نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دهم، شماره سه، بهار ۱۴۰۰

ISSN 2251-7480

افزایش ضریب تخلیه آب سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از مدل‌های فیزیکی

وفا رضایی[۱]، سید حبیب موسوی جهرمی[۲]*، امیر خسرو جردی[۳]، حسین صدقی[٤]

۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲) استاد بازنشسته گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: h-mousavi@srbiau.ac.ir

۳) استادیار گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

٤) استاد گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰٦ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۱/۲٦

چکیده:

سرریزها از لحاظ فنی و اقتصادی نقش مهمی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سازه‌های ذخیره آب ایفا می‌کنند. سرریزهای کلید پیانویی، نوع پیشرفته و توسعه یافته‌ای از سرریزها هستند که می‌توانند مقادیر زیادی دبی را با ثابت نگهداشتن هزینه‌های اجرایی انتقال دهند. هدف از انجام این تحقیق، تعیین پارامترهای موثر بر ضریب دبی جریان با استفاده از ۹ مدل فیزیکی بود. نسبت عرض کلیدهای ورودی (W_i) به خروجی (W_o) در هفت سرریز عبارت بودند از: ۱،۰، ۱،۱، ۱،۲، ۱،۳، ۱،۴، ۱،۵ و ۱،۶ که به ترتیب با علامت‌های اختصاری PK1.0، PK1.1، PK1.2، PK1.3، PK1.4، PK1.5 و PK1.6 نشان داده شدند و دو مدل دیگر شامل سرریزهای مدل PKT (دارای دیواره ضخیم‌تر) و PKTP (دارای دیواره ضخیم‌تر و تاج افزایش یافته) بودند. در مطالعه حاضر تاثیر تغییر عرض کلیدهای ورودی (W_i) و خروجی (W_o) بر ضریب تخلیه و منحنی دبی- اشل، تاثیر ضخامت دیواره و لبه‌دار نمودن عرض کلیدهای خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که بهترین حالت برای تغییر عرض‌ها نسبت ۱،۴ می‌باشد، به‌طوری که موجب افزایش ۳۰ درصدی تخلیه نسبت به سرریز شاهد شد. افزایش ضخامت دیواره، افزایش ۵ درصدی تخلیه نسبت به شاهد را به دنبال داشت و نصب لبه‌های مربوط به عرض کلیدهای خروجی، ضمن افزایش ۱۰ درصدی دبی نسبت به سرریز شاهد، باعث توزیع یکنواخت خطوط جریان روی سرریز گردید. بر اساس نتایج این تحقیق، مبنی بر برتری سه مدل PK1.4، PKT و PKTP، می‌توان خصوصیات هندسی این مدل‌ها را به عنوان الگویی در بهینه‌سازی طراحی سرریزهای کلیدپیانویی مورد استفاده قرار داد.

کلید واژه‌ها: سرریز سد؛ سرریز تاج طولانی؛ ضریب دبی؛ کارایی تخلیه آب

مقدمه

مدیریت هدایت آب در سازه‌های آبی از لحاظ اقتصادی، فنی، کشاورزی و زیست محیطی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی، امکانات گسترده‌ای را برای ساخت سدهای بزرگ، مخازن و کانال‌ها به وجود آورده است. این پیشرفت‌ها لزوم توسعه طراحی و روش‌های ساخت را به خصوص برای سیستم‌هایی که بتوانند سیلاب کافی را تخلیه کنند ایجاب می‌نماید. افزایش دبی تخلیه آب نقش تعیین کننده‌ای در بالا بردن ضریب اطمینان سازه‌های ذخیره آب از جمله سدها دارد و در این رابطه سرریزها برای عبور دادن دبی‌های زیاد از روی یک سازه

هیدرولیکی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که هیچ گونه صدمه عمده‌ای به خود سازه و همچنین محیط اطراف آن وارد نشود (کریمی چهارطاقی و همکاران، ۱۳۹۳).

