

بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای

میناسادات سیدجواد^{۱*}، سیدتقی امیدنائینی^۲ و مجتبی صانعی^۳

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷

چکیده

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها در سدها استفاده می‌شوند. سرریزهای جانبی نوعی خاص از سرریزها هستند که به موازات جریان اصلی در دیواره مجاری انتقال آب، مانند کانال‌ها یا رودخانه‌ها، جانمایی می‌شوند و هنگامی که سطح آب بالا می‌آید تنظیم دبی و کنترل سطح آب را به‌عهده دارند. کنترل و انحراف سیلاب در مخازن سدها، انحراف جریان و محافظت سازه در برابر سیلاب در رودخانه‌ها از دیگر موارد کاربرد سرریزهای جانبی است. این تحقیق، در شرایط آزمایشگاهی و با ۱۶ مدل سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A با سه ارتفاع متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر اجرا شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرریز با $P=15\text{ cm}$ در نسبت بی‌بعد $0/4 < H/P < 0/2$ دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری C_M است و در نسبت بی‌بعد $0/5 < H/P < 0/2$ سرریز با $P=20\text{ cm}$ بیشترین ضریب دبی عبوری C_M را دارد. در مقایسه ضریب دبی عبوری از سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای با سرریز جانبی کنگره‌ای دوزنقه‌ای ۱۲ درجه و ۶ درجه به ترتیب ۱/۲ و ۱/۸۷ برابر و از سرریز جانبی کنگره‌ای مثلثی ۱/۵ برابر دبی بیشتری آب از خود عبور می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

سازه انحراف آب، دبی عبوری، جریان

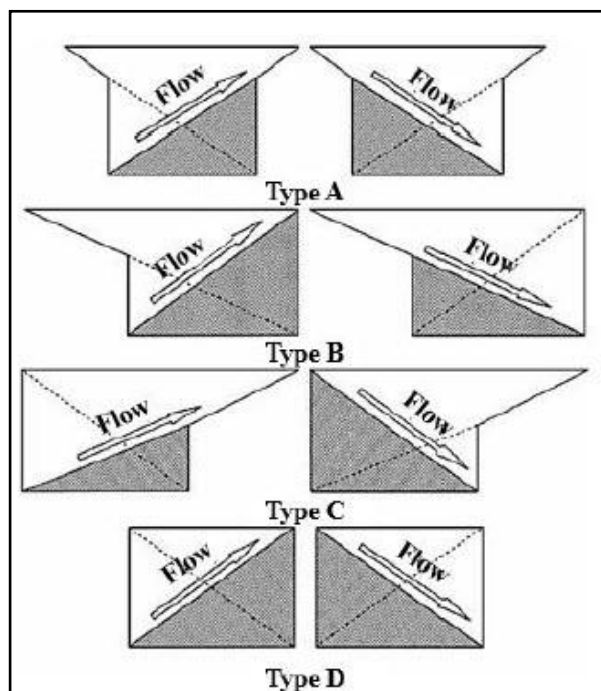
مقدمه

جریان نزدیک‌شونده به این نوع سرریزها، به‌ویژه جریان‌های تحتانی، پس از ورود به محدوده دو دیواره قائم تاج‌های کناری، به‌شدت دچار فشردگی می‌شود و به‌همین دلیل، تاج‌های بالادست و پایین‌دست نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب ندارند. علاوه بر این نکات، عیب عمده این نوع سرریزها، سطح پی بزرگ مورد نیاز برای نصب آنها روی سدهای بتنی است. شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی، سرریزهای کلید پیانویی هستند که مؤسسه هیدروکووپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بیسکارا الجزایر ارائه شده است (Gandoshmin & Norouzi, 2014). در این

سرریز جانبی یکی از انواع سازه‌های انحراف آب است که به‌طور گسترده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کنترل سیلاب، سیستم فاضلاب شهری و کنترل سطح آب به‌کار می‌رود. جریان عبوری از سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است (Askari & Vatankhah- Mohammadabadi, 2108). اساس سرریزهای کلید پیانویی، سرریزهای کنگره‌ای هستند. سرریزهای کنگره‌ای اغلب با استفاده از دیوارهای قائم ساخته می‌شوند و کارایی آنها بسیار بهتر از کارایی سرریزهای خطی است، اما

بالادست و تیپ C دارای شیروانی‌های پایین‌دست است، تیپ D شیروانی ندارد (Lempérière *et al.*, 2011). در واقع، افزایش طول تاج سرریز در یک عرض ثابت آبراهه سرریز و به‌ازای یک بار آبی ثابت، دبی مؤثر این سرریزها را سه تا چهار برابر نسبت به سرریز خطی افزایش می‌دهد (Anderson & Tullis, 2012).

نوع سرریزها، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، دهانه‌ها یک‌درمیان شیب‌دار به سمت داخل مخزن و بیرون است. به‌طور کلی سرریزهای کلید پیانویی دارای چهار تیپ مختلف هستند که تفاوت آنها داشتن یا نداشتن شیروانی است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تیپ A دارای شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست است، تیپ B دارای شیروانی‌های



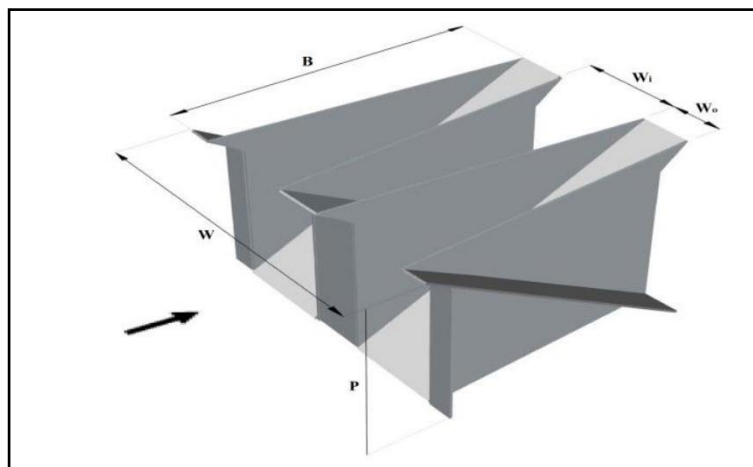
شکل ۱- انواع مختلف سرریز کلید پیانویی (Kabiri-Samani & Javaheri, 2012)
 Fig. 1- Different types of piano key weirs (Kabiri-Samani & Javaheri, 2012)

