

Experimental Investigation of the Impact of Sidewall Slope on the Discharge Capacity of Trapezoidal Piano Key Weirs

Morteza Shokri¹  | Ali Gholami² 

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: M.Shokri@basu.ac.ir
2. M.Sc. Student in Water and Hydraulic Structures, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: 7ali.gholami@gmail.com

ABSTRACT

Sloped piano key weirs, by adjusting the inclination of their sidewalls, enable improved hydraulic performance under various conditions. These weirs, with appropriate slopes, demonstrate better performance than non-sloped weirs by storing more water during low-flow conditions and providing more effective discharge during floods. The flow discharge in sloped piano key weirs is proportional to the upstream head, which contributes to increased efficiency and safety of dams. Trapezoidal piano key weirs, given their high efficiency, are well-suited for complex hydraulic conditions such as floods and variable flows. This study examines the performance of trapezoidal piano key weirs in both sloped and non-sloped configurations. The experiments were conducted in a 15-meter-long channel with a width and height of 60 cm. The laboratory models included trapezoidal piano key weirs of type A with slopes of 0, 5, 7.5, and 10 degrees. To investigate the effect of slope direction, the piano key weirs were inclined both in the flow direction and against the flow direction and were tested under 9 different discharges. The results showed that sloped trapezoidal piano key weirs inclined against the flow, with over 75% of the weir crest length engaged, have a higher discharge coefficient compared to other models. The discharge coefficient in the weir with a 5-degree slope against the flow direction is on average 7% higher than that of the non-sloped weir. The results of this study indicate that a trapezoidal piano key weir with a 5-degree slope against the flow direction performs better under flood and low-flow conditions compared to a non-sloped trapezoidal piano key weir.

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

بررسی آزمایشگاهی تاثیر شیب دیواره‌های جانبی بر آبگذری سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

مرتضی شکری^۱ | علی غلامی^۲

۱. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: M.Shokri@basu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: Tali.gholami@gmail.com

چکیده

سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار با تنظیم شیب دیواره‌های جانبی خود، امکان بهبود عملکرد هیدرولیکی را در شرایط مختلف فراهم می‌کنند. این سرریزها با بهره‌گیری از شیب مناسب، در زمان کم‌آبی با ذخیره آب بیشتر و در زمان سیلاب با تخلیه مؤثرتر، عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای بدون شیب نشان می‌دهند. تخلیه جریان در سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار متناسب با هد بالادست انجام می‌شود که این امر به افزایش کارایی و ایمنی سدها کمک می‌کند. سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با توجه به کارایی بالایی که دارند برای شرایط هیدرولیکی پیچیده (مثل سیلاب‌ها و جریان‌های متغیر) مناسب هستند. این پژوهش به بررسی عملکرد سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در حالت شیب‌دار و بدون شیب پرداخته است. آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۵ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام گرفت. مدل‌های آزمایشگاهی شامل سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع A با شیب‌های ۰، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه هستند و برای بررسی تأثیر جهت شیب، سرریز کلید پیانویی هم در جهت جریان و هم در خلاف جهت جریان شیب‌دار شدند و در ۹ دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار در خلاف جهت جریان با مشارکت بیش از ۷۵ درصد طول تاج سرریز، ضریب دبی بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارند. ضریب دبی در سرریز با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان به طور متوسط ۷ درصد بیشتر از سرریز بدون شیب است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان در مقایسه با سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب، عملکرد بهتری در شرایط سیلاب و کم‌آبی دارد.

کلیدواژه‌گان: سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای، شیب دیواره‌های جانبی، ضریب دبی، کارایی سرریز

مقدمه

سدها و مخازن، راهی مؤثر برای ذخیره آب و حفاظت در برابر سیل بوده و نقش حیاتی در بهبود شرایط آبی و برقی کشورها دارند (Chanson, 1994). در چنین شرایطی، کنترل سیلاب باید به گونه‌ای تضمین شود که عبور یا رهاسازی سیل بدون ایجاد هیچ‌گونه خطر یا حادثه‌ای انجام پذیرد. کنترل سیلاب یا رهاسازی سیلاب یکی از جنبه‌های اساسی حفاظت از سد است، زیرا بسته به حجم آب موجود، می‌تواند اثرات قابل توجهی داشته باشد (Pinto et al., 2017). جریان‌های زیاد می‌توانند ناشی از تغییرات آب‌وهوایی و داده‌های هیدرولوژیکی گسترده‌تر باشند که موجب سرریز شدن آب در سرریزهای با ظرفیت کم می‌شود. در نتیجه، افزایش ظرفیت آبگذری این سازه‌ها برای بهبود حفاظت ایمنی آن‌ها ضروری است. یکی از رایج‌ترین راه‌حل‌ها، استفاده از سرریزهای غیرخطی است. این نوع سرریز، با حفظ طول یک سرریز خطی سنتی، توانایی عبور دبی جریان بیشتری را فراهم می‌کند (Anderson & Tullis, 2012a). سرریزهای کلید پیانویی از جمله سرریزهای غیرخطی و تکامل یافته سرریزهای کنگره‌ای هستند که برای بهبود شرایط، نخستین بار در سال ۲۰۰۳ معرفی شدند. اولین توسعه‌دهندگان این سرریزها قصد داشتند نوعی سرریز غیرخطی جدید با ابعاد کوچک‌تر ایجاد کنند که در عین حال ساختاری اقتصادی و ساده داشته باشد. بر اساس وجود و عدم وجود طره، سرریزهای کلید پیانویی به ۴ گروه تقسیم می‌شوند. در صورتی که در بالادست و پایین‌دست سرریز کلید پیانویی دارای طره باشد سرریز کلید پیانویی نوع A و در صورتی که فاقد طره در پایین‌دست یا بالادست باشد به ترتیب سرریزهای کلید پیانویی نوع B و C و اگر به‌طور کلی سرریز فاقد طره باشد نیز نوع D، نامیده می‌شوند. همچنین تعداد کلیدهای سرریز بین ۴ تا ۷ پیشنهاد می‌شود. (Lempérière & Ouamane, 2003). اولین سرریز کلید پیانویی روی سد گولورس^۱ در کشور فرانسه ساخته شد (Crookston et al., 2019).

در تحقیقات گذشته پارامترهای مؤثر بر آبگذری سرریزهای کلید پیانویی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد در هدهای بالا تداخل جریان در کلیدهای خروجی، موجب کاهش ضریب دبی تا وقتی به مقدار ثابتی میل کند، می‌گردد. با توجه به عملکرد هوشمند سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار که متناسب با هد بالادست سرریز، تخلیه را انجام می‌دهند و ظرفیت بالایی در هدهای بالا دارند، توجه محققین را به خود جلب کرده است. با وجود مطالعات صورت گرفته همچنان دانش کافی در مورد سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار در دسترس نیست. بنابراین در این پژوهش به بررسی شیب‌های مختلف و جهت شیب سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای (سرریز با شیب منفی و مثبت) می‌پردازیم تا تحلیل جامع و دقیقی در این زمینه حاصل شود.

از جمله کاربردهای سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در سدها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی است. در سدها از این جهت حائز اهمیت است که بدون نیاز به افزایش ارتفاع سد در مواقع غیر بحرانی، آب بیشتری ذخیره می‌شود که به معنای اقتصادی بودن طرح است. در شبکه‌های آبیاری و زهکشی نیز در فصول کم‌آبی تراز آبی موردنظرمان را برای آبیگرهای بالادست ایجاد می‌کند.