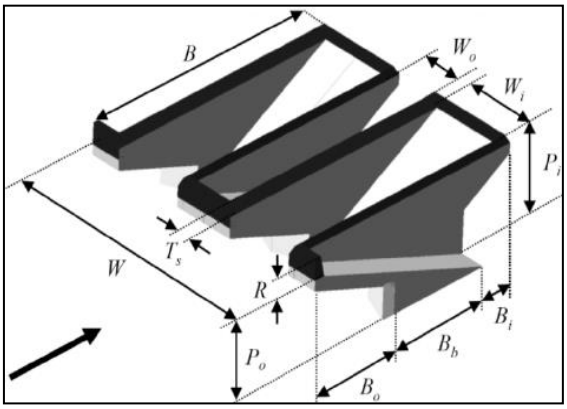
تخلیه آب از سرریزها معمولا با دو مشکل اساسی همراه است که اولی خطر ناکافی بودن ظرفیت تخلیه سرریز و دومی مربوط به اثرات مخرب رسوب‌گذاری است. گزارش‌های اعلام شده از خرابی سدها نشان می‌دهد که یک سوم از خرابی سدها بر اثر کم بودن ظرفیت تخلیه سرریزها رخ داده است (جواهری و کبیری سامانی، ۱۳۹۰)، به همین دلیل کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) توصیه کرده است که سرریزهای سدهای بلند برای اطمینان از امنیت آنها، مجددا مورد بررسی قرار گیرد. لذا باید برای طراحی سرریزها، سیلاب‌ها را با دوره بازگشت بزرگتری در نظر گرفت که این امر سبب افزایش عرض سرریز و به تبع آن بالا رفتن قیمت ساخت سرریز می‌شود. بر این اساس، طراحان برای کاهش قیمت‌ها، سعی کردند با رعایت ضریب اطمینان لازم ابعاد سرریزها را کوچک کنند و ساختار آن را ساده نمایند. محققین با انجام مطالعات متعدد به این نتیجه رسیدند که برای دستیابی به سازه های اقتصادی با کارایی بالا، سرریزها باید به صورت غیر خطی ساخته شوند که در این مورد یک راه حل ساده و مناسب طراحی سرریز کلید پیانویی است (Lemperiere and Ouamane, 2003; Erpicum *et al.*, 2014). سرریزهای کلید پیانویی شکل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند که توسط موسسه تحقیقاتی (Hydrocoop) و با همکاری آزمایشگاه هیدرولیک و محیط زیست دانشگاه (Biskra) الجزایر در سال ۲۰۰۳ میلادی ارائه گردید (Lemperiere and Ouamane, 2003; Pralong *et al.*, 2011). ابداع فرم کلید پیانویی برای سرریزها حاصل تحقیقات گسترده در ارتباط با سرریزهای غیر خطی است (Lemperiere and Ouamane, 2003; Ouamane and Lemperiere, 2006). سرریزهای کلید پیانویی می‌توانند به‌عنوان سازه‌هایی اقتصادی و با کارایی بالا در سدها، سیستم‌های انتقال آب و شبکه‌های آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار گیرند و در واقع، نوعی سازه مهندسی هیدرولیک برای تامین عمق مناسب آب، حفظ جریان آزاد بر روی سرریزها در رودخانه‌های کوهستانی و حفاظت از شکست سدها در شرایط پیش بینی نشده سیلابی می‌باشند (Tiwari and Sharma, 2017). این سرریزها به لحاظ ساختاری ساده و موثر هستند و می‌توانند روی سدهای موجود و سدهای وزنی جدید احداث گردند و به‌راحتی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی برای افزایش هد آب و گرفتن انرژی اضافی آب قابل استفاده هستند. طبق تحقیقات انجام گرفته، دبی عبوری از سرریزهای کلید پیانویی حداقل چهار برابر سرریزهای معمولی است. همچنین از این سرریزها می‌توان برای اصلاح پدیده گرداب در سرریزهای مدور قائم که گاه باعث کاهش دبی جریان، ارتعاش، خرابی، ایجاد موج (ناشی از تشکیل گرداب)، کاویتاسیون، پخش و جدایی خطوط جریان می‌شود و در بسیاری از موارد ایمنی سازه را به مخاطره می اندازد، استفاده نمود. در واقع تیغه های ضد گرداب ایجاد شده توسط این سرریزها می‌توانند جریان را آرام نمایند (شمسی و کبیری سامانی، ۱۳۹۱). این سرریزها از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده، هزینه نگهداری کمتری دارند و در حال حاضر در کشورهایی چون آمریکا، فرانسه و ویتنام به صورت عملی ساخته شده و در چند کشور دیگر مانند الجزایر، هند، سوئیس و بورکیناسو در دست ساخت و برنامه ریزی می‌باشند (کریمی چهارطاقی و همکاران، ۱۳۹۳). مطالعات زیادی بر روی سرریزهای کلید پیانویی صورت گرفته است و همگی به این نتیجه رسیده‌اند که در هدهای پایین، زیاد کردن تعداد دهانه سرریز باعث افزایش کارایی سرریز می‌گردد (Guy-Michel *et al.*, 2010; Anderson and Tullis, 2013; Machiels *et al.*, 2012; Leite Ribeiro *et al.*, 2012). روشنگر و همکاران (۱۳۹۷) طی تحقیقات گسترده‌ای با

انجام ۳۰۸ آزمایش در مورد مقایسه سرریزهای کلید پیانویی قوسی و کنگره‌ای قوسی به این نتیجه رسیدند که کارایی سرریزهای کلید پیانویی قوسی برای زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب ۷,۵ و ۹ درصد بیشتر از سرریزهای کنگره‌ای قوسی بود و دلیل برتری را به وجود پیش‌آمدگی در بالادست سرریز، بهتر شدن شرایط جریان ورودی به سیکل‌ها، کاهش افت انرژی ورودی و افزایش یکنواختی خطوط جریان نزدیک شونده ارتباط دادند. نتایج آزمایش‌های Hien و همکاران (2006) نشان داد که تعداد ٦ دهانه برای بار آبی پایین و ۵ تا ۷ دهانه برای هدهای بالا باعث افزایش ضریب دبی می‌گردد. همچنین Ouamane و Lamperiere (2006)، Hien و همکاران (2006) و Barcouda و همکاران (2006) نشان دادند که اگر دهانه ورودی بزرگ‌تر از دهانه خروجی در نظرگرفته شود باعث افزایش دبی عبوری سرریز می‌گردد. مطالعات سیدجواد و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داد که سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه‌ای به طور کلی، عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و ذوزنقه‌ای دارند. در مطالعات Erpicum و همکاران (2014)، ارتفاع سرریز به عنوان یک فاکتور اصلی برای افزایش بازده هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی ذکر گردید و مشخص شد که با چهار برابر کردن ارتفاع سرریز، کارکرد این سرریزها در مقایسه با سرریزهای اوجی در بارهای آبی بالا و پایین به ترتیب ۲ تا ٤ برابر افزایش می‌یابد. تجزیه وتحلیل آن‌ها نشان داد که مقدار ارتفاع اولیه این سرریزها اهمیت فراونی دارد و عرض کلیدها و نسبت شیروانی‌ها به عنوان پارامتر ثانویه با فرض ثابت بودن ارتفاع سرریز، راندمان را به ترتیب ۲۰ و ۳۰ درصد افزایش می‌دهد. با وجود مطالعات زیادی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته است، هنوز اطلاعات جامع و دقیقی درباره خصوصیات جریان بر روی سرریزها کلیدهای پیانویی وجود ندارد و رابطه‌هایی که نشان دهنده تغییرات صریح نسبت دهانه‌های ورودی و خروجی، ضخامت دیواره و ارتفاع یا لبه‌دار نمودن کلیدهای خروجی باشد هنوز ارائه نشده است. لذا بر اساس بررسی منابع، دامنه‌ای از نسبت بین عرض کلیدهای ورودی و خروجی در محدوده ۱ تا ۱,٦ انتخاب گردید و تحقیق حاضر با هدف ارائه بهترین نسبت بین عرض کلیدهای ورودی و خروجی در محدوده مذکور و همچنین تعیین اثرات تغییر ضخامت دیواره و ارتفاع کلیدهای خروجی بر کارایی سرریز، اجرا شد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های سرریز کلید پیانویی

