

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

بهاره یارمحمدی<sup>۱</sup>، جواد احدیان<sup>۲\*</sup> و منوچهر فتحی مقدم<sup>۳</sup>

### 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 این نوع سرریز مورد بررسی واقع شده 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 تحلیل انتگرال عددی، قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر روی تاج جانبی سرریز با ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متری حدود ۳۵٪ 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 گردیده است که قرارگیری دیواره‌های سپری غیرپیوسته کارایی هیدرولیکی سرریز را بهبود می‌بخشد. در نهایت نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، روابطی جهت تخمین ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با وجود دیواره سپری بدون شیب و شیب‌دار برآورد شده است که به ترتیب دارای  $R^2$  برابر با ۰/۷۸۳ و ۰/۹۴۱ و شاخص‌های آماری 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 تحلیل انتگرالی، دیواره سپری بدون شیب منقطع، دیواره سپری شیب‌دار، سرریزهای کلید پیانویی.

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران،

۲- نویسنده مسئول-دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، ja\_ahadiyan@yahoo.com، j.ahadiyan@scu.ac.ir

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

## مقدمه

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  $1/25$  و  $1/5$  تعیین نمودند، بطوریکه در نسبت‌های  $16 < H_t/P < 1/25$  سرریز با نسبت  $1/25 = W_i/W_o$  متوسط بهره‌وری تخلیه بالاتر و در نسبت‌های  $1/5 < H_t/P < 16$  سرریز با نسبت  $1/5 = W_i/W_o$  متوسط بهره‌وری 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 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 بهره‌وری سرریز در پی داشته

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 بيسکرا<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 شکل توسعه یافته سرریزهای زیگزاگی با فوندانسیون کوجکتر 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 بیان نمودند که برای مقادیر کم  $H_t/P$ ، مقادیر  $N=1/5$  منجر به دستاوردهای قابل توجهی در بهره‌وری می‌شود، این درحالی است که برای مقادیر زیاد  $H_t/P$ ، مقادیر بزرگ  $N$  (تعداد سیکل‌ها) تأثیر چندانی در افزایش بهره‌وری تخلیه نداشت. (Leite Ribeiro et al., 2009) با بررسی تأثیر دیواره سپری بر عملکرد سرریز کلید پیانویی با افزایش  $12/3$  درصدی ارتفاع سرریز، افزایش  $15$  درصدی راندمان هیدرولیکی سرریز را در سد اترویت 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

1- Hydrocoop

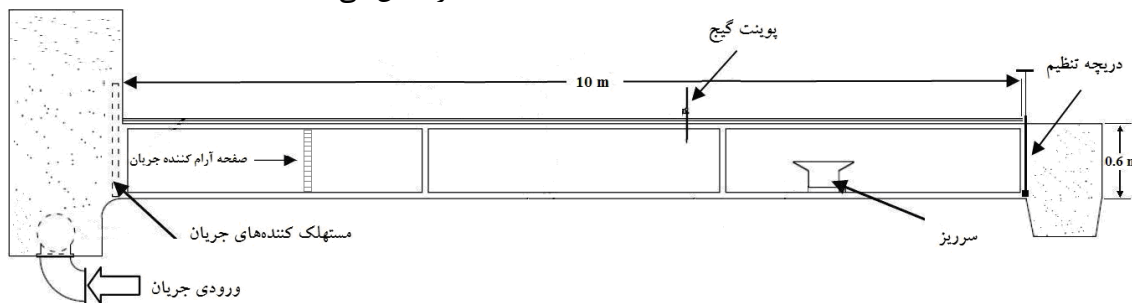
2- Biskra University

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 صرف نظر 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.