پیشینه پژوهش

Lempérière & Ouamane (2006) سرریز کلید پیانویی نوع A و B با ارتفاع و تعداد کلیدهای یکسان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد کارایی سرریز کلید پیانویی نوع B حدود ۱۰ درصد بیشتر از نوع A است. همچنین دریافتند ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز اوجی سه تا چهار برابر است. (Leite Ribeiro et al., 2009). هفت سد بزرگ فرانسه که دارای سرریز کلید پیانویی بودند مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند که در بارهای آبی کم، جت عبوری از روی سرریز تحت مکش قرار می‌گیرد و موجب افزایش دبی عبوری می‌شود. با افزایش بار آبی روی سرریز، کارایی سرریز کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند پروژه بازسازی سد اترویت با استفاده از دیواره سپری موجب افزایش راندمان هیدرولیکی تا ۱۵ درصد شده است. Anderson & Tullis (2012b) بیان کردند عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی به علت وجود طره در آن بهتر از سرریز کنگره‌ای است. در صورتی که سرریز کلید پیانویی فاقد طره باشد بازدهی را پایین می‌آورد. (Machiels (2012) بهترین نسبت عرض کلید ورودی به خروجی را بزرگ‌تر از ۱ عنوان نمود. (Macheils et al., 2013) تأثیر دیواره‌های سپری روی پارامترهای هندسی سرریز کلید پیانویی با ساخت

^۱. Goulours

^۲. Barrage du Pas de l'Etroit

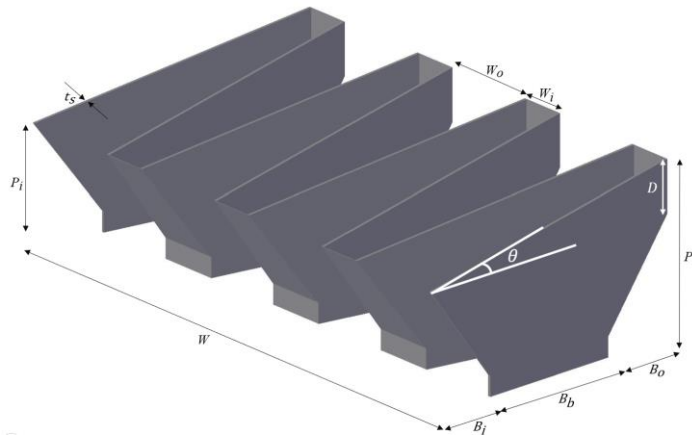
مدل‌های از جنس پی‌وی‌سی^۱ مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در کانالی به طول ۷/۲ متر با عرض و ارتفاع ۱/۲ متر انجام شد. آن‌ها دریافتند که استفاده از دیواره‌های سپری در واقع در افزایش ارتفاع سرریز مؤثر می‌باشند. استفاده از دیواره‌های سپری با رساندن ارتفاع سرریز به مقدار مطلوب، موجب افزایش ظرفیت تخلیه سرریز می‌شود. چنانچه سرریز کلید پیانویی دارای ارتفاع مطلوب باشد دیواره‌های سپری تأثیری در ظرفیت تخلیه سرریز ندارند؛ بنابراین تأثیر اصلی دیواره‌های سپری برای افزایش ارتفاع ورودی به منظور کاهش سرعت طولی و افزایش ظرفیت تخلیه جانبی است. (Belzner et al. (2017) دریافتند سرریز کلید پیانویی مستطیلی نوع A ضریب دبی بالاتری نسبت به سرریز کلید پیانویی نوع C دارد. (Kumar et al. (2020) با بررسی و مقایسه تجربی و مدل‌سازی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی دریافتند که کارایی سرریزهای کلید پیانویی با مقاطع دوزنقه‌ای نسبت به مستطیلی بیشتر است. (Saengesfidi et al. (2021) با بررسی ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی، دریافتند که ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای حدود ۵ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی مستطیلی است. (Shaker et al (2023) در پژوهشی به بررسی تأثیر هندسه دیوار سپری بر عملکرد سرریز کلید پیانویی 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. (Alabedi & Khassaf (2024) با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای جانبی کلید پیانویی 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.

افضلیان و احدیان (۱۳۹۶) با استفاده از دیواره‌های سپری شیب‌دار روی دو مدل سرریز کلید پیانویی مستطیلی، قابلیت این سرریزها را در تخلیه جریان در هنگام سیلاب و نیز انحراف آب در هنگام کم‌آبی بررسی نمودند و نتایج نشان داد جهت استفاده از دیواره‌های سپری شیب‌دار به‌صورت سرریز ثابت و یا جهت استفاده به‌عنوان سد انحرافی نسبت $\frac{P}{W_u} \leq \frac{1}{33}$ مناسب است. زیرا از طرفی هم در دبی‌های کم، پتانسیل افزایش سطح آب بیشتری را نسبت به مدل بدون دیواره سپری دارد و هم با افزایش دبی راندمان تخلیه نسبتاً مطلوبی دارند. قدسیان و احسانی‌فر (۱۳۹۸) با مطالعه آزمایشگاهی جریان در سرریز کلید پیانویی نوع A با پلان‌های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای دریافتند که در هد کل‌های (H_1) کمتر از ۰/۰۸، سرریز کلید پیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای حدود ۵ درصد و نسبت به سرریز کلید پیانویی مثلثی حدود ۱۳ درصد آب‌گذری بهتری دارد. دلیل اصلی آن را عدم کارایی هواگیری سرریز کلید پیانویی مستطیلی نسبت به دو سرریز دیگر دانستند. به‌علاوه برای هد کل‌های بیشتر از ۰/۰۸ سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی حدود ۵ درصد و نسبت به سرریز کلید پیانویی مثلثی حدود ۱۰ درصد آب‌گذری بهتری دارد. که علت آن را هواگیری کمتر در مقایسه با سرریز کلید پیانویی مثلثی و بیشتر بودن نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ در مقایسه با سرریز کلید پیانویی مستطیلی بیان نمودند. سهراب‌زاده و قدسیان (۱۴۰۱) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب تاج دیواره‌های جانبی بر آب‌گذری سرریز کلید پیانویی مثلثی پرداختند با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مشخص شد تراز سطح آب بالادست در سرریز کلید پیانویی مثلثی با شیب دیواره‌های جانبی ۱۰ درجه نسبت به سرریز کلید پیانویی مثلثی متعارف افزایش یافته در حالیکه بار آبی مؤثر روی سرریز شیب‌دار نسبت به حالت بدون شیب کاهش یافته است، همچنین به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی سرریز شیب‌دار نسبت به مدل بدون شیب افزایش یافته است. قدسیان و سهراب‌زاده انزانی (۱۴۰۱)، در پژوهشی به مقایسه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی مستطیلی با نسبت هندسی $(\frac{B}{W} = \frac{1}{3})$ با تاج افقی و سرریز با شیب ۲۰ درجه 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 پیانویی شیب‌دار نسبت به سرریز با تاج افقی افزایش می‌یابد. همچنین، کارایی سرریز کلید پیانویی شیب‌دار بیشتر از سرریز با تاج افقی بود. سهراب‌زاده و قدسیان (۱۴۰۳)، با قرار دادن دیوار سپری مثلثی با شیب ۱۰ درجه روی بخشی از طول تاج دیواره‌های جانبی سرریز کلید پیانویی مستطیلی، به بررسی ضریب دبی در مدل اصلاح‌شده و سرریز بدون دیوار سپری پرداختند، نتایج نشان داد ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با دیوار سپری نسبت به سرریز بدون دیوار سپری افزایش یافته است. همچنین دریافتند، سرریز کلید پیانویی با دیوار سپری کارایی بیشتری نسبت به سرریز بدون دیوار سپری دارد.

روش‌شناسی پژوهش

پارامترهای مؤثر بر عملکرد سرریزهای کلید پیاپی ذوزنقه‌ای با تاج دیواره‌های جانبی شیب‌دار در شکل ۱ و همین‌طور رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$F(W_i, W_o, W, B_i, B_o, B, T_s, L, g, P_i, P_o, S, N, H, Q, \mu, \rho, \sigma, L', \theta, \alpha, \text{Re}, \text{We}, \text{Fr})=0 \quad (\text{رابطه ۱})$$



شکل ۱. پارامترهای هندسی مؤثر بر عملکرد سرریزهای کلید پیاپی ذوزنقه‌ای

W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، W عرض کل سرریز، B_i طول شیروانی پایین دست، B_o طول شیروانی بالادست، $B=B_i+B_o$ طول تاج جانبی سرریز، L طول کل تاج سرریز، T_s ضخامت سرریز، g شتاب گرانش، P_i ارتفاع سرریز در بالادست، P_o ارتفاع سرریز در پایین دست، S شیب کف کانال، N تعداد کلیدهای سرریز، H هد کل در بالادست سرریز $(H=h+\frac{v^2}{2g})$ ، Q دبی سرریز، μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی جریان، σ کشش سطحی، α زاویه دیواره‌های جانبی سرریز ذوزنقه‌ای، L' طول مؤثر سرریز (طول تر شده)، θ زاویه شیب تاج دیواره‌های جانبی سرریز، Re عدد رینولدز، Fr عدد فرود، We عدد وبر و F نماد تابع می‌باشند. مقدار θ برابر $\tan^{-1} \frac{D}{B}$ که D ارتفاع دیواره‌های اضافه شده به سرریز است.

