

## بررسی تحلیلی-انتگرالی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی با دیواره‌های سپری پیوسته و ناپیوسته

بهاره یارمحمدی<sup>۱</sup>، جواد احدیان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

### چکیده

در سال‌های اخیر، با توجه به ظرفیت تخلیه بالای سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای خطی و همچنین افزایش حجم ذخیره مخازن سدها، کاربرد آن‌ها فزونی یافته است. با توجه به کاهش عملکرد سرریزهای کلید پیانویی در بارهای آبی زیاد، پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی ترکیب‌های مختلف دیواره سپری بدون شیب منقطع و شیب‌دار در طول‌های مختلف بر عملکرد سرریز کلید پیانویی می‌پردازد. نتایج آزمایش‌های این تحقیق که در یک کانال آزمایشگاهی انجام شد، نشان داد که با روش حل انتگرالی، قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر روی تاج جانبی سرریز با ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متری حدود ۳۵ درصد عملکرد سرریز را بهبود می‌بخشد. این در حالی است که قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر کل تاج سرریز افزایش ۱۴/۸ درصدی راندمان سرریز را در پی داشت. همچنین قرارگیری دیواره سپری شیب‌دار نیز منتج به بهبود عملکرد سرریز شد. در واقع مطابق با روش مذکور، مشخص گردید که قرارگیری دیواره‌های سپری غیرپیوسته کارایی هیدرولیکی سرریز را بهبود می‌بخشد. در نهایت نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، دو رابطه جهت تخمین ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با وجود دیواره سپری بدون شیب و شیب‌دار استخراج شد که به ترتیب دارای ضریب تعیین ۰/۷۸۳ و ۰/۹۴۱ و شاخص‌های اندازه‌گیری خطا، RMSE و MAE، برای مدل‌های بدون شیب، به ترتیب برابر با ۰/۰۴۸ و ۰/۰۲۹، و برای مدل‌های شیب‌دار به ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۲۵ بود.

واژه‌های کلیدی: حل تحلیلی انتگرالی، دیواره سپری بدون شیب منقطع، دیواره سپری شیب‌دار، سرریزهای کلید پیانویی.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ۰۹۱۶۸۴۲۸۲۱۸ .bahareh\_yarmohammadi@yahoo.com (مسئول مکاتبه)

<sup>۲</sup> دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، ۰۹۱۶۸۲۴۴۹۰۰ .ja\_ahadiyan@yahoo.com

## مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا برای حجم ذخیره مخزن بیشتر، افزایش حجم حوادث محتمل، و نیاز مداوم به بهبود ایمنی سدها، ظرفیت تخلیه بسیاری از سرریزهای موجود در حال حاضر ناکافی بوده و نیاز به بازسازی و یا جایگزینی دارند (Anderson and Tullis, 2013). در این چارچوب مؤسسه هیدروکوپ<sup>۱</sup> فرانسه با همکاری دانشگاه بیسکرا<sup>۲</sup> در الجزایر یک هندسه جدید از سرریز با قابلیت ظرفیت تخلیه بالاتر نسبت به سایر سرریزها را معرفی نمودند (Machiels, 2012). سرریزهای کلید پیانویی<sup>۳</sup> شکل توسعه یافته سرریزهای زیگزاگی با فوندانسیون کوچکتتر می‌باشند که توسط (Blanc and Lempérière, 2001) و (Lempérière and Ouamane, 2003) به منظور تسهیل در نصب سرریز بر روی تاج سدها و بهبود ظرفیت تخلیه سدها توسعه یافت. مطالعات (Ouamane and Lempérière, 2006a) نشان داد که ظرفیت تخلیه سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریز اوجی در یک هد و طول تاج برابر حدود سه تا چهار برابر کارآمدتر است، همچنین این محققین بیان نمودند که برای مقادیر کم  $H_t/P$ ، مقدار  $N=1/5$  (تعداد سیکل‌ها) منجر به دستاوردهای قابل توجهی در بهره‌وری می‌شود؛ این در حالی است که در  $H_t/P$  زیاد، مقدار بزرگ  $N$  (تعداد سیکل‌ها) تأثیر چندانی در افزایش بهره‌وری تخلیه ندارد. (Leite Ribeiro et al., 2009) با بررسی تأثیر دیواره سپری بر عملکرد سرریز کلید پیانویی با افزایش ۱۲/۳ درصدی ارتفاع سرریز، افزایش ۱۵ درصدی راندمان هیدرولیکی سرریز را در سد اثرویت گزارش نمودند. (Anderson and Tullis, 2011) وجود شیروانی‌ها و نصب دماغه در زیر شیروانی‌های بالادست را مؤثر

گزارش نمودند. سرریز کلید پیانویی با وجود یک ساختار خاص و پیچیده با حضور شیروانی‌ها، کلیدهای ورودی و خروجی شیبدار شامل یک مجموعه بزرگ پارامترهای هندسی است که با شرح جزئیات توسط (Pralong et al., 2011) نام‌گذاری و ارائه شد. با توجه به مطالعات سه بعدی انجام شده توسط (Laugier et al., 2011)، ضخامت دیوارهای جانبی تأثیر مهمی بر ظرفیت تخلیه PKW (تا حدود ۲۰ درصد) دارد، در واقع ظرفیت تخلیه PKW با کاهش ضخامت دیوارها افزایش می‌یابد. (Machiels et al., 2012) با بررسی فنی-اقتصادی ابعاد بهینه‌ای برای پارامترهای مختلف سرریز کلید پیانویی را ارائه نمودند. (Machiels et al., 2013) با بررسی تأثیر دیواره سپری بر عملکرد سرریز کلید پیانویی بیان نمودند که استفاده از دیواره سپری زمانی مؤثر واقع می‌گردد که ارتفاع کل سرریز کمتر از مقدار بهینه باشد. (Anderson et al., 2013) با بررسی هندسه‌های مختلف سرریز کلید پیانویی به این نتایج رسیدند که ضریب دبی سرریز با افزایش نسبت  $W_i/W_o$  افزایش یافته و محدوده بهینه آن را بین  $1/5$  و  $1/25$  تعیین نمودند، بطوریکه در نسبت‌های  $W_i/W_o = 1/25$  سرریز با نسبت  $H_t/P > 0/6$  متوسط راندمان تخلیه بالاتر و در نسبت‌های  $0/6 < H_t/P$  سرریز با نسبت  $W_i/W_o = 1/5$  متوسط راندمان تخلیه بالاتری را ایجاد می‌کند.

