

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه دیوار جانبی و ارتفاع سرریز بر مقدار بار آبی و ضریب دبی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

مصطفی اکبری خیرآبادی<sup>۱</sup>، مهدی کریمی مقدم<sup>۲\*</sup>، تورج سبزواری<sup>۲</sup> و زهرا قدم‌پور<sup>۳</sup>

۱، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشیار، و استادیار گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران  
۲- استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

### چکیده

یکی از راه‌های افزایش ظرفیت تخلیه در سرریزها، استفاده از سرریزهای غیرخطی است. نوع جدید سرریزهای غیرخطی، سرریز کلیدپیانویی است. اکثر تحقیقات گذشته روی سرریز کلید پیانویی نوع مستطیلی تمرکز داشته و عملکرد سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر بررسی شده است. در این تحقیق، اثر زاویه دیوار جانبی کلید و ارتفاع سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای روی بار آبی کل بالادست و ضریب دبی سرریز به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی به‌عنوان شاهد و سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با زاویه دیوار جانبی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۴ درجه اجرا شد. سه نسبت ارتفاع سرریز به عرض یک سیکل ( $P/W_u$ ) برابر ۰/۷۵، ۰/۸۷۵ و ۱ برای سرریزها انتخاب شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در دبی‌های بالا، در یک دبی مشخص، بار آبی ایجاد شده در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است. حداکثر ضریب دبی (برابر ۰/۶۱۱) مربوط است به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با زاویه دیوار جانبی ۱۲ درجه. حداکثر و متوسط ضریب دبی در بار آبی بالا، به‌ترتیب حدود ۱۴ درصد و ۱۰ درصد بیشتر از ضریب دبی در نوع مستطیلی است. همچنین، با افزایش نسبت ارتفاعی  $P/W_u$ ، مقدار ضریب دبی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد رابطه لمپریر برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی تیپ A و در شرایط خاص هیدرولیکی جواب قابل قبول ارائه می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

استغراق محلی، سرریز زیگزاگی، سرریز کلیدپیانویی، ظرفیت تخلیه، کشش سطحی

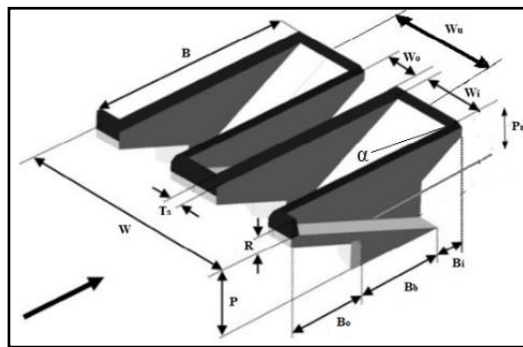
### مقدمه

دارند (Anon, 2015). یکی از راه‌های افزایش ظرفیت تخلیه سرریزها، افزایش طول تاج آنهاست. به علت محدودیت در عرض تاج سد، کانال‌ها و آبراهه‌ها، ممکن است افزایش طول تاج سرریز امکان‌پذیر نباشد. بنابراین توسعه طول تاج با پیچ خوردن سرریز و سه‌بعدی کردن آنها امکان‌پذیر خواهد بود مانند سرریزهای نوک اردکی، سرریزهای قوسی و

در حال حاضر بسیاری از سرریزهای موجود در سراسر جهان به‌دلیل پایین بودن ظرفیت تخلیه‌شان، نیاز به بازنگری دارند (Crookston et al., 2018). برای مثال، انجمن مسئولان امنیت سدهای ایالتی پیش‌بینی می‌کند بیش از ۱۶۰۰ سد با هزینه کلی بیش از ۱۸/۲ میلیارد دلار احتیاج به بازنگری

جریان در کلید ورودی از رمپ بالا می‌رود و در انتهای آن به پایین دست تخلیه می‌شود. در کلید خروجی، جریان از روی تاج سرریز روی رمپ به سمت پایین حرکت می‌کند و به پایین دست تخلیه می‌شود. یک عرض سیکل کامل از سرریز ( $W_u$ ) شامل یک کلید ورودی و دو نیم کلید خروجی است. شکل ۱ سرریز کلیدپیانویی و مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد.

سرریزهای زیگزاگی (Crookston & Tullis, 2012) ساده‌ترین شکل سرریزهای غیرخطی، سرریزهای زیگزاگی هستند. مشکل این نوع سرریزها، زیاد بودن عرض فونداسیون آنهاست. یکی از سرریزهایی که اخیراً مورد استقبال قرار گرفته، سرریزهای کلیدپیانویی (PKW) است که به دلیل داشتن رمپها، شیروانی‌ها و دیوارهای کناری موازی، نسبت به سرریزهای زیگزاگی عرض پی کمتری دارند (Crookston *et al.*, 2018).



شکل ۱- پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی

Fig. 1- Geometric parameters of PKW

$$q = 4.3h\sqrt{P_m} \quad (1)$$

تاکنون مطالعات روی سرریزهای کلیدپیانویی را

محققانی مانند اندرسون (Anderson, 2011)، لاگیر و همکاران (Laugier *et al.*, 2011)، میشلز و همکاران (Machiels *et al.*, 2011)، پرالانگ و همکاران (Pralong *et al.*, 2011a,b)، اومانه و لمپریر (Ouamane & Lempérière, 2006) و همکاران (Hien *et al.*, 2006) پی گرفته‌اند. بارکودا و همکاران (Barcouda *et al.*, 2006) نشان دادند اگر عرض کلید ورودی بزرگ‌تر از عرض کلید خروجی در نظر گرفته شود، دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد. لمپریر (Lempérière, 2009) رابطه تجربی ساده‌ای برای دبی در واحد عرض در سرریز کلیدپیانویی نوع A (دارای شیروانی در بالادست و پایین دست) به صورت رابطه ۱ ارائه داده است.

که در آن،  $q$  = دبی در واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض کانال)؛  $P_m$  = فاصله محل برخورد دو شیب تا روی تاج (متر) (شکل ۱)؛ و  $h$  = ارتفاع آب یا بار آبی کل روی تاج در بالادست (متر). اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2011) و کبیری سامانی و جواهری (Kabiri-Samani & Javaheri, 2012) با تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که هندسه خاص سرریزهای کلیدپیانویی باعث شده تا ظرفیت تخلیه این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای اوجی نزدیک به ۴ برابر افزایش یابد. میشلز (Machiels, 2012) نشان داد که نسبت عرض

شیرانی و همکاران (Poshteh-Shirani *et al.*, 2017) با استفاده از پنج هندسه مختلف سرریز کلیدپیانویی، انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور را بررسی کردند و نشان دادند در بار آبی ثابت، مدل سرریز با نسبت  $W_i/W_o = 1/25$  برابر  $1/25$  نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه، حساسیت کمتری به انسداد دارد. احدیان و افضلیان (Ahadian & Afzalian, 2017) با استفاده از دیوارهای سپری شیب‌دار روی دو مدل سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، توانایی این سرریزها را در انحراف آب در مواقع کم‌آبی و نیز تخلیه جریان را در هنگام سیلاب بررسی کردند و نشان دادند که مدل  $P/W_u = 0.5$  در دبی‌های کم توانایی بیشتری در افزایش سطح آب دارد در حالی که مدل  $P/W_u = 1.33$  در دبی‌های زیاد توان تخلیه جریان بیشتر دارد. یارمحمدی و احدیان (Yarmohammadi & Ahadian, 2017) آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با نسبت  $W_i/W_o = 1.5$ ، نسبت ارتفاع سرریز به عرض یک سیکل  $P/W_u = 0.5$  و تیپ A سرریز کلیدپیانویی (طول شیروانی یکسان در بالادست و پایین دست) به انجام رساندند ( $W_u$  عرض یک سیکل است). سجادی و همکاران (Sajadi *et al.*, 2017) آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی تیپ A با  $W_i/W_o = 1.5$  و  $P/W_u = 1.33$  و در بار آبی کم دنبال کردند. کروکستون و همکاران (Crookston *et al.*, 2018) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محققان دیگر، مقادیر ضریب  $C_d$  را به روش عددی به دست آوردند و در سرریزها  $W_i/W_o$  را بین  $0.67$  تا  $1/5$  در نظر گرفتند. الشکور و همکاران (Al-Shukur *et al.*, 2018) تأثیر پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی نوع B را روی ضریب تخلیه در شرایط آزاد جریان بررسی کردند و نشان دادند در مقایسه با سرریز