با آنالیز ابعادی رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$F\left(\frac{Q}{L\sqrt{gH^2}}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{W_i}{W}, \frac{W}{B_o}, \frac{L}{W}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{B}{W}, \frac{H}{P_i}, \frac{W}{B_i}, \frac{T_s}{B}, \frac{T_s}{P_o}, S, N, \frac{L'}{L}, \theta, \alpha, \text{Re}, \text{We}, \text{Fr}\right)=0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

مطابق جدول ۱ و با بررسی اطلاعات هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده میزان عدد وبر در دو محدوده کمتر و بیشتر از ۵۰ قرار دارد؛ لذا با توجه به نتایج تحقیق Machiels (2012) کشش سطحی بر ضریب دبی جریان مؤثر است. با توجه به اینکه عدد رینولدز $(\frac{\rho VL}{\mu})$ در تحقیق حاضر در محدوده‌ی جریان آشفته بوده، از عدد رینولدز می‌توان صرف‌نظر کرد. تمامی اعداد فرود بالادست سرریز کمتر از ۱ است و جریان در این تحقیق زیر بحرانی است. همچنین نسبت‌های $\frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{T_s}{P_o}, \frac{B}{W}, \frac{W}{B_i}, \frac{L}{W}, \frac{W_i}{W}$ و $\frac{W}{B_o}$ در تمامی آزمایش‌های انجام شده ثابت است. در این پژوهش میزان α ، N و S نیز به ترتیب برابر ۴ و صفر است.

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار

مدل	$P+h$ (m)	Q (Lit/s)	$\frac{H}{P_i}$	Re	Fr	We
TPKW 0	۰/۲۰۳ - ۰/۲۵۰		۰/۰۱۴ - ۰/۳۰۶	۳۲۲۸ - ۶۶۰۳۰	۰/۰۱۹ - ۰/۳۰۹	۰/۰۲۶ - ۱۵۱/۸۵
TPKW 5 (-)	۰/۲۱۴ - ۰/۲۶۶		۰/۰۶۸ - ۰/۳۷۹	۳۱۶۲ - ۶۴۱۴۱	۰/۰۱۷ - ۰/۲۸۲	۰/۱۱۵ - ۱۷۷/۴۸
TPKW 5 (+)	۰/۲۱۲ - ۰/۲۷۵		۰/۰۶ - ۰/۴۱۸	۳۱۷۲ - ۶۳۱۷۰	۰/۰۱۸ - ۰/۲۶۸	۰/۱۰۲ - ۱۸۸/۳۷
TPKW 7.5 (-)	۰/۲۱۷ - ۰/۲۷۵	۳/۲۵ - ۷۲/۶۲	۰/۰۸۳ - ۰/۴۱۸	۳۱۴۴ - ۶۳۱۷۰	۰/۰۱۷ - ۰/۲۶۸	۰/۱۳۶ - ۱۸۸/۳۷
TPKW 7.5 (+)	۰/۲۱۴ - ۰/۲۸۶		۰/۰۶۹ - ۰/۴۷۳	۳۱۶۰ - ۶۱۹۲۰	۰/۰۱۷ - ۰/۲۵۲	۰/۱۱۶ - ۲۰۱/۱۵
TPKW 10 (-)	۰/۲۲ - ۰/۲۸۶		۰/۰۹۷ - ۰/۴۶۹	۳۱۲۴ - ۶۲۰۰۵	۰/۰۱۷ - ۰/۲۵۳	۰/۱۵۵ - ۱۹۹/۹۲
TPKW 10 (+)	۰/۲۱۵ - ۰/۲۹۸		۰/۰۷۶ - ۰/۵۲۸	۳۱۵۳ - ۶۰۷۰۹	۰/۰۱۷ - ۰/۲۳۷	۰/۱۲۶ - ۲۱۱/۰۵

بنابراین با حذف پارامترهای ثابت، رابطه (۲) را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۳) نمایش داد:

$$C_d = \frac{Q}{L\sqrt{gH^3}} = F\left(\frac{H}{P_i}, \frac{L'}{L}, \theta, We, Fr\right) = 0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار به پارامترهای بدون بعد $\frac{H}{P_i}$, $\frac{L'}{L}$, θ , Fr , We وابسته است. لازم به ذکر

است پارامترهای θ و $\frac{L'}{L}$ برای سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب به ترتیب ۰ و ۱ است و از رابطه (۳) حذف می‌گردد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بوعلی سینا که دارای کانالی با دیواره و کف شیشه‌ای به طول ۱۵ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر است، انجام شد. در ۱ متر انتهایی کانال، با استفاده از یک تبدیل واگرا از جنس ورق آهنی، عرض کانال به ۹۷ سانتی‌متر افزایش یافته بود و مدل‌ها در این بخش نصب شدند. جریان آب با تنظیم شیر کنترل در محدوده دبی ۳/۲۵ تا ۷۲/۶۲ لیتر بر ثانیه، از طریق مخزنی که در زیر کانال تعبیه شده وارد کانال می‌شود و پس از عبور از سرریز مجدداً به داخل مخزن بازمی‌گردد. مدل‌های آزمایشگاهی ساخته شده شامل سرریزهای کلید پیانویی نوع A با شیب‌های ۰، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه هستند که برای بررسی تأثیر جهت شیب سرریز، این سرریزها یک‌بار در جهت جریان و یک‌بار در خلاف جهت جریان، شیب‌دار شدند. انتخاب شیب‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه برای سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار بر اساس دو معیار ارتباط با مطالعات پیشین و بررسی جامع عملکرد سرریز در محدوده‌های مختلف دبی صورت گرفته است.

مطالعه‌ای که توسط قدسیان و سهراب‌زاده انزانی (۱۴۰۱) انجام شد، نشان داد که سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شیب ۲۰ درجه (با ارتفاع متناظر ۹/۰۹ سانتی‌متر) در محدوده دبی ۵۰ تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه دارای آب‌گذری بیشتری نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی بدون شیب است. در این تحقیق، باهدف بررسی عملکرد کلی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و بدون شیب در دبی‌های پایین و بالا، شیب ۱۰ درجه (با ارتفاع متناظر ۸/۸ سانتی‌متر) برای سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۱۰ درجه در خلاف جهت جریان، در دبی‌های بالا عملکرد بهتری دارند؛ اما به‌طور متوسط در محدوده دبی این تحقیق، موجب کاهش آب‌گذری می‌شود.

بنابراین، آزمایش‌های دیگری بر روی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب‌های ۵ و ۷/۵ درجه نیز انجام شد تا بهترین شیب در محدوده دبی تحقیق حاضر تعیین شود.

پس از نصب و آب‌بندی سرریز در کانال، عمق جریان با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای با دقت $\pm 0.1\text{mm}$ ، در فاصله دوبرابر ارتفاع سرریز به علت انحنای کم آب برداشت 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 با دقت ± 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 مورد استفاده قرار گرفت. شایان ذکر است، سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در خلاف جهت جریان، موجب افزایش

ارتفاع پایین دست سرریز (P_o) می شود و سرریزهای کلید پیانویی شیب دار در جهت جریان، موجب افزایش ارتفاع بالادست سرریز (P_i) می گردد. مشخصات مدل های آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مدل های آزمایشگاهی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه ای شیب دار در خلاف جهت جریان

مدل	α	$S_i=S_o$	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			0°	۴۵۳/۴	۱۲/۵	۲۵	۲۰	۲۰	۷/۵	۱۷/۵	۹۷
پیانویی	6°	53°	5°	۴۵۴/۹	۱۲/۵	۲۵	۲۴/۴	۲۰	۷/۵	۱۷/۵	۹۷
دوزنقه ای			$7/5^\circ$	۴۵۶/۸	۱۲/۵	۲۵	۲۶/۶	۲۰	۷/۵	۱۷/۵	۹۷
			10°	۴۵۹/۵	۱۲/۵	۲۵	۲۸/۸	۲۰	۷/۵	۱۷/۵	۹۷

یافته های پژوهش

در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه ای با تاج شیب دار متناسب با هد آب در بالادست سرریز، تخلیه جریان انجام می شود و در دبی های پایین تنها نیمی از کلیدها در گذردهی جریان مشارکت دارند و همین موجب افزایش هد بالادست و ذخیره آب می گردد. به عبارت دیگر همان طور که در شکل ۲ و ۳ مشاهده می شود، سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه ای شیب دار خلاف جهت جریان و در جهت جریان، در دبی های پایین، به ترتیب کلیدهای خروجی و کلیدهای ورودی در گذردهی جریان مشارکت دارند و با افزایش دبی تمام کلیدها فعال می شوند. همچنین مشاهده می شود که با افزایش شیب سرریز کلید پیانویی در یک دبی ثابت، هد بالادست افزایش می یابد و افزایش دبی در یک شیب ثابت نیز، موجب افزایش هد بالادست می شود. این مشاهدات آزمایشگاهی با یافته های سهرابزاده انزانی (۱۴۰۰) در مورد سرریز کلید پیانویی مستطیلی شیب دار همخوانی دارد.