(Kabiri-Samani and Javaheri, 2012) با بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف رابطه‌ای جهت برآورد ضریب دبی در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه دادند. (افضلیان، ۱۳۹۳) با بررسی هندسه‌های مختلف پایه و تاج جانبی به این نتیجه رسید که پایه مثلثی بیشترین عملکرد سرریز کلید پیانویی را در مقابل سایر پایه‌های بررسی شده از خود نشان می‌دهد، همچنین بیان نمود دیواره سپری بدون شیب استفاده شده در سرریز با بهینه اقتصادی منجر

1- Hydrocoop

2- Biskra University

3- Piano Key Weirs (PKW)

با توجه به اینکه معمولاً عدد رینولدز جریان در کانال رو باز به اندازه کافی بزرگ است، بنابراین می‌توان از اثر ویسکوزیته در مقایسه با اثر گرانش صرف‌نظر نمود (Henderson, 1966). با توجه به ثابت بودن هندسه سرریز و با بکارگیری تکنیک آنالیز ابعادی رابطه نهایی پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی در این تحقیق به شرح زیر خواهد بود:

$$C_d = f\left(\frac{H_t}{p}, \frac{H}{R}, S, We, Fr\right) \quad (2)$$

### تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های تجربی مربوط به این تحقیق در یک کانال آزمایشگاهی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز در ابعاد طول ۱۰ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. دیواره‌های فلوم از جنس شیشه، کف فلوم فولاد ضد زنگ و شیب کف فلوم صفر است. شکل (۱) مقطع کانال آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

به بهبود عملکرد سرریز و بکارگیری دیواره سپری شیبدار منجر به افزایش تراز آبی بالادست می‌گردد. با توجه به تأثیر مثبت پایه مثلثی در بهبود هیدرولیکی سرریز در تمامی آزمایش‌های این پژوهش از پایه مثلثی استفاده شد. مطابق مطالعات پیشین صورت گرفته تأثیر دیواره سپری بدون شیب منقطع و دیواره سپری شیبدار کمتر مورد توجه قرار گرفته است، لذا با توجه به اهمیت این موضوع و ارائه راهکارهای طراحی در جهت کاربردی نمودن نتایج تحقیق، در پژوهش حاضر اثر عدم پیوستگی دیواره‌های سپری با استفاده از روش حل تحلیلی انتگرالی مورد بررسی واقع شده است.

### مواد و روش‌ها

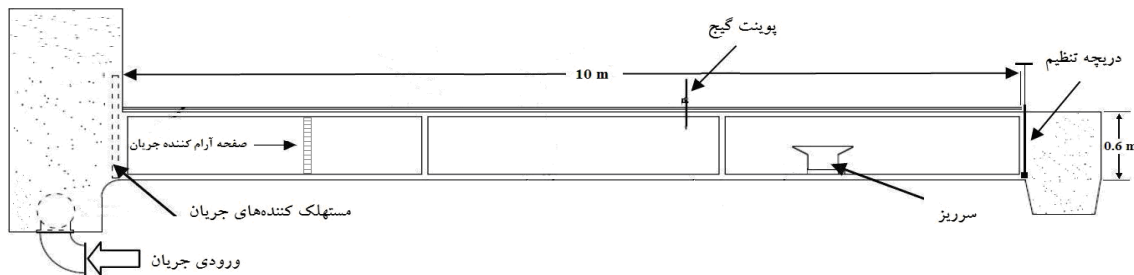
همانگونه که در بخش مقدمه اشاره شد، دیواره سپری می‌تواند نقش مثبتی در راندمان سرریز در پی داشته باشد؛ در این راستا با توجه به اهداف مدنظر در تحقیق حاضر، بکارگیری ترکیب‌های مختلف دیواره سپری مورد آزمون و بررسی واقع شد.

### آنالیز ابعادی

به منظور دستیابی به روابط بدون بعد مؤثر، اقدام به تحلیل ابعادی بین پارامترهای تأثیرگذار در پژوهش حاضر شد. تابع کلی پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه در این تحقیق را می‌توان بصورت معادله زیر بر شمرد:

$$f(H, P, R, S, g, \sigma, \rho, \mu, \nu) = 0 \quad (1)$$

پارامترهای هندسی شامل ارتفاع سرریز،  $P$ ، ارتفاع دیواره سپری،  $R$ ، زاویه دیواره سپری روی تاج جانبی،  $S$ ، می‌باشند. پارامترهای مربوط به خصوصیات جریان و سیال نیز شامل دبی جریان،  $Q$ ، عمق جریان در بالادست سرریز،  $H$ ، سرعت بالادست،  $v$ ، شتاب ثقل،  $g$ ، جرم واحد حجم مایع،  $\rho$ ، لزجت دینامیکی،  $\mu$ ، کشش سطحی،  $\sigma$ ، می‌باشند.



شکل (۱): مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

(Case B)، (ج) کل تاج سرریز، (Case C)، ۳-  
آزمایش‌های بررسی اثر دیواره سپری شیبدار با در نظر  
گرفتن ۴ طول مختلف دیواره سپری  $B \times (1 \text{ و } 0.75)$ ،  
 $B' = (0.25, 0.5)$

در جدول (۱) بخشی از داده‌های آزمایشگاهی  
مربوط به قرارگیری دیواره سپری بدون شیب  $4/5$   
سانتی‌متری بر روی تاج جانبی سرریز و قرارگیری  
دیواره سپری شیبدار  $2/5$  سانتی‌متری بر تاج جانبی  
سرریز به طول  $B' = 0.75B$  ارائه شده است.