بررسی تأثیر عمق‌های متفاوت بالادست سد و شیب‌های کناری، به تأثیر آنها بر ضریب دبی C_d پرداختند. مهبودی و همکاران (Mehboudi *et al.*, 2016)، با بررسی مطالعات آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A در کانال مستقیم به این نتیجه رسیدند که عملکرد این نوع از سرریزها از سرریزهای کلید پیانویی مستطیل شکل ۲۲ درصد بالاتر است. اورتل (Oertel, 2015)، با بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی شکل تیپ A، به این نتیجه رسید دبی

بیشتر تحقیقات اجرا شده روی سرریز کلید پیانویی تیپ A روی سرریز مستطیلی کلید پیانویی مستقیم است. کبیری سامانی و جواهری (Kabiri-Samani & Javaheri, 2012) برای تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی جریان، به آزمایش‌هایی دست زدند و رابطه‌ای برای این نوع ضریب در محدوده‌ای خاص از جریان ارائه دادند. اندرسون و تولیس (Anderson & Tullis, 2013) با

اسماعیل‌پور و همکاران (Esmailpour *et al.*, 2016) به بررسی مشخصات سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای یک‌طرفه و ساغری و همکاران (Saghari *et al.*, 2019)، به بررسی سرریز دوزنقه‌ای جانبی کلید پیانویی در قوس پرداختند. کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2018) ضریب دبی عبوری در سرریز مستطیلی جانبی کلید پیانویی را در کانال مستطیلی و مهری و همکاران (Mehri *et al.*, 2018b) سرریز دوزنقه‌ای جانبی کلید پیانویی تیپ C را در کانال با قوس ۳۰ درجه بررسی کردند. با توجه به مطالعات، پیشین تا کنون عملکرد سرریز دوزنقه‌ای کلید پیانویی تیپ A به‌صورت جانبی در یک کانال مستطیلی بررسی نشده است. شکل ۲، نمایی از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A را نشان می‌دهد.

در حالتی افزایش پیدا می‌کند $H/P < 0.15$ و ضریب دبی برای هر سه نوع تیپ سرریز برابر است و در شرایطی که $0.4 < H/P < 0.15$ است قابل مقایسه است. روی سرریزهای جانبی مطالعات فراوان است ولی بیشتر آنها روی سرریزهای مستطیلی و مثلثی صورت گرفته است. امیراگلو و همکاران (Emiroglu *et al.*, 2009) از سرریز غیرخطی کنگره‌ای به‌عنوان سرریز جانبی استفاده و مقدار ضریب دبی عبوری این نوع از سرریز را ارزیابی کردند. روشنگر و همکاران (Roushangar *et al.*, 2017) سرریز کنگره‌ای را با استفاده از مدل‌های GEP و ANFIS و مهری و همکاران (Mehri *et al.*, 2018a) سرریز دوزنقه‌ای جانبی کلید پیانویی تیپ C را در کانال با قوس‌های ۳۰ و ۱۲۰ درجه بررسی کردند.



شکل ۲- نمایی از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A (Mehboudi *et al.*, 2016)

Fig. 2- Type A trapezoidal piano key side weir (Mehboudi *et al.*, 2016)

برای به‌دست آوردن معادله‌ای مناسب برای سرریزهای کناری در نظر گرفت، می‌توان میزان C_M (ضریب دبی عبوری) سرریز جانبی مورد نظر را تخمین زد.

$$\frac{dy}{ds} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{Q}{gA^2}\right)\left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \left(\frac{Q^2 b}{gA^3}\right)} \quad (1)$$

مواد و روش‌ها

اساس سرریزهای جانبی

جریان در سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با کاهش دبی است. تحقیقات روی این جریان فراوان است. رابطه ۱ بیانگر نوع جریان و تغییرات آن در یک سرریز جانبی است که با استفاده از ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی که دی‌مارچی (De-Marchi, 1934)

که در آن،
 $S_f = 0$ یا $S_0 = 0$ و $S_f = 0$ است و نتایج تجربی نشان می‌دهد که یک فرض منطقی است؛ سرریز کناری معادل یک سرریز لبه‌تیز است که هوادهی کامل صورت گرفته و آب به صورت آزاد خارج می‌شود؛ و ضریب تصحیح انرژی α مساوی یک است. با توجه به فرضیات بالا، رابطه دینامیکی مربوط به سرریزها به شکل رابطه ۲ در می‌آید (این رابطه، به رابطه دی‌مارچی^۱ معروف است).

شیب کف کانال اصلی؛ $S_f =$ شیب خط انرژی؛ $A =$ مساحت کانال؛ $Q =$ جریان ورودی کانال اصلی؛ $q = dQ/dx$ دبی در واحد عرض؛ $g =$ شتاب ثقل؛ و $y =$ عمق جریان. فرضیاتی که دی‌مارچی در نظر گرفته شامل این موارد است:
 کانال مستطیلی و منشوری است، طول سرریز کناری کوتاه و انرژی مخصوص بین مقاطع بالادست و پایین‌دست ثابت است. این امر معادل فرض $S_0 -$

$$x = \frac{3B}{2C_M} \left[\frac{2E-3W}{E-W} \sqrt{\frac{E-y}{y-W}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{E-W}} \right] + \text{ثابت انتگرال} \quad (2)$$

آنالیز ابعادی

متغیرهای مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید بیانویی جانبی عبارت‌اند از:
 مشخصات فیزیکی سیال، مشخصات هیدرولیکی جریان، مشخصات هندسی کانال و سرریز، و مشخصات عمومی که بر اساس مشخصات موجود می‌توان رابطه ۳ را برای به دست آوردن ضریب دبی سرریز بیان کرد:

که در آن،
 مقادیر y و $E =$ عمق و انرژی در بالادست و پایین‌دست سرریز؛ و $W =$ ارتفاع یا همان پایه سرریز؛ $C_M =$ ضریب دبی عبوری؛ و $B =$ طول سرریز است.
 با توجه به عمومیت این رابطه، برای به دست آوردن دیگر سرریزهای جانبی و شکل‌های مختلف آن نیز از این رابطه استفاده شده است (Abrishami & Hosseini, 2017).

$$\Phi(S_0, B, B_i, P, L, L', y_1, y_2, V_1, g, \alpha, \delta, \mu, \rho, \sigma, C_d) = 0 \quad (3)$$

دینامیکی؛ $\rho =$ جرم مخصوص؛ $\sigma =$ کشش سطحی و $C_d =$ ضریب دبی.
 بر اساس تئوری π باکینگهام، ۱۶ متغیر وجود دارد و با در نظر گرفتن y_1 (با بعد L)، V_1 (با بعد LT^{-1}) و ρ (با بعد ML^{-3}) به عنوان سه متغیر اصلی (تکراری)، ۱۳ متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود. با ترکیب هر یک از متغیرها با متغیرهای اصلی، یک متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود، بنابراین:

که در آن،
 $S_0 =$ شیب کانال اصلی؛ $B =$ طول سرریز؛ $B_i =$ طول شیروانی پایین‌دست؛ $P =$ ارتفاع سرریز؛ $L =$ طول بازشدگی سرریز؛ $L' =$ طول مؤثر سرریز؛ $y_1 =$ عمق آب در بالادست سرریز؛ $y_2 =$ عمق آب در پایین‌دست سرریز؛ $V_1 =$ سرعت جریان در کانال در بالادست سرریز؛ $g =$ شتاب ثقل؛ $\alpha =$ زاویه قرارگیری سرریز؛ $\delta =$ زاویه شیروانی‌های سرریز؛ $\mu =$ لزوجت

$$C_d = \Phi_1 \left(\frac{V_1^2}{g y_1}, \frac{\mu}{\rho y_1 V_1}, \frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{B_i}{y_1}, \frac{B}{P}, \frac{L'}{y_1}, \frac{w_i}{w_o}, \alpha, \delta, S_0 \right) \quad (4)$$

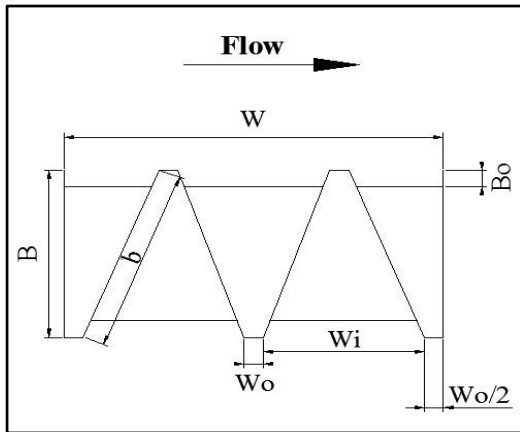
محیط آزمایشگاهی

این تحقیق در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در تهران و تمام آزمایش‌ها در یک کانال پلکسی‌گلاس مستطیلی به طول ۱۰، عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۶ متر اجرا شده است. برای جلوگیری از اغتشاش جریان در بالادست، از یک آرام‌کننده در بالادست، برای اندازه‌گیری جریان در بالادست از سرریز مثلثی کالیبره شده، و در پایین دست از یک سرریز مستطیلی لبه تیز کالیبره شده استفاده شده است. برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در این آزمایش با دستگاه پروفیل‌سنج با حساسیت در دامنه ± 0.1 m اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق از ۱۶ مدل سرریز تیپ A ذوزنقه‌ای به کار گرفته شده که در دو حالت ۱ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سرریزها از جنس پلکسی‌گلاس ساخته و ضخامت آنها ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جدول ۱، مشخصات آزمایش‌های اجرا شده را نشان می‌دهد. در این تحقیق بنا به بررسی تأثیر تعداد سیکل ورودی سرریزهای مورد آزمایش از دو سوی مختلف در حالت جانبی کانال اصلی مورد آزمایش قرار گرفتند. حالت ۱ حالتی است که دارای دو سیکل کامل ورودی و حالت دو دارای یک سیکل کامل ورودی است. شکل‌های ۳ و ۴ نحوه قرارگیری سرریز به دو حالت بیان شده، و شکل ۵ نمایی از پلان موقعیت آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

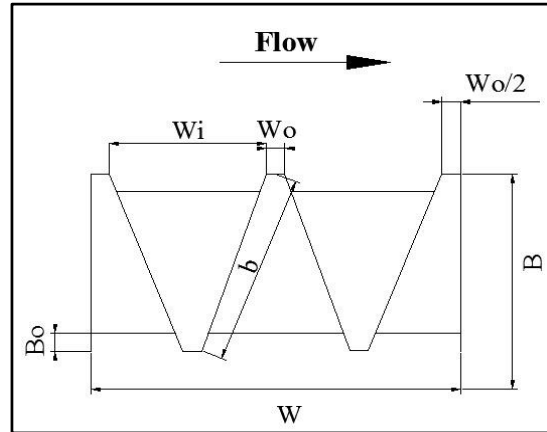
در هیدرولیک کانال‌های باز، وقتی جریان آشفته باشد، تأثیر نیروهای لزوجت در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز و اندک است و اصولاً وضعیت جریان در کانال‌ها به صورت آشفته است، از تأثیر نیروی لزوجت یا همان عدد رینولدز $\left(\frac{\rho y_1 V_1}{\mu}\right)$ صرف نظر می‌شود. تأثیر نیروی کشش سطحی در مواقعی در نظر گرفته نمی‌شود که عمق آب کمتر از ۳ سانتی‌متر باشد. از آنجاکه در آزمایش‌های در نظر گرفته شده عمق آب از ۳ سانتی‌متر بیشتر خواهد بود از تأثیر کشش سطحی یا همان عدد وبر $\left(\frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}\right)$ صرف نظر می‌شود (Erpicum et al., 2013; Kazemi et al., 2016). برخی محققان تأثیر شیب کف در جریان‌های زیربحرانی را ناچیز دانسته‌اند در نتیجه از تأثیر S_0 صرف نظر می‌شود. در نتیجه با ترکیب متغیرهای بی‌بعد و در نظر گرفتن تأثیر آنها در متغیرهای دیگر رابطه ۵ حاصل می‌شود.