شکل ۲. سرریز کلید پیانویی دوزنقه ای با شیب $7/5$ درجه در جهت جریان



شکل ۳. سرریز کلید پیانویی دوزنقه ای با شیب $7/5$ درجه خلاف جهت جریان

در شکل ۴ می‌توان پرشی که در بالادست کلیدهای ورودی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب در جهت جریان ایجاد می‌شود را مشاهده نمود. پرش ایجادشده در دبی و شیب زیاد بهتر دیده می‌شود.



شکل ۴. سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۱۰ درجه در جهت جریان

مشاهدات آزمایشگاهی در سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار خلاف جهت جریان نشان می‌دهد که تا قبل از فعال شدن کلیدهای ورودی، آشفستگی زیر این کلیدها به شکل برآمدگی ظاهر می‌شود. با افزایش دبی، ارتفاع این برآمدگی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۵). سهراب‌زاده انزانی (۱۴۰۰) علت تشکیل این برآمدگی را برخورد جریان در زیرشیروانی کلیدهای ورودی عنوان کرده است.



شکل ۵. آشفستگی زیر کلیدهای ورودی در سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان

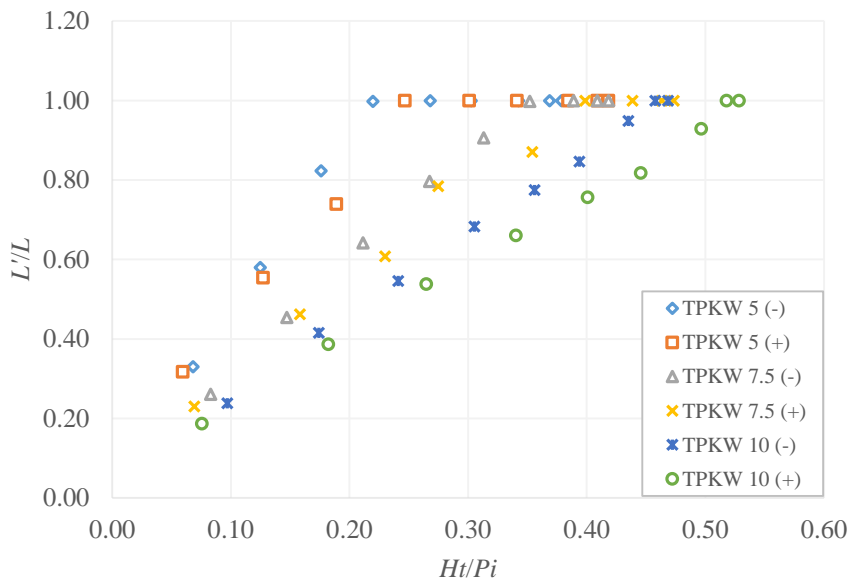
در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب خلاف جهت جریان، در اثر تداخل جریان گذرنده از کلیدهای خروجی و دیواره‌های جانبی سرریز، برآمدگی در بالادست کلیدهای خروجی ظاهر می‌شود که با افزایش دبی ارتفاع این برآمدگی نیز افزایش می‌یابد. به‌علاوه در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب خلاف جهت جریان، برگشت جریان در کلیدهای ورودی دیده می‌شود که در اثر برخورد با دیواره‌های نصب‌شده روی تاج سرریز ایجاد می‌شود (شکل ۶). برآمدگی ایجادشده در کلیدهای خروجی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی شیب‌دار در تحقیق سهراب‌زاده انزانی (۱۴۰۰) نیز مشاهده شده است. اما با توجه به اینکه در این پژوهش سرریز کلید پیانویی از نوع دوزنقه‌ای است، برآمدگی در کلید خروجی با طول کمتری دیده می‌شود.



شکل ۶. برگشت جریان در کلیدهای ورودی و برآمدگی در کلیدهای خروجی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان

طول مؤثر

در دبی‌های پایین تنها نیمی از کلیدها در گذردهی جریان مشارکت دارند بنابراین نسبت $\frac{L'}{L}$ یکی از پارامترهای مؤثر بر مقدار ضریب دبی است. با افزایش شیب دیواره‌های جانبی هددهای بالاتری برای فعال شدن کل تاج سرریز مورد نیاز است. با بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در خلاف جهت جریان نسبت به سرریز بدون شیب در نسبت‌های $\frac{L'}{L}$ بالاتر از ۰/۷۵ روندی افزایشی پیدا می‌کند. این در حالی است که سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در جهت جریان در تمام نسبت‌ها موجب کاهش ضریب دبی نسبت به سرریز بدون شیب می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷. نسبت $\frac{L'}{L}$ در مقابل $\frac{H_t}{P_i}$ برای سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تاج شیب‌دار

ضریب دبی

ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از رابطه (۴) که به رابطه عمومی سرریزها معروف است محاسبه می‌گردد:

$$C_d = \frac{Q_E}{Q_t} = \frac{Q_E}{\frac{2}{3} L \sqrt{2gH_t^3}} \quad \text{رابطه ۴}$$

پارامترهای C_d ضریب دبی سرریز، Q_t دبی تئوری گذرنده از سرریز، Q_E دبی آزمایشگاهی گذرنده از سرریز، L طول مؤثر سرریز، g شتاب ثقل و H_t ارتفاع کل آب روی تاج سرریز در رابطه (۴) تعریف می‌گردند.

در سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار طول مؤثر تاج سرریز ثابت نیست و با افزایش هد آب طول مؤثر سرریز افزایش می‌یابد، لذا استفاده از رابطه عمومی سرریزها برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار مناسب نیست؛ بنابراین دبی تئوری گذرنده از سرریز مطابق رابطه (۵)، به سه قسمت تقسیم می‌گردد (افضلیان، ۱۳۹۳)

$$Q_t = Q_{Wi} + Q_{Wo} + Q_{SW} \quad \text{رابطه ۵}$$

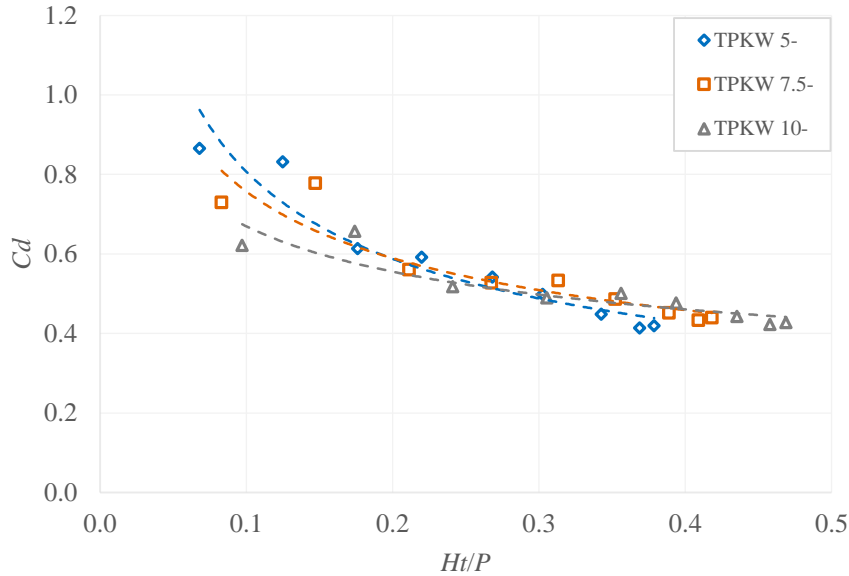
پارامترهای رابطه (۵)، Q_t دبی تئوری گذرنده از سرریز، Q_{Wi} دبی گذرنده از کلیدهای ورودی، Q_{Wo} دبی گذرنده از کلیدهای خروجی و Q_{SW} دبی گذرنده از دیواره‌های جانبی سرریز می‌باشند. معادلات اصلاح‌شده نهایی به همراه شرایط استفاده از هر کدام در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. معادلات اصلاح‌شده برای برآورد دبی تئوری سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار (افضلیان، ۱۳۹۳)