کلید ورودی به خروجی ( $W_i/W_o$ ) در محدوده  $1/25$  تا  $1/5$ ، بیشترین راندمان سرریز را به همراه دارد. اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) با آزمایش‌های خود روی سرریز PKW با  $W_i/W_o = 1.2$  به این نتیجه رسیدند که با به کار بردن بار آبی کل ( $H_t$ ) در رابطه لمپریر، این رابطه مقدار دبی را به طور متوسط و حداکثر به ترتیب  $10/1$  و  $10/9$  درصد بیشتر برآورد می‌کند. این دو محقق همچنین آزمایش‌های خود را روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج تخت و نیم‌دایره‌ای و با  $W_i/W_o = 0.67-1.5$  ادامه دادند. علاوه بر مطالعه مدل‌های فیزیکی، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی سرریز کلیدپیانویی توسط لیبور و همکاران (Lefebvre *et al.*, 2014) و پرالانگ و همکاران (Pralong *et al.*, 2011a) دنبال شده است. نتایج تحقیقات آنها مطابقت خوبی با داده‌ای آزمایشگاهی داشته است. اورتل و برمر (Oertel & Bremer, 2016) و پرالانگ و همکاران (Pralong *et al.*, 2011b) با پیشنهاد دادن یک رابطه جایگزین دبی-اشل برای سرریزهای کلیدپیانویی معتقدند در نظر گرفتن طول کل تاج سرریز ( $L_t$ ) برای بررسی راندمان سرریز PKW منطقی نیست و باید به جای آن از عرض کل سرریز ( $W$ ) استفاده کرد. صفرزاده و نوروزی (Safarzadeh & Nouroozi, 2014) هیدرولیک سه‌بعدی سرریزهای کلیدپیانویی انحنادار را بررسی و عملکرد آن را با سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با زاویه دیوار جانبی  $6$  درجه و  $P/W_u = 0.72$  مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان داد با افزایش زاویه مرکزی سرریز، ظرفیت آگذری سیستم افزایش می‌یابد و دلیل آن راکاهش استغراق موضعی، افزایش سطح کلیدهای ورودی و اصلاح الگوهای جریان‌های عبوری از روی کلیدهای کناری اعلام کردند. پشته

بررسی کرد که از هدف‌های این تحقیق است. در این تحقیق اثر افزایش زاویه دیوار جانبی کلید و ارتفاع سرریز در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای روی بار آبی کل بالادست و ضریب تخلیه سرریز بررسی شده و نتایج به‌دست آمده از این نوع سرریز با آنچه از نوع مستطیلی و تحقیقات گذشته حاصل آمده، مقایسه شده است.

### مواد و روش‌ها

#### آنالیز ابعادی

با توجه به شکل ۱، کمیت‌های مؤثر در ضریب دبی سرریز کلیدپیانویی را می‌توان به‌صورت رابطه ۲ ارائه داد (Leite Ribeiro *et al.*, 2012)

$$F(Q, \rho, g, \mu, \sigma, H_t, L_t, P, W, W_u, W_i, W_o, B_i, B_o, B, n, S_i, S_o, T_s, \alpha) = 0 \quad (2)$$

که در آن،

$$F\left(\frac{P}{W_u}, \frac{H_t}{P}, \frac{L_t}{W}, \frac{Q}{\sqrt{2gL_t H_t^{1.5}}}, \alpha, Re, We\right) = 0 \quad (3)$$

که در آن:

$$Re = \text{عدد رینولدز}; We = \text{عدد وبر}; \text{و } \frac{Q}{\sqrt{2gL_t H_t^{1.5}}}$$

ضریب دبی ( $Ca$ ).

#### مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان اجرا شد که از نظر مشخصات هندسی دارای مقطع مستطیلی، طول ۷ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۵ متر است. ضمن آنکه در ابتدا و انتهای فلوم مخازنی به‌ترتیب برای هدایت جریان به داخل و خارج از آن تعبیه شده است. جریان با یک پمپ از یک مخزن زیرزمینی

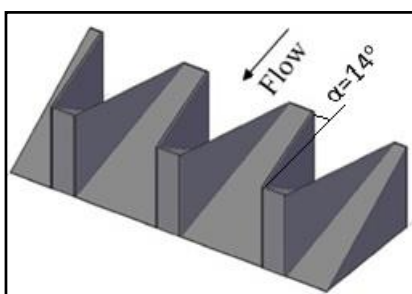
خطی، نسبت  $L/W$  و اختلاف ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز، سبب افزایش ۴۲ درصد در ظرفیت تخلیه می‌شود.

تا کنون اکثر تحقیقات روی سرریزهای کلیدپیانویی نوع مستطیلی بوده و به هیدرولیک سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر توجه شده است. در سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی دیوارهای جانبی موازی یکدیگرند و از این رو در بار آبی بالا، استغراق موضعی رخ می‌دهد و سبب کاهش عملکرد سرریز می‌شود. با باز کردن دیوارهای جانبی و تبدیل سرریز کلیدپیانویی مستطیلی به نوع دوزنقه‌ای می‌توان تغییر در عملکرد سرریز را

$Q$  = دبی جریان؛  $\rho$  و  $\mu$  = به‌ترتیب جرم مخصوص و لزوجت سیال؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $\sigma$  = کشش سطحی؛  $H_t$  = بار آبی کل روی سرریز؛  $L_t$  = طول کل تاج سرریز؛  $P$  = ارتفاع سرریز؛  $W$  = عرض کل فلوم؛  $W_u$  = عرض یک سیکل کامل؛  $W_i$  و  $W_o$  = به‌ترتیب عرض کلید ورودی و خروجی؛  $B_i$  و  $B_o$  = به‌ترتیب طول شیروانی بالادست و پایین‌دست؛  $B$  = طول تاج کناری؛  $n$  = تعداد کلیدها؛  $S_i$  و  $S_o$  = به‌ترتیب شیب کلید ورودی و خروجی؛  $T_s$  = ضخامت بدنه؛ و  $\alpha$  = زاویه دیوار جانبی کلید (در سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای). با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام و حذف پارامترهای ثابت در این تحقیق (نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی، نسبت طول شیروانی‌ها، تعداد کلیدها، شیب کلیدها و ضخامت بدنه)، پارامترهای بدون بعد به‌صورت رابطه ۳ به‌دست می‌آیند.

از ۵ مدل سرریز کلیدپیانویی استفاده شد. این مدل -ها شامل سرریز کلیدپیانویی مستطیلی (RPKW) و سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای (TPKW) با زاویه‌های دیوار جانبی کلید ( $\alpha$ ) برابر ۴، ۸، ۱۲ و ۱۴ درجه نسبت به جریان است. شکل ۲ یکی از مدل سرریزهای استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

تامین می‌شود. مقدار دبی جریان با شیر کنترل، سرریز مثلثی و مانومترهای دبی-اشل قابل تنظیم است. جریان پس از ورود به فلوم، از روی مدل سرریز کلیدپیانویی عبور می‌کند و از انتهای فلوم خارج و سرانجام پس از عبور از سرریز مثلثی، از طریق سیستم کانال برگشتی به داخل مخزن اولیه تخلیه می‌شود. برای آزمایش‌ها در حالت آزاد جریان،



شکل ۲- مدل سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با زاویه کلید ۱۴ درجه

Fig. 2- TPKW model with key angle of 14°

بدون بعد سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی (RPKW) و دوزنقه‌ای (TPKW) استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ مشخص شده است. یادآوری می‌شود سرریز کلیدپیانویی با زاویه دیوار جانبی برابر صفر درجه همان سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است.