محدوده تغییرات دبی بین ۵ تا ۱۶۰ لیتر بر ثانیه  
است. مدل‌های سرریز از جنس پلکسی‌گلاس با  
ضخامت ۱۰ میلی‌متری ساخته شد. با توجه به  
مطالعات (Machiels et al., 2012)، در پژوهش  
حاضر با لحاظ نسبت بهینه  $w_i/w_o$  برابر با  $1/5$  و  
بهینه اقتصادی نسبت  $P/w_{II}$  بترتیب برابر با  $0.5$  و  
بهینه اقتصادی نسبت  $B_i/B_o$  برابر با ۱ و با  
در نظر گرفتن عرض کل سرریز برابر با ۸۰ سانتی‌متر،  
سرریز کلید پیانویی تیپ A با  $3/5$  سیکل ساخته شد.  
در هر آزمایش، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ  
به فلوم آزمایشگاهی منتقل و اندازه‌گیری‌ها (شامل  
قرائت ارتفاع سطح آب و دبی) انجام گردید. قرائت  
ارتفاع سطح آب در بالادست سرریز به وسیله عمق  
سنج نقطه‌ای و دبی جریان توسط یک سرریز  
مستطیلی به عرض ۱ متر مستقر در انتهای فلوم  
اندازه‌گیری شد. در قسمت ورودی فلوم آزمایشگاهی،  
از مستهلک‌کننده‌های جریان، برای آرام‌تر شدن جریان  
ورودی به سرریز و کاهش نوسانات سطح آب بالادست  
سرریز استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در شرایط زیر  
بحرانی صورت گرفت. در مجموع با بکارگیری ۳ ارتفاع  
دیواره سپری ( $2/5$ ،  $3/5$  و  $4/5$  سانتی‌متری)، ۲۲۰  
آزمایش با ۲۲ مدل آزمایشگاهی در این ارتباط انجام  
شد که مدل‌ها به شکل زیر ارائه شدند: ۱-  
آزمایش‌های بدون دیواره سپری به عنوان مدل شاهد،  
۲- آزمایش‌های اثر دیواره سپری بدون شیب بر روی  
سرریز کلید پیانویی، بر روی (الف) تاج‌های جانبی،  
(Case A)، (ب) تاج‌های جانبی و تاج کلید ورودی،

جدول (۱): بخشی از داده‌های آزمایشگاهی

دیواره سپری بدون شیب		دیواره سپری شیبدار	
دبی (m <sup>3</sup> /s)	(m)	دبی (m <sup>3</sup> /s)	(m)
۰/۰۱۶	۰/۰۳۲	۰/۰۰۹	۰/۰۴۲
۰/۰۲	۰/۰۴۱	۰/۰۱۰	۰/۰۴۳
۰/۰۴۰	۰/۰۵۳	۰/۰۲۰	۰/۰۵۶
۰/۰۶۱	۰/۰۷۴	۰/۰۴۳	۰/۰۷۵
۰/۰۷۳	۰/۰۸۸	۰/۰۵۹	۰/۰۸۹
۰/۰۸۲	۰/۰۹۹	۰/۰۷۲	۰/۱۰۱
۰/۰۸۹	۰/۱۰۹	۰/۰۸۵	۰/۱۱۲
۰/۰۹۵	۰/۱۱۶	۰/۰۹۷	۰/۱۲۴
۰/۰۹۹	۰/۱۲۱	۰/۱۰۶	۰/۱۳۴
۰/۱۰۵	۰/۱۲۸	۰/۱۱۵	۰/۱۴۴

شود، لذا دبی تئوری با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌گردد.

$$Q_{tr} = Q_{wi} + Q_{wo} + Q_{sw} \quad (4)$$

در این رابطه:

$Q_{wi}$ : دبی عبوری از بخش کلید ورودی،

$Q_{wo}$ : دبی عبوری از بخش کلید خروجی و

$Q_{sw}$ : دبی عبوری از تاج‌های جانبی می‌باشند.

در نهایت ضریب دبی مربوط به هر آزمایش توسط معادله (۵) محاسبه می‌شود؛

$$Q_a = C_d \cdot Q_{tr} \quad (5)$$

که در این رابطه:

$Q_a$ : دبی واقعی جریان،

$Q_{tr}$ : دبی تئوری و

$C_d$ : ضریب دبی جریان می‌باشند.

با توجه به تحقیقات پیشین و مشاهدات در روند آزمایش‌ها، مشاهده شد که پروفیل سطح آب عبوری از سرریز کلید بیانویی در طول تاج جانبی متغیر است که در شکل (۲) شماتیکی از پروفیل سطح آب ارائه شده است.

به طور کلی تحلیل داده‌های دبی-اشل همانند آنچه که در جدول (۱) آورده شده است، نشان داد که قرارگیری دیواره سپری شیبدار بر تاج جانبی سرریز باعث افزایش عملکرد سرریز می‌شود.

## نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها، به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های جمع آوری شده، از معادله عمومی سرریزها، معادله (۳)، استفاده شد.

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

که در این معادله:

$Q$ : دبی،

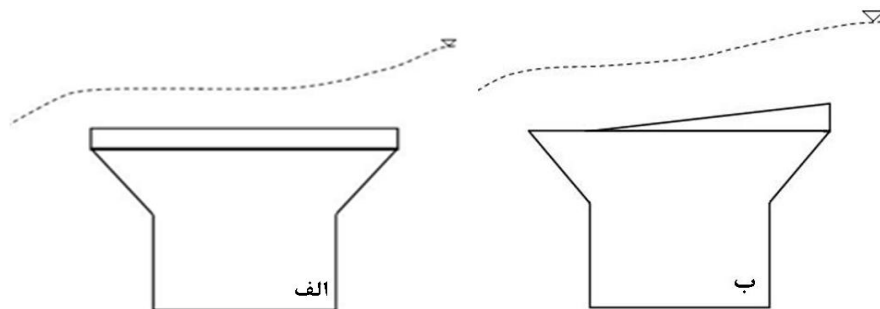
$C_d$ : ضریب سرریز،

$g$ : شتاب ثقل،

$L$ : طول تاج و

$H_t$ : هدکل بالادست می‌باشند.

نکته قابل توجه اینکه قرارگیری مقطعی دیواره‌های سپری بدون شیب بر روی تاج سرریز، باعث می‌شود بار آبی در بخش‌های مختلف سرریز متغیر



شکل (۲): شماتیکی از پروفیل سطح آب با قرارگیری دیواره سپری الف: بدون شیب، ب: شیبدار

انتگرال گیری عددی سیمپسون مرکب، معادله (۷)، مقدار دبی محاسبه شد.