$$C_d = \Phi_2 \left(Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{B}, \frac{P}{y_1}, \frac{B_i}{L}, \frac{B}{P}, \frac{L'}{y_1}, \frac{w_i}{w_o}, \delta \right) \quad (5)$$

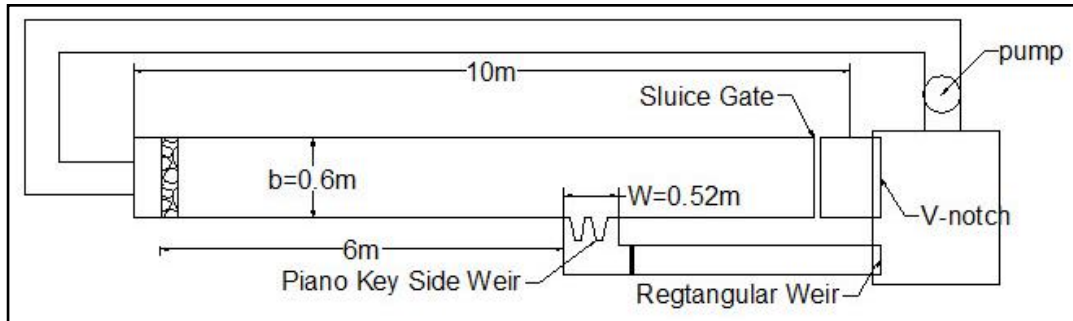
یادآوری می‌شود، عدد فرود بالادست سرریز در همه مدل‌های آزمایش شده کمتر از یک بوده است که شرایط جریان زیربحرانی را در بالادست سرریز ارضا می‌کرد.



شکل ۴- نحوه قرارگیری سرریز به حالت ۱
Fig. 4- Location of weir in case 1



شکل ۳- نحوه قرارگیری سرریز به حالت ۲
Fig. 3- Location of weir in case 2



شکل ۵- نمایی از پلان شرایط آزمایشگاه
Fig. 5- Plan of the laboratory

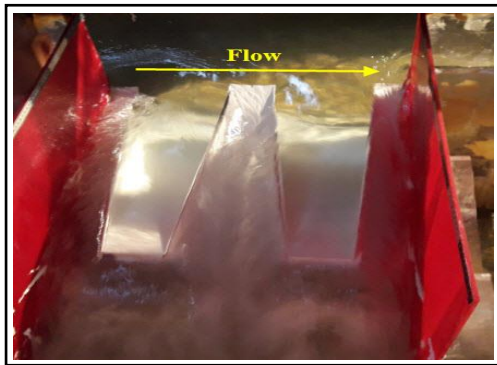
جدول ۱- مشخصات سازه‌ها و آزمایش‌های اجرا شده

Table 1- Structures specifications and performed tests

نوع سرریز Weir Type	طول سرریز Length of Weir	ارتفاع پایه سرریز Weir Height	عرض کانال اصلی Width of Channel	عرض قرارگیری سرریز Width of Opening	نسبت طول کلید ورودی به طول کلید خروجی W_i/W_o	نسبت طول بازشدگی سرریز به عرض سرریز L/W	دبی بالادست Discharge	عدد فرود Froud Number
	B (cm)	P (cm)	b (m)	W (m)			Q_f (L/s)	Fr
PKSW	30	10,15,20	0.6	0.52	1.33-4	2.6-5.9	30 - 60	0.15-0.60
PKSW	50	10,15,20	0.6	0.52	1.33-4	2.6-5.9	30 - 60	0.15-0.60
PKSW	70	10,15,20	0.6	0.52	1.33-4	2.6-5.9	30 - 60	0.15-0.60

سرریز کلید پیمانویی دوزنقه‌ای بررسی شده است. نمونه‌ای از سرریزهای با عرض‌های متفاوت استفاده شده در پایه ۱۰ سانتی‌متر در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است.

نتایج و بحث
همان‌طور که در جدول ۱ اشاره شده است در این تحقیق سه پایه متفاوت ($P= 10, 15, 20$ cm) و سه عرض متفاوت ($B= 30, 50, 70$ cm) در تیپ A



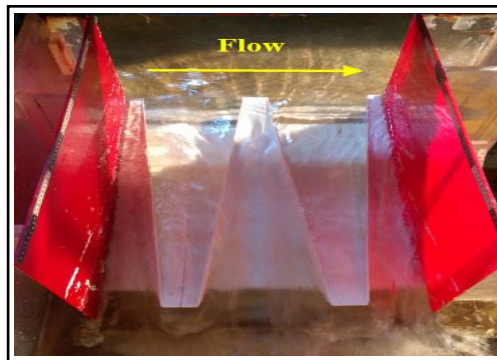
شکل ۷- نمونه سرریز با بال ۵۰ سانتی متر و پایه ۱۰ سانتی متر