شکل (۱): مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

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 (۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ سانتی‌متری)، حداقل ۲۲۰ اندازه‌گیری با ۲۲ مدل آزمایشگاهی در این ارتباط انجام شد که مدل‌ها به شکل زیر ارائه شدند: ۱- مدل آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی 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، (Case B)، (ج) کل تاج

باشد؛ در این راستا با توجه به اهداف مدنظر در تحقیق حاضر، جهت بررسی دقیق در این خصوص با بکارگیری ترکیب‌های مختلف دیواره سپری این موضوع مورد بررسی قرار گرفت.

### 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.

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 ۱/۵، و بهینه اقتصادی نسبت  $P/w_u$  بترتیب برابر با ۰/۵ 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 ۳/۵ سیکل ساخته شد. در هر آزمایش، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ به فلوم آزمایشگاهی منتقل شده و اندازه‌گیری‌ها شامل قرائت ارتفاع سطح آب و دبی انجام پذیرفت. قرائت ارتفاع سطح آب در بالادست سرریز به وسیله عمق سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری شد و دبی جریان توسط یک سرریز مستطیلی

$$Q_{tr} = Q_{wi} + Q_{wo} + Q_{sw} \quad (۴)$$

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؛

$$Q_a = C_d \cdot Q_{tr} \quad (۵)$$

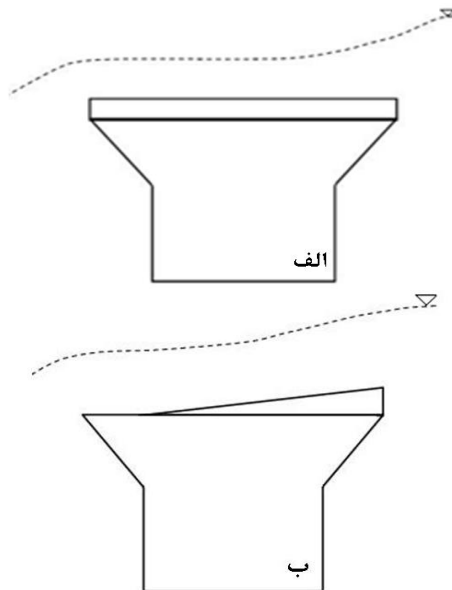
که در این رابطه:

$Q_a$ : 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 پلانویی در طول تاج جانبی متغیر است که در شکل (۲) شماتیکی از پروفیل سطح آب ارائه شده است.



شکل (۲): شماتیکی از پروفیل سطح آب با قرارگیری دیواره

سپری الف: بدون شیب، ب: شیب‌دار

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 انتگرال‌گیری عددی و با در نظر گرفتن پروفیل سطح آب صورت پذیرفت. رابطه‌ی دبی جریان خروجی - اشل برای سرریز جانبی به صورت معادله (۶) است؛

$$Q_s = \sqrt{2g} \int_a^b (y - p')^{1.5} dx \quad (۶)$$

که در این رابطه:

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

در جدول (۱) بخشی از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به قرارگیری دیواره سپری بدون شیب ۴/۵ سانتی‌متری بر روی تاج جانبی سرریز و قرارگیری دیواره سپری شیب‌دار ۲/۵ سانتی‌متری بر تاج جانبی سرریز به طول  $B' = 0.75B$  ارائه شده است.

جدول (۱): بخشی از داده‌های آزمایشگاهی

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

از داده‌های دبی - اشل ارائه شده در جدول (۱) مشخص است که قرارگیری دیواره سپری شیب‌دار بر تاج جانبی سرریز عملکرد مطلوب تری داشته است.

## نتایج و بحث

بعد از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات، به منظور تجزیه و تحلیل ظرفیت تخلیه سرریزهای کلید پلانویی، از معادله عمومی سرریزها، معادله (۳)، استفاده می‌شود.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_t^{1.5} \quad (۳)$$

که در این معادله:

$Q$ : دبی،

$C_d$ : ضریب سرریز،

$g$ : شتاب ثقل،

$L$ : طول تاج و

$H_t$ : هدکل بالادست می‌باشند.