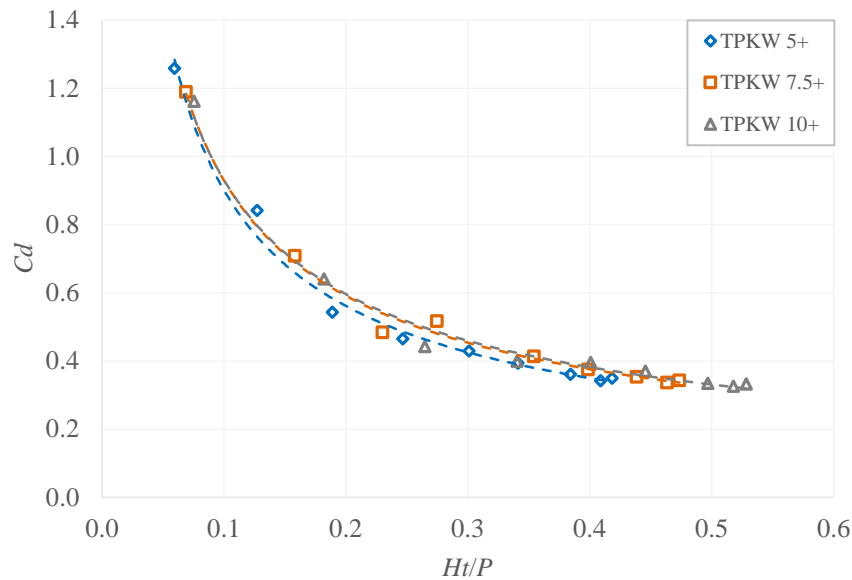
Q_t	H/D	جهت شیب
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_o}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nBH}^{2.5}$	<1	خلاف جهت جریان
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_o}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nB[H^{2.5}-(H-D)^{2.5}]} + \frac{2}{3}\sqrt{2gnw_i}(H-D)^{1.5}$	>1	
$\frac{2}{3}\sqrt{2gnw_i}H^{1.5} + \frac{4}{15D}\sqrt{2g2nBH}^{2.5}$	<1	در 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	

پس از انجام آزمایش‌ها روی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و با توجه به نتایج تحقیق افضلیان (۱۳۹۳) به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در خلاف جهت جریان به علت طول مؤثر بیشتر، عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای با شیب در جهت جریان دارند. وجود شیروانی در بالادست سرریز کلید پیانویی موجب می‌گردد آب با کمترین تلاطم و افت انرژی وارد سرریز شود که این امر موجب افزایش کارایی هیدرولیکی و بهبود جریان آب بر روی سرریز می‌شود (Yang et al., 2023). همچنین Anderson & Tullis (2012b) شیروانی‌های بالادست سرریز کلید پیانویی را بسیار مؤثرتر از شیروانی‌های پایین‌دست معرفی نمودند. با توجه به شکل ۲، شیب‌دار نمودن سرریز کلید پیانویی در جهت جریان موجب بسته‌شدن شیروانی بالادست سرریز می‌شود که می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در کاهش ضریب دبی سرریز کلید پیانویی شیب‌دار در جهت جریان نسبت به سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار در خلاف جهت جریان و سرریز بدون شیب باشد.

بنابراین، با بررسی تغییرات ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تاج شیب‌دار خلاف جهت جریان و در جهت جریان، در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که شیب‌دار نمودن سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در جهت جریان موجب کاهش عملکرد سرریز می‌شود. همچنین نتایج حاکی از آن است که افزایش شیب تاج دی‌رهای جانبی موجب کاهش ضریب دبی می‌گردد علت این امر را می‌توان طول مؤثر کمتر و افزایش تداخل جریان با افزایش شیب سرریز بیان کرد. به‌علاوه طبق نتایج تحقیق Macheils et al. (2013) در صورتی که سرریز کلید پیانویی دارای ارتفاع مطلوب باشد دیواره‌های سپری تأثیری در ظرفیت تخلیه سرریز ندارند. در نتیجه، به‌طور متوسط بیشترین ضریب دبی در سرریز کلید پیانویی با شیب ۵ درجه خلاف جهت جریان مشاهده می‌شود.



شکل ۸. ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تاج شیب‌دار خلاف جهت جریان



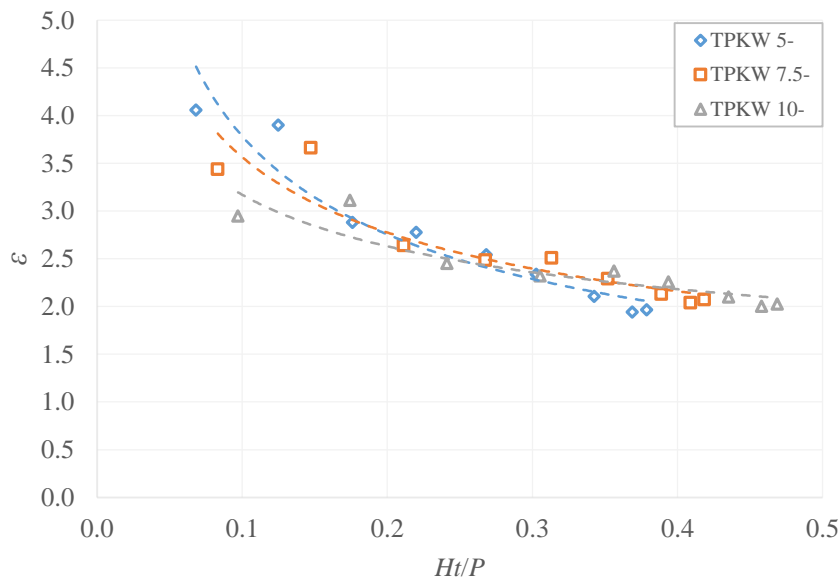
شکل ۹. ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تاج شیب‌دار در جهت جریان

کارایی سرریز

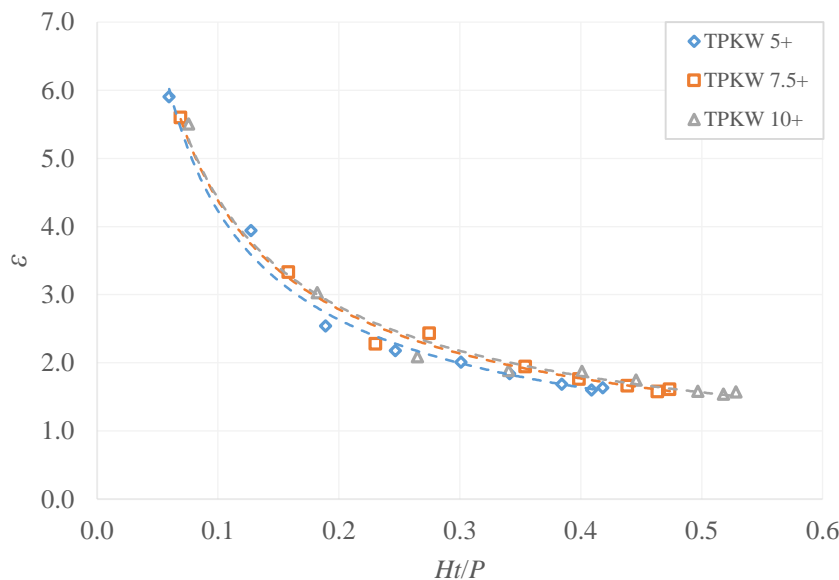
برای محاسبه کارایی سرریز کلید پیانویی از رابطه (۶) استفاده گردیده است (Saengsfidi et al., 2021).