تمامی مدل‌ها ۳ سیکل دارند و طول کل تاج ۱/۶۵ متر است. در این تحقیق، سرریزها از نوع تیپ D (بدون شیروانی در بالادست و پایین‌دست) هستند و عرض کلید ورودی و خروجی یکسان در نظر گرفته شده‌است. آزمایش‌ها برای سه ارتفاع سرریز ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ سانتی‌متر اجرا شد. پارامترهای هندسی

جدول ۱: پارامترهای بدون بعد مدل‌های سرریز کلیدپیانویی در این تحقیق

Table 1- Dimensionless parameters for PKW models in this research

زاویه کلید (درجه) Key angle (degree)	ارتفاع سرریز (متر) Weir height (m)	ارتفاع سرریز به عرض یک سیکل Weir height to pkw unit width	عرض کلید ورودی به خروجی Inlet to outlet width ratio	تعداد سیکل Cycle Number	طول تاج به عرض کل Crest length to total width ratio
0, 4, 8, 12, 14	0.15, 0.175, 0.2	0.75, 0.875, 1	1	3	2.75

شد. جریان با دبی مشخص به کمک پمپ و سرریز مثلثی تنظیم شد. پس از پایدار شدن جریان، تراز سطح آب در بالادست و ارتفاع آب روی سرریز ( $H$ ) برداشت شد. با استفاده از

### نحوه اجرای آزمایش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها، ابتدا یکی از مدل‌های سرریز در فلوم نصب شد. نشستی احتمالی از حد فاصل سرریز و دیوارهای فلوم با چسب زدن برطرف

ضریب دبی ( $C_d$ ) از رابطه عمومی سرریز محاسبه شد (رابطه ۵).

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3}\sqrt{2g}L_t H_t^{1.5}} \quad (5)$$

در هر مدل، آزمایش‌ها برای تعداد ۱۵ دبی اجرا شد.

### نتایج و بحث بار آبی کل

شکل ۳، جریان عبوری از روی سرریز ۱۲ درجه را در حالت جریان آزاد نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که به‌رغم بازشدگی زاویه کلیدها، هنوز جریان عبوری از روی دیوارهای کناری با یکدیگر تداخل کمی دارند. مقدار تداخل جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ۱۲ و ۱۴ درجه کمتر از مقدار تداخل جریان در مدل‌های دیگر مشاهده شد.

معادله پیوستگی مقدار سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز محاسبه گردید. با توجه به اینکه سطح جریان در نزدیک سرریز به تدریج کاهش می‌یابد، تراز سطح آب در نقطه‌ای از بالادست اندازه‌گیری شد که سطح جریان افقی باشد. پس از اندازه‌گیری پارامترهای لازم، مدل با زاویه مرکزی یا ارتفاع متفاوت نصب و آزمایش‌ها تکرار شد. مقدار بار کل روی سرریز در بالادست از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$H_t = H + \frac{V_u^2}{2g} \quad (4)$$

که در آن:

$H_t$  = بار کل روی سرریز در بالادست (متر)؛  $H$  = عمق آب روی سرریز در بالادست (متر)؛ و  $V_u$  = سرعت جریان در بالادست سرریز (متر بر ثانیه). برای هر دبی، پس از محاسبه بار کل روی سرریز، مقدار



شکل ۳- جریان عبوری از روی سرریز کلید پیانویی دوزنقه ای ۱۲ درجه

Fig. 3- Flow over TPKW with key angle of 12°

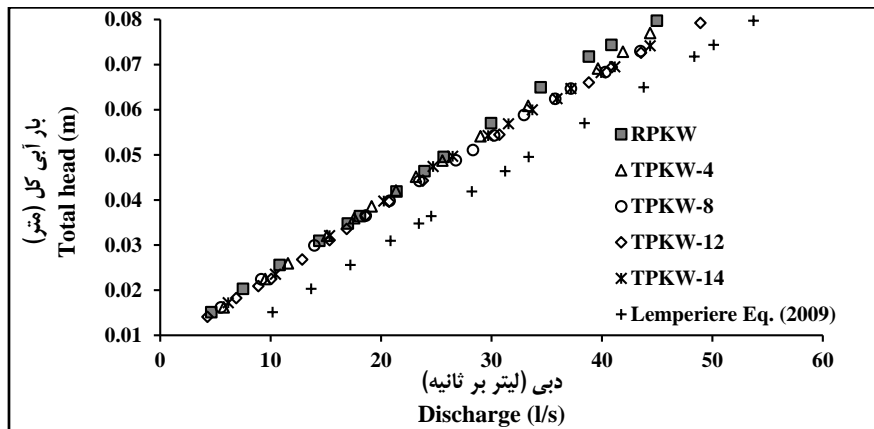
در دبی‌های پایین، بار آبی ایجاد شده در بالادست برای تمامی سرریزها اختلاف کمی با یکدیگر دارند. در دبی‌های بالا، در یک دبی مشخص، بار آبی ایجاد شده در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی (RPKW)، نسبت به سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای (TPKW)، بیشتر است. هنگامی که دبی پایین است، جریان‌های عبوری از روی

### الف- تأثیر زاویه دیوار جانبی روی بار آبی

شکل ۴، رابطه بین دبی عبوری از روی سرریزهای کلیدپیانویی و بار آبی کل را در بالادست ( $H_t$ ) نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق با نتایج حاصل از رابطه لمپریر (رابطه ۱) مقایسه شده است. با توجه به شکل ۴، با افزایش دبی عبوری از روی سرریز، مقدار بار آبی کل بالادست افزایش می‌یابد.

دیوارهای سرریز تأثیر کمتری بر عمق آب بالادست خواهد داشت.

کلید خروجی و دیوارهای جانبی تداخلی با یکدیگر ندارند. لذا بازشدگی



شکل ۴- رابطه دبی عبوری از روی سرریزهای کلیدپیانویی و بار آبی کل در بالادست

Fig. 4- Relation between the discharge over PKWs and the total upstream head

حدود ۲۰ درصد بیشتر از مقدار دبی واقعی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی برآورد می‌کند. بنابراین، دبی به‌دست آمده از رابطه لمپریه در بارهای آبی بالا به دبی واقعی نزدیک‌تر است. صفرزاده و نوروزی (Safarzadeh & Nouroozi, 2014) می‌گویند رابطه لمپریه در محدوده  $0.4P_m < H < 2P_m$  معتبر است. مشکل معادله لمپریه این است که مشخص نیست  $h$  بار آبی کل است یا بار آبی پیزومتری؟ (Anderson & Tullis, 2013) ضمن اینکه ضریب دبی برای تمام بار آبی، یکسان و برابر  $4/3$  در نظر گرفته شده است در حالی که این ضریب با افزایش بار آبی ابتدا افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که آزمایش‌های تحقیق حاضر روی سرریز کلیدپیانویی تیپ D (بدون شیروانی بالادست و پایین‌دست) و نسبت  $W_i/W_o=1$  و در تحقیق لمپریه (Lempérière, 2009) روی سرریز کلیدپیانویی تیپ A (با شیروانی در بالادست و پایین‌دست) و نسبت  $W_i/W_o=1.25$  اجرا شده است. بنابراین، رابطه مذکور در شرایط خاص کاربرد دارد.

بنابراین، با توجه به یکسان بودن طول کل سرریز در تمامی مدل‌ها، اختلاف عمق آب ایجاد شده در بالادست سرریز برای مدل‌های مستطیلی و دوزنقه ای اندک است. در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی، دیوارهای جانبی موازی و نزدیک به یکدیگرند. از این رو هنگامی که دبی عبوری بالاست، تداخل جریان‌های عبوری از روی کلید خروجی و دیوارهای جانبی باعث کاهش ضریب دبی عبوری و در نتیجه افزایش عمق آب بالادست شده است. هنگامی که زاویه دیوارهای جانبی کلید به  $4$  درجه تغییر می‌کند، تداخل جریان کاهش می‌یابد و از این رو در یک دبی مشخص، بار آبی کل کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه دیوار جانبی، کاهش بار آبی ادامه دارد. کمترین بار آبی کل در دبی مشخص مربوط به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای  $12$  درجه است. در شکل ۴، رابطه بین دبی و بار آبی کل با استفاده از رابطه لمپریه نشان داده شده است. در یک بار آبی مشخص، رابطه لمپریه دبی عبوری را برای بارهای آبی پایین حدود ۱۰۰ درصد و برای بار آبی بالا

ب- تأثیر ارتفاع سرریز روی بار آبی

ثابت با افزایش  $P/W_u$ ، مقدار بار آبی ایجاد شده روی سرریز کلیدپیانویی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت  $P/W_u$ ، اختلاف دبی‌های به‌دست آمده از رابطه لمپریه و مقدار دبی واقعی بیشتر شده است. بنابراین برای تیپ سرریز انتخاب شده در این تحقیق، رابطه لمپریه در نسبت های  $P/W_u$  پایین، جواب بهتری ارائه می‌دهد.