با توجه به قرارگیری مقطعی دیواره‌های سپری بدون شیب بر روی تاج سرریز، بار آبی در بخش‌های مختلف سرریز متغیر خواهد بود، به همین جهت دبی تئوری با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌گردد.

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 حل این انتگرال میسر نمی‌شود، به همین دلیل با استفاده از روش انتگرال گیری عددی سیمپسون مرکب، معادله (۷)، مقدار دبی محاسبه شد.

$$\int_a^b f(x) = \frac{h}{3}[f(a) + f(b)] + \frac{2h}{3} \sum_{k=1}^{M-1} f(x_{2k}) + \frac{4h}{3} \sum_{k=1}^M f(x_{2k-1}) \quad (۷)$$

که در این معادله:

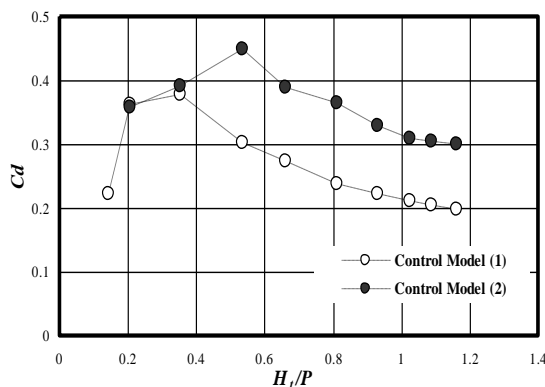
h برابر است با  $(b-a)/2M$

k برابر است با  $k = 0, 1, \dots, 2M$

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

جدول (۲): معادلات دبی تئوری

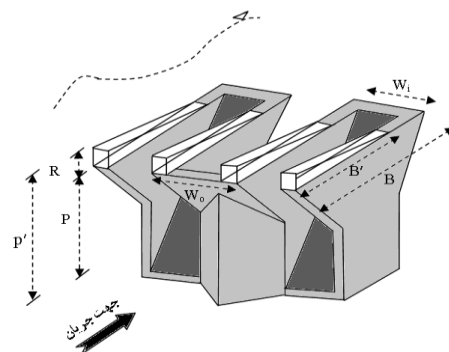
معادله	قرارگیری دیواره سپری
$Q_{tr}^{(۸)} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_i)(H-R)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_o)(H-R)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \int_0^B (y-p')^{1.5} dx$	بدون شیب روی کل تاج سرریز
$Q_{tr}^{(۹)} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_i)(H-R)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_o)(H)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \int_0^B (y-p')^{1.5} dx$	بدون شیب روی کلید ورودی و تاج جانبی
$Q_{tr}^{(۱۰)} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_i)(H)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_o)(H)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \int_0^B (y-p')^{1.5} dx$	بدون شیب روی تاج جانبی
$Q_{tr}^{(۱۱)} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_i)(H)^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (mw_o)(H)^{1.5} + 2N \sqrt{2g} \left[ \int_0^{B'} (y-p')^{1.5} dx + \int_{B'}^B (y-p')^{1.5} dx \right]$	شیبدار روی تاج جانبی



