

بررسی آزمایشگاهی آبدگزی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج افقی و شیب‌دار

مسعود قدسیان* و حسین سهراب زاده انزانی

۱-استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲-کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

* ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

چکیده

در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده روی آبدگزی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی شکل ارایه شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دو مدل سرریز کلیدپیانویی با تاج دیوارهای جانبی افقی و شیب‌دار و دبی بین ۵۰ تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. سرریزهای کلیدپیانویی با نسبت طول به عرض ۱:۳ استفاده شد. نتایج نشان داد که تراز سطح آب در بالادست سرریز با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار، نسبت به سرریز با تاج دیوارهای جانبی افقی، ۱۱.۲ درصد افزایش یافت. درحالی‌که ضریب آبدگزی سرریز با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار، در مقایسه با سرریز با تاج افقی، بطور متوسط ۴.۸ درصد افزایش نشان داد. همچنین کارایی سرریز با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار به‌طور متوسط ۷.۳ درصد بیش از سرریز با تاج افقی می‌باشد. رابطه‌ای جدید نیز برای محاسبه ضریب آبدگزی برای سرریز با تاج افقی و تاج شیب‌دار ارایه شد.

واژگان کلیدی: سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، تاج شیب‌دار، ضریب آبدگزی، کارایی سرریز، رودخانه.

۱- مقدمه

سدها به ویژه در زمان سیلاب باید از ظرفیت ذخیره مناسبی برخوردار باشند تا در مواقع ضروری، مورد بهره‌برداری قرار گیرد. پژوهشگران توجه ویژه‌ای به آبدگزی سرریز سدها دارند و با توجه به شرایط و ضرورت تخلیه بیشتر جریان از مخزن، به افزایش ابعاد سرریزها روی آوردند؛ اما این راه‌حل به دلیل محدودیت‌های توپوگرافی و هزینه‌های طرح در تمام موارد مناسب نیست. پس پژوهشگران به دنبال راه‌حلی برای

افزایش آبدگزی سرریزها هستند. سرریز کلیدپیانویی نوع جدیدی از سرریز کنگره‌ای است که در سال‌های اخیر در برخی از کشورها استفاده شده است. این نوع سرریز قابل بهره‌برداری در شرایط مختلف هست. عواملی مانند تداخل جریان عبوری از روی دیواره‌های جانبی سرریز، میزان استغراق سرریز و عوامل زیاد و مؤثر بر ضریب آبدگزی، تحلیل جریان روی این نوع سرریز را پیچیده کرده است [1]. Lempérière and Ouamane پیشنهاد کردند شمار

- کلیدهای سرریز بین ۴ تا ۷ در نظر گرفته شود [2].
- Lempérière and Jun نیز شمار کلیدهای سرریز را بین ۴ تا ۷ مناسب می‌دانند [3].
- Ouamane and Lempérière [3].
- کارایی سرریزهای کلیدپیانویی نوع B را در مقایسه با نوع A، در حدود ۱۰ درصد بیشتر گزارش کردند. طبق گزارش Anderson and Tullis [4] افزایش نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی در سرریز کلیدپیانویی باعث افزایش ضریب آبگذری می‌شود [5].
- Machiels بهترین نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی را بزرگ‌تر از ۱ عنوان کرد [6].
- Kabiri-Samani and Javaheri [6].
- مشخصات هندسی شامل ارتفاع سرریز، طول و عرض کلیدها بر کارایی سرریز کلیدپیانویی نوع A در شرایط جریان آزاد و مستغرق را بررسی نمودند [7].
- Ribeiro et al. [7].
- منحنی‌هایی برای آبگذری نسبی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای ارائه نمودند [8].
- Safarzadeh and Noroozi با بررسی هیدرولیک سرریز کلیدپیانویی انحنادار، نشان دادند که با افزایش زاویه مرکزی سرریز، ظرفیت آبگذری سرریز افزایش می‌یابد [9].
- Mehboudi et al. [9].
- ارزیابی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای پرداختند [10].
- Belzner et al. [10].
- نتایج تحقیقات نشان داد که سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A ضریب آبگذری بالاتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی نوع C دارد [11].
- Ahadian and Afzalian به بررسی تأثیر دیواره سپری شیب‌دار روی آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی پرداختند [12].
- Sajadi et al. [12].
- استهلاک انرژی جریان گذرنده از روی سرریز کلیدپیانویی را بررسی کردند-Poshteh Shirani, et. [13].
- تأثیر انسداد ناشی از اجسام شناور را در سرریز کلیدپیانویی ارزیابی کردند [14].
- Zounemat-Kermani and Mahdavi-Meymand به تخمین ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با استفاده از هوش مصنوعی پرداختند [14].
- Rezaei Ahvanooei et al. [14].
- با بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز کلیدپیانویی غیرخطی در پلان نشان دادند که ضریب آبگذری این نوع سرریز به مقدار محسوسی کاهش می‌یابد. ایشان همچنین نشان دادند که ایجاد پشت‌بند باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی این نوع سرریز می‌شود [15].
- Ghodsian and Ehsanifar [15].
- با مقایسه نتایج آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای نشان دادند که اختلاف ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مثلثی و مستطیلی ۵ درصد است [16].
- همچنین این دو سرریز نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در حدود ۱۰ درصد ضریب آبگذری بیشتری دارند. Akbari et al. [16].
- بررسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای گزارش کردند در دی‌های بالا، بار آبی ایجادشده در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است [17].
- Kumar et al. [17].
- با مطالعه تجربی روی سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی نشان دادند که کارایی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیش از کارایی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است [18].
- Sangsefidi et al. [18].
- بررسی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای، نشان دادند که ضریب آبگذری در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای حدود ۵ درصد بیشتر از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است [19].
- Singh and Kumar [19].
- با پلکانی کردن کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی نوع B، اعلام داشتند، میزان افت انرژی در شرایط مختلف جریان بین ۲/۰۵ تا ۶/۴۳ درصد افزایش می‌یابد [۲۰].
- Sohrabzadeh and Ghodsian با بررسی تأثیر شیب تاج دیوارهای جانبی سرریز کلیدپیانویی مثلثی گزارش کردند که تراز سطح آب در بالادست سرریز ۲۹ درصد و ضریب آبگذری این سرریز، بطور متوسط ۵/۳ درصد در مقایسه با سرریز با تاج افقی افزایش یافته است [21].
- پژوهش‌های گذشته روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج دیواره جانبی افقی انجام شده است. از آنجا که بهره‌برداری از سرریز در سدها متناسب با شرایط مختلف (کم‌آبی و زمان بحرانی مانند سیلاب) اهمیت دارد، این تحقیق به بررسی راهکاری می‌پردازد که در زمان بحرانی (مانند سیلاب) بتوان به واسطه افزایش طول سرریز، آبگذری سرریز را نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج افقی بهبود بخشد و در زمان کم‌آبی، تراز آب بالادست سرریز را افزایش دهد. شیب‌دار کردن