در مطالعه حاضر حداقل ۹ مدل فیزیکی با نسبت‌های مختلف مورد نیاز بود. در یکی از مدل‌ها اثر ضخامت و ارتفاع دیواره روی تاج کلیدهای خروجی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اصلی هندسی یک سرریز کلید پیانویی که در شکل ۱ نشان داده شده است عبارتند از: عرض محل احداث (W)، ضخامت تاج (T_s)، ارتفاع کلید خروجی (Po)، ارتفاع کلید ورودی (P_i)، عرض کلید خروجی (W_o)، عرض کلید ورودی (W_i)، طول شیروانی ورودی (B_i)، طول شیروانی خروجی (B_o)، طول قاعده (B_b) و طول تاج جانبی (B) (Pralong *et al.*,2011).



شکل ۱. پارامترهای اصلی سرریز کلید پیانویی

(Pralong *et al.*, 2011)

آنالیز ابعاد سرریزها

فرمول عمومی یک سرریز مستطیلی لبه تیز به صورت زیر است:

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}.C_d.L.H^{\frac{3}{2}} \quad (۱)$$

که در آن:

Q: دبی بر حسب لیتر بر ثانیه

C_d: ضریب تخلیه

g: ثابت جاذبه

H: سطح آب در بالادست

L: طول سرریز

ضریب تخلیه سرریزهای کلید پیانویی را می‌توان از رابطه عمومی سرریزها به شرح زیر به‌دست آورد:

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3}\sqrt{2g}.L.H^{\frac{3}{2}}} \quad (۲)$$

ضرایب سرریزهای کلید پیانویی به دلیل پیچدگی این نوع از سرریزها، به لزجت دینامیک (μ) و کشش سطحی (δ) بستگی دارد. برای محاسبه ضریب تخلیه این سرریزها می‌توان از معادله زیر استفاده نمود:

$$f(Q, H, L, w_u, w_i, w_o, B_i, B_o, T_s, n, g, \mu, \delta) = 0 \quad (۳)$$

با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعاد، می‌توان ضریب تخلیه را بر اساس پارامترهای زیر نشان داد:

$$C_d = f\left(\frac{H}{P}, \frac{B}{w}, \frac{w_i}{w}, \frac{w_o}{w}, \frac{B_i}{B}, \frac{B_o}{B}, n_c, w_b, Re\right) \quad (٤)$$

در این معادله، W_b و R_e به ترتیب عبارتند از ضرایب وبر (Weber) و رینولدز (Reynolds). معمولا در کانال‌ها ضریب رینولدز به اندازه کافی بزرگ است، بنابر این از اثر ویسکوزیته می‌توان چشم‌پوشی نمود. مطالعات Novak و Cabelka (1981) نشان داد که اگر سطح آب روی سرریز بیشتر از ۳ تا ٤ سانتی‌متر باشد، می‌توان اثر کشش سطحی را نیز نادیده گرفت. بنابر این ضرایب وبر و رینولدز را می‌توان از معادله ٤ حذف نمود. همچنین از آنجا که n نیز تابعی از عرض ورودی و خروجی است ($n = \frac{w_i + w_o}{w}$)، حذف می‌شود و معادله ٤ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$C_d = f\left(\frac{H}{P}, \frac{B}{w}, \frac{w_i}{w}, \frac{w_o}{w}, \frac{B_i}{B}, \frac{B_o}{B}\right) \quad (۵)$$

به‌دلیل ماهیت سه‌بعدی و پیچیدگی جریان در سرریزهای کلید پیانویی، ساده‌ترین راه برای محاسبه ضریب تخلیه این نوع سرریزها، مدل‌های آزمایشگاهی است. اگرچه هزینه مدل‌های فیزیکی بیشتر از مدل‌های ریاضی است، ولی معمولا نتایج مدل‌های ریاضی با استفاده از مدل‌های فیزیکی واسنجی می‌گردند. بنابر این اجرای مدل‌های فیزیکی برای بررسی اثر پارامترهای جزئی ضروری به نظر می‌رسد، لذا هزینه‌های مربوط به ساخت مدل‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی قابل توجیه می‌باشد.

طراحی مدل

مقیاس پایه‌ای هر مدل هیدرولیکی، مقیاسی هندسی است که با نسبت بعدی از مدل به بعد نظیر آن در پروتوتیپ[1] تعریف می‌شود. وقتی مقیاس هندسی مدلی مشخص شد شرایط لازم جهت احراز تشابه دینامیکی فراهم می‌گردد. از نقطه نظر فنی، در صورتی که امکانات فضا و سیستم تغذیه اجازه دهد، مدل باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود، چرا که یک خطای جزئی در اندازه‌گیری مدل ممکن است به اشتباه بزرگی در برآورد دبی سرریز به علت نسبت زیاد مقیاس و تبدیل آن منجر گردد. مدل‌سازی فیزیکی این تحقیق در آزمایشگاه تحقیقات مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه انجام شد (شکل‌های ۲ و ۳). امکانات و فضای آزمایشگاهی تخصیص یافته جهت این تحقیق به شرح زیر می باشد:

مساحت آزمایشگاه: ۲۰۰ متر مربع

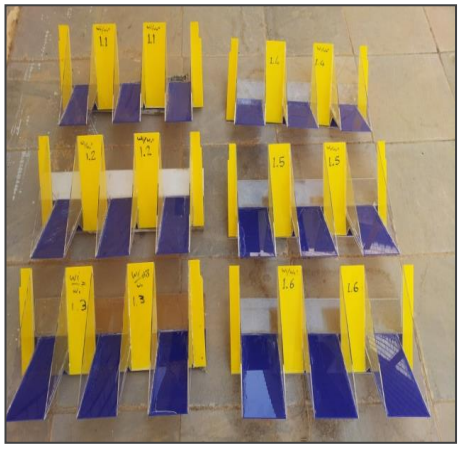
طول فلوم: ۱۰ متر، عرض فلوم: ٦۰ سانتی‌متر، ارتفاع دیواره: ۷۰ سانتی‌متر.