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

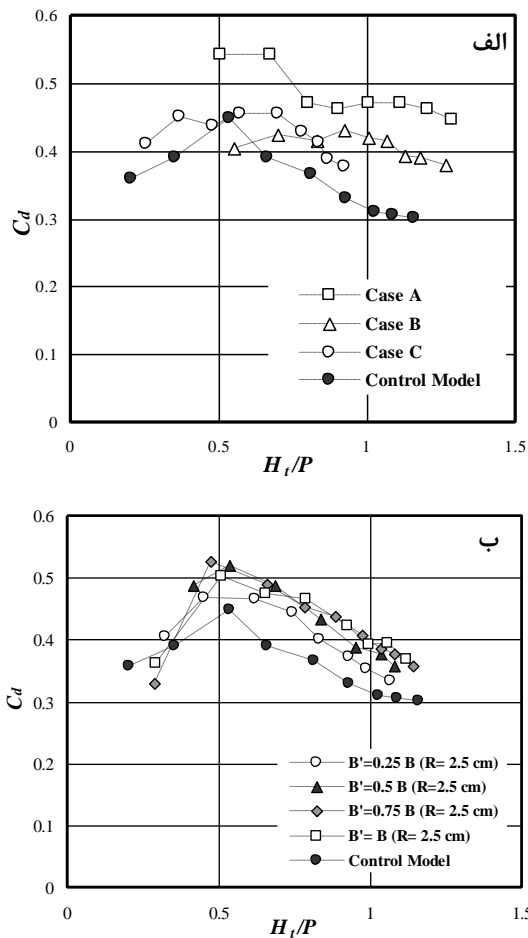
همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با بکارگیری روش حل تحلیل انتگرال گیری عددی، ضریب دبی جریان به طور متوسط افزایش ۴۰ درصدی را در پی دارد. این افزایش در ضریب آبگذری احتمالاً بدین دلیل است که ارتفاع آب روی سرریز و پروفیل سطح آب در نظر گرفته شده در روش حل انتگرال گیری عددی کمتر از ارتفاع سطح آب بالادست سرریز است که در معادله عمومی سرریزها بکار می‌رود. شکل (۵) نمودار تراز سطح آب-دبی را برای مدل‌های دیواره سپری بدون شیب ۴/۵

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



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

در شکل (۳) عرض کلید ورودی،  $W_i$ ، عرض کلید خروجی،  $W_0$ ، طول تاج جانبی،  $B$ ، طول دیواره سپری شیبدار،  $B'$ ، ارتفاع سرریز،  $P$ ، ارتفاع دیواره سپری،  $R$ ، ارتفاع تاج سرریز تا کف کانال،  $P'$ ، نمایش داده شده است. بدین ترتیب مطابق روابط ارائه شده ضریب دبی جریان محاسبه شد و نمودارهای مربوط به مدل‌های آزمایشی ترسیم شد. شکل (۴) نمودار 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.

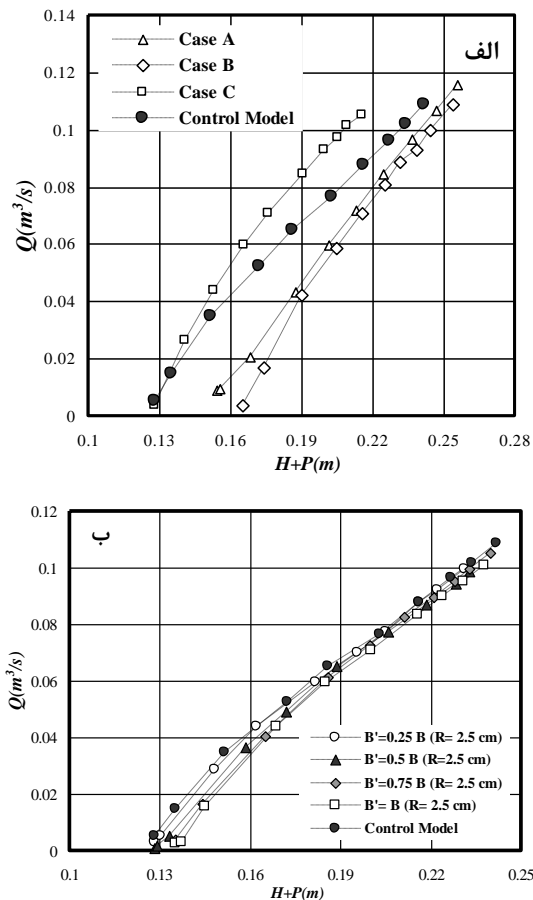


شکل (۶): منحنی روند تغییرات  $C_d$  در برابر  $H_t/P$  در

مدل‌های الف: دیواره سپری بدون شیب ۴/۵ سانتی‌متری، ب: دیواره سپری شیبدار ۲/۵ سانتی‌متری