سرریز $(\theta = \tan^{-1} \frac{D}{B})$ و ارتفاع دیواره‌های شیروانی بالادست سرریز می‌باشد.

رابطه (۲) را با استفاده از تحلیل ابعادی به صورت زیر می‌توان نوشت:

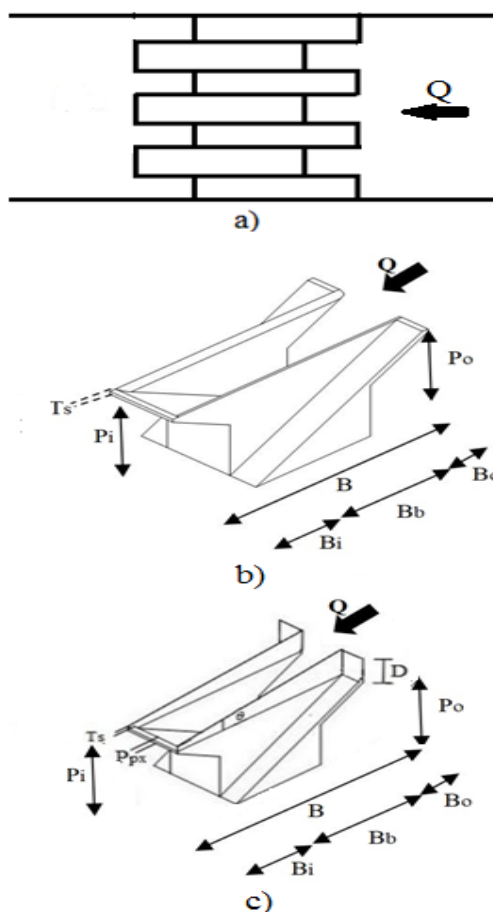


Fig. 1. PKW schematic: a) plan, b) Horizontal side walls and c) Inclined side walls

$$F\left(\frac{Q}{L\sqrt{gH_t^3}}, \frac{W_i}{W}, \frac{W_o}{W}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{L}{W}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{B}{W}, \frac{H_t}{P_i}, \frac{W}{B_i}, \frac{T_s}{B}, \frac{T_{ss}}{P_o}, \theta, We\right) = .$$

مقادیر $\frac{W}{B_o}$ و $\frac{L}{W}$ ، $\frac{W_i}{W}$ ، $\frac{B}{W}$ ، $\frac{T_s}{B}$ ، $\frac{W_i}{W_o}$ ، $\frac{W}{B_i}$ ، $\frac{T_s}{P_o}$ ، $\frac{B_i}{B_o}$ سرریزها و آزمایش‌های این تحقیق ثابت بود. در آزمایش‌های انجام شده عمق آب در بالادست سرریز بیشتر از ۳ سانتی‌متر

تاج دیواره‌های جانبی سرریز باعث افزایش عمق جریان در بالادست سرریز شده، پس با استفاده از این نوع سرریز با تاج شیب‌دار در رودخانه‌ها و کانال‌ها، می‌توان در زمان کم‌آبی، تراز ارتفاعی رودخانه را برای آبیگری افزایش داد و در سایر مواقع به نسبت تراز آب رودخانه بتوان از آن آبیگری نمود. این مهم برای آبیگری در رودخانه‌هایی که تراز آب در آن‌ها نسبت به زمین‌های مجاور بطور معمول پایین‌تر است، حائز اهمیت است.