Fig. 7- Weir with 50 cm side wall length and 10 cm pier



شکل ۶- نمونه سرریز با بال ۳۰ سانتی متر و پایه ۱۰ سانتی متر

Fig. 6- Weir with 30 cm side wall length and 10 cm pier



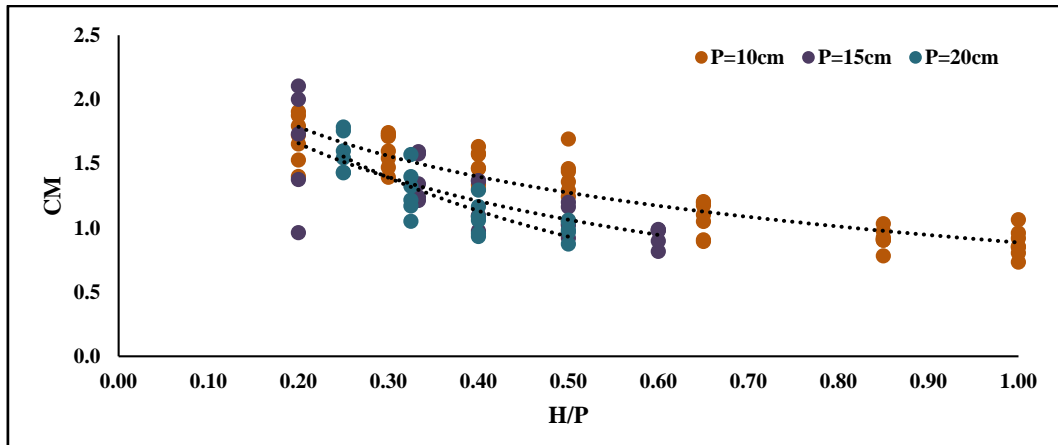
شکل ۸- نمونه سرریز با بال ۷۰ سانتی متر و پایه ۱۰ سانتی متر

Fig. 8- Weir with 70 cm side wall length and 10 cm pier

برای بررسی صحت عملکرد این نوع از سرریزها، به مقایسه انواع پارامترهای بی بعد استفاده شده در اندازه گیری ها با استفاده از داده های به دست آمده از نتایج آزمایش های دیگر محققان پرداخته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده نشان داده شده در شکل ۹ سرریز دارای پایه $P=10\text{ cm}$ در حالتی که $B=50\text{ cm}$ و $B=70\text{ cm}$ است، میزان ضریب C_M (به دست آمده از رابطه دی مارچی) بیشتر از حالتی است که $B=30\text{ cm}$ است. میزان این ضریب در $0.4 < H/P < 0.2$ در حالتی که سرریز در حالت ۱ خود قرار بگیرد بین $1/9 < C_M < 1/3$ و در حالتی که $1/5 < H/P < 0.7$ این مقدار بین $1/7 < C_M < 1/3$ می رسد. در بررسی سرریز به صورت حالت ۲ نمودار ۲ در پایه ۱۰ سانتی متر میزان این ضریب در $0.4 < H/P < 0.2$ بین $1/9 < C_M < 1/3$ و در حالتی که $1/5 < H/P < 0.7$ این مقدار بین $1/7 < C_M < 1/3$ می رسد. در پایه ۱۵ سانتی متر در کل داده های به دست آمده از آزمایش های سرریز در حالت ۱ با توجه به شکل ۹ می توان این استنباط را داشت که هرچه طول عرض بال سرریز (B) بیشتر باشد ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود و در این شرایط در $0.4 < H/P < 0.2$ ضریب دبی مقدار بیشتری خواهد داشت و می توان گفت که اگر نسبت $H/P > 0.5$ باشد، کارایی سرریز عملاً کاهش پیدا می کند. اگر B برابر ۵۰ سانتی متر باشد، در نسبت $0.4 < H/P < 0.2$ ضریب دبی عبوری بین ۲/۱ تا ۱/۳۶ و از $H/P > 0.5$ مقدار C_M بین ۱/۲ تا ۰/۹۸ متغیر است. اگر B برابر ۳۰ سانتی متر باشد در نسبت $0.4 < H/P < 0.2$

برای بررسی صحت عملکرد این نوع از سرریزها، به مقایسه انواع پارامترهای بی بعد استفاده شده در اندازه گیری ها با استفاده از داده های به دست آمده از نتایج آزمایش های دیگر محققان پرداخته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده نشان داده شده در شکل ۹ سرریز دارای پایه $P=10\text{ cm}$ در حالتی که $B=50\text{ cm}$ و $B=70\text{ cm}$ است، میزان ضریب C_M (به دست آمده از رابطه دی مارچی) بیشتر از حالتی است که $B=30\text{ cm}$ است. میزان این ضریب در $0.4 < H/P < 0.2$ در حالتی که سرریز در حالت ۱ خود قرار بگیرد بین $1/9 < C_M < 1/3$ و در حالتی که $1/5 < H/P < 0.7$ این مقدار بین $1/7 < C_M < 1/3$ می رسد. در بررسی سرریز به صورت حالت ۲ نمودار ۲ در پایه ۱۰ سانتی متر میزان این ضریب در $0.4 < H/P < 0.2$ بین $1/9 < C_M < 1/3$ و در حالتی که $1/5 < H/P < 0.7$ این مقدار بین $1/7 < C_M < 1/3$ می رسد. در پایه ۱۵ سانتی متر در کل داده های به دست آمده از آزمایش های سرریز در حالت ۱ با توجه به شکل ۹ می توان این استنباط را داشت که هرچه طول عرض بال سرریز (B) بیشتر باشد ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود و در این شرایط در $0.4 < H/P < 0.2$ ضریب دبی مقدار بیشتری خواهد داشت و می توان گفت که اگر نسبت $H/P > 0.5$ باشد، کارایی سرریز عملاً کاهش پیدا می کند. اگر B برابر ۵۰ سانتی متر باشد، در نسبت $0.4 < H/P < 0.2$ ضریب دبی عبوری بین ۲/۱ تا ۱/۳۶ و از $H/P > 0.5$ مقدار C_M بین ۱/۲ تا ۰/۹۸ متغیر است. اگر B برابر ۳۰ سانتی متر باشد در نسبت $0.4 < H/P < 0.2$