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

در این رابطه، ε کارایی سرریز، L طول کل تاج سرریز، W عرض کل سرریز و C_d ضریب دبی سرریز، نامیده می‌شوند. طبق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، کارایی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب خلاف جهت جریان با شیب کاهشی کمتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب در جهت جریان ادامه می‌یابد و عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای کلید پیانویی با تاج شیب‌دار در جهت جریان دارند. نتایج در تحقیق حاضر نشان می‌دهد سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه کارایی بالاتری دارد. با توجه به رابطه (۶) ضریب دبی در مقدار ثابت $\frac{L}{W}$ ضرب می‌گردد و به‌طور متوسط سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه ۷ درصد کارایی بالاتری نسبت به سرریز بدون شیب دارد.



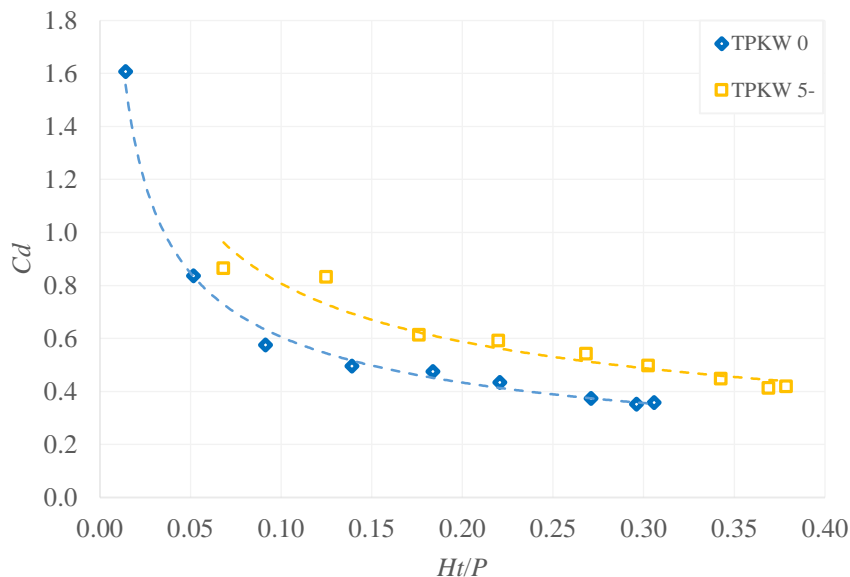
شکل ۱۰. کارایی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تاج شیب‌دار خلاف جهت جریان



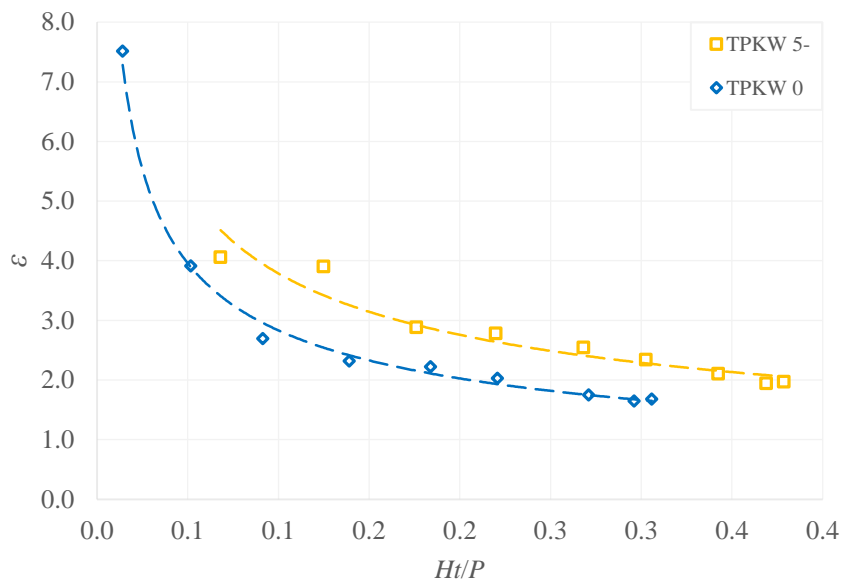
شکل ۱۱. کارایی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با تاج شیب‌دار در جهت جریان

مقایسه سرریزهای کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب

از سرریزهای شیب‌دار انتظار می‌رود که در هدهای پایین ضریب دبی و کارایی پایینی داشته باشند و با افزایش هد و فعال شدن تمام کلیدهای سرریز نسبت به سرریزهای بدون شیب ضریب دبی افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهد سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب در نسبت‌های $\frac{H_t}{P}$ کمتر از ۰/۱۲ ضریب دبی و کارایی بیشتری نسبت به سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه دارد و با افزایش نسبت $\frac{H_t}{P}$ به بیش از ۰/۱۲ و در نتیجه قرار گرفتن مؤثر در نسبت‌های $\frac{L'}{L}$ بالاتر از ۰/۷۵ ضریب دبی و کارایی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه در مقایسه با سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب افزایش می‌یابد. بنابراین مطابق شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ضریب دبی و کارایی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه به طور متوسط ۷ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب است.



شکل ۱۲. مقایسه ضریب دبی سرریز کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب



شکل ۱۳. مقایسه کارایی سرریز کلید پیانویی شیب‌دار و بدون شیب

رابطه ضریب دبی

ضریب دبی در تحقیق حاضر تابعی از پارامترهای بدون بعد Fr ، We ، $\frac{H_t}{P}$ ، $\frac{L'}{L}$ و $\theta = \tan^{-1} \frac{D}{B}$ است. فلذا با استفاده از نرم‌افزار SPSS، رابطه‌ی (۷) جهت برآورد ضریب دبی بدست آمد. جهت تعیین ضرایب رابطه (۷)، از دو محدوده برای لحاظ نمودن تأثیر عدد وبر استفاده گردید: برای اعداد وبر کمتر از ۵۰، ضرایب (۷-۱) در جدول ۴ ارائه شدند؛ و برای اعداد وبر بیشتر از ۵۰، ضرایب (۷-۲) تعیین گردید. شایان‌ذکر است برای بدست آوردن رابطه (۷)، از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد و سپس با ۲۰ درصد دیگر مورد آزمون قرار گرفت.

$$C_d = a + \left(b \times \frac{H_t}{P}\right) + \left(c \times \left(\frac{H_t}{P}\right)^2\right) + \left(d \times \log\left(\frac{H_t}{P}\right)\right) + \left(e \times \frac{L'}{L}\right) + \left(f \times \left(\frac{L'}{L}\right)^2\right) + \left(g \times \frac{D}{B}\right) + \left(h \times \left(\frac{D}{B} \times \frac{L'}{L}\right)\right) + (i \times Fr) + (j \times We)$$

رابطه (۷)

جدول ۴. ضرایب بدست آمده از نرم افزار SPSS برای برآورد ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و بدون شیب

ضرایب	a	b	c	d	e	f	G	H	I	j
(۷-۱)	-۰/۴۶۴	۰/۴۵	-۵/۸۴۸	-۱/۳۰۷	-۰/۰۹۱	-۰/۲۶۱	-۰/۶۰۱	۵/۵۹۰	-۰/۰۰۱	-۰/۰۱۱
(۷-۲)	-۰/۳۶۴	۱/۸۷۲	-۳/۱۰۲	-۱/۲۱۸	-۰/۷۲۵	۰/۱۷	-۱/۶۷۳	۴/۱۸۸	۱/۲۱۱	۰

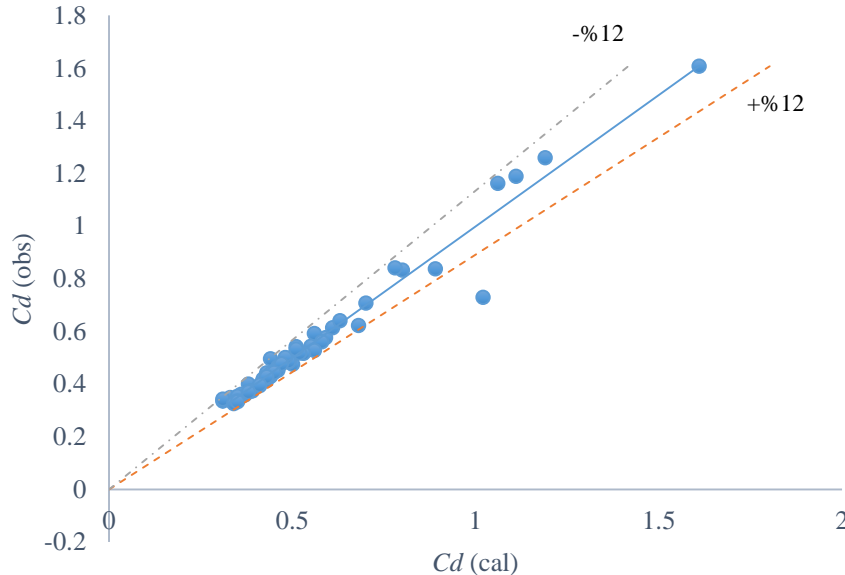
پارامترهای رابطه (۷)، $\frac{H_i}{P}$ هد آب روی تاج سرریز به ارتفاع سرریز، $\frac{L'}{L}$ طول ترش‌دگی به طول کل سرریز، $\frac{D}{B}$ بیانگر ارتفاع دیواره‌های نصب‌شده به عرض تاج سرریز، We عدد ویر و Fr عدد فرود می‌باشند.