۲- آنالیز ابعادی

شکل (۱) پارامترهای هندسی یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج دیواره‌های جانبی افقی و شیب‌دار را نشان می‌دهد. دبی عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی Q را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به دست آورد:

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

در این رابطه C_d ضریب آبیگری سرریز، L طول مؤثر تاج سرریز، g شتاب ثقل، H_t بار کل در بالادست سرریز $(h + \frac{v^2}{2g})$ ، $H_t =$ سرعت جریان v و عمق جریان روی تاج سرریز است. جریان عبوری از روی سرریز کلیدپیانویی با تاج دیواره‌های جانبی افقی و شیب‌دار در شکل (۲) نشان داده شده است.

پارامترهای مؤثر بر آبیگری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی را می‌توان به صورت رابطه (۲) بیان نمود.

$$F(W_i, W_o, W, B_i, B_o, B, T_s, L, g, P_i, P_o, H_t, Q, \theta, \rho, \sigma) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه W_i عرض کلید ورودی، W_o عرض کلید خروجی، W عرض کل سرریز، B_i طول شیروانی پائین‌دست، B_o طول شیروانی بالادست، T_s ضخامت دیواره سرریز، $B = B_i + B_o + B_b$ طول تاج دیواره‌های جانبی سرریز، L طول کل تاج سرریز، P_i ارتفاع سرریز در پائین‌دست، P_o ارتفاع سرریز در بالادست، ρ جرم مخصوص آب و σ ضریب کشش سطحی، F نماد تابع، θ زاویه شیب تاج دیواره‌های جانبی

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۰.۷۵ متر و ارتفاع ۰.۹۰ متر انجام شد (شکل ۳). دیواره‌های فلوم از جنس شیشه و کف آن فلزی است. جریان آب از مخزن زیرزمینی وارد فلوم شده، بعد از عبور از روی سرریز، از طریق مخزن خروجی در پایین‌دست به مخزن زیرزمینی می‌ریزد. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در فاصله ۴ متری از ابتدای فلوم نصب و آب‌بندی شد. دو مدل سرریز کلیدپیانویی با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار ($\theta = 20^\circ$) و افقی ($\theta = 0^\circ$) استفاده شد. دبی موردنظر در محدوده ۵۰ تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه، با تغییر دور موتورپمپ‌ها، تنظیم می‌شد. عمق آب با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای و با دقت $\pm 0.1 \text{ mm}$ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری طول مؤثر تاج سرریز، از یک خط‌کش با دقت $\pm 1 \text{ mm}$ استفاده شد. مشخصات سرریزهای استفاده‌شده در جدول (۱) ارائه شده است.

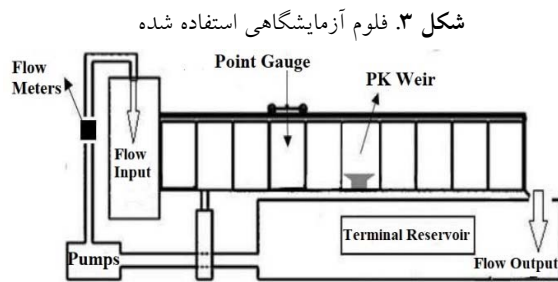


Fig. 3. Overview of implemented channel

جدول ۱ مشخصات سرریزهای استفاده شده

Model	θ°	P_o (cm)	P_i (cm)	B_b (cm)	$B_i=B_o$ (cm)	L (cm)
Rec-Base	0	20	20	۱۲.۵	۶.۲۵	225.09
Rec- B_3	۲۰	2۹.۰۹	20	۱۲.۵	۶.۲۵	۲۳۴.۶

Table 1. Specifications of weirs used

۴- مشاهدات آزمایشگاهی

در هنگام انجام آزمایش‌ها، مشاهده شد که تداخل جریان عبوری از روی سرریز، از انتهای تاج دیوارهای سرریز آغاز و با افزایش دبی و بار هیدرولیکی، در طول آن گسترش می‌یافت. در دبی‌های زیاد، که تمام کلیدهای سرریز به‌طور کامل زیر آب

در نظر گرفته شد تا تاثیر کشش سطحی ناچیز باشد (Pfister et al. [22] و [23] Erpicum et al.). طبق نتایج Machiels [5] و [23] Erpicum et al.، کشش سطحی زمانی مؤثر است که عدد وبر کمتر از ۵۰ باشد. در آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر، عدد وبر We همواره بیش از ۵۰ بود پس از تاثیر کشش سطحی صرف‌نظر شد.