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} [f(a) + f(b)] + \frac{2h}{3} \sum_{k=1}^{M-1} f(x_{2k}) + \frac{4h}{3} \sum_{k=1}^M f(x_{2k-1}) \quad (7)$$

که در این معادله:

$$h \text{ برابر است با } (b-a)/2M$$

$$k \text{ برابر است با } 0, 1, \dots, 2M$$

به این ترتیب طبق روش مذکور، معادلات دبی تئوری برای دیواره‌های سپری بدون شیب و شیبدار بر اساس جدول (۲) استخراج شد.

شکل (۳) پارامترهای مشخصه در معادلات ارائه شده را نمایش می‌دهد.

همانگونه که در شکل (۲) نمایان است ارتفاع آب بر روی تاج جانبی متغیر است، به همین دلیل در پژوهش حاضر دبی عبوری از بخش تاج جانبی با استفاده از انتگرال گیری و با در نظر گرفتن پروفیل سطح آب صورت پذیرفت. رابطه‌ی دیفرانسیلی دبی تخلیه برای سرریز جانبی به صورت معادله (۶) است؛

$$Q_s = \sqrt{2g} \int_a^b (y-p')^{1.5} dx \quad (6)$$

که در این رابطه:

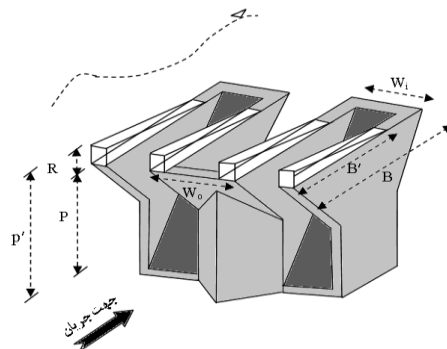
$y$ : ارتفاع سطح آب و

$p'$ : ارتفاع تاج سرریز از کف کانال است.

با توجه به متغیر بودن ارتفاع سطح آب در طول تاج جانبی و مشخص نبودن رابطه ریاضی این تغییرات، حل این انتگرال میسر نمی‌شود، به همین دلیل با استفاده از روش

جدول (۲): معادلات دبی تئوری

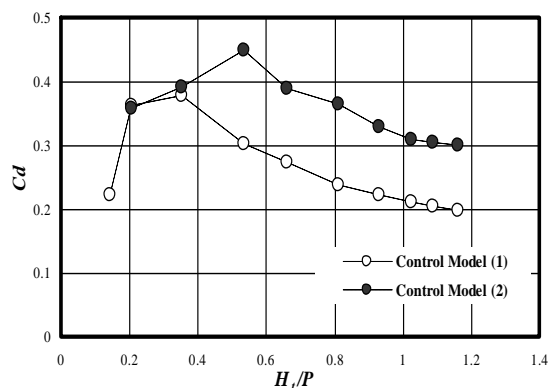
قرارگیری دیواره سپری	معادله
بدون شیب روی کل تاج سرریز $\int_0^B (y-p')^{1.5} dx$	$(8) Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_i)(H-R)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_o)(H-R)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \int_0^B (y-p')^{1.5} dx$
بدون شیب روی کلید ورودی و تاج جانبی $\int_0^B (y-p')^{1.5} dx$	$(9) Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_i)(H-R)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_o)(H)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \int_0^B (y-p')^{1.5} dx$
بدون شیب روی تاج جانبی $\int_0^B (y-p')^{1.5} dx$	$(10) Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_i)(H)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_o)(H)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \int_0^B (y-p')^{1.5} dx$
شیبدار روی تاج جانبی $\int_0^{B'} (y-p')^{1.5} dx + \int_{B'}^B (y-p')^{1.5} dx$	$(11) Q_{tr} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_i)(H)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (nw_o)(H)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \left[ \int_0^{B'} (y-p')^{1.5} dx + \int_{B'}^B (y-p')^{1.5} dx \right]$



شکل (۳): نمایش پارامترهای موجود در معادلات تئوری ارائه شده

بدین ترتیب مطابق روابط ارائه شده ضریب دبی جریان محاسبه شد و نمودارهای مربوط به مدل‌های آزمایشی ترسیم شد. شکل (۴) روند تغییرات ضریب دبی جریان در برابر نسبت بدون بعد  $H_t/P$  را در مدل بدون دیواره سپری با استفاده از معادله عمومی سرریزها و روش تحلیل انتگرالی نشان می‌دهد.

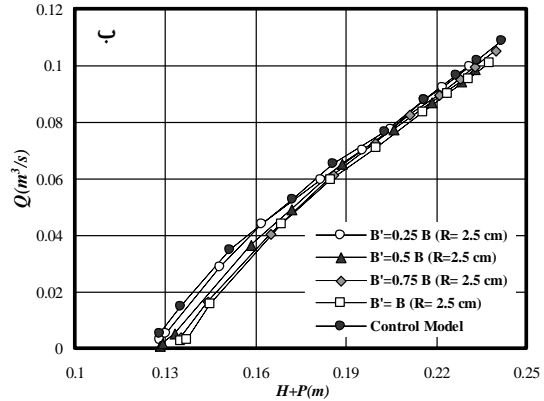
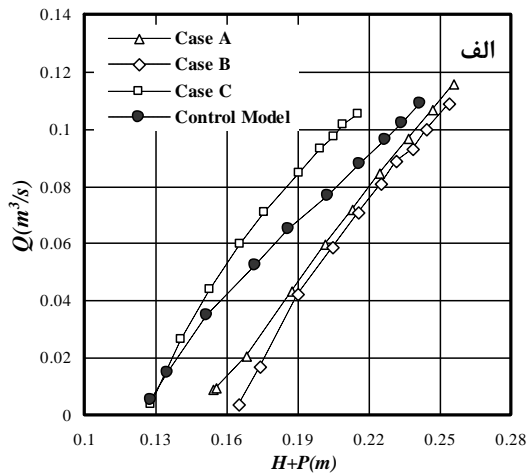
در شکل (۳) عرض کلید ورودی،  $W_0$ ، عرض کلید خروجی،  $B$ ، طول تاج جانبی،  $B'$ ، طول دیواره سپری شیبدار،  $P$ ، ارتفاع سرریز،  $R$ ، ارتفاع دیواره سپری،  $P'$ ، ارتفاع تاج سرریز تا کف کانال، نمایش داده شده است.