سیستم تغذیه دارای سه الکتروپمپ با دبی ۱۰۰ لیتر در ثانیه و دو مخزن با گنجایش ۱۵ متر مکعب از جنس آهن گالوانیزه به صورت یک تکه.

دبی‌سنج اولتراسونیک با صفحه نمایش دیجیتال و قابلیت اتصال به کامپیوتر و ثبت داده‌ها.

[1] Prototype

ارتفاع‌سنج اولتراسونیک با صفحه نمایش دیجیتال و کالکسه ویژه فلوم.



شکل ۲. نمای هندسی سرریزهای کلید پیانویی

شکل ۳. سیستم تغذیه و گردش آب در آزمایشگاه

با مشخص شدن امکانات آزمایشگاه و در اختیار بودن اطلاعات پایه، مقیاس مدل طوری تعیین گردید که اولاً فلوم آزمایشگاهی از نظر هندسی کفایت ابعاد مدل را داشته باشد. ثانیاً حداکثر دبی مورد نیاز در آزمایش مدل، در دامنه دبی سیستم تغذیه قرار گیرد. در ابتدا با توجه به ابعاد سرریز و انتخاب جنس پلگسی گلاس با برش لیزری تعداد نه مدل و هر مدل با تعداد شش دهانه (ورودی و خروجی) با هندسه متفاوت عرض کلیدها ساخته شد و سرریزها بر روی یک سکو به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر قرار داده شدند. نمای مدل‌های فیزیکی سرریزهای مورد مطالعه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند و مشخصات آنها به‌طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. ابعاد هندسی سرریزها بر مبنای مشخصات فلوم آزمایشگاهی با طول ۱۰ متر، عرض ٦٠ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر بود.

اندازه‌گیری دبی

در انتهای فلوم یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ٥٤ درجه نصب گردید که با قرائت یک اشل و استفاده از رابطه دبی فلوم به صورت زیر قابل اندازه‌گیری بود:

$$Q = \frac{8}{15}.\sqrt{2g}.C.\tan\frac{\theta}{2}.H^{\frac{5}{2}} \qquad (٦)$$

Q: دبی بر حسب لیتر بر ثانیه

C: ضریب مربوط به سرریز که مقدار آن در این سرریز ۰,۵۷٦ است.

H: عمق تیغه آب بر حسب سانتی‌متر

توضیح این‌که در محدوده دبی‌های مورد آزمایش، این سرریز به روش حجمی کالیبره گردید. روش دیگر برای اندازه‌گیری دبی، استفاده از دبی‌سنج التراسونیک بود، که در دبی‌های بالا به‌راحتی می‌توانست با دقت خوبی حجم آب عبوری را مشخص کند.

نتایج و بحث

نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی (W_i/W_o)

نمودار میزان دبی (Q) و عمق تیغه آب (H) در هفت سرریز PK1.0، PK1.1، PK1.2، PK1.3، PK1.4، PK1.5 و PK1.6 در شکل ٤ نشان می‌دهد که روند تغییرات دبی در سریزهای مختلف با روند تغییر ارتفاع یا عمق تیغه آب هماهنگی دارد. همچنین مقایسه میزان دبی سرریزهای مذکور با آزمون آماری کمترین اختلاف معنی‌دار (LSD) نشان دهنده تفاوت معنی‌دار سرریزها از نظر دبی بود به طوری که بیشترین میزان دبی با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر سرریزها مربوط به سرریز PK1.4 بود (شکل ٤).

جدول ۱. مشخصات سرریزهای کلید پیانویی مورد استفاده در این آزمایش

Model	L (cm)	W_i/W_o	P/W_u	L/W	$B_i=B_o$ (cm)	B_b (cm)	W_o (cm)	W_i (cm)	P (cm)	T_s (mm)	W (cm)
$PK_{1.0}$	274.2	1.0	0.66	4.57	13	10	10	10.0	13.3	2.8	60
$PK_{1.1}$	274.2	1.1	0.66	4.57	13	10	9.5	10.5	13.3	2.8	60
$PK_{1.2}$	274.2	1.2	0.66	4.57	13	10	9.1	10.9	13.3	2.8	60
$PK_{1.3}$	274.2	1.3	0.66	4.57	13	10	8.7	11.3	13.3	2.8	60
$PK_{1.4}$	274.2	1.4	0.66	4.57	13	10	8.3	11.7	13.3	2.8	60
$PK_{1.5}$	274.2	1.5	0.66	4.57	13	10	8.0	12.0	13.3	2.8	60
$PK_{1.6}$	274.2	1.6	0.66	4.57	13	10	7.7	12.3	13.3	2.8	60
PKT	270.6	1.1	0.66	4.51	13	10	9.5	10.5	13.3	8.5	60
PKTP	247.1	1.1	0.66	4.12	13	10	9.5	10.5	13.3	8.5	60