طبق مطالعات (Machiels, 2012)، در بارهای آبی کم، خطوط جریان بصورت نسبتاً مشابه در طول کل تاج سرریز توزیع شده‌اند. بخش پایین دست تاج کلید ورودی عمدتاً توسط جریان تحتانی و بخش تاج بالادست کلید خروجی عمدتاً از جریان سطحی و در نهایت تاج جانبی در بخش پایین دست توسط جریان پیشرونده کلید ورودی و در بخش بالادست توسط جریان پیشرونده کلید خروجی، زیر سطح تاج، برقرار می‌شود. در بارهای آبی بالا، توزیع خطوط جریان مطلوب به نظر نمی‌رسد. در واقع، مطابق شکل (۷)، جریان عبوری از کلید ورودی سرریز کلید پیاپی، علاوه بر جریان پیشرونده در امتداد شیب، جریان سطحی عبوری از تاج جانبی با سرعت بالا، با جریان پیشرونده تداخل نموده و از این رو تخلیه از تاج جانبی با شرایط آزاد صورت نمی‌پذیرد؛ لذا تاج جانبی ضعیف عمل نموده و ظرفیت تخلیه سرریز در این حالت کاهش می‌یابد.

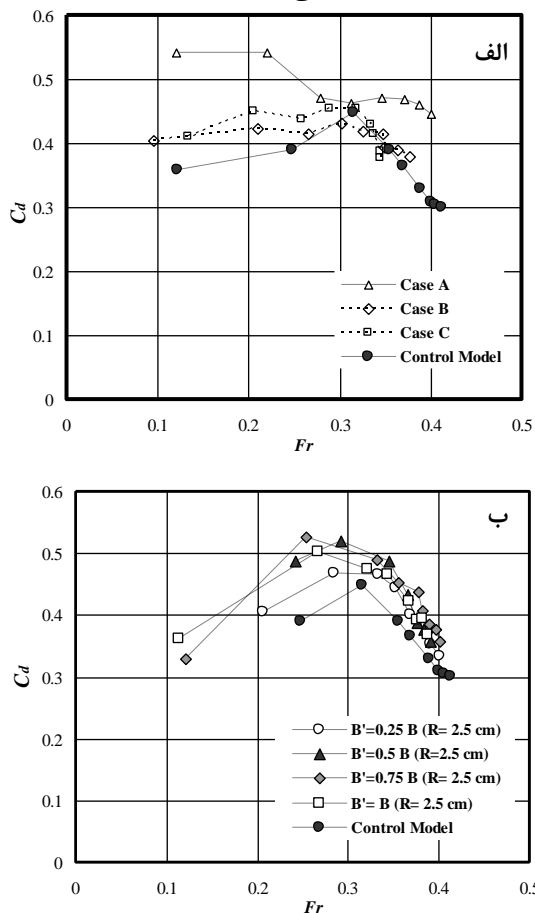
سانتی‌متری و دیواره سپری شیبدار ۲/۵ سانتی‌متری نشان می‌دهد.



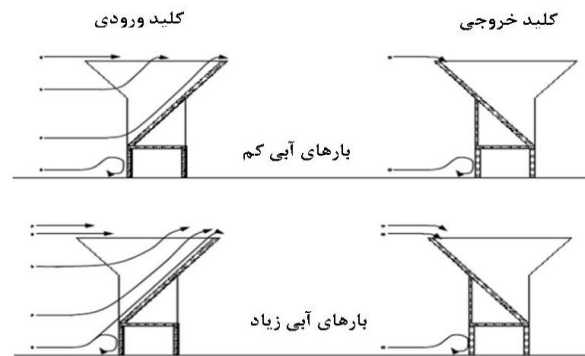
شکل (۵): نمودار دبی - تراز سطح آب برای مدل‌های دیواره سپری الف: بدون شیب، ب: شیبدار