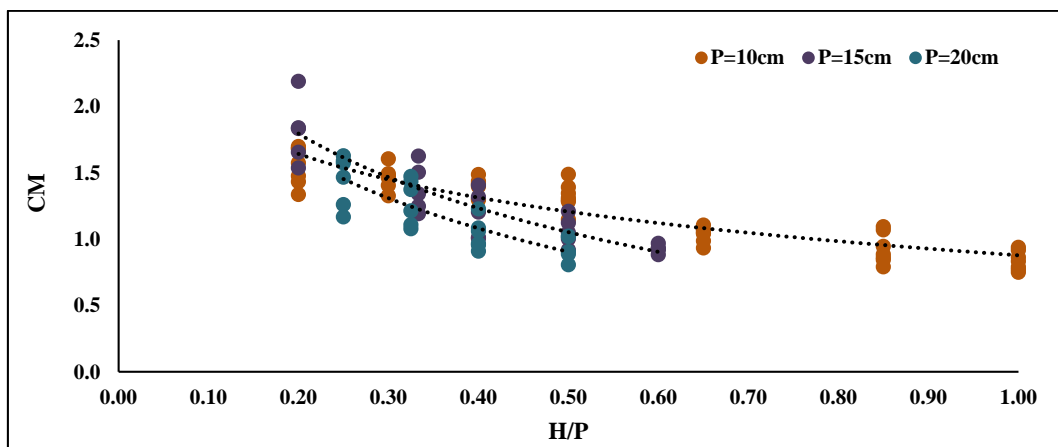
ضریب دبی عبوری در حالت ۱ سرریز بین ۰/۹۶ تا ۱/۷۳ است و از $H/P > ۰/۵$ مقدار C_M بین ۱/۰۲ تا ۰/۸۲ متغیر است. همان‌طور که دیده می‌شود، در پایه $P=۱۵$ سانتی‌متر اگر مقدار B کاهش پیدا کند بالطبع L نیز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ضریب دبی عبوری نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۹- ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۱ سرریز
Fig. 9- Discharge coefficient value for the weir in case 1

می‌گیرد مقدار کمتری دارد. اگر ضریب C_M را در حالتی که $B=۵۰$ cm است بررسی کنیم می‌توان برداشت کرد که مقدار C_M بین ۱/۷۶ تا ۱/۰۶ در حال نوسان است و افت تقریباً زیادی بین زمانی که $B=۵۰$ cm تا $B=۷۰$ cm در حالتی که $H/P = ۰/۲$ است رخ می‌دهد و حدود ۰/۲ واحد این مقدار کمتر می‌شود. البته در این مورد نیز مقدار C_M در حالت ۲ کمتر از حالت ۱ است (شکل ۱۰).

در پایه $P=۲۰$ cm در کل داده‌های به دست آمده می‌توان برآورد داشت که هرچه طول عرض بال سرریز (B) بیشتر باشد ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود. اگر $B=۷۰$ cm باشد در نسبت $۰/۲ < H/P < ۰/۴$ ضریب دبی عبوری (C_M) بین ۱/۷۸ تا ۱/۲۹ است و بهتر است گفته شود در این نمونه از سرریزها، H/P بالاتر از ۰/۴ قابل محاسبه نبوده است؛ این نکته را نیز باید متذکر شد که مقدار ضریب C_M در حالتی که سرریز به صورت حالت ۲ را



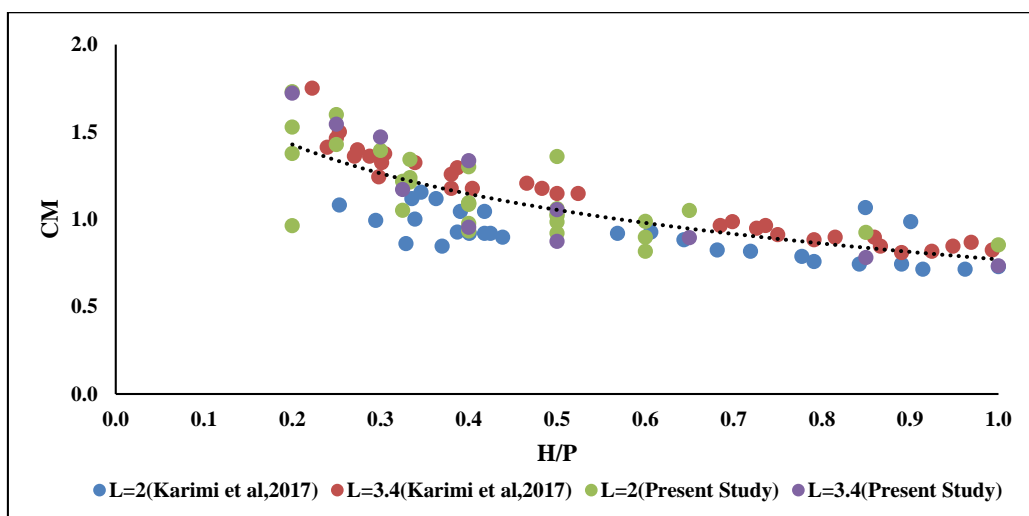
شکل ۱۰- ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز
Fig. 10- Discharge coefficient value for the weir in case 2

دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/73$ تا $0/93$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/15$ تا $0/85$ است. در حالتی که $H/P > 0/5$ باشد، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/36$ تا $0/82$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/07$ تا $0/71$ است. مقایسه بعدی برای حالتی است که سرریزها دارای طول برابر $3/4$ متر هستند؛ در این حالت، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/72$ تا $0/95$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/72$ تا $1/18$ است. در حالتی که $H/P > 0/5$ باشد، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/47$ تا $0/87$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/21$ تا $0/81$ است.

در پایه $P=20\text{ cm}$ اگر $B=30\text{ cm}$ باشد مقدار C_M بین همان مقادیر $1/6$ تا $0/93$ تغییر می‌کند و تفاوت زیادی بین حالتی که $B=50\text{ cm}$ و $B=30\text{ cm}$ است مشاهده می‌شود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بین حالتی که $B=50\text{ cm}$ و $B=30\text{ cm}$ است مقدار ضریب C_M تفاوت وجود خواهد داشت و ضریب C_M در حالتی که $B=50\text{ cm}$ است $0/13$ بیشتر از دو حالت دیگر است.