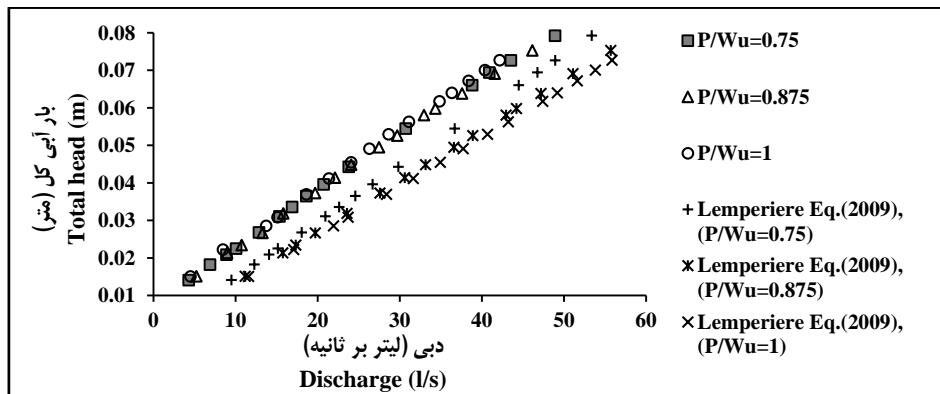
برای بررسی تأثیر ارتفاع سرریز بر ضریب دبی، نتایج آزمایش‌های مربوط به سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای ۱۲ درجه با سه ارتفاع ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ سانتی‌متر تحلیل می‌شود. شکل ۵، منحنی دبی - اشل را برای سه نسبت ارتفاع  $P/W_u$  برابر ۰/۷۵، ۰/۸۷۵ و ۱ در این تحقیق و مقایسه آن با رابطه لمپریه نشان می‌دهد.  $P$  ارتفاع سرریز و  $W_u$  عرض یک سیکل است.

ضریب تخلیه جریان

الف- تأثیر زاویه دیوار جانبی روی ضریب تخلیه

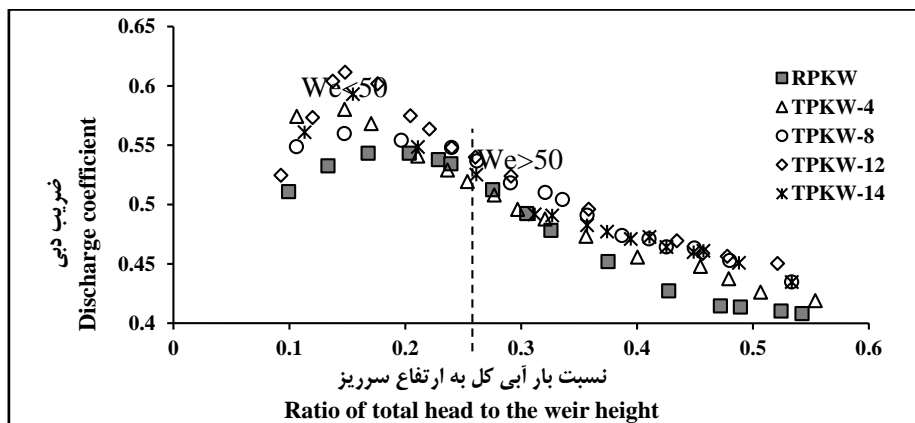
شکل ۶، رابطه بین نسبت  $H_t/P$  و ضریب دبی عبوری ( $C_d$ ) را برای تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۵، در یک دبی مشخص و بالا، بار آبی بالادست سرریز با  $P/W_u=0.75$  کمترین و با  $P/W_u=1$  بیشترین مقدار است. بنابراین در یک دبی



شکل ۵- مقایسه رابطه دبی-اشل در این تحقیق و معادله لمپریه برای سه نسبت ارتفاع  $P/W_u$

Fig. 5- Comparison of head-discharge relationship in this research and Lemperiere Eq. for three ratio  $P/W_u$



شکل ۶- رابطه بین  $H_t/P$  و ضریب دبی عبوری  $C_d$  برای کلیه مدل‌ها

Fig. 6- Relation between  $H_t/P$  and  $C_d$  for all models



سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با زاویه دیوار جانبی ۱۲ درجه بیشتر از دیگر مدل‌های سرریز است. در بار آبی کم، با افزایش مقدار  $\frac{H_t}{P}$  به اندازه ۰.۷۰، ۰.۳۹، ۰.۳۹، ۰.۶۰ و ۰.۳۷ درصد به ترتیب برای مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با زاویه‌های ۰.۴، ۰.۸، ۱۲ و ۱۴ درجه، حداکثر ضریب  $C_d$  به ترتیب ۰.۵/۹، ۰.۱/۰۴، ۰.۲/۱۹، ۰.۱۶/۶۰ و ۰.۵/۷ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، بیشترین افزایش مربوط به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ۱۲ درجه است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ضریب دبی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی (RPKW) کمتر از ضریب دبی در سرریزهای دوزنقه‌ای (TPKW) است. این نتیجه با یافته‌های صفرزاده و نوروزی (Safarzadeh & Nouroozi, 2014) مطابقت دارد. با تغییر سرریز کلیدپیانویی مستطیلی به دوزنقه‌ای ۱۲ درجه، حداکثر ضریب دبی حدود ۱۴ درصد افزایش یافته است. پس از حاصل شدن حداکثر ضریب دبی  $C_d$ ، این ضریب با افزایش  $\frac{H_t}{P}$  کاهش می‌یابد. دلیل پایین‌تر بودن ضریب دبی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای این است که دیواره‌های کناری در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای به یکدیگر نزدیک‌ترند. از این رو در دبی‌های بالا، تداخل جریان‌های عبوری از دو دیوار مجاور در کلید خروجی، سبب بالا رفتن بار آبی بالادست و در نتیجه کاهش ضریب تخلیه جریان شده است.

در اعداد و بر کمتر از ۵۰ ( $W_e < 50$ )، تا رسیدن ضریب  $C_d$  به مقدار حداکثر خود، این ضریب برای سرریز کلیدپیانویی مستطیلی کمترین و برای سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با زاویه ۱۲ درجه بیشترین مقدار است. پس از آن تا رسیدن عدد و بر به مقدار

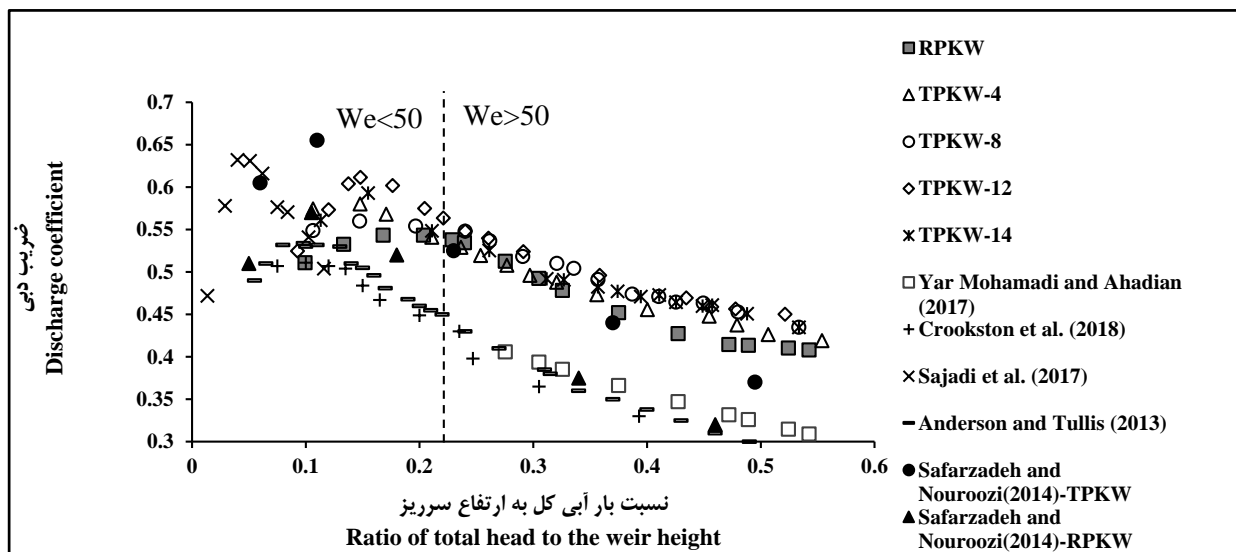
در بار آبی کم، یکی از پارامترهایی که بر ضریب  $C_d$  تأثیر می‌گذارد، کشش سطحی ( $\sigma$ ) است. برای بررسی این پارامتر از پارامتر بدون بعد و بر ( $We$ ) استفاده می‌شود.