همانطور که از شکل (۵-الف) مشخص است قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر کل تاج سرریز در یک هد ثابت دبی بیشتری را عبور می‌دهد و قرارگیری مقطعی دیواره سپری بدون شیب در بار آبی کم افزایش تراز آبی را نشان می‌دهد، اما با توجه به شیب نمودارها مشخص است که در بارهای آبی زیاد احتمالاً می‌تواند مؤثر واقع شود. با توجه به شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود که مدل شاهد در بار آبی کم در یک هد ثابت دبی بیشتری را عبور می‌دهد بنابراین احتمالاً در بار آبی زیاد استفاده از دیواره سپری شیبدار ظرفیت تخلیه سرریز را افزایش می‌دهد. شکل (۶) نمودارهای روند تغییرات ضریب آگذری در برابر  $H_t/P$  در مدل‌های دیواره سپری بدون شیب ۴/۵ سانتی‌متری و دیواره سپری شیبدار ۲/۵ سانتی‌متری با روش حل انتگرال گیری عددی نشان می‌دهد.

تداخل ابتدای کلید خروجی کاهش می‌یابد بنابراین ضریب دبی دوباره روند صعودی خواهد داشت انتظار می‌رود این روند ادامه یابد اما بدلیل تداخل بیشتر تیغه‌های جریان در طی افزایش دبی جریان، ضریب دبی مجدداً روند نزولی دارد تا به یک مقدار ثابت برسد. با توجه به شکل (۶-ب)، مشاهده می‌شود که دیواره سپری شیبدار نیز در افزایش بهره‌وری سرریز مؤثر بوده است، بطوریکه قرارگیری دیواره‌های سپری شیبدار به طول  $B' = 0.25B$ ،  $B' = 0.5B$ ،  $B' = 0.75B$  و  $B' = B$  در بر داشتند. شایان ذکر است که نمودارهای  $B' = 0.75B$  و  $B' = B$  تقریباً بر هم منطبق می‌باشند ولی در بارهای آبی کم  $B' = 0.75B$  ضریب دبی بالاتری را بوجود می‌آورد. شکل (۸) روند تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به عدد فرود بالادست سرریز در دو حالت مدل‌های دیواره سپری بدون شیب و شیبدار را نشان می‌دهد.



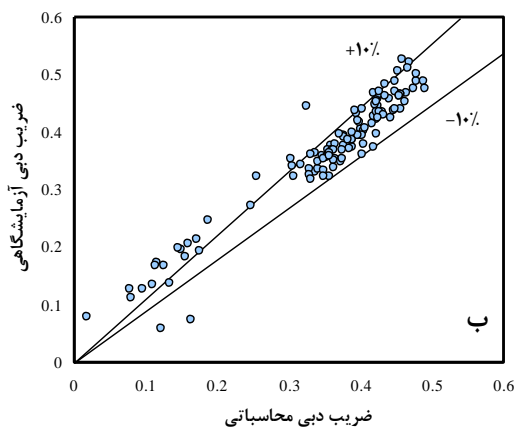
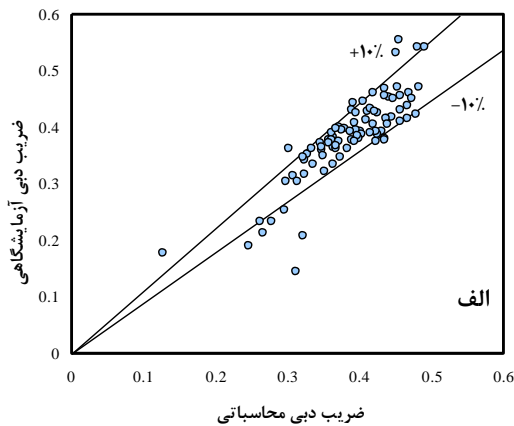
شکل (۸): تغییرات ضریب دبی جریان در برابر عدد فرود بالادست سرریز برای مدل‌های الف: بدون شیب، ب: شیبدار



