F. and Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower and Dams*. 10(5): 144-149.
- Lempérière, F. and Vigny, J. 2011. General comments on labyrinth and Piano Keys Weirs—The future. Proc. Int. Conf. Labyrinth Piano Key Weirs-PKW2011, London Taylor Fr., London: Taylor and Francis.
- Machiels, O. 2012. Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs.
- Machiels, O., Ercicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. 2013. Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139(6): 506-511.
- Machiels, O., Ercicum, S., Dewals, B. J., Archambeau, P. and Piroton, M. 2011. Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. *Journal of Hydraulic Research*. 49(3): 359-366.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. 2006. Design of a new economic shape of weir. Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century.
- Rezaei Ahvanooei, A., Mousavi, S.-F. and Karami, H. 2019. Improvement of Hydraulic Performance of Nonlinear Piano-key Weirs in Plan [Original Research]. *Modares Civil Engineering Journal*. 19(4): 71-82.
- Sangsefidi, Y., Tavakol-Davani, H., Ghodsian, M., Mehraein, M. and Zarei, R. 2021. Hydrodynamics and free-flow characteristics of piano key weirs with different plan shapes. *Water*. 13(15): 2108.
- Sohrabzadeh, H. and Ghodsian, M. 2022. Experimental study of the effect of sidewall slope over the triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*. 17(4): 17-30.
- Sohrabzadeh Anzani, H. and Ghodsian, M. 2024. Laboratory study on the discharge coefficient of rectangular piano key weir with partially sloped crest. *Journal of Hydraulics*. 19(1): 1-12.
- Shaker, M., Yusuf, B., Khassaf, S., Mohamed, B., and Alias, N. A. 2023. Novel Techniques to Study the Effect of Parapet Wall Geometry on the Performance of Piano Key Weirs. *Water*. 15(13): 2307.
- Yarmohammadi, B. and Ahadian, J. 2016. Experimental
- ۲- در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه در خلاف جهت جریان، با افزایش نسبت $\frac{H_1}{p}$ به بیش از ۰/۱۷ و در نتیجه مشارکت بیش از ۸۰ درصد سرریز در گذردهی جریان، ضریب تخلیه و کارایی سرریز در مقایسه با سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب افزایش می‌یابد.
- ۳- ضریب تخلیه سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان به طور متوسط ۴ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب است.
- ۴- رابطه (۷) جهت برآورد ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار و بدون شیب، پیشنهاد گردید.

منابع

- Anderson, R. and Tullis, B. 2012. Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(4): 358-361.
- Anderson, R., and Tullis, B. 2013. Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139(3): 246-253.
- Afzalian, A. R. and Ahadiyan, J. 2015. Piano key weir with sloped parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*. 38(2): 91-102.
- Alabedi, H. J. and Khassaf, S. I. 2024. Numerical study on discharge capacity of piano key side weir with various ratios of the crest length to the width. *Open Engineering*. 14(1): 20220536.
- Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M. and Thorenz, C. 2017. Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. In *Labyrinth and piano key weirs III* (pp. 167-174). CRC Press.
- Crookston, B., Anderson, R. and Tullis, B. 2018. Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries. *Journal of Hydro-Environment Research*. 19: 160-167.
- Crookston, B. M., Ercicum, S., Tullis, B. P. and Laugier, F. 2019. Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures, advancements, and future research needs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 145(12): 02519004.
- Falvey, H. T. 2003. Hydraulic design of labyrinth weirs. ASCE Press (American Society of Civil Engineers) Reston, VA.
- Ghodsian, M. and Sohrabzadeh Anzani, H. 2023. Experimental Study on Flow Over Rectangular Piano Key Weirs with Slopped Side Crests [Original Research]. *Modares Civil Engineering Journal*. 23(2): 167-175.
- Khatsuria, R. M. 2004. Hydraulics of spillways and

Engineering. 39(4): 47-58.

Study of Flow Hydraulic in Piano Key Weirs at
Different Parapet Wall. Irrigation Sciences and

The Influence of Sidewall Crest Slope on the Performance of Rectangular Piano Key Weirs

A. Gholami¹, M. Shokri^{2*}

Received: Jul.02, 2024

Accepted: Sep.12, 2024

Abstract:

The Piano Key Weir (PKW), as a novel type of nonlinear weir, economically and reliably enhances the dam safety factor, water conveyance capacity, and flood storage volume by increasing the crest length compared to traditional sharp-crested linear weirs. However, the performance of these weirs decreases due to submergence in the outlet keys as the upstream water level rises. This study investigates the impact of sidewall slope on the discharge coefficient of rectangular PKWs. Experiments were conducted in the hydraulics laboratory of Bu-Ali Sina University using a flume measuring 15 meters in length, 60 centimeters in width, and height. The experimental models included type-A rectangular PKWs with sidewall slopes of 0, 5, 7.5, and 10 degrees, inclined both in the direction of flow and against it, tested across 9 different flow rates. The results indicated that rectangular PKWs with slopes against the flow direction, engaging over 80% of the weir crest length, had a higher discharge coefficient compared to other models. The discharge coefficient for the PKW with a 5-degree slope against the flow direction was, on average, 4% higher than that of the non-sloped weir. These findings suggest that adjusting the sidewall slope can enhance weir performance under both flood and non-critical conditions.

Keywords: Discharge Coefficient, Rectangular Piano Key Weir, Sidewall Slope, Weir Efficiency

1- M.Sc. Student in Water and Hydraulic Structures Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: M.Shokri@basu.ac.ir , Msh.Shokri@gmail.com)