شکل ۲. جریان روی سرریز کلیدپیانویی: (a) با تاج افقی و (b) با تاج شیب‌دار

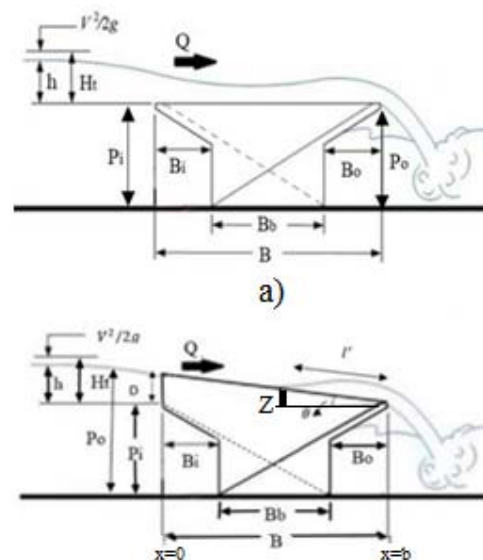


Fig. 2. Flow over: a) Horizontal side walls crest and b) Inclined side walls crest

با حذف پارامترهای ثابت و بی‌تأثیر، رابطه (۳) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

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

با توجه به اینکه متغیرهای بدون بعد را می‌توان در عدد ثابتی ضرب کرد پس بر اساس روابط (۱ و ۴)، داریم:

$$C_d = \frac{Q}{L\sqrt{2gH_t^3}} = F\left(\frac{H_t}{P_i}, \theta\right) \quad (5-a)$$

تاج در جهت جریان قرار دارد، در دبی‌های کمتر، جریان از کلیدهای ورودی می‌گذرد و با افزایش دبی، کلیدهای خروجی نیز به کار می‌افتد. این امر به معنای بسته بودن نیمی از کلیدها در ابتدا می‌باشد، که باعث افزایش عمق آب در بالادست سرریز با تاج شیب‌دار در مقایسه با سرریز با تاج افقی می‌شود.

شکل ۵. تغییرات بار آبی بر حسب دبی

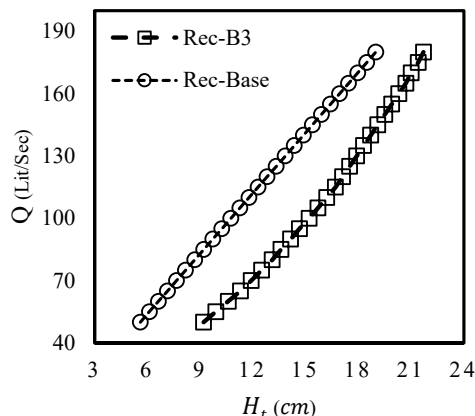


Fig. 5 Water head changes at upstream of PKW

۵- ضریب آبگذری

برای محاسبه ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار، دبی عبوری از سرریز مطابق رابطه زیر به سه قسمت تقسیم می‌شود:

$$Q_T = Q_{W_i} + Q_{W_o} + Q_{S_W} \quad (5)$$

در رابطه بالا، Q_T دبی کل عبوری از سرریز، Q_{W_i} دبی عبوری از کلیدهای ورودی، Q_{W_o} دبی عبوری از کلیدهای خروجی و Q_{S_W} دبی عبوری از روی دیوارهای جانبی سرریز است. دبی عبوری از کلیدهای ورودی و کلیدهای خروجی به ترتیب از روابط

(۶) و

(۷) بدست می‌آید Ahadian and Afzalian [11].

$$Q_{W_i} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nW_i) (H_t - D)^{1.5} \quad (6)$$

$$Q_{W_o} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nW_o) (H_t)^{1.5}$$

می‌رفت، تراز سطح جریان در فاصله بین $\frac{1}{3}$ تا $\frac{2}{3}$ طول سرریز، کاهش و در ادامه افزایش داشت و حالتی مانند پرش بر روی سرریز رخ می‌داد (شکل ۴). این مشاهدات توسط Sohrabzadeh and Ghodsian [21] برای سرریز کلیدپیانویی مثلی نیز گزارش شده است. در دبی‌های کمتر، جریان عبوری از روی سرریز به صورت چسبیده به بدنه سرریز، به پایین دست منتقل می‌شد. با افزایش دبی، جریان از بدنه سرریز جدا شده و با افزایش بیشتر دبی، جریان حالت کاملاً ریزشی آزاد به خود می‌گرفت. مشاهدات حاضر با نتایج Rao (1975) برای سرریزهای خطی همخوانی دارد.

با توجه به مشاهدات، در آزمایش‌های با هد کل در محدوده $5 \text{ cm} < H_t < 8 \text{ cm}$ ، هوا به زیر تیغه‌های جریان عبوری از روی سرریز نفوذ می‌کرد. علاوه بر این در محدوده $8 \text{ cm} < H_t < 12 \text{ cm}$ ، نوساناتی در جریان عبوری از روی سرریز مشاهده شد. در مقادیر بالاتر هد کل ($12 \text{ cm} < H_t$) جریان به صورت کامل طول سرریز را در برگرفته و از روی آن عبور می‌کند. در این شرایط نیز نوسانات تیغه جریان به مقدار کمتری قابل مشاهده بود.