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 پیاپویی در پژوهش حاضر با لحاظ بهینه اقتصادی طراحی شده است، لذا ارتفاع سرریز از بهینه هیدرولیکی کمتر می‌باشد و همانگونه که در نمودارهای شکل (۶) مشاهده می‌شود استفاده از دیواره سپری در هر دو حالت بدون شیب و شیبدار منتج به افزایش ضریب آبگذری و در نتیجه بهبود عملکرد سرریز شده است. با توجه به شکل (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 انتگرال‌گیری عددی و با قرارگیری دیواره سپری بدون شیب ضریب دبی جریان در ابتدا روند صعودی دارد تا به یک حد نهایی برسد سپس با افزایش بار آبی شروع به کاهش می‌کند و در ادامه مجدداً روند صعودی و نزولی اما با شیب ملایم‌تر داشته است. این احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد که در ابتدا بدلیل عدم تداخل تیغه جریان عبوری از روی کلید خروجی و تاج جانبی استغراق محلی روی کلید خروجی اتفاق نمی‌افتد و ضریب دبی روند صعودی را طی می‌کند، اما با افزایش دبی جریان و بار آبی بالادست سرریز استغراق محلی در ابتدای کلید خروجی و تاج جانبی رخ می‌دهد که منجر به عملکرد ضعیف تخلیه کلید خروجی و ابتدای تاج جانبی می‌گردد و در نتیجه ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد، در ادامه با افزایش دبی جریان و نتیجتاً افزایش سرعت جریان نقطه شروع استغراق به سمت جلو پیشروی می‌کند و

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. همچنین جهت مقایسه رابطه‌ی ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی گراف خط ۴۵ درجه در شکل (۹) برای روابط آماری ارائه شده‌ی دیواره سپری بدون شیب و شیب‌دار نمایش داده 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.

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 نتیجتاً افزایش عدد فرود، اتلاف ورودی را افزایش داده و از راندمان کلی سرریز می‌کاهد.

در نهایت با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، روابطی جهت تخمین ضریب دبی با وجود دیواره‌های سپری بدون شیب و شیب‌دار، در محدوده آزمایش‌های این تحقیق برآورد شده است. همچنین جهت برآورد دقت روابط ارائه شده، علاوه بر ضریب تعیین،  $R^2$ ، از شاخص‌های آماری اندازه‌گیری خطای RMSE<sup>۲</sup> و MAE<sup>۳</sup>، که به صورت معادلات (۱۲) و (۱۳) می‌باشند، استفاده شده است.

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

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

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 بدون شیب، رابطه (۱۴)، و مدل شیب‌دار، رابطه (۱۵)، بصورت زیر قابل ارائه می‌باشند.

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

$$\ln(\text{Fr}) - 0.45 \ln(\text{We}) + 6.35$$

$$C_d = 49.457 \left(\frac{H_t}{P}\right)^{0.106} - 0.084 \left(\frac{H}{R}\right)^{0.324} + \quad (15)$$

$$7.77 \ln(\text{Fr}) - 3.811 \ln(\text{We}) - 0.049 \ln(\text{S}) - 18.285$$

مقادیر  $R^2$ ، RMSE و MAE برای رابطه ارائه شده (۱۴) بترتیب برابر با ۰/۷۸۳، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۲۹ و برای رابطه ارائه شده (۱۵) بترتیب برابر با ۰/۹۴۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۲۵

1- R-Square

2- Root Mean Square Error

3- Mean Absolute Error



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 ( $C_D$ )	دماغه‌ی ورودی سرریز
ماسیلز و همکاران (۲۰۱۳)	۰/۰-۳۴/۵۹	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