$$We = \frac{\rho V^2 H}{\sigma} \quad (6)$$

میشلز و همکاران (Machiels et al., 2011) و میشلز (Machiels, 2012) در تحقیقات خود دریافتند که کشش سطحی زمانی تأثیرگذار خواهد بود که عدد و بر کمتر از ۵۰ باشد. در شکل ۶، مرز ناحیه عدد و بر کمتر از ۵۰ و بیشتر از آن مشخص شده است. محاسبات نشان می‌دهد برای بار آبی بالای ۳/۵ سانتی‌متر، عدد و بر بالاتر از ۵۰ و برای بار آبی کمتر از ۳/۵ سانتی‌متر، عدد و بر کمتر از ۵۰ حاصل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، برای تمامی مدل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای، با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$ ، مقدار ضریب دبی عبوری  $C_d$  ابتدا افزایش و بعداً کاهش می‌یابد. بنابراین، حداکثر ضریب دبی عبوری در نسبت  $\frac{H_t}{P}$  پایین رخ می‌دهد. این موضوع، در بار آبی کم، نشان از راندمان بالای این گونه سرریزها دارد. (Sajadi et al., 2017). هنگامی که بار آبی روی سرریز کم است، جریان‌های عبوری از روی کلیدهای خروجی و دیواره‌های جانبی تداخلی با یکدیگر ندارند، از این رو با افزایش بار آبی، ضریب دبی  $C_d$  نیز افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر بار آبی، جریان‌های عبوری تداخل با یکدیگر پیدا می‌کنند و سبب کاهش ضریب  $C_d$  می‌شوند. حداکثر ضریب  $C_d$  برای سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای با زاویه‌های ۰.۴، ۰.۸، ۱۲ و ۱۴ درجه به ترتیب ۰/۵۴، ۰/۵۸، ۰/۵۶، ۰/۶۱ و ۰/۵۹ به دست آمده است. بنابراین، حداکثر ضریب تخلیه جریان در

۱۲ درجه به میزان ۹/۷۵ درصد نسبت به سرریز مستطیلی افزایش یافته است. شکل ۷، مقایسه ضریب دبی در این تحقیق و آزمایش‌های محققان مختلف روی سرریز با ابعاد، تیپ و شرایط مختلف جریان اجرا شده است.

حدود ۵۰، مقدار ضریب  $C_d$  در سرریزهای کلیدپیانویی مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شوند. در اعداد وبر بالای ۵۰ ( $We > 50$ )، ضریب  $C_d$  در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی کمترین و در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ۱۲ و ۱۴ درجه بیشترین مقدار است. همچنین ضریب  $C_d$  در سرریز دوزنقه‌ای



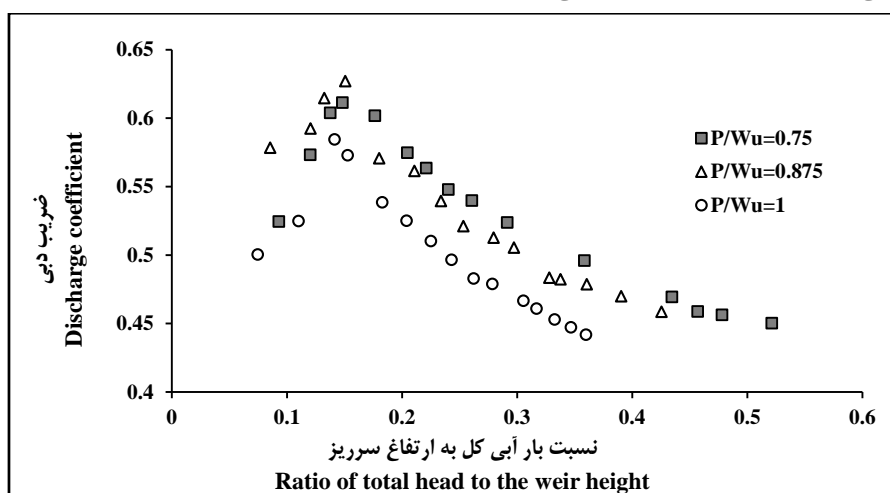
شکل ۷- مقایسه ضریب  $C_d$  در این تحقیق با تحقیقات گذشته

Fig. 7- Comparison of  $C_d$  coefficient in this research and previous researches

سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است تا در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی. مقدار  $P/W_u$  در این تحقیق و تحقیق صفرزاده و نوروژی (Safarzadeh & Nouroozi, 2014) به یکدیگر نزدیک است. دیگر تحقیقات گذشته روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی بوده است. مقادیر ضریب دبی در این تحقیق بیشتر از مقادیر ضریب دبی در اکثر تحقیقات گذشته است که دلیل آن متفاوت بودن هندسه و ابعاد مدل و پارامترهایی مانند  $P/W_u$  و  $W_i/W_o$  است. حداکثر ضریب  $C_d$  در این تحقیق حدود ۱۳ درصد بیشتر از حداکثر ضریب دبی در تحقیق اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) است.

نتایج تحقیق حاضر برای  $W_i/W_o=1$  و  $P/W_u=0.75$  رسم شده است. در این تحقیق، سرریزها بدون شیروانی (تیپ D) هستند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در تحقیقات گذشته نیز با افزایش بار آبی بالادست، ضریب  $C_d$  ابتدا افزایش و پس از آن کاهش نشان می‌دهد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. ضریب  $C_d$  در تحقیق حاضر با آنچه از تحقیق صفرزاده و نوروژی (Safarzadeh & Nouroozi, 2014) روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ۶ درجه به دست آمده است، همخوانی بیشتری دارد. در تحقیق صفرزاده و نوروژی (Safarzadeh & Nouroozi, 2014) نیز مانند تحقیق حاضر دیده می‌شود که ضریب  $C_d$  در

همچنین، با افزایش نسبت ارتفاعی  $P/W_u$ ، مقادیر ضریب  $C_d$  کاهش یافته است. با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$ ، اختلاف مقادیر  $C_d$  برای نسبت‌های مختلف  $P/W_u$  بیشتر شده است. بنابراین، ضریب دبی با نسبت ارتفاعی سرریز رابطه عکس دارد.



شکل ۸- رابطه  $H_t/P$  و  $C_d$  در نسبت‌های مختلف  $P/W_u$

Fig. 8- Relationship between  $H_t/P$  and  $C_d$  in different height ratios  $P/W_u$

ظرفیت تخلیه سرریز لبه تیز خطی از رابطه ۸ محاسبه می‌شود (Leite Ribeiro et al., 2012):

$$Q_{sh} = C_s \sqrt{2g} W H_t^{1.5} \quad (۸)$$

که در آنها،

$W$  = عرض سرریز یا فلوم؛  $C_D$  = ضریب دبی سرریز اوجی؛  $C_s$  = ضریب دبی سرریز لبه تیز؛ و  $H_t$  = بار آبی کل در بالادست. مقدار ضریب  $C_D$  سرریز اوجی از نمودار ارائه شده توسط USBR استخراج شده است. طبق تحقیقات هگر و شلیس (Hager & Schleiss, 2009)، ضریب دبی سرریز لبه تیز برابر  $0.42$  در نظر گرفته شده است.