شکل (۴): نمودار  $H_t/P$  در برابر  $C_d$  برای مدل شاهد (۱): با استفاده از معادله عمومی سرریزها و مدل شاهد (۲): با استفاده از روش حل تحلیل انتگرالی

انتگرال‌گیری عددی کمتر از ارتفاع سطح آب بالادست سرریز است که در معادله عمومی سرریزها بکار می‌رود. شکل (۵) نمودار تراز سطح آب-دبی را برای مدل‌های دیواره سپری بدون شیب  $4/5$  سانتی‌متری و دیواره سپری شیبدار  $2/5$  سانتی‌متری نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با بکارگیری روش حل تحلیل انتگرال‌گیری عددی، ضریب دبی جریان به طور متوسط افزایش ۴۰ درصدی را در پی دارد. این افزایش در ضریب آبگذری به این دلیل است که ارتفاع آب روی سرریز و پروفیل سطح آب در نظر گرفته شده در روش حل

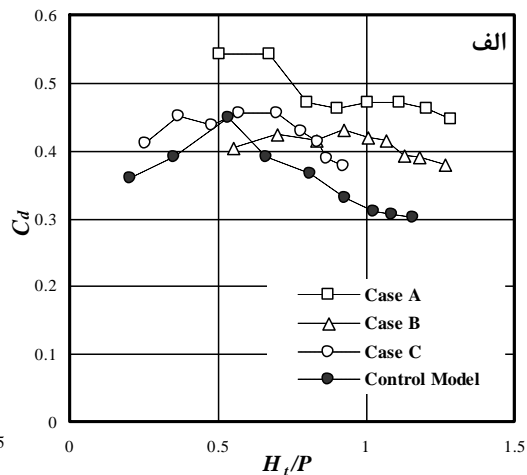
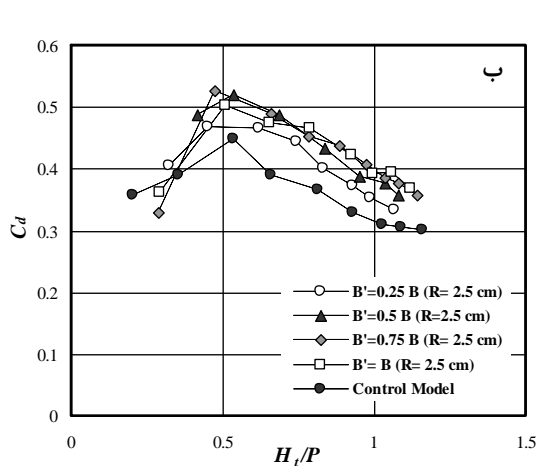


ش

کل (۵): نمودار دبی - تراز سطح آب برای مدل‌های دیواره سپری الف: بدون شیب، ب: شیبدار

در یک هد ثابت، دبی بیشتری را عبور می‌دهد. ولی در مجموع وجود آن‌ها خیلی اثرگذار در دبی اشل نیست. شکل (۶) نمودارهای روند تغییرات ضریب آبگذری در برابر  $H_t/P$  در مدل‌های دیواره سپری بدون شیب ۴/۵ سانتی‌متری و دیواره سپری شیبدار ۲/۵ سانتی‌متری با روش حل انتگرال‌گیری عددی نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل (۵- الف) مشخص است قرارگیری دیواره سپری بدون شیب پیوسته در یک هد ثابت، دبی بیشتری را عبور می‌دهد. از طرفی قرارگیری مقطعی دیواره سپری بدون شیب در بار آبی کم افزایش سطح آب را نشان می‌دهد. اما با توجه به شیب نمودارها مشخص است که در بارهای آبی زیاد می‌تواند مؤثر واقع شود. با توجه به شکل (۵- ب) مشاهده می‌شود که مدل شاهد در بارهای آبی کم و

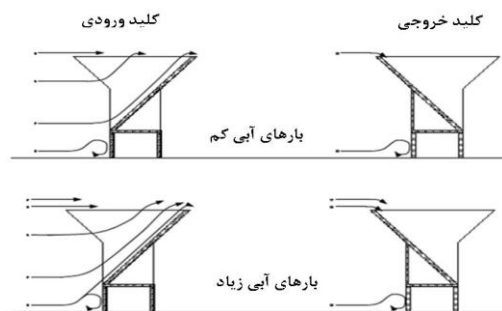


شکل (۶): منحنی روند تغییرات  $C_d$  در برابر  $H_t/P$  در مدل‌های الف: دیواره سپری بدون شیب ۴/۵ سانتی‌متری، ب: دیواره سپری شیبدار ۲/۵ سانتی‌متری



شیبدار منتج به افزایش ضریب آبگذری و در نتیجه بهبود عملکرد سرریز شده است. با توجه به شکل (۶-۶) الف)، مشخص است که قرارگیری دیواره سپری بر روی تاج جانبی بیشترین درصد افزایش ضریب دبی، حدود ۳۵ درصد، را داشته است. طبق روش حل تحلیل انتگرال گیری عددی و با قرارگیری دیواره سپری بدون شیب ضریب دبی جریان در ابتدا روند صعودی داشت تا به یک حد نهایی برسد. سپس با افزایش بار آبی شروع به کاهش نموده و در ادامه مجدداً روند صعودی و نزولی اما با شیب ملایم تر داشته است. این موضوع به این دلیل می باشد که در ابتدا بدلیل عدم تداخل تیغه جریان عبوری از روی کلید خروجی و تاج جانبی، استغراق محلی روی کلید خروجی رخ نداده و ضریب دبی روند صعودی را طی می کند؛ اما با افزایش دبی و بار آبی بالادست سرریز، استغراق محلی در ابتدای کلید خروجی و تاج جانبی به وقوع پیوسته که منجر به کاهش سهم تخلیه برای کلید خروجی و ابتدای تاج جانبی می گردد. در نتیجه ضریب دبی جریان کاهش می یابد. در ادامه با افزایش دبی و سرعت جریان نقطه شروع استغراق به سمت جلو کشیده شده و تداخل ابتدای کلید خروجی کاهش می یابد. بنابراین در این حالت مجدداً ضریب دبی روند صعودی خواهد داشت. در ادامه به دلیل تداخل بیشتر تیغه های جریان در طی افزایش دبی جریان، ضریب دبی مجدداً روند نزولی داشته تا به یک مقدار ثابت برسد. با توجه به شکل (۶-۶) ب)، مشاهده می شود که دیواره سپری شیبدار نیز در افزایش بهره وری سرریز مؤثر بوده است؛ به طوری که قرارگیری دیواره های سپری شیبدار به طول  $B' = 0.75B$  و  $B' = B$ ،  $B' = 0.5B$ ،  $B' = 0.25B$  بترتیب ۱۲، ۲۰، ۲۶ و ۲۶/۵ درصد افزایش در ضریب دبی جریان را در بر داشتند. شایان ذکر است که نمودارهای  $B' = B$  و  $B' = 0.75B$  تقریباً بر هم منطبق می باشند؛ ولی در بارهای آبی کم  $B' = 0.75B$  ضریب دبی بالاتری را باعث می شود. شکل (۸) روند تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به عدد فرود بالادست سرریز