شکل ۴. جریان عبوری از روی سرریز

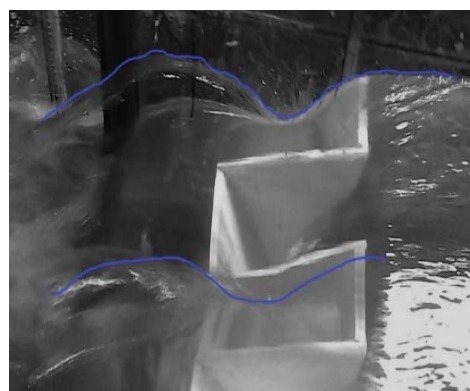


Fig. 4. Flow over the weir

تغییرات دبی بر حسب هد کل برای هر دو سرریز استفاده شده در شکل (۵) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد، در یک دبی ثابت، عمق آب در بالادست سرریز با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار (مدل Rec-B3)، در مقایسه با سرریز با تاج افقی (مدل Rec-Base)، بیشتر است. با توجه به اینکه شیب

(۷)

عمق‌های بیشتر، این ضریب کاهش یافته و به مقدار ثابت ۰/۳ نزدیک می‌شود. با توجه به آنچه در قسمت مشاهدات آزمایشگاهی ذکر شد، افزایش عمق جریان، تداخل لایه‌های جریان از تاج پائینی به سمت تاج بالائی سرریز را در پی داشته است. به همین علت روند کاهش ضریب آبگذری در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

در سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار (Rec-B3)، با افزایش عمق جریان، ضریب آبگذری نیز روندی کاهشی دارد و به مقدار ثابتی میل می‌کند. با توجه به شکل مذکور، ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیب‌دار، تا پیش از $\frac{H_t}{P_i} \leq 0/8$ ، با شیب زیادی کاهش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر عمق نسبی جریان، به دلیل تداخل لایه‌های جریان بر روی سرریز، از شیب کاهشی آن کاسته می‌شود. در محدوده $\frac{H_t}{P_i} \geq 0/8$ ، ضریب کاهشی ضریب آبگذری کمتر شده و به مقدار ثابت ۰/۳۵ میل می‌کند. اگرچه تاج سرریز شیب‌دار بوده و جریان را به‌مانند سرسره‌ای به سمت پائین‌دست هدایت می‌کند، اما تداخل لایه‌های جریان نیز با افزایش بار آبی شدیدتر می‌شود. به همین علت شیب کاهشی این ضریب مانند سرریز با تاج افقی است. جدول (۲) مقادیر بیشینه و متوسط ضریب آبگذری برای هر دو مدل سرریز کلیدپیانویی را نشان می‌دهد. مطابق این جدول مقدار متوسط ضریب آبگذری در سرریز با تاج افقی ۰/۳۹۸ و برای سرریز با تاج شیب‌دار برابر ۰/۴۱۲ است. ضریب آبگذری سرریز با تاج شیب‌دار، در مقایسه با سرریز با تاج افقی، بطور متوسط ۴/۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد. علت افزایش ضریب آبگذری در مدل Rec-B3 نسبت به مدل Rec-Base، طبق مشاهدات آزمایشگاهی به علت ارتفاع کمتر عمق جریان روی سرریز است که منجر به کاهش تداخل لایه‌های جریان در کلیدهای خروجی سرریز می‌شود. به روند افزایشی ضریب آبگذری با کاهش عمق جریان روی سرریز کلیدپیانویی توسط Lempérière and Ouamane [1] و Ghodsian and Ehsanifar [16] نیز اشاره شده است.

جدول ۲ مقادیر متوسط و بیشینه ضریب آبگذری

در اینجا n تعداد کلیدهای سرریز است. با توجه به این که ارتفاع سرریز در طول سرریز با تاج شیب‌دار، ثابت نیست، بنابراین برای محاسبه دبی عبوری از روی یکی از دیواره‌های جانبی سرریز از رابطه (۸) استفاده می‌شود:

$$Q_{sw} = \int_0^B \frac{2}{3} \sqrt{2g} (H_t - Z)^{1.5} dx \quad (8)$$

از آنجا که $H_t > D$ می‌باشد، $Z = (1 - \frac{x}{B})D$ در نظر گرفته شده است. پارامتر x همان پارامتر معرفی شده در شکل (۲) است. بنابراین رابطه بالا را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$Q_{sw} = \int_0^B \frac{2}{3} \sqrt{2g} (H_t - (1 - \frac{x}{B})D)^{1.5} dx \quad (9)$$

یا:

$$Q_{sw} = \frac{2}{3} \frac{B}{2.5D} \sqrt{2g} \left[(H_t - D + \frac{D}{B}x)^{2.5} \right]_0^B dx \quad (10)$$

از آنجا که معادله بالا تنها برای یکی از دیواره‌های جانبی سرریز است، پس برای یک سیکل از سرریز در عدد ۲ و برای کل سرریز در تعداد کلیدها (n) ضرب می‌شود. بنابراین Q_{sw} به صورت معادله زیر نوشته می‌شود:

$$Q_{sw} = \frac{4}{15D} \sqrt{2g} (2n) B [H_t^{2.5} - (H_t - D)^{2.5}] \quad (11)$$