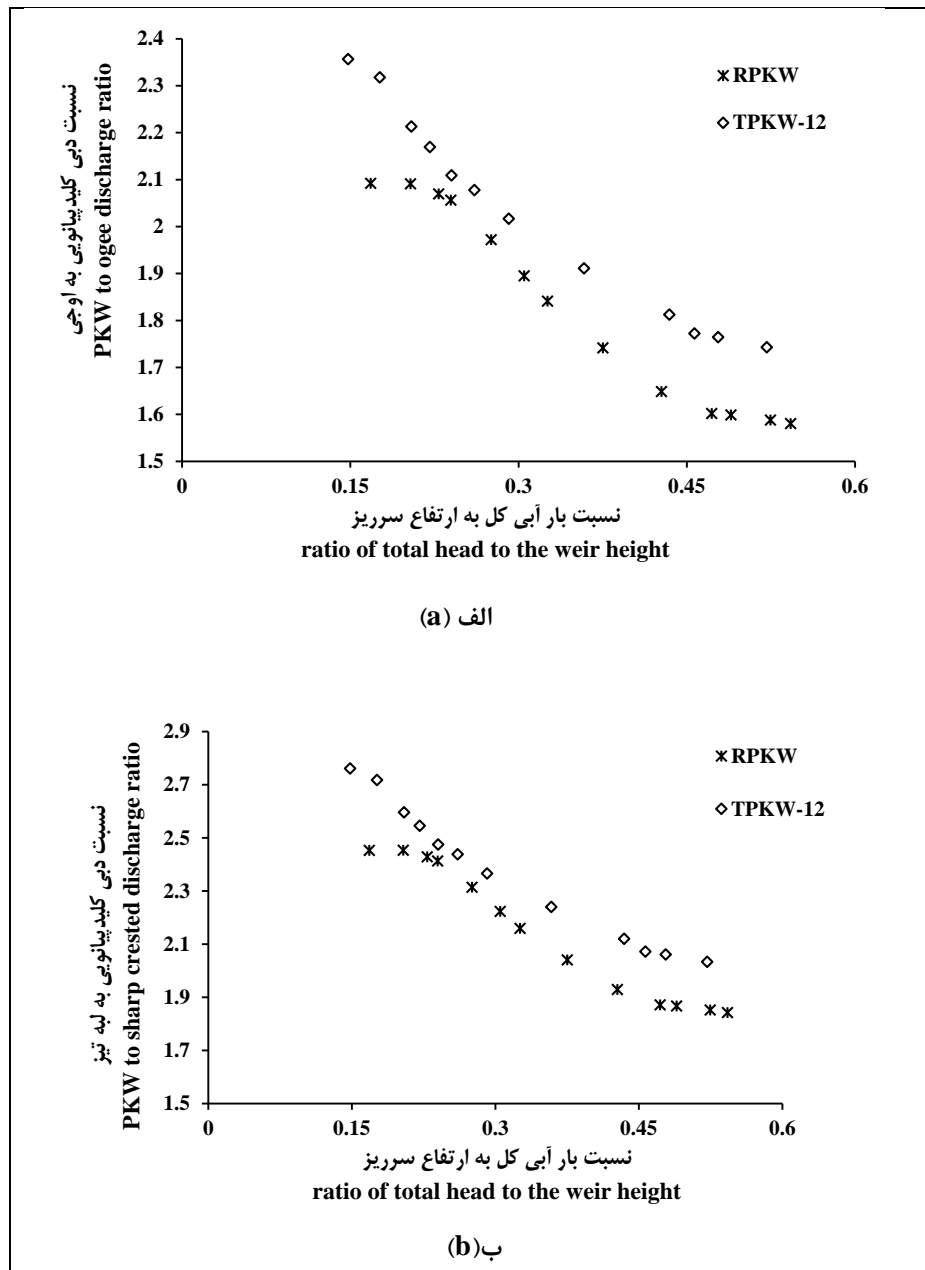
ب- تأثیر ارتفاع سرریز روی ضریب تخلیه

شکل ۸، منحنی  $\frac{H_t}{P}$  در مقابل  $C_d$  را برای سه نسبت ارتفاع  $P/W_u$  نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که در تمامی نسبت‌های ارتفاعی، با افزایش  $\frac{H_t}{P}$ ، مقدار  $C_d$  ابتدا افزایش می‌یابد و به مقدار حداکثر می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد.

- مقایسه دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای با سرریز اوجی و لبه تیز

شکل ۹، مقایسه دبی عبوری از سرریزهای کلید پیانویی در این تحقیق ( $Q_{pkw}$ ) و دبی عبوری از سرریز اوجی ( $Q_{ogee}$ ) و سرریز خطی لبه تیز ( $Q_{sh}$ ) را نشان می‌دهد. برای مقایسه دبی عبوری از سرریز اوجی و لبه تیز با کلیدپیانویی، عرض سرریز اوجی و لبه تیز برابر عرض فلوم آزمایشگاهی و برابر  $0.16$  متر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه دبی سرریز اوجی، از رابطه ۷ استفاده شده است.

$$Q_{ogee} = C_D \sqrt{2g} W H_t^{1.5} \quad (۷)$$



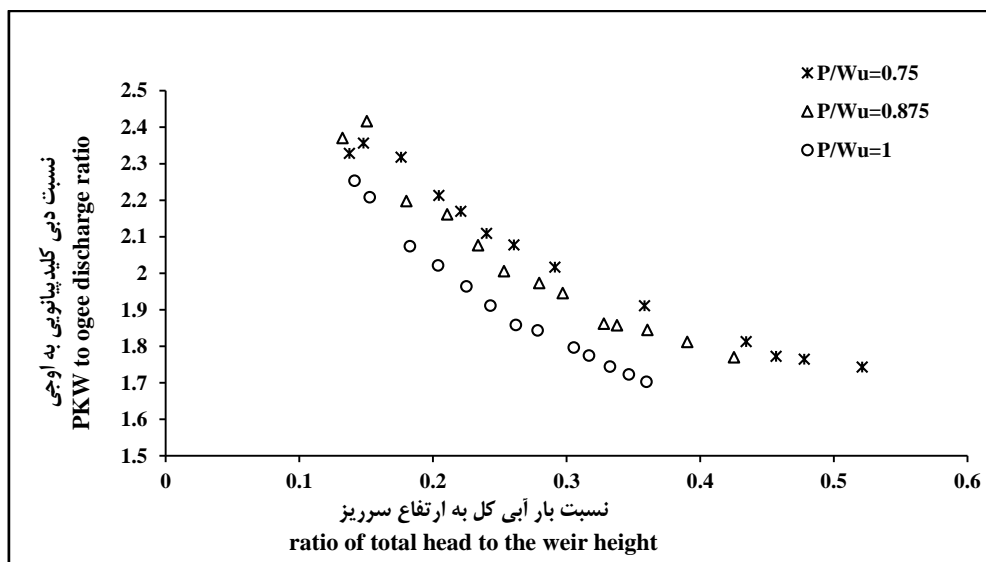
شکل ۹- مقایسه دبی عبوری از سرریزهای کلیدپیانویی با الف) سرریز اوجی و ب) سرریز لبه تیز  
 Fig. 9- Comparison of discharge capacity of PKWs with a) Ogee weir and b) Sharp-crested weir

آبی بالا نیز دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه ای ۱۲ درجه به ترتیب ۱/۵۸ و ۱/۷۴ برابر دبی عبوری از سرریز اوجی است. این موضوع نشان از راندمان بالای سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریزهای اوجی دارد. در شکل ۹-ب نیز مشخص است که در  $\frac{H_t}{P} = 0.15$ ، دبی عبوری از

در شکل ۹-الف مشخص است که در  $\frac{H_t}{P} = 0.15$ ، دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی ۲/۱ برابر دبی عبوری از سرریز اوجی و دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای با زاویه ۱۲ درجه حدود ۲/۳۵ برابر دبی عبوری از سرریز اوجی است. با افزایش بار آبی، نسبت  $\frac{Q_{PKW}}{Q_{ogee}}$  کاهش می یابد. در بار

شکل ۱۰، مقایسه دبی عبوری از سرریز دوزنقه‌ای با زاویه کلید ۱۲ درجه و نسبت‌های مختلف  $P/W_u$  را با دبی عبوری از سرریز اوجی نشان می‌دهد. مشخص است که در تمامی نسبت‌های ارتفاعی، دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی بیشتر از مقدار آن در سرریز اوجی است. با کاهش  $P/W_u$  از ۱ به  $0.875$  و از  $1$  به  $0.75$ ، مقدار نسبت  $\frac{Q_{PKW}}{Q_{ogee}}$  در شاخه نزولی به‌طور متوسط به ترتیب  $3/71$  و  $6/95$  درصد افزایش می‌یابد. بنابراین با کاهش مقدار  $P/W_u$ ، اختلاف دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی و سرریز اوجی افزایش می‌یابد.