تغییرات دبی در برابر عمق تیغه آب (ارتفاع) در هفت سرریز مورد مطالعه نشان دهنده وجود رابطه رگرسیونی خطی بین این دو پارامتر بود به‌طوری که معادله رگرسیونی برازش داده شده بر اساس داده‌های هر هفت نوع سرریز با ضریب تبیین بالا (R^2 = ۰,۹۶۷٤) حاکی از وجود همبستگی قوی بین دو متغیر مذکور بود (شکل ۵). در اکثر سرریزهای کلیدپیانویی، رابطه دبی- اشل، خطی است و نه نمایی. با توجه به مطالعات Lemperiere و Ouamane (2003) رابطه دبی- اشل برای سرریزهای کلیدپیانویی به صورت $Q=\frac{4}{3}h\sqrt{P_m}$ بود (P_m: ارتفاع مشخصه سرریز). در این رابطه ضریب $\frac{4}{3}$ ثابت است و ارتباط بین ارتفاع- دبی، خطی است که با رابطه دبی- اشل در سرریزهای عادی هماهنگ نیست. روند تغییرات دبی در برابر H در سرریزهای مختلف توسط جواهری و کبیری سامانی (۱۳۹۰) و Anderson و Tullis (2013) نیز به طور مشابهی گزارش شده است. با افزایش نسبت عرض‌ها، روند افزایش ضریب تخلیه شروع شد و در مدل PK1.4 به اوج خود رسید، به‌طوری که در این حالت راندمان تخلیه نسبت به شاهد بیش از ۳۰ درصد افزایش یافت. این افزایش ظرفیت تخلیه را می‌توان به بهبود شرایط جریان نزدیک شونده (تقرب) به دیواره‌های کناری تاج، افزایش عرض مفید کلیدهای ورودی، کاهش فشردگی جریان در کلیدهای ورودی، خطوط منظم جریان و جلوگیری از استغراق موضعی روی سرریز نسبت داد.

ضریب تخلیه (C_d) توسط چند عامل تحت تاثیر قرار می‌گیرد از جمله: عمق جریان در بالادست، شکل جریان روی سرریز، طول تاج توسعه یافته بر روی سرریز، ضخامت دیواره و درجه استغراق سرریز. منابع خارجی و داخلی مورد استفاده در این تحقیق، اثر تغییر پارامترهای مندرج در شکل ۱ را بر راندمان تخلیه سرریزهای کلید پیانویی مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند و با توجه به جدید بودن این نوع سرریزها هنوز معیار و استانداردهای کافی برای محدوده پارامترها ارائه نگردیده‌است و هر تحقیق به طور جزئی پارامترهای خاصی را مورد ارزیابی و سنجش قرار می‌دهد و با نتایج مطالعات قبلی مقایسه می‌کند تا نهایتاً استانداردهای لازم، معرفی و ارائه گردد. بر اساس نتایج این آزمایش، تغییر عرض کلیدهای ورودی و خروجی با ثابت نگهداشتن طول توسعه یافته تاج، باعث افزایش ضریب تخلیه شد. در این تحقیق افزایش عرض کلید توانست حداقل ۳۰ درصد راندمان ضریب تخلیه را افزایش دهد. افزایش ضخامت دیواره حدود ۵ درصد افزایش ضریب تخلیه را به دنبال داشت و دیواره سپری نیز در حدود ۱۰ درصد افزایش راندامان را موجب شد. شکل ٦ نشان می‌دهد که بالاترین کارایی تخلیه در محدوده نسبت H به P از ۰,۱ تا ۰,۳ و توسط سرریز PK1.4 ($W_i/W_o=1.4$) به‌دست آمده است. با این حال تفاوت بین سرریزهای PK از لحاظ ضریب تخلیه (C_d) برای نسبت‌های H/P بیشتر از ۰,۳ قابل اغماض می‌باشد. در این رابطه، پارامترهای اصلی عبارت بودند از: L: طول توسعه یافته سرریز؛ W_i: عرض کلیدهای ورودی؛ W_o: عرض کلیدهای خروجی؛ P: ارتفاع سرریز؛ W_v: عرض کنسول یا فاصله مرکز به مرکز دو کلید ورودی؛ B_i: طول

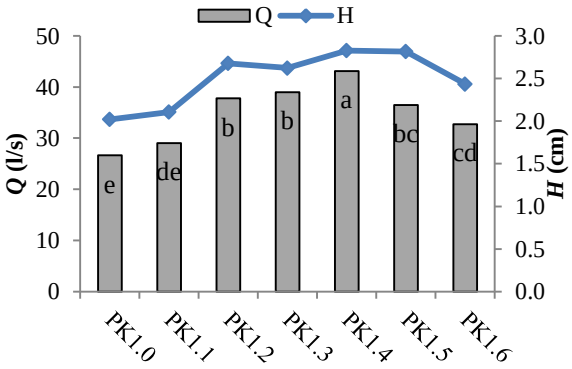
شیروانی کلیدهای ورودی؛ B_b: عرض پایه سرریز یا طول قاعده؛ T_s: ضخامت دیواره کلیدها؛ W: عرض فلوم. در این رابطه، Anderson و Tullis (2013) نیز به‌طور مشابهی اعلام کردند که با افزایش نسبت H/P، تأثیر نسبت W_i/W_o کاهش می‌یابد.

تأثیر نسبت W_i به W_o بر عملکرد تخلیه سرریز کلید پیانویی را می‌توان به شرح زیر توضیح داد. با افزایش عرض سیکل ورودی، کل اثر اُفت هد ناشی از جریان وارد شده کاهش می‌یابد و سطح جریان وارد شده به کلید ورودی افزایش یافته و ظرفیت حمل جریان سیکل ورودی نیز افزایش می‌یابد. عرض جریان خروجی با افزایش عرض جریان ورودی کاهش می‌یابد. با کاهش عرض کلید خروجی، توانایی جمع‌آوری کل جریان از کلید ورودی مجاور موثرتر، و تخلیه آن در پایین دست بدون ایجاد شرایط غوطه‌وری موضعی کاهش می‌یابد. اثرات غوطه‌وری بر روی کلیدهای خروجی (مناطقی که عمق جریان در کلید خروجی از ارتفاع تاج سرریز بیشتر است) می‌تواند عملکرد تخلیه سرریز را کاهش دهد.