و ضریب آبگذری (C_d) از رابطه

(۱۲) بدست می‌آید:

$$C_d = \frac{Q_E}{Q_T} \quad (12)$$

در رابطه بالا Q_E دبی آزمایشگاهی و Q_T دبی تئوری است. ضریب آبگذری برای هر دو مدل سرریز، با استفاده از رابطه بالا محاسبه و در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در سرریز با تاج افقی (Rec-Base)، بیشترین مقدار C_d در $\frac{H_t}{P_i} = 0/28$ و برابر ۰/۵۴۳ است. در

Model	θ	H_t/P_i	$\bar{C}_d$	$C_{d_{max}}$
Rec-Base	.	0.28-0.95	0.398	0.543
Rec-B ₃	۲۰	0.46-1.08	0.412	0.596

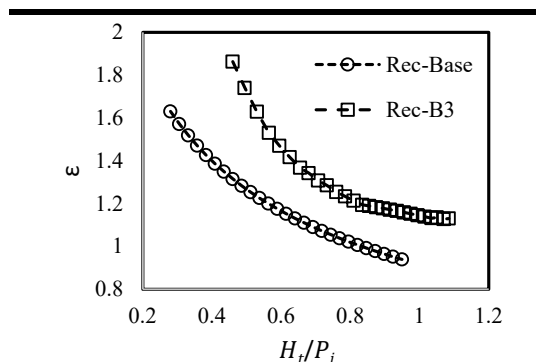


Fig. 7. Efficiency curves

با توجه به نتایج قبلی و روند تغییرات ضریب آبگذری، برای تخمین ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و تاج شیب‌دار رابطه زیر پیشنهاد می‌شود.

$$C_d = \left(a \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^3 + b \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^2 + c \left(\frac{H_t}{P_i} \right) + d \right)^e \quad (14)$$

که در آن a, b, c, d و e ثابت‌های تجربی هستند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مطابق جدول (۳) به دست آمد. محدوده اعتبار رابطه بالا برای مدل‌های Rec-Base و Rec-B₃ به ترتیب $0.927 \leq \frac{H_t}{P_i} \leq 0.257$ و $0.47 \leq \frac{H_t}{P_i} \leq 1.1$ است. رابطه پیشنهادی بالا برای محاسبه ضریب آبگذری برای مدل‌های Rec-Base و Rec-B₃ به ترتیب دارای ضریب همبستگی (R^2)، ۱ و ۰/۹۹۹ می‌باشند.

جدول ۳ مقادیر ثابت تجربی در رابطه‌ی (14)

Model	a	b	c	d	e
Rec-base	-0.599	1.532	-1.479	0.733	0.72
Rec-B ₃	-2.01	5	-4.224	1.582	1.017

Table 3 Values of constants in Eq. [14]

درصد خطای متوسط E با استفاده از رابطه زیر محاسبه و برای هر دو مدل سرریز (Rec-Base و Rec-B₃)، به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۴ درصد به دست آمد.

Table 2 Average and maximum values of discharge coefficients

شکل ۶. ضریب آبگذری هر دو مدل سرریز

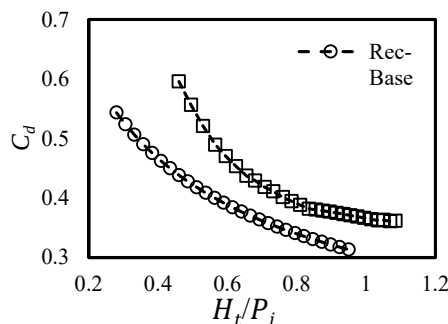


Fig. 6. Discharge coefficient curves

۶- کارایی سرریز

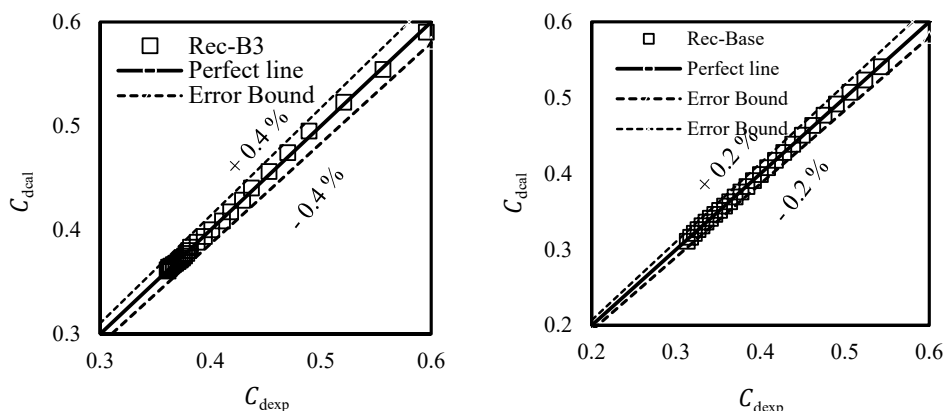
کارایی سرریز کلیدپیانویی مطابق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود (Sangsefidi et al. [19]):