سرریز کلیدپیانویی مستطیلی حدود  $2/5$  برابر دبی عبوری از سرریز لبه تیز و دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با زاویه  $12^\circ$  درجه، حدود  $2/80$  برابر دبی عبوری از سرریز لبه تیز است. با افزایش بار آبی، نسبت  $\frac{Q_{PKW}}{Q_{sh}}$  کاهش می‌یابد. تولیس و همکاران (Tullis et al., 1995) و اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2011) می‌گویند سرریزهای غیرخطی ظرفیت تخلیه جریان را حدود ۳ تا ۴ برابر نسبت به سرریزهای خطی افزایش می‌دهند. نتایج شکل ۹ با این نتیجه‌گیری همخوانی دارد.



شکل ۱۰- مقایسه دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی و سرریز اوجی در نسبت‌های مختلف  $P/W_u$   
 Fig. 10- Comparison of discharge capacity of PKWs with Ogee weir in different ratios  $P/W_u$

دوزنقه‌ای برابر ۴، ۸، ۱۲ و ۱۴ درجه انتخاب شد. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به‌شرح زیر است:  
 - در یک دبی مشخص، بار آبی کل بالادست در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کمتر است تا در نوع مستطیلی آن.  
 - ضریب دبی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است تا در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ضریب دبی و بار آبی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی بررسی و با یکدیگر مقایسه شد. برای سرریزهای کلیدپیانویی سه سیکل، طول کل تاج  $1/65$  متر، نسبت  $W_i/W_o=1$  و سه نسبت ارتفاعی  $P/W_u$  برابر  $0.75$ ،  $0.875$  و  $1$  در نظر گرفته شد. همچنین، زاویه دیوار جانبی کلید ( $\alpha$ ) برای سرریزهای کلیدپیانویی

- حداکثر ضریب دبی برای سرریز کلیدپیانویی ۱۲ - با افزایش  $P/W_u$  مقدار ضریب دبی کاهش می‌یابد.  
درجه و برابر ۰/۶۱۱ به دست آمد.  
- رابطه لمپریر برای تیپ A و در شرایط خاص ۱۲ درجه ۲/۳۵ برابر دبی عبوری از سرریز اوجی و هیدرولیکی جواب قابل قبول ارائه می‌دهد.  
۲/۸ برابر دبی عبوری از سرریز لبه‌تیز خطی است.

## قدردانی

این مقاله از رساله دکتری نویسنده اول در گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان استخراج شده است.

## مراجع

- Ahadian, J., & Afzalian, A. R. (2017). Applied analysis of pkw structures as a diversion dam. *Amirkabir Journal Civil Engineering*, 49(3), 459-472. (in Persian)
- Al-Shukur, A. H. K., & Al-Khafaji, G. H. (2018). Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), 63-70.
- Anderson, R. M. (2011). Piano key weir head discharge relationships (M. Sc. Thesis) Faculty of Hydraulic Structures, Utah State University, Logan, Utah.
- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2011). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4), 358-361.
- Anderson, R. M., & Tullis, M. (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3), 246-253.
- Anon. (2015). State and Federal Oversight of Dam Safety Must Be Improved. ASDSO. Available at <http://www.damsafety.org>.
- Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B. A., Lacroix, S., Laugier, F., & Vigny, J. P. (2006). Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or PK Weirs. 22<sup>nd</sup> ICOLD Congress. CIGB/ICOLD. June 18-23, Barcelona, Spain.
- Crookston, B. M., & Tullis, B. P. (2012a). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5), 363-370.
- Crookston, B. M., & Tullis, B. P. (2012b). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. II: Nappe aeration, instability, and vibration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5), 371-377. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000553](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000553)
- Crookston, B. M., Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2018). Free-flow discharge estimation method for piano key weir geometries. *Journal of Hydro-environment Research*, 19, 160-167.
- Hager, W. H., & Schleiss, A. J. (2009). Constructions hydrauliques, écoulements stationnaires (Hydraulic structures, steady flow). *Traité de Génie Civil*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.
- Hien, T. C., Son, H. T., & Khanh, M. H. T. (2006). Results of some piano keys weir hydraulic model tests in Vietnam. The 22<sup>nd</sup> Congress of ICOLD. June 18-23, Barcelona, Spain.
- Kabiri-Samani, A. R., & Javaheri, A. (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 114-120.

- Laugier, F., Pralong, J., & Blancher, B. (2011). *Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spillway discharge capacity. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs-PKW*. Feb. 9-11, Liège, Belgium. CRC Press.
- Lefebvre, V., Vermeulen, J., & Blancher, B. (2014). *Influence of geometrical parameters on PK-weir discharge with 3D numerical analysis. In: Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicéro, G.M., Schleiss, A. (Eds.), Labyrinth and Piano Key Weirs II*. CRC Press, Leiden, The Netherlands.
- Leite Ribeiro, M., Boillat, J. L., Schleiss, A., Singhal, G., & Sharma, N. (2012). Discharge capacity of piano key weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 199-203.
- Lempérière, F. (2009). New labyrinth weirs triple the spillways discharge—data for an easy design of PK Weir. Available at: [www.hydrocoop.org](http://www.hydrocoop.org).
- Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs (Ph. D Thesis) Faculty of Applied Science, University of Liège, Belgium.
- Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B., Archambeau, P., & Piroton, M. (2011). Experimental observation of flow characteristics over a piano key weir. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 359-366.
- Oertel, M., & Bremer, F. (2016). *Analysis of various piano key weir geometries concerning discharge coefficient development. 4<sup>th</sup> IAHR Europe Congress*. July 27-29, Liege Belgium.
- Ouamane, A., & Lempérière, F. (2006). *Design of a new economic shape of weir. International Symposium on Dams in the Societies of the 21<sup>st</sup> Century*. June 18, Barcelona, Spain. 18, 463-470.
- Poshteh-Shirani, M., Rahimpour, M., & Ahmadi, M. M. (2017). The effect of upstream overhang on the debris blocking and discharge capacity of piano key weirs. *Journal of Civil Engineering*, 30(2), 33-44. (in Persian)
- Pralong, J., Montarros, F., Blancher, B., & Laugier, F. (2011a). *A sensitivity analysis of piano key weirs geometrical parameters based on 3D numerical modeling. Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC Press, Liege, Belgium*.
- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J. L., Leite Ribeiro, M., & Schleiss, A. (2011b). *A naming convention for the piano key weirs geometrical parameters. International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW 2011, CRC Press*. Feb. 9-11, Liège, Belgium.
- Safarzadeh, A., & Noroozi, B. (2014). Three dimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulics*, 9(3), 61-79. (in Persian)
- Sajadi, S. M., Ahadyian, J., & Qanavati, M. (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)
- Tullis, J. P., Amanian, N., & Waldron, D. (1995). Design of labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 247-255.
- Yarmohammadi, B., & Ahadyian, J. (2017). Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. *Scientific Journal of Agriculture*, 39(4), 47-58. (in Persian)

## Experimental Study of Effect of Sidewall Angle and Weir Height on Total Head and Discharge Coefficient in Trapezoidal Piano Key Weir

M. Akbari Kheir-Abadi, M. Karami Moghadam\*, T. Sabzevari and Z. Ghadampour

\*Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University (PNU), Iran. Email: m\_karami\_mo@yahoo.com

Received: 3 December 2019, Accepted: 18 February 2020

### Extended Abstract

#### Introduction

The simplest form of non-linear weirs, the labyrinth weirs enjoy a high foot width as a disadvantage. A recently welcome type of the weirs, the piano key weir (PKW) possesses smaller foot width thanks to having ramps, overhangs, and parallel sidewalls (Crookstoon *et al.*, 2018). Several investigations were carried out on the performance of a PKW. Surveying on PKW with  $W_i/W_o=1.2$ , Anderson and Tullis (2013) got the fact that applying total head ( $H_t$ ) in the equation of Lamperier (2009) estimates the discharge higher by 10.1% on average and by 10.9% at most. In addition to the study of physical models, the 3D numerical simulation was done on PKW by Lefebvre *et al.* (2014) and Pralong *et al.* (2011b) yielding the results conforming with the experimental data. Most of the hitherto conducted researches were focused on RPKWs with few attention paid on the hydraulic of TPKWs. In this research, the impact of increase in the key angle and the weir's height in TPKWs on the total upstream head and on  $C_d$  were investigated. Also, the results obtained with reference to this type of weir were compared to the rectangular type as well as the recent works in the literature.