همچنین جهت تعیین بهترین رابطه علاوه بر R^2 ، از تابع خطای MAPE، RMSE که به صورت روابط (۸) و (۹) می‌باشند، استفاده شده است.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{C_d(\text{obs}) - C_d(\text{cal})}{C_d(\text{obs})} \right|}{n} \times 100 \quad \text{رابطه (۸)}$$

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

در روابط (۸) و (۹)، $C_d(\text{obs})$ ، ضریب دبی اندازه‌گیری شده، $C_d(\text{cal})$ ، ضریب دبی محاسباتی و n تعداد داده‌ها می‌باشند. مقادیر R^2 برای رابطه (۷) با استفاده از ضرایب (۷-۱) و (۷-۲) به ترتیب برابر ۰/۹۴۷ و ۰/۹۳۷ به دست آمد و نیز MAPE، RMSE نیز برای رابطه (۷) با استفاده از ضرایب (۷-۱)، به ترتیب برابر ۴/۷۹۲ و ۰/۰۶۵ و با استفاده از ضرایب (۷-۲)، به ترتیب برابر ۲/۹۸۴ و ۰/۰۱۴ حاصل شد، که نشان‌دهنده دقت بالای رابطه (۷) است. در ادامه شکل (۱۰) محدوده خطای بدست آمده از رابطه (۷) را برای سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و بدون شیب، نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. مقایسه ضریب دبی اندازه‌گیری شده ($C_d(\text{obs})$) و محاسباتی ($C_d(\text{cal})$) از رابطه (۷) برای سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و بدون شیب

در جدول ۵، روابط پیشنهادی در تحقیق حاضر و روابط ارائه‌شده توسط Saengesfidi et al. (2021) و Sohrabzadeh Anzani & Ghodsian (2024) برای محاسبه ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. در نسبت مشابه $\frac{H_i}{P}$ ، رابطه ارائه‌شده توسط Sohrabzadeh Anzani & Ghodsian (2024) نسبت به رابطه (۷) با ضرایب (۷-۲) که در تحقیق حاضر پیشنهاد شده است، دقت بالاتری دارد. باین حال، رابطه پیشنهاد شده در تحقیق حاضر علاوه بر سرریزهای بدون شیب،

قابلیت پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار را نیز دارا بوده و از دقت بالایی در هر دو حالت برخوردار است.

جدول ۵. مقایسه رابطه (۷) با برخی از رابطه‌های پیشنهاد شده برای برآورد ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای

محقق	رابطه پیشنهادی	$\frac{H_t}{P}$	R^2	Error (%)
Saengesfidi et al. (2021)	$C_d = -0.4118 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 + 1.2077 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 - 1.3452 \left(\frac{H_t}{P}\right) + 0.9106$	۰/۳۵ - ۱	۰/۹۹۹۱	۰/۸
Sohrabzadeh Anzani and Ghodsian (2024)	$C_d = \left[0.406 \left(\frac{H_t}{P}\right)^{-0.431} - 0.133 \left(\frac{H_t}{P}\right)^{-0.315} + \left(\frac{H_t}{P}\right)^{-0.428} \right] \left(\frac{W}{B}\right)^{0.353} \left(\frac{L}{W}\right)^{-0.989}$	۰/۱۵۵ - ۰/۳۸۳	۰/۹۸۳	۱/۲
رابطه (۷) تحقیق حاضر با ضرایب (۷-۲)	$C_d = -0.364 + 1.872 \times \frac{H_t}{P} + \left(-3.102 \times \left(\frac{H_t}{P}\right)^2\right) + (-1.218 \times \log\left(\frac{H_t}{P}\right)) + \left(-0.725 \times \frac{L}{L'}\right) + \left(0.17 \times \left(\frac{L}{L'}\right)^2\right) + \left(-1.673 \times \frac{D}{B}\right) + \left(4.188 \times \left(\frac{D}{B} \times \frac{L}{L'}\right)\right) + (1.211 \times Fr)$	۰/۲۲۱ - ۰/۳۰۶	۰/۹۳۷	۲/۹۸۴
رابطه (۷) تحقیق حاضر با ضرایب (۷-۱)	$C_d = -0.464 + 0.45 \times \frac{H_t}{P} + \left(-5.848 \times \left(\frac{H_t}{P}\right)^2\right) + (-1.307 \times \log\left(\frac{H_t}{P}\right)) + \left(-0.091 \times \frac{L}{L'}\right) + \left(-0.261 \times \left(\frac{L}{L'}\right)^2\right) + \left(-0.601 \times \frac{D}{B}\right) + \left(5.59 \times \left(\frac{D}{B} \times \frac{L}{L'}\right)\right) + (-0.001 \times Fr) + (0.011 \times We)$	۰/۰۱۴ - ۰/۱۸	۰/۹۴۷	۴/۷۹۲

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- با بررسی تحقیق حاضر بر روی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و فاقد شیب نتایج زیر حاصل شد:
- با مشارکت بیش از ۷۵ درصد طول تاج سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار در خلاف جهت جریان در گذردهی جریان، ضریب دبی و کارایی سرریز نسبت به سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب افزایش می‌یابد.
 - با افزایش نسبت $\frac{H_t}{P}$ به بیش از ۰/۱۲ و در نتیجه مشارکت بیش از ۷۵ درصد سرریز در گذردهی جریان، ضریب دبی و کارایی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه در مقایسه با سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب افزایش می‌یابد.
 - ضریب دبی و کارایی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با شیب ۵- درجه به‌طور متوسط ۷ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای بدون شیب است.
 - رابطه (۷) اشاره شده در پژوهش، جهت برآورد ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شیب‌دار و بدون شیب، پیشنهاد شد.

منابع

- افضلیان، علیرضا. (۱۳۹۳). بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای PKW تحت هندسه‌ی متفاوت پایه و تاج جانبی. *پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد*. به راهنمایی جواد احدیان. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب.
- احدیان، جواد، و افضلیان، علیرضا. (۱۳۹۶). تحلیل کاربردی سرریزهای کلید پیانویی به‌عنوان یک سد انحرافی. *نشریه مهندسی عمران / امیرکبیر*. doi: 10.22060/ceej.2016.694
- سهراب‌زاده انزانی، حسین. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی اثر شیب دیواره‌های جانبی بر آبگذری سرریز کلید پیانویی. *پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد*. به راهنمایی مسعود قدسیان. تهران: دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست.
- سهراب‌زاده، حسین، و قدسیان، مسعود. (۱۴۰۱). مطالعه آزمایشگاهی اثر شیب تاج دیواره‌ی جانبی بر آبگذری سرریز کلید پیانویی مثلثی. *نشریه هیدرولیک*. doi: 10.30482/jhyd.2022.326177.1581 , 17(4): 17-30.

- سهراب زاده انزانی، حسین، و قدسیان، مسعود. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سرریز کلید پیانویی با تاج شیب دار ناپیوسته. نشریه هیدرولیک. doi: 10.30482/jhyd.2022.354595.1613 , 19(1): 1-12.
- قدسیان، مسعود، و احسانی فر، علی. (۱۳۹۸). مطالعه آزمایشگاهی جریان در سرریز کلید پیانویی نوع A با پلان‌های مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای. هجدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران. <https://civilica.com/doc/998900/>
- قدسیان، مسعود، و سهراب زاده انزانی، حسین. (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی آبگذری سرریز کلید پیانویی مستطیلی با دیوارهای جانبی شیبدار. مهندسی عمران مدرس. <http://dx.doi.org/10.22034/23.2.11> , 23(2): 167-175.