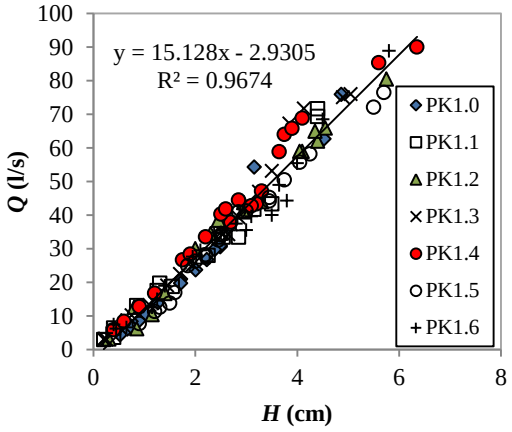
نتایج فوق با یافته‌های Anderson و Tullis (2013) مطابقت دارد. نتایج مطالعه این محققین بر روی سرریزهای کلید پیانویی با نسبت‌های W_i/W_o ۰٫۶۷، ۰٫۸، ۱، ۱٫۲۵ و ۱٫۵ نشان داد که سرریز با نسبت ۱٫۵ کارایی بهتری نسبت به سایر سرریزها داشت. مطالعات Erpicum و همکاران (2014) بر روی پارامترهای هندسی موثر بر کارایی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی نشان داد که محدوده بهینه نسبت W_i/W_o در دامنه ۱٫۲۹–۱٫۵۷ قرار دارد که با نتایج آزمایش حاضر مشابهت دارد.

ضخامت دیواره و پاراپت[1]

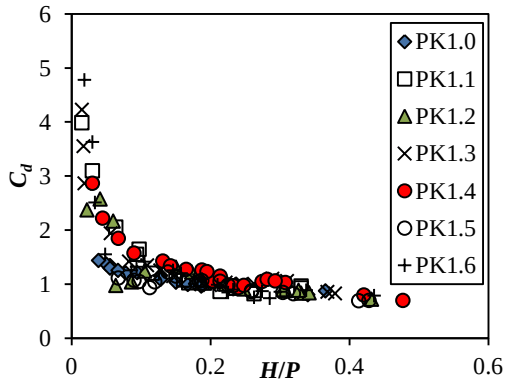
در بخش دیگری از این آزمایش دو تغییر بر روی سرریز مدل PK1.1 انجام شد که عبارت بودند از: ۱) ضخامت دیواره این سرریز سه برابر افزایش داده شد (از ۲٫۸ به ۸٫۵ سانتی‌متر) و سرریز جدید مدل PKT نامیده



شکل ٤. روند تغییرات میانگین ارتفاع و دبی در سرریزهای مختلف (حروف متفاوت روی ستون‌های دبی، نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین دبی سرریزها بر اساس آزمون کمترین اختلاف معنی‌دار، می‌باشد)



شکل ٥. تغییرات دبی (Q) در برابر ارتفاع (H) در انواع سرریزهای کلید پیانویی



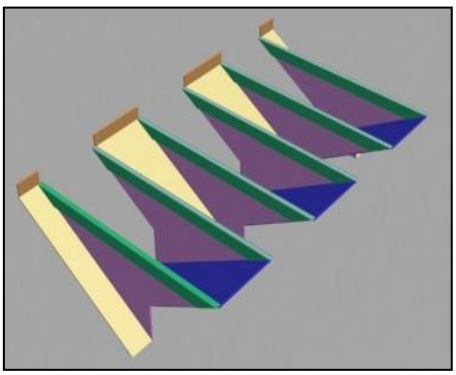
شکل ٦. تغییرات ضریب تخلیه (C_d) در برابر نسبت H/P در انواع سرریزهای کلید پیانویی

[1] Parapet

شد. در توضیح انتخاب این ضریبِ افزایش، باید ذکر نمود که ضخامت ورقه‌های پلکسی گلاس مورد استفاده در این تحقیق ۲٫۸ میلی‌متر بود و در مرحله اول تمام مدل‌ها بر اساس این ضخامت ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. در مرحله بعد اثر ضخامت کلیدها نیز مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به دیواره بین کلیدهای ورودی و خروجی که به‌صورت مشترک و جداکننده آن‌ها بود، برای برقراری حالت تعادل، نواری از پلکسی گلاس به طرفین دیواره مزبور چسبانده شد تا حالت تعادل حفظ گردد، بنابر این ضخامت به سه برابر افزایش یافت. ۲) ضخامت دیواره مانند حالت قبلی افزایش داده شد و علاوه بر آن تاج سرریز با افزودن یک دیوار پاراپت عمودی ۲ سانتی‌متری افزایش داده شد و مدل جدید، PKTP نامیده شد (جدول ۲ و شکل ۷).

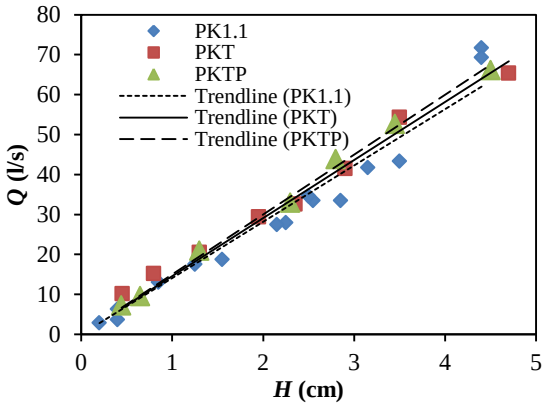
جدول ۲. علایم اختصاری و توصیف سرریزهای مورد آزمایش

علامت	توصیف
$PK_{1.0}$	PK weir with W_i/W_o = 1.0
$PK_{1.1}$	PK weir with W_i/W_o = 1.1
$PK_{1.2}$	PK weir with W_i/W_o = 1.2
$PK_{1.3}$	PK weir with W_i/W_o = 1.3
$PK_{1.4}$	PK weir with W_i/W_o = 1.4
$PK_{1.5}$	PK weir with W_i/W_o = 1.5
$PK_{1.6}$	PK weir with W_i/W_o = 1.6
PKT	$PK_{1.1}$ with thickened wall
PKTP	$PK_{1.1}$ with thickened wall and parapet wall