#### Materials and Methods

##### Laboratory Model

The experiments were conducted in the flume of hydraulic laboratory of Water and Power Organization of Khuzestan. The flume was of 7m length, 0.6m width, and 0.5m height. Five models were employed for the experiments in the free-flow condition. These include RPKW and TPKW with sidewalls making angles 4°, 8°, 12°, and 14° with the flow direction.

##### Experiment Process

Following the installment of one of the models in the flume, the flow was regulated with a certain discharge by means of a pump and a triangular weir. After the flow was stabilized, the water level at the upstream together with the water head on the weir ( $H$ ) was taken. Then, the total head ( $H_t$ ) and discharge coefficient were computed through the following:

$$H_t = H + \frac{V_u^2}{2g} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3}\sqrt{2g}L_i H_t^{1.5}} \quad (2)$$



Where,  $H_t$  (m) designates the total upstream head at the upstream,  $H$  (m) stands for the piezometric head relative to the weir elevation, and  $V_u$  (m/s) is the flow velocity at the upstream.

**Results and Discussion**

The relation between the ratio  $H_t/P$  and  $C_d$  is illustrated in Figure (1) for all the models used in this research.

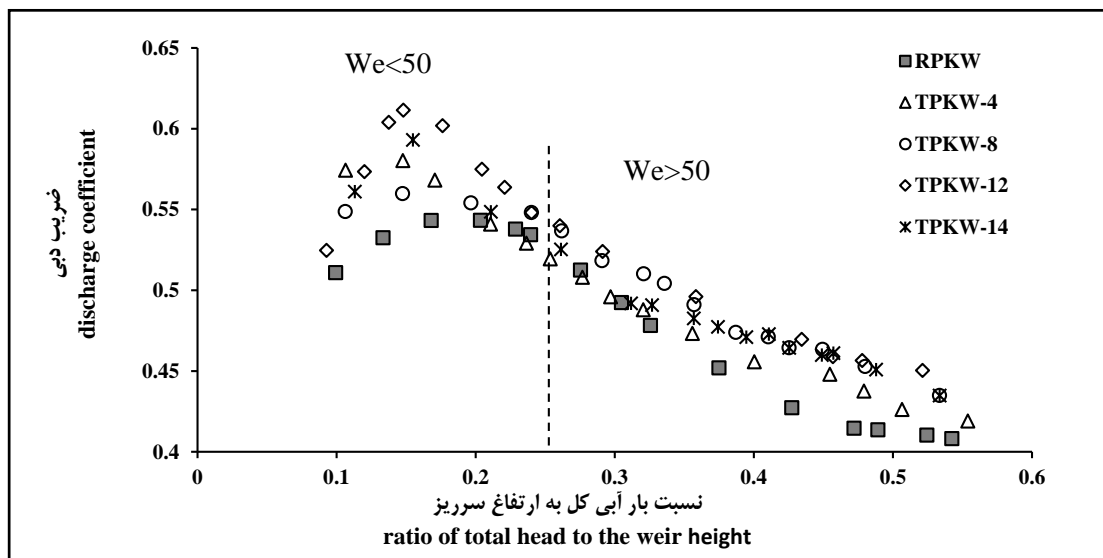


Fig. 1- Relation between  $H_t/P$  and  $C_d$  for all models

The maximum amount of the coefficient  $C_d$  for RPKWs and TPKWs with key angles  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$ , and  $14^\circ$  were attained, respectively as 0.54, 0.58, 0.56, 0.611, and 0.59. This guarantees that the maximum discharge coefficient belongs to TPKW with sidewall angle  $12^\circ$ . The figure also substantiates that  $C_d$  takes less values in RPKWs respective to TPKWs, a fact agreeing with the findings of Safarzadeh and Noroozi (2014). Figure (2) draws the curve of  $H_t/P$  against  $C_d$  for three height ratios  $P/W_u$ .

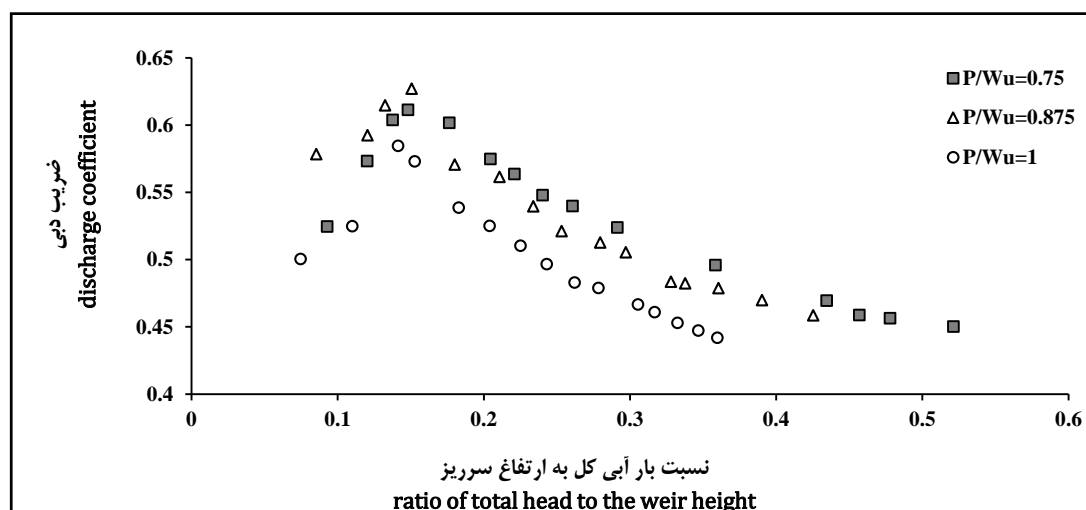


Fig. 2- Relationship between  $H_t/P$  and  $C_d$  in different height ratios  $P/W_u$

As observed, for all the ratios, first the  $C_d$  value grows and reaches its maximum, and then decreases. The decrease in  $C_d$  values occurs also along with an increase in the ratio  $P/W_u$ . The differences among the values of  $C_d$  in various ratios of  $P/W_u$  broaden as the ratio  $H/P$  increases. So, there is a reverse relationship between  $C_d$  and  $P/W_u$ .

### **Conclusion**

In this research, the discharge coefficient and the total heads of trapezoidal and rectangular piano key weirs were studied and compared. Three cycles, total crest length of 1.65 m, the ratio  $W_i/W_o=1$ , and three height ratios 0.75, 0.875, and 1 were adopted for the key piano weirs. The sidewall angles of the key for the trapezoidal piano key weirs were selected as 4°, 8°, 12°, and 14°. The most important results obtained were as follows:

- In a certain discharge, the total upstream head of TPKW is less than that of the rectangular counterpart.
- The discharge coefficient value in TPKW is greater than in RPKW.
- The highest discharge coefficient 0.611 corresponded to the 12° piano key weir.
- The Lampiere's equation (2009) provides an acceptable solution for type A and in particular situations.
- An increase in  $P/W_u$  leads to a decrease in discharge coefficient value.
- The maximum discharge capacity of the 12° TPKW is 2.35 times that of ogee weir, and it is 2.8 times that of the linear sharp-crested weir.

### **Acknowledgement**

This article was excerpted from a Ph.D. thesis in Water and Hydraulic Structures, Islamic Azad University, Estahban Branch.

**Keywords:** Discharge Coefficient, Labyrinth Weir, Local Submergence, Surface Tension