References

- Afzalian, A. (2014). Experimental investigation of PKW hydraulics' properties under variation geometric of piers and side crests (Master's thesis, Shahid Chamran University of Ahwaz, Faculty of Water Science Engineering, Department of Hydraulic Structures). (In Persian).
- Ahadian, J., & Afzalian, A. (2017). Applied analysis of piano key weir (PKW) structures as a diversion dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 463-476. doi: 10.22060/ceej.2016.694. (In Persian).
- Alabedi, H. J., & 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. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0536>
- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2012a). Piano key weir: Reservoir versus channel application. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(8), 773-776. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000464)
- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2012b). Comparison of piano key weir and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 358-361. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000509)
- Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M., & 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. doi: 10.1201/9781315169064-24.
- Chanson, H. (1994). Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways. *Transactions-Institution of Engineers Australia, Civil Engineering*, 36, 69-74.
- Crookston, B. M., Erpicum, S., Tullis, B. P., & 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001646](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001646)
- Ghodsian, M., & Ehsanifar, A. (2019). Experimental study of flow in type A piano key weir with rectangular, triangular, and trapezoidal plans. *18th Iranian Hydraulic Conference, Tehran*. <https://civilica.com/doc/998900/>. (In Persian).
- Ghodsian, M., & 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. <http://dx.doi.org/10.22034/23.2.11>. (In Persian).
- Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N., & Ranjan, S. (2020). Experimental study and modeling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. *Applied Water Science*, 10(1), 43. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1104-8>.
- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A., Delorme, F., & Laugier, F. (2009). Hydraulic capacity improvement of existing spillways—design of a piano key weirs. In *Proceedings (on CD) of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB-ICOLD* (Vol. 2, pp. 100-118).

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

Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs.

Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M. (2013). Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 506-511. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000566](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000566).

Ouamane, A., & Lempérière, F. (2006, June). Design of a new economic shape of weir. In *Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century* (Vol. 18, pp. 463-470).

Pinto, M. M. M., Matos, J. D. S. G., & dos Santos Viseu, M. T. F. (2017). Energy dissipation on stepped spillways with a piano key weir: Experimental study.

Sangsefidi, Y., Tavakol-Davani, H., Ghodsian, M., Mehraein, M., & Zarei, R. (2021). Hydrodynamics and free-flow characteristics of piano key weirs with different plan shapes. *Water*, 13(15), 2108. <https://doi.org/10.3390/w13152108>.

Shaker, M., Yusuf, B., Khassaf, S., Mohamed, B., & 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. <https://doi.org/10.3390/w15132307>

Sohrabzadeh Anzani, H., & Ghodsian, M. (2024a). Experimental study of flow over piano key weirs with different plan shapes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 30(2), 185-195. <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2302808>

Sohrabzadeh Anzani, H., & Ghodsian, M. (2024b). Laboratory study on the discharge coefficient of rectangular piano key weir with partially sloped crest. *Journal of Hydraulics*, 19(1), 1-12. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2022.354595.1613> .(In Persian).

Sohrabzadeh Anzani, H. (2021). The effect of side wall slope on the flow discharge over PKW (Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran). (In Persian).

Sohrabzadeh, H., & Ghodsian, M. (2022). Experimental study of the effect of sidewall slope over the triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*, 17(4), 17-30. doi: 10.30482/jhyd.2022.326177.1581. (In Persian).

Yang, J., Li, S., Helgesson, A., Skepparkrans, E., & Ansell, A. (2023). Geometric Modification of Piano Key Weirs to Enhance Hydraulic Performance and Discharge Capacity. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15234148>

Experimental Investigation of the Effect of Sidewalls Slope on the Discharge Capacity of Trapezoidal Piano Key Weirs

Introduction

The construction of dams as a cost-effective method for preserving freshwater is of great importance. One of the critical components in dam construction is spillways, which are essential for preventing dam failure and controlling floods. Spillways raise the water level upstream of the dam, increase the flow velocity over the weir crest, and transfer excess water to the downstream side of the dam. According to studies, Piano Key Weirs (PKWs) experience a decrease in efficiency due to increased water load from submergence at the inlet keys. According to ICOLD reports, one-third of dam failures occur due to inadequate spillway capacity, making proper spillway design vital.

This research investigates the impact of sidewall slopes on the discharge coefficient of trapezoidal PKWs, to optimize design to enhance efficiency and performance under various hydraulic conditions. One notable feature of sloped PKWs is their ability to store more water without the need to increase dam height, making them an economically advantageous design. Additionally, irrigation and drainage networks can maintain the required water level for upstream intakes during low-flow seasons. Overall, sloped PKWs play a crucial role in water resource conservation and flood control by discharging flow proportionate to the upstream head.

Methodology

The experiments were conducted in the Hydraulics Laboratory of the Faculty of Engineering at Bu-Ali Sina University, which features a glass-sided and glass-bottomed flume 15 meters in length, with a width and height of 60 centimeters. In the final 1 meter of the channel, the width increased to 97 centimeters using a diverging section made of iron sheets, where the models were installed. Water flow was regulated by a control valve, allowing flow rates ranging from 3.25 to 72.62 liters per second. The water, supplied from a reservoir located beneath the channel, flowed through the channel and over the weir, then returned to the reservoir.

To construct the trapezoidal type-A PKW with a thickness of 5 mm and in 4 cycles, the necessary components for the weir and those required to slope the weir were first designed using AutoCAD software. The parts were then fabricated from 5 mm PVC sheets using laser cutting and assembled with 1-2-3 glue to produce the models. The experimental models included type-A PKWs with sidewall slopes of 0, 5, 7.5, and 10 degrees. To examine the effect of weir slope orientation, these PKWs were inclined once in the direction of flow and once against the direction of flow.

After installing and sealing the weir in the channel, the flow depth was measured using a point gauge with an accuracy of ± 0.1 mm at a distance of twice the height of the weir due to minimal water curvature. Additionally, the effective length of the weir was measured using a ruler with an accuracy of ± 1 mm.

Results and Discussion

Flow discharge in trapezoidal Piano Key Weirs (PKWs) with sloped sidewalls corresponds to the upstream head of the weir. In other words, at lower discharges, only half of the keys are involved in passing the flow, which leads to increased head and water storage upstream of the weir. As the discharge increases, the full capacity of the sloped PKW is utilized for flow passage (Figure 7). The results indicate that trapezoidal PKWs sloped in the direction of flow result in a decrease in the discharge coefficient and weir efficiency. Conversely, PKWs sloped against the flow direction exhibit a smaller reduction in the discharge coefficient and efficiency.

The analysis of the data reveals that the discharge coefficient and efficiency of trapezoidal PKWs sloped against the flow direction increase once over 75% of the weir becomes active in passing the flow, compared to a non-sloped PKW, thus enhancing the weir's performance. Additionally, the results show that increasing the weir slope reduces the effective length of the weir, thereby decreasing the discharge coefficient and efficiency (Figure 8).

Therefore, with an increase in the $\frac{H_i}{P}$ ratio to above 0.12, resulting in more than 75% activation of the trapezoidal PKW with a 5-degree slope against the flow direction, the discharge coefficient and efficiency improve compared to a non-sloped trapezoidal PKW (Figure 12). The discharge coefficient and efficiency of the trapezoidal piano key weir with a 5-degree slope against the flow direction are, on average, 7% higher than those of the non-sloped weir, making it the best-performing model among the constructed models.

Ultimately, after analyzing the experimental data, Equation 7 was developed to estimate the discharge coefficient for both sloped and non-sloped trapezoidal Piano Key Weirs.

Conclusion

The use of trapezoidal Piano Key Weirs (PKWs) with sidewall slopes against the flow direction appears to be an effective option for increasing water storage during low-flow periods and enhancing discharge during flood events. Based on previous research and the present study, the PKW with a 5-degree slope against the flow direction exhibits the best performance. It provides suitable water storage during low-flow conditions and offers high discharge capacity during floods. The findings of this study can serve as a guideline for the optimal design of PKWs in water resource management and hydraulic structure projects.

Keywords

Discharge Coefficient, Trapezoidal Piano Key Weir, Sidewall Slope, Weir Efficiency

Author Contributions

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of ABCD (Ethical code: IR.UT.RES.2024.500). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.