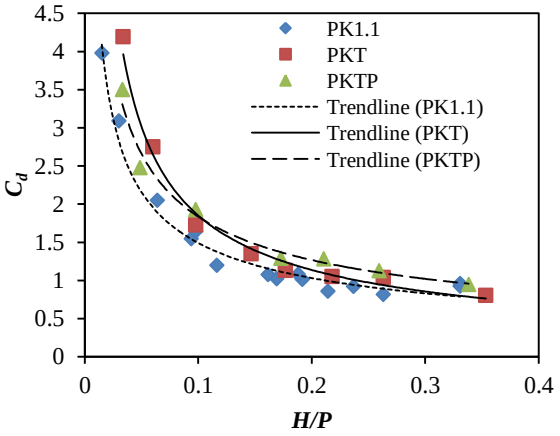


شکل ۷. نمای سرریز PK1.1 با دیواره سپری

شکل ۸ نشان‌دهنده وجود تفاوت در بین سه سرریز PK1.1، PKT و PKTP می‌باشد که حاکی از اثر تغییرات هندسی ایجاد شده در ضخامت دیواره و پاراپت بر تغییرات دبی در برابر ارتفاع می‌باشد. حداقل مقدار افزایش دبی خروجی نسبت به مدل PK1.1، بیش از ۱۰ درصد بود و با اضافه شدن ضخامت دیواره، این رقم به ۱۵ درصد هم افزایش یافت. شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که هر دو سرریز جدید یعنی مدل‌های PKT و PKTP نسبت به مدل PK1.1 کارایی بیشتری داشتند. داده‌های شکل ۹ همچنین نشان می‌دهند که سرریز PKT در محدوده H/P < 0.1 نسبت به مدل PKTP کارایی تخلیه بیشتری داشت در حالی‌که سرریز PKTP در محدوده H/P > 0.1 از نظر تخلیه، کاراتر از مدل PKT بود. همان طور که از خطوط نمودار در شکل ۹ مشاهده می‌شود، سرریز مدل PKT در محدوده‌های پایین H/P نسبت به سرریز PK1.1 بسیار کاراتر بود، ولی کارایی سرریز PKT با افزایش نسبت H/P کاهش یافت چنان‌که با همگرا شدن خطوط نمودار سرریزهای PK1.1 و PKT نمایان شده است. خطوط نمودار همچنین نشان می‌دهند که در تمامی محدوده‌های H/P سرریز مدل PKTP نسبت به مدل PK1.1 کارایی بیشتری داشت. کارایی بیشتر سرریز PKT نسبت به سرریز PK1.1 را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که افزایش ضخامت دیواره موجب کاهش ارتعاش و منظم‌تر شدن شکل تیغه آب شده که در نتیجه افزایش ظرفیت تخلیه آب را به دنبال داشته است. این نتایج با یافته‌های Ouamane and Lemperiere (2006) و Guy-Michel و همکاران (2010) همخوانی دارد.



شکل ۸. تغییرات دبی (Q) در برابر ارتفاع (H) در سرریزهای PK1.1، PKT و PKTP



شکل ۹. تغییرات ضریب تخلیه (C_d) در برابر نسبت *H/P* در سرریزهای PK1.1 ، PKT و PKTP

افزایش کارایی تخلیه در نتیجه نصب پاراپت بر روی سرریز کلید پیانویی به طور مشابهی توسط Leite Ribeiro و همکاران (2009)، Machiels و همکاران (2013) و Anderson و Tullis (2013) نیز گزارش شده است، با این توضیح که در تحقیق حاضر، نتایج جدیدی به این شرح حاصل شد: ۱) معرفی مدل PK1.4 به عنوان مدل بهینه با بیش از ۳۰ درصد افزایش تخلیه نسبت به سرریز شاهد، ۲) تاثیر دیواره سپری در ظرفیت تخلیه در حدود ۱۰ درصد، ۳) تاثیر ضخامت دیواره در ظرفیت تخلیه در حدود ۵ درصد.

کارایی سرریز مدل PKPT را می‌توان چنین توضیح داد که در مدل‌های بدون دیواره پاراپت، ایجاد جریان‌های آشفته و گرداب‌های حلزونی شکل در محل کلیدهای خروجی، سرریز را تحت بارگذاری نامتقارن قرار داده و این نوع بارگذاری باعث کاهش ظرفیت تخلیه سرریز، افزایش هد آب و ارتعاشات شدید در فلوم و مخزن بالا دست گردید. ایجاد دیواره بر روی کلید های خروجی، در حذف اغتشاشات جریان بسیار موثر عمل کرد و با حذف این گرداب‌ها علاوه بر افزایش ظرفیت تخلیه و به دنبال آن کاهش هد آب روی سرریز، جریان ملایمی را در بالادست سرریز بوجود آورد. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که فشردگی بیش از حد جریان، شکل غیر صحیح پایه‌ها و شکستگی‌های تیز سطح دیواره، منجر به اغتشاشات سطح جریان و نهایتاً کاهش ضریب تخلیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از داده های هندسی نُه مدل آزمایشی، شرایط مطلوب پارامترهای هندسی موثر بر ضریب تخلیه تعیین شد و اثرات تغییر نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی، ضخامت دیواره و نصب دیواره پاراپت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که، بدون تغییر طول توسعه یافته، و فقط با تغییر در عرض کلیدها، می توان ضریب دبی را بهبود بخشید. در این آزمایش بهینه‌ترین مدل معرفی شد و مشخص شد که با افزایش ضخامت دیواره در محدوده تحقیق ضمن این که دبی به صورت معنی‌داری افزایش یافت، سبب کاهش ارتعاشات روی سرریز شده، هم‌چنین سبب منظم‌تر شدن شکل تیغه‌ی آب گردید. هم‌چنین ارتفاع‌دار نمودن دیواره خروجی، ضمن حذف جریان‌های آشفته و گرداب‌های حلزونی شکل، افزایش دبی تخلیه و توزیع یکنواخت خطوط جریان روی سرریز را به دنبال داشت. به‌طور کلی اصلاح هندسه این سرریزها بایستی با هدف افزایش عرض مفید عبوری از کلیدهای ورودی و کاهش استغراق موضعی در کلیدهای خروجی صورت گیرد. بنابراین سرریزهای کلید پیانویی می‌توانند به‌عنوان سازه‌هایی اقتصادی و با کارایی بالا در سدها، سیستم‌های انتقال آب و شبکه‌های آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به برتری مدل‌های PK1.4، PKT و PKTP به عنوان مدل‌های بهینه در این آزمایش، می‌توان خصوصیات هندسی این مدل‌ها را با در نظر گرفتن نسبت‌های بین پارامترهای آن‌ها، به عنوان الگویی مطلوب در طراحی سرریزهای کلید پیانویی مورد استفاده قرار داد.