بررسی نتایج تحقیق حاضر با شرایط آزمایشگاهی مشابه

برای تایید صحت این تحقیق، و اینکه میزان ضریب دبی عبوری (C_M) بهبود یافته است، نتایج تحقیق حاضر با شرایط مشابه مقایسه شده است. در مقایسه نتایج با یکدیگر، سرریز کلید پیانویی مستطیل شکل و سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در دو طول یکسان 2 و $3/4$ متر مقایسه شدند. شکل ۱۱ نتایج آزمایش‌ها را در شرایطی نشان می‌دهد که سرریزهای این تحقیق در حالت ۱ قرار گرفته‌اند، اگر $0/2 < H/P < 0/4$ قرار بگیرد، در حالتی که طول کل سرریز برابر 2 متر باشد، ضریب

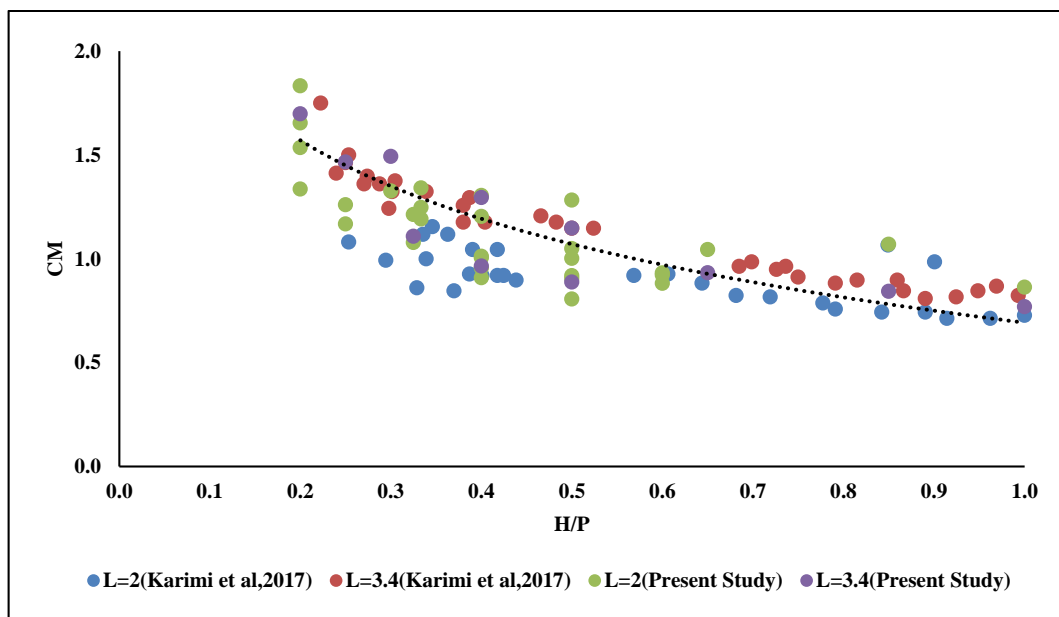


شکل ۱۱- مقایسه ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۱ سرریز دوزنقه‌ای با سرریز مستطیلی

Fig. 11- Comparison between the coefficients values for case 1 of trapezoidal and rectangular weirs

دارای طولی برابر $3/4$ متر هستند؛ در این حالت، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/70$ تا $0/96$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/72$ تا $1/18$ است. در حالتی که $H/P > 0/5$ باشد، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/15$ تا $0/77$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/21$ تا $0/81$ است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در عبور دبی در حالت جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت مستطیلی دارد.

شکل ۱۲، نتایج آزمایش‌ها را در شرایطی نشان می‌دهد که سرریزهای این تحقیق در حالت ۲ قرار گرفته‌اند؛ اگر $0/4 < H/P < 0/2$ قرار بگیرد، در حالتی که طول کل سرریز برابر ۲ متر باشد، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/83$ تا $0/9$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/15$ تا $0/85$ است. در حالتی که $H/P > 0/5$ باشد، ضریب دبی عبوری (C_M) در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین $1/28$ تا $0/8$ است که در نسبت مشابه آن در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین $1/07$ تا $0/71$ است. مقایسه بعدی برای حالتی است که سرریزها



شکل ۱۲- ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز دوزنقه‌ای با سرریز مستطیلی

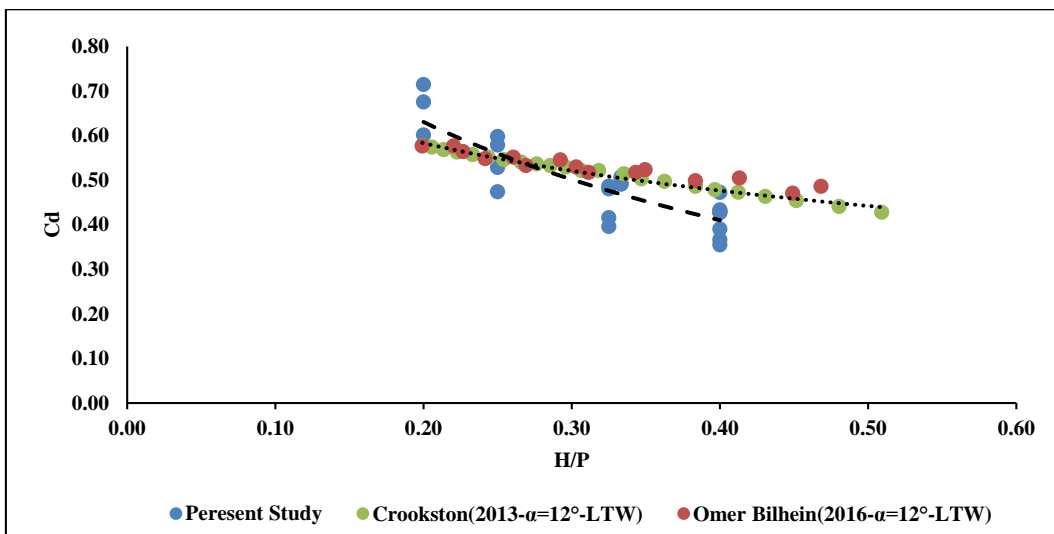
Fig. 12- Comparison between the coefficients values for case 2 of trapezoidal and rectangular weirs