طبق مطالعات (Machiels, 2012)، در بارهای آبی کم، خطوط جریان بدون فشردگی و به صورت نسبتاً مشابه در طول کل تاج سرریز توزیع می شوند. بخش پایین دست تاج کلید ورودی عمدتاً توسط جریان تحتانی و بخش بالادست تاج کلید خروجی عمدتاً با جریان سطحی کنترل می شود. از طرفی نیز بخش پایین دست تاج جانبی توسط جریان پیشرونده کلید ورودی و بخش بالادست آن توسط جریان پیشرونده کلید خروجی، زیر سطح تاج، کنترل می شود. در بارهای آبی بالا، توزیع خطوط جریان به صورت فشرده می باشد. در واقع، مطابق با شکل (۷) ص، هیدرولیک جریان به شکلی است که در راستای شیب در حال حرکت است که با جریان سطحی عبوری از تاج جانبی (که دارای سرعت بالایی است) تداخل نموده و باعث می شود، تخلیه تاج جانبی در شرایط آزاد صورت نپذیرد. در این حالت، تخلیه از تاج جانبی کاهش یافته و ظرفیت نهایی سرریز کاهش می یابد.

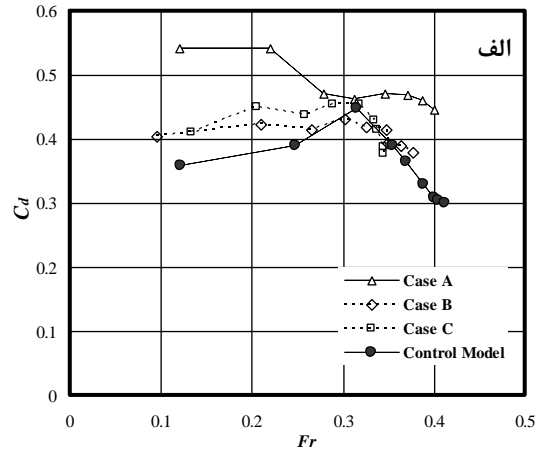
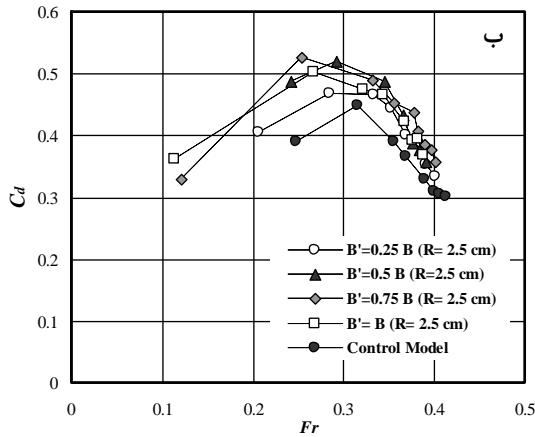


شکل (۷): توزیع خطوط جریان بر روی کلیدهای ورودی و خروجی، (Machiels, 2012)

همچنین طبق مطالعات (Machiels et al., 2013)، استفاده از دیواره سپری زمانی تأثیرگذار است که ارتفاع سرریز از ارتفاع بهینه کمتر باشد، در غیر این صورت تنها اثر دیواره سپری، افزایش ارتفاع سرریز است. با توجه به اینکه سرریز کلید پیانویی در پژوهش حاضر با لحاظ نمودن شرایط بهینه اقتصادی، طراحی شده است، لذا ارتفاع سرریز از بهینه هیدرولیکی کمتر بوده و همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می شود استفاده از دیواره سپری در هر دو حالت بدون شیب و

نشان می‌دهد.

در هر دو حالت دیواره سپری بدون شیب و شیب‌دار را



شکل (۸): تغییرات ضریب دبی جریان در برابر عدد فرود بالادست سرریز برای مدل‌های الف: بدون شیب، ب: شیب‌دار

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^K (X_K - Y_K)^2}{K}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{\sum_{K=1}^K |X_K - Y_K|}{K} \quad (13)$$

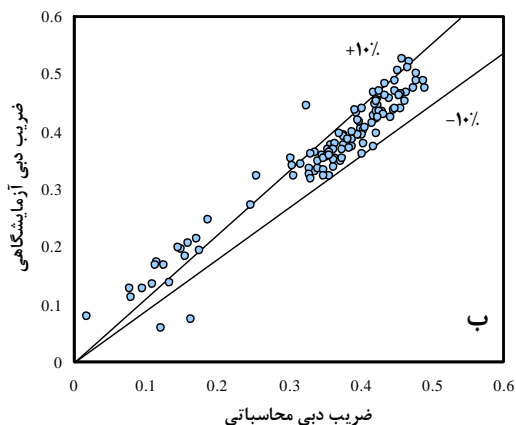
که در این روابط  $X_K$ ، مقادیر اندازه‌گیری شده،  $Y_K$ ، مقادیر برآورد شده و  $K$ ، تعداد داده‌ها می‌باشند. روابط استخراج شده از نرم‌افزار SPSS، برای مدل بدون‌شیب، رابطه (۱۴)، و مدل شیب‌دار، رابطه (۱۵)، بصورت زیر قابل ارائه می‌باشند.