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

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با روش انتگرال‌گیری عددی به روش سیمپسون مرکب، اثر قرارگیری ترکیب‌های مختلف دیواره‌های سپری بدون شیب و شیب‌دار بر عملکرد سرریز کلید پیانویی 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 می‌دهد. همچنین قرارگیری دیواره‌های سپری شیب‌دار بر روی تاج جانبی سرریز به طول  $B' = 0.25B$ ،  $B' = 0.5B$ ،  $B' = 0.75B$  و  $B' = B$  بطور متوسط بترتیب 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، بدلیل 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 انتگرال‌گیری عددی به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

### منابع

- افضلیان ع. ر. (۱۳۹۳). بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای PKW تحت هندسه متفاوت پایه و تاج‌جانبی. 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 Tullis, B. 2013. Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison. J. Irrig. Drain Eng. 139(3): 246-253.
- Anderson, R. M., and Tullis, B.P. 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 Lempérière, F. 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 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., and Blancher, B. 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., Pfister, M., and Schleiss, A. J. 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., Pfister, M., Schleiss, A. J., and Boillat, J. L. 2012. Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(4): 400-408.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., and Laugier, F. 2012. Piano key weirs as efficient spillway structure. *24th ICOLD Congress on Large Dams, Kyoto (J)*, Q.94 – R.13.
- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., Delorme, F., and Laugier, F. 2009. Hydraulic capacity improvement of existing spillways - Design of Piano Key Weirs. in *proceedings of 23rd congress of CIGB/ICOLD, Brasilia*.
- Lempérière, F., and Ouamane, A. 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, University 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., Erpicum, S., Piroton, M., Dewals, B., and Archambeau, P. 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., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. J., and Piroton, M. 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., Erpicum, S., Dewals, B., Archambeau, P., and Piroton, M. 2011b. Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir, *Journal of Hydraulic Research* 49(3): 359-366.
- Ouamane, A., and Lempérière, F. 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., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J., Leite Ribeiro, M., and Schleiss, A. J. 2011. A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, 271-278.

## Analytical integration evaluation of hydraulic of piano key weirs (PKW) with Continues and non-Continues parapet walls

B. Yarmohammadi<sup>1</sup>, J.Ahadiyan<sup>2\*</sup>, M. Fathi Moghadam<sup>3</sup>

### Abstract

Weirs are compared to linear weirs due to the high discharge capacity of piano keys. Since using these weirs increases the reservoir storage volume of dams, these weirs have been investigated widely in recent years. Since the high discharges reduce the performance of the piano key weirs, the present study examined the effect of various combination parapet walls with interrupted non-slope and sloped ones on the performance of the piano key weirs. The results of this study carried out in an experimental channel showed that by using the analytical integration method, setting of non-sloped parapet walls on the side crest of the weir with 4.5-cm height can improve the performance of the weir 35% approximately. In contrast, the non-sloped parapet on the whole of the weir crest had a 14.8% increase in implementation of the weir. Then using the sloped parapet wall improved the performance of the weir. In fact, according to the mentioned method, discontinuing the parapet walls enhances the hydraulic performance of the weir. However, statistical equations were developed to estimate the discharge coefficient using SPSS software. It was derived in the presence of sloped and non-sloped parapet walls, with  $R^2$  values equal to 0.763 and 0.941, respectively. The statistical measuring error Indexes, RMSE, and MAE, were 0.048 and 0.029 for non-sloped models and 0.03 and 0.025 for sloped models, respectively.

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

---

1-Msc Student of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran;

2\*-Corresponding author -Associate Professor of Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; [j.ahadiyan@scu.ac.ir](mailto:j.ahadiyan@scu.ac.ir), [ja\\_ahadiyan@yahoo.com](mailto:ja_ahadiyan@yahoo.com)

3-Professor of hydraulics structures of Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.