$$\varepsilon = \frac{L}{W} C_d \quad (13)$$

مقادیر کارایی هر دو مدل سرریز با استفاده از رابطه بالا محاسبه و در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در هر دو مدل سرریز با افزایش $\frac{H_t}{P_i}$ ، کاهش کارایی سرریز مشاهده می‌شود. در سرریز با تاج شیب‌دار، جریان را مانند سرسره به سمت پائین‌دست هدایت می‌کند، پس کارایی این سرریز در مقایسه با سرریز با تاج افقی، با شیب کاهشی کمتری ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش طول تاج و کاهش عمق جریان روی این سرریز، تداخل لایه‌های جریان روی سرریز کاهش یافته که منجر به افزایش کارایی سرریز می‌شود. بنابراین افزایش طول سرریز در یک عرض ثابت، کارایی سرریز را افزایش داده و موجب بهبود عملکرد سرریز می‌شود. مقدار متوسط افزایش کارایی سرریز با تاج شیب‌دار برابر ۷/۳ درصد است.

شکل ۷. کارایی سرریز

شکل ۸. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ضریب آبگذری برای سرریز با تاج افقی و شیب‌دار


 Fig. 8. Comparison of measured and calculated values of C_d

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_{dcal} - C_{dexp}}{C_{dcal}} \right| \frac{100}{n'} \quad (15)$$

در این رابطه C_{dexp} و C_{dcal} به ترتیب مقادیر محاسبه‌شده و مقادیر واقعی ضریب آبگذری و n' تعداد داده‌ها است. شکل (۸) مقایسه‌ای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده ضریب آبگذری را نشان می‌دهد. این شکل و مقادیر ضریب همبستگی و درصد خطای متوسط ناشی از معادله پیشنهادی، نشان می‌دهد که این معادله ضریب آبگذری را با دقت بالا محاسبه می‌نماید. به منظور مقایسه و ارزیابی رابطه (14)، با روابط به دست آمده توسط Kumar et al. [18] و Sangsefidi et al. [19]، مقادیر ضریب آبگذری برای بخشی از داده‌های حاضر برای سرریز با تاج افقی محاسبه و خطای متوسط برای هر کدام به دست آمد و در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به این جدول، روشن است که رابطه Sangsefidi et al. [19]، با خطای متوسط ۱/۵۸ درصد، در مقایسه با رابطه Kumar et al. [18]، با خطای متوسط ۱۱۵ درصد، دقت بیشتری دارد. هرچند که درصد خطای کمتر ناشی از رابطه به دست آمده در این تحقیق، دقت بیشتر آن را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه تحقیقات پیشین و مطالعه حاضر

Researcher	Suggested Eq.	H_t/P	C_{dmax}	R^2	Error (%)
Sangsefidi et al. [19]	$C_d = -0.3388 \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^3 + 0.8687 \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^2 - 0.9368 \left(\frac{H_t}{P_i} \right) + 0.7123$	0.15-0.85	0.497	0.9982	1.58

Kumar et al. [18]	$C_d = -2.4112\left(\frac{H_t}{P_i}\right) + 0.1944\frac{L}{W} + 1.03$	≥ 0.249	0.87	0.937	115
Present Study Rec-base model	$C_d = \left(-0.599\left(\frac{H_t}{P_i}\right)^3 + 1.532\left(\frac{H_t}{P_i}\right)^2 - 1.479\left(\frac{H_t}{P_i}\right)^{0.72} + 0.733 \right)$	0.27-0.93	0.54	1	0.2

Table 4. Comparison of previous researches and the present study

- [1] Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). "The Piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways." *International Journal on Hydropower & Dams* 10(5): 144-149.
- [2] Lempérière, F. and Jun, G. (2005). "Low cost increase of dam's storage and flood mitigation: the piano keys weir." *Proc. of 19th congress of ICID, Beijing, China.*
- [3] 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, ICOLD, Taylor and Francis. London, UK.*
- [4] Anderson, R. and Tullis, B. (2011). "Influence of Piano Key Weir geometry on discharge." *Proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs.*
- [5] Machiels, O. (2012). "Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano key weirs," *Université de Liège, Belgium.*
- [6] Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A. (2012). "Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano key weirs." *Journal of hydraulic research* 50(1): 114-120.
- [7] Ribeiro, M. L., et al. (2013). "Overview of Piano key weir prototypes and scientific model investigations." *Proceedings of the 2nd International workshop on Labyrinth and Piano key weirs.*
- [8] Safarzadeh, A. and Noroozi, B. (2016). "3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways", *International Journal of Civil Engineering* 1 : 6-8.
- [9] Mehboudi, A., et al. (2017). "Flow regimes over trapezoidal piano key weirs." *Labyrinth and Piano Key Weirs III-PKW 2017, CRC*