$$C_d = -2.609 \left(\frac{H_t}{P}\right)^{-0.234} + 0.682 \left(\frac{H}{R}\right)^{-0.475} + \ln(\text{Fr}) - 0.45 \ln(\text{We}) + 6.35 \quad (14)$$

$$C_d = 49.457 \left(\frac{H_t}{P}\right)^{0.106} - 0.084 \left(\frac{H}{R}\right)^{0.324} + 7.77 \ln(\text{Fr}) - 3.811 \ln(\text{We}) - 0.049 \ln(\text{S}) - 18.285 \quad (15)$$

از آنجا که طبق مطالعات (Machiels, 2012)، یک ناحیه بحرانی در امتداد کلید ورودی وجود دارد، بنابراین راندمان سرریز در بارهای آبی کم بستگی به سرعت جریان و عدد فرود جریان خواهد داشت. با توجه به منحنی‌های ارائه شده در شکل (۸) در یک عدد فرود ثابت، قرارگیری دیواره سپری بر روی تاج جانبی در مدل بدون شیب و قرارگیری دیواره سپری به طول  $B' = 0.75B$  در مدل شیب‌دار ضریب دبی بالاتری را از خود نشان می‌دهد. در واقع افزایش سرعت جریان و در نتیجه آن افزایش عدد فرود، اتلاف انرژی در بخش ورودی را افزایش داده و از راندمان کلی سرریز می‌کاهد.

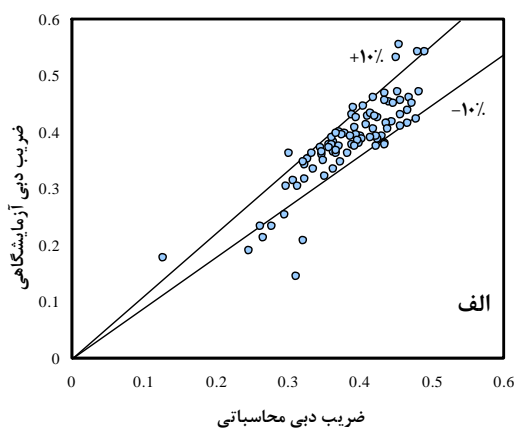
در ادامه این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، روابطی جهت تخمین ضریب دبی با وجود دیواره‌های سپری بدون‌شیب و شیب‌دار، در محدوده آزمایش‌های این تحقیق استخراج شد. همچنین جهت برآورد دقت روابط ارائه شده، علاوه بر ضریب تعیین،  $R^2$ ، از شاخص‌های آماری اندازه‌گیری خطای  $RMSE^2$  و  $MAE^3$ ، که به صورت معادلات (۱۲) و (۱۳) می‌باشند، استفاده شده است.



شکل (۹): مقایسه ضریب دبی محاسباتی و آزمایشگاهی برای دیواره سپری الف: بدون شیب، ب: شیبدار

مطابق با شکل (۹)، مشخص است که روابط آماری برآورد شده با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی ضریب دبی جریان بوده است. به جهت ارزیابی نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج پژوهش حاضر با نتایج ارائه شده‌ی مطالعات پیشین صورت پذیرفته است که در جدول (۳) ارائه گردیده است.

مقادیر  $R^2$ ، RMSE و MAE برای رابطه (۱۴) بترتیب برابر با ۰/۷۸۳، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۲۹ و برای رابطه (۱۵) بترتیب برابر با ۰/۹۴۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۲۵ بدست آمد. ضمن اینکه هر چه مقادیر RMSE و MAE کمتر باشند، نشان‌دهنده‌ی خطای کمتر و دقت بالاتر روابط ارائه شده است، شایان ذکر است که روابط ارائه شده با ۸۰ درصد داده‌ها برآورد شده و با استفاده از شاخص‌های اندازه‌گیری خطا ۲۰ درصد مابقی مورد آزمون قرار گرفت. از طرفی برای مقایسه دقت رابطه‌ی ارائه شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، از خط ۴۵ درجه استفاده شد. شکل (۹) این موضوع را برای دیواره‌های سپری بدون شیب و شیبدار نمایش می‌دهد.



جدول (۳): مقایسه‌ی ضریب دبی دیواره‌های سپری با مطالعات پیشین

منابع مورد استفاده	نسبت $\frac{P}{W_u}$	مدل دیواره‌ی سپری	نسبت $\frac{H_t}{P}$	ضریب دبی (C <sub>D</sub> )	دماغه‌ی ورودی سرریز
ماسیلز و همکاران (۲۰۱۳)	۰/۳۴-۰/۵۹	بدون شیب پیوسته	۰/۶	۰/۲۴	بدون پایه
افضلیان (۱۳۹۳)	۰/۵	بدون شیب پیوسته	۰/۶	۰/۲۷	پایه‌نیم‌استوانه
پژوهش حاضر	۰/۵	بدون شیب ناپیوسته	۰/۵۷	۰/۴۵	پایه‌مثلثی
افضلیان (۱۳۹۳)	۰/۵	شیب‌دار پیوسته	۰/۵	۰/۳	پایه‌نیم‌استوانه
پژوهش حاضر	۰/۵	شیب‌دار ناپیوسته	۰/۶۶	۰/۴۵	پایه‌مثلثی