منابع مورد استفاده

جواهری، ا. و کبیری سامانی، ع. ۱۳۹۰. تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد. اولین کنفرانس بین-المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برق آبی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

روشنگر، ک.، ماجدی اصل، م.، اعلمی، م. و شیری، ج. ۱۳۹۷. ارزیابی تاثیر تغییرات زاویه سیکل قوسی بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و کلید پیانویی قوسی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ٤٩ (٢): ٣٤١-٣٥١.

سیدجواد، م. س.، امیدنائینی، س. ا. و صانعی، م. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی کلید پیانویی ذوزنقه‌ای. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۱ (۷۸): ۲۳-٤٠.

شمسی، ر. و کبیری سامانی، ع. ۱۳۹۱. تاثیر ورودی کلید پیانویی بر عمق استغراق بحرانی در سرریزهای مدور قائم. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

کریمی چهارطاقی، م.، نظری، س. و کریمی چهارطاقی، م. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای کلید پیانو با تاج متغیر. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه بابل، بابل، ایران.

Anderson, R M & Tullis, B P 2013. Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139: 246-253.

Barcouda, M, Cazaillet, O, Cochet, P, Jones, B A, Lacroix, S, Laugier, F, Odeyer, C & Vingy, J P 2006. Cost-effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or P.K. weirs. Proceedings, 22nd ICOLD Congress, CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain.

Erpicum, S, Archambeau, P, Pirotton, M & Dewals, B J 2014. Geometric Parameters Influence on Piano Key Weir Hydraulic Performances. Proceedings, 5th International Symposium on Hydraulic Structures, Brisbane, Australia.

Guy-Michel, C, Carol, G, Marilyne, L, Thomas, P, Alexandre, L & Pierre-Henri, B 2010. Experimental optimization of a piano key weir to increase the spillway capacity of the Malarce dam. Proceedings, First IAHR European Congress, Edinburg, UK.

Hien, T C, Son, H T & Khanh, M H T 2006. Results of some Piano Keys weir Hydraulic Model Tests in Vietnam. Proceedings, 22nd ICOLD Congress, CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain.

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

Leite Ribeiro, M, Bieri, M, Boillat, J L, Schleiss, A J, Delorme, F & Laugier, F 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways: Design of piano key weirs. Proceedings, 23rd Congress of International Commission on Large Dams (ICOLD), International Committee on Large Dams (ICOLD), Paris, France.

Leite Ribeiro, M, Pfister, M, Schleiss, A J & Boillat, J L 2012. Hydraulic design of A-type piano key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50: 400-408.

Lemperiere, F & Ouamane, A 2003. The Piano Key Weir: A new cost effective solution for spillway. The International Journal on Hydropower and Dams, 10: 144-149.

Machiels, O, Erpicum, S, Archambeau, P, Dewals, B & Pirotton, M 2013. Parapet wall effect on Piano Key weir efficiency. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139: 506-511.

Machiels, O, Erpicum, S, Archambeau, P, Dewals, B. J & Pirotton, M 2012. Method for the preliminary design of piano key weirs. La Houille Blanche, 4-5: 14-18.

Novak, P & Cabelka, J 1981. Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications, Pitman Publication, London, UK., ISBN: 978-0273084365.

Ouamane, A & Lemperiere, F 2006. Design of a new economic shape of weir. Proceedings, The International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain.

Pralong, J, Montarros, F, Blancher, B & Laugier, F 2011. A sensitivity analysis of piano key weirs geometrical parameters based on 3d numerical modeling, labyrinth and piano key weirs-PKW. Proceedings, The International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs, PKW, Liege, Belgium.

Tiwari, H & Sharma, N 2017. Turbulence study in the vicinity of piano key weir: relevance,instrumentation, parameters and methods. Applied Water Science, 7: 525-534.

ISSN 2251-7480

Increasing the water discharge coefficient of piano key weirs using physical models

Vafa Rezaei[1], Sayed Habib Musavi-Jahromi[2*], Amir Khosrowjerdi[3] and Hossein Sedghi[4]

1) Ph.D Student, Department of Agricultural Systems, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2*) Emeritus Professor, Department of Water Structures, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran
*Corresponding author email: h-mousavi@srbiau.ac.ir
3) Assistant Professor, Department of Agricultural Systems, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4) Professor, Department of Agricultural Systems, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 27-10-2020 Accepted: 15-04-2021

Abstract

Overflows play an important role technically and economically in optimizing the operation of water storage structures. Piano key weir is an advanced and developed type of spillway that can transfer large amounts of discharge by keeping executive costs constant. The aim of this study was to determine the parameters affecting the discharge coefficient, using nine physical models. The ratio of the width of the input keys (W_i) to the output (W_o) in the seven overflows were: 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 and 1.6 (PK1.0, PK1.1, PK1, PK1.3, PK1.4, PK1.5 and PK1.6 respectively) and the other two models included PKT (thicker-walled) and PKTP (thicker-walled and crown-enhanced). The effect of changing the width of the inlet (W_i) and outlet (W_o) keys on the discharge coefficient and stage-discharge curve, the effect of wall thickness and parapet wall were evaluated. Results showed that the best model for changing the inlet and outlet widths was the model of PK1.4, which resulted in 30% increase in discharge rate compared with the control. The increase in wall thickness led to an increase in the discharge at a 5% rate in comparison with control and installing parapet wall resulted in a 10% increase in discharge and a uniform distribution of flow lines on the weir. According to the results of this research, based on the superiority of three models of PK1.4, PKT and PKTP, the geometric properties of these models can be used as a model in optimizing the design of piano key weirs.

Keywords: dam weir, discharge coefficient, long crown weir, water discharge efficiency.