۷- نتیجه گیری

- ۱- عمق آب در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار، در مقایسه با سرریز با تاج افقی، ۱۱/۰۲ درصد افزایش یافته است.
- ۲- ضریب آبگذری در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار در مقایسه با تاج افقی ۴/۸ درصد افزایش یافته است.
- ۳- کمترین مقدار ضریب آبگذری برای سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و تاج شیب‌دار به ترتیب ۰/۳ و ۰/۳۵ و بیشترین مقدار ضریب آبگذری در سرریز با تاج شیب‌دار برابر ۰/۵۹۵ است.
- ۴- کارایی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج شیب‌دار در مقایسه با تاج افقی بطور متوسط ۷/۳ درصد بیشتر است.
- ۵- رابطه (۱۴) برای محاسبه ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی و تاج شیب‌دار پیشنهاد شد.
- ۶- از آنجاکه سطح رودخانه‌ها نسبت به اراضی تحت کشت به‌طور معمول پایین‌تر است، به‌واسطه افزایش عمق آب در بالادست سرریز کلیدپیانویی با تاج دیوارهای جانبی شیب‌دار، از این سرریز می‌توان در کانال‌ها و رودخانه‌ها برای آبگیری نیز استفاده نمود و به نسبت تراز ارتفاعی سطح آب رودخانه از آن بهره برد.

۸- منابع

- height on total head and discharge coefficient in trapezoidal Piano key weir." *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 21(79): 93-110. (In Persian).
- [18] Kumar, M., et al. (2020). "Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs." *Applied Water Sci* 10: 1-9.
- [19] Sangsefidi, Y., et al. (2021). "Hydrodynamics and free-flow characteristics of Piano key weirs with different plan shapes." *Water* 13(15): 2108.
- [20] Singh, D. and Kumar, M. (2022). "Energy dissipation of flow over the type-B Piano key weir." *Flow Measurement and Instrumentation* 83: 102109.
- [21] Sohrabzadeh, H., and Ghodsian, M. (2022). Experimental study of the effect of sidewalls slope over the triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*. (In Persian).
- [22] Pfister, M., et al. (2013). "Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano key weirs." *Labyrinth and Piano key weirs II* 73.
- [23] Erpicum, S., et al. (2016). "Scale effects in physical piano key weirs models." *Journal of hydraulic research* 54(6): 692-698.
- [24] Erpicum, S., et al. (2013). "Escouloubre Piano key weir: Prototype versus scale models." *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, CRC press. London: 65-72.
- Press: 65-73.
- [10] Belzner, F., et al. (2017). "Piano key and labyrinth weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW." *Labyrinth and Piano key weirs III-PKW* 2017, CRC Press: 167-174.
- [11] Ahadian, J. and Afzalian, A. (2017). "Applied analysis of Piano key weir structures as a diversion dam." *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 49(3): 463-476.
- [12] Sajadi, S. M., et al. (2017). "Effect of baffled outlet keys at Piano key weir on dissipating energy." *Irrigation and drainage structures engineering research* 18(69): 77-92. (In Persian).
- [13] Poshteh-Shirani, M., et al. (2018). "The effect of upstream overhang on debris blocking and discharge capacity of Piano key weirs." *Journal of Ferdowsi Civil Engineering* 30(2). (In Persian).
- [14] Zounemat-Kermani, M. and A. Mahdavi-Meymand (2019). "Hybrid meta-heuristics artificial intelligence models in simulating discharge passing the Piano key weirs." *Journal of Hydrology* 569: 12-21.
- [15] Rezaei Ahvanooei, A., et al. (2019). "Improvement of hydraulic performance of nonlinear Piano-key weirs in Plan." *Modares Civil Engineering journal* 19(4): 71-82. (In Persian).
- [16] Ghodsian, M., & Ehsanifar, A. (2020). "Experimental investigation of flow over Piano key weir with rectangular, triangular and trapezoidal plans". 18th Iranian Hydraulic Association conference.
- [17] Akbari, M., et al. (2020). "Experimental study of effect of sidewall angle and weir

Laboratory Investigation of flow over rectangular piano key weir with slopped side walls

Masoud Ghodsian¹ and Hosein Sohrabzadeh Anzani²

1.Prof. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran Iran.

2.Ex. MSc. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran- Iran

* ghods@modares.ac.ir

Abstract

In this paper, results of experiments on the discharge coefficient of rectangular Piano key weirs are presented. Experiments were conducted in a recirculating flume with 10 m length, 0.75 m width, and 0.9 m height. The walls and bed of the flume were made of glass and metal, respectively, and supported by metal frames. Experiments were conducted using two piano key weirs: one with a sloped side walls crest and the other one with a horizontal crest. Piano Key weirs with a constant value of the ratio of length to width were used. Piano key weirs were fixed at a distance of 4 m from the flume entrance. Experiments were conducted for discharges in the range of 50 L/s to 180 L/s .

It was found that the interaction of over flow layers from weir end stars and by increasing the discharge and water head continued upward. At larger values of discharges, which covered all the keys, the water level was lowered at the distance of about 1/2 to 2/3 of weir length and raised further downstream. The results showed that the water level upstream of the weir with sloped side walls crest increased by about 11.02 percent. The discharge coefficient of the weir with sloped side wall crests increased by about 4.8 percent. The efficiency of a weir with a sloped side wall crest increases by about 7.3 percent. The new equation for prediction of discharge coefficient of rectangular piano key weir with sloped side walls crest and the horizontal side wall crest was obtained.