می‌دهد. همچنین قرارگیری دیواره‌های سپری شبیدار بر روی تاج جانبی سرریز به طول  $B' = 0.25 B$ ،  $B' = 0.5B$ ،  $B' = 0.75B$  و  $B' = B$  به ترتیب و به طور متوسط ۱۲، ۲۰، ۲۶/۵ و ۲۶ درصد راندمان سرریز را نسبت به مدل شاهد بهبود می‌بخشد. افزایش در راندمان سرریز ناشی از قرارگیری دیواره سپری، به دلیل کاهش استغراق محلی در کلید خروجی، افزایش ناحیه جریان و کاهش اتلاف ورودی است. در مطالعه حاضر مشخص شد که درصد افزایش عملکرد سرریز با قرارگیری دیواره‌های سپری با استفاده از روش تحلیل انتگرالی و با در نظر گرفتن ارتفاع سطح آب متغیر در طول تاج جانبی سرریز نسبت به روش تحلیلی که با فرض افقی بودن پروفیل سطح آب در سرریز محاسبه می‌گردد، کمتر است، که بنظر می‌رسد با توجه به این نکته که در اصل پروفیل سطح آب افقی نیست و در طول تاج جانبی متغیر است، روش حل تحلیل انتگرالی عددی به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، ضریب دبی مدل‌های آزمایشی در پژوهش حاضر در مقایسه با ضریب دبی مدل‌های آزمایشی تحقیقاتی پیشین، با در نظر گرفتن تغییر در پروفیل سطح آب و همچنین با استفاده از روش انتگرالی عددی جهت برآورد ضریب دبی، مقدار بیشتری دارند.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با روش انتگرالی عددی به روش سیمپسون مرکب، اثر قرارگیری ترکیب‌های مختلف دیواره‌های سپری بدون شیب و شبیدار بر عملکرد سرریز کلید پیاپویی با توجه به پروفیل سطح آب در طول تاج جانبی سرریز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از این روش نشان داد که قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر کل تاج سرریز، بر تاج کلید ورودی و تاج جانبی سرریز و فقط بر روی تاج جانبی بطور متوسط بترتیب ۱۴/۸، ۱۶/۸ و ۳۴/۸ درصد راندمان سرریز را نسبت به مدل شاهد افزایش

### منابع

- افضلیان ع. ر. ۱۳۹۳. بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای PKW تحت هندسه متفاوت پایه و تاج-جانبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- Anderson, R. M. 2011. Piano Key Weir Head Discharge Relationships. All Graduate Theses and Dissertations. Utah State University.
- Anderson, R. M., and B. Tullis. 2013. Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison. *J. Irrig. Drain Eng.* 139(3): 246–253.
- Anderson, R. M., and B. P. Tullis. 2011. Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. *Proc. Intl Work-shop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, 75-80.
- Blanc, P., and F. Lempérière. 2001. Labyrinth spillways have a promising future, *International Journal of Hydropower and Dams*. 8(4): 129-131.
- Henderson, F. M. 1966. *Open channel flow*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ.
- Kabiri-Samani, A., and A. Javaheri. 2012. Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 50 (1): 114-120.
- Laugier, F., J., Pralong and B. Blancher. 2011. Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spill-way discharge capacity. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, 159-165.
- Leite Ribeiro, M., M., Pfister, and A. J. Schleiss. 2013. Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs*. CRC Press, Boca Raton. p. 273-281.

- Leite Ribeiro, M., M., Pfister, A. J., Schleiss, and J. L. Boillat. 2012. Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(4): 400-408.
- Leite Ribeiro, M., M., Pfister, J. L., Boillat, A. J., Schleiss, and F. Laugier. 2012. Piano key weirs as efficient spillway structure. 24th ICOLD Congress on Large Dams, Kyoto (J), Q.94 – R.13.
- Leite Ribeiro, M., M., Bieri, J. L., Boillat, A. J., Schleiss, F., Delorme, and F. Laugier. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways - Design of Piano Key Weirs. in proceedings of 23rd congress of CIGB/ICOLD, Brasilia.
- Lempérière, F., and A. Ouamane .2003. The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways, *International Journal of Hydropower and Dams* 10(5), 144-149.
- Machiels, O. 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs. PhD Thesis ULgetd, Univerity of Liège (B).
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., and Piroton, M. 2013. Parapet Wall Effect on Piano Key Weir Efficiency. *J. Irrig. Drain Eng.* 139(6): 506–511.
- Machiels, O., S., Erpicum, M., Piroton, B., Dewals, and P. Archambeau. 2012. Experimental analysis of PKW hydraulic performance and geometric parameters optimum. Proceedings of International workshop on Piano Key Weir for In-stream Storage and Dam Safety. 97-114.
- Machiels, O., S., Erpicum, P., Archambeau, B. J., Dewals, and M. Piroton. 2011a. Influence of Piano Key Weir height on its discharge capacity. *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, CRC Press, London, 59-66.
- Machiels, O., S., Erpicum, B., Dewals, P., Archambeau, and M. Piroton. 2011b. Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir, *Journal of Hydraulic Research* 49(3): 359-366.
- Ouamane, A., and F. Lempérière. 2006a. Design of a new economic shape of weir. Proc. Int. Symp. Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, 463–470.
- Pralong, J., J. Vermeulen, B. Blancher, F. Laugier, S. Erpicum, O. Machiels, M. Piroton, Boillat, M., J- Leite Ribeiro, and A. J. Schleiss. 2011. A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical pa-rameters. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 271-278.

## Analytical integration investigation of hydraulic of piano key weirs (PKW) with Continues and discontinues parapet walls

B.Yarmohammadi<sup>1</sup>, J.Ahadiyan<sup>2</sup>

### Abstract

Nowadays piano key weirs (PKW) are widely used in many projects, because, in comparison to linier weirs, they have high discharge capacity and more storage volume of dam reservoir. The piano key weirs performance reduce in high discharges, so this research investigate the various combinations of interrupted non-sloped and sloped parapet walls on the piano key weirs performance. It is used an experimental flume to do research. By using analytical integration method, the results show that they improve the weir performance about 35 percent, when the 4.5-centimeter-high non-sloped parapet walls were on the weir's side crest, while setting non-sloped parapet walls on the whole of the weir crest increase it about 14.8 percent. In addition the sloped parapet walls improve the weir performance. According to this method, the results show that the discontinued parapet walls improve the weir performance. Finally, by SPSS software, two equations were developed for the piano key weirs discharge coefficient with sloped and non-sloped parapet walls. For non-sloped models, these equations have respectively regression coefficients, measuring error index, RMSE, and MAE about 0.783, 0.048 and 0.03, but for sloped models, they are about 0.941, 0.03, and 0.025.

**Keywords:** Analytical integration solution, parapet wall without interrupted slope, sloped parapet wall, piano key weir

<sup>1</sup> Corresponding author Msc Student of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran; bahareh\_yarmohammadi@yahoo.com

<sup>2</sup> Associate Professor of Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran; ja\_ahadiyan@yahoo.com