پیانویی جانبی دوزنقه‌ای. همان‌طور که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، با توجه به نسبت بی بعد H/P در سرریزها، مقدار C_d به‌دست آمده در سرریزهای جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای برای زاویه ۱۲ درجه در بیشترین مقدار $0/71$ و در کمترین مقدار $0/35$

بررسی نتایج تحقیق حاضر با مطالعات پیشین مقایسه دیگر بین نتایج به‌دست آمده این تحقیق، که می‌توان به آن اشاره کرد، بر اساس نتایج پارامتر ثابت زاویه سرریزها (α) است. نتایج مربوط است به مقایسه سرریز جانبی کنگره‌ای و کلید

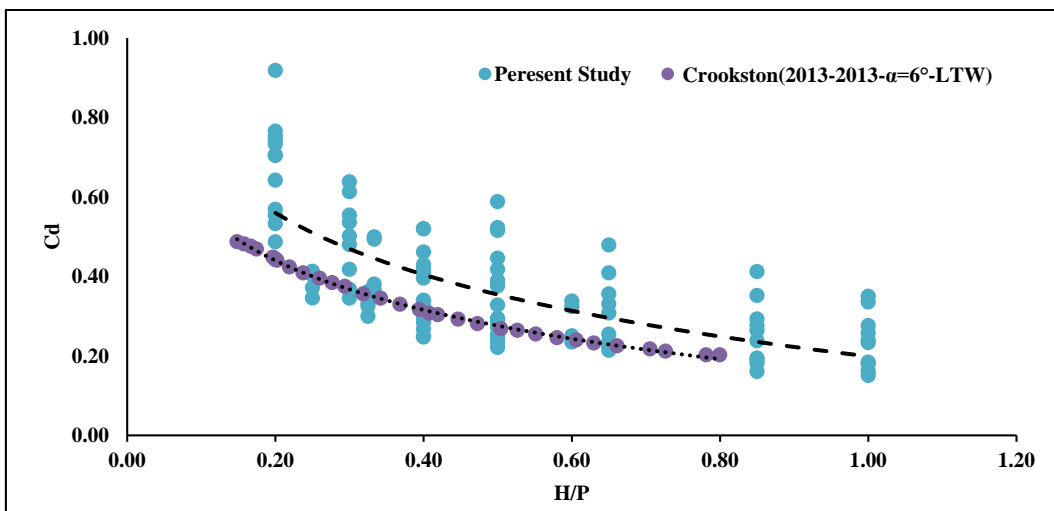
در صورتی که این مقادیر در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۲۰ است، بنابراین سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای ۱/۸۷ برابر ضریب عبور دبی بیشتری در این زاویه در شرایط یکسان خواهند داشت. شکل ۱۴ ضریب دبی عبوری در زاویه ۶ درجه را نشان می‌دهد.

است. در صورتی که این مقادیر در سرریزهای جانبی کنگره‌ای دوزنقه‌ای به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۴۷ است که به نسبت سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای ۱/۲ برابر ضریب عبور دبی بیشتری خواهند داشت وقتی $H/P < 0.2$ باشد. در سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای برای زاویه ۶ درجه در بیشترین مقدار ۰/۹۲ و در کمترین مقدار ۰/۱۵ است.



شکل ۱۳- مقایسه ضریب دبی عبوری بر اساس زاویه ۱۲ درجه

Fig. 13- Comparison between the discharge coefficients based on 12 degrees angle

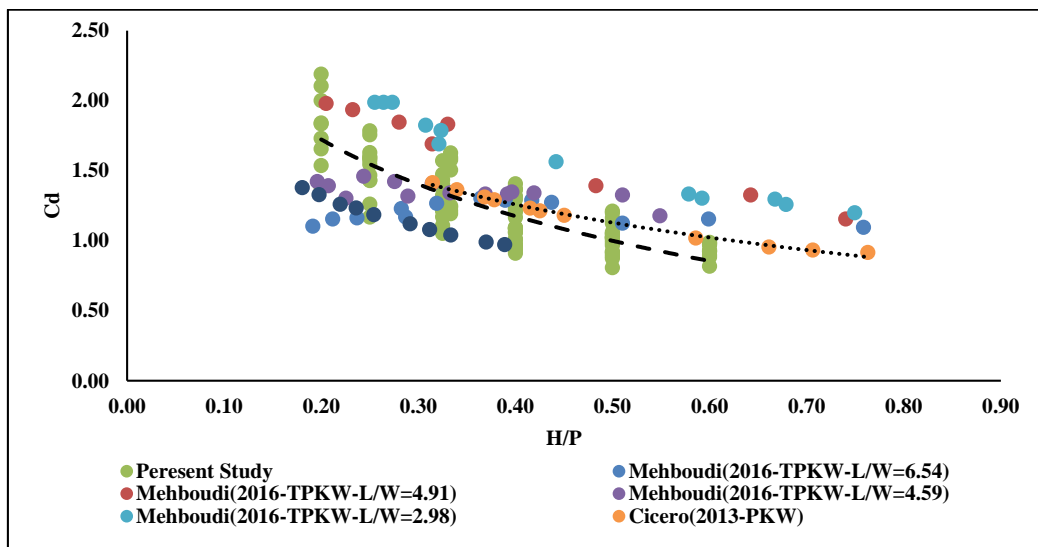


شکل ۱۴- مقایسه ضریب دبی عبوری بر اساس زاویه ۶ درجه

Fig. 14- Comparison between the discharge coefficients based on 6 degrees angle

در صورتی که در $H/P > 0.5$ کارایی سرریز جانبی کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که نشان داده شده است، سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای در هر دو حالت جانبی و مستقیم $1/55$ برابر بیش از سرریز مستطیلی کلید پیانویی مستقیم دبی را عبور می‌دهد.

شکل ۱۵، مقایسه بین ضریب دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای و مستطیلی مستقیم و سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای جانبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تا نسبت $0.4 < H/P < 0.2$ مقدار ضریب C_d در سرریز جانبی $1/1$ برابر سرریز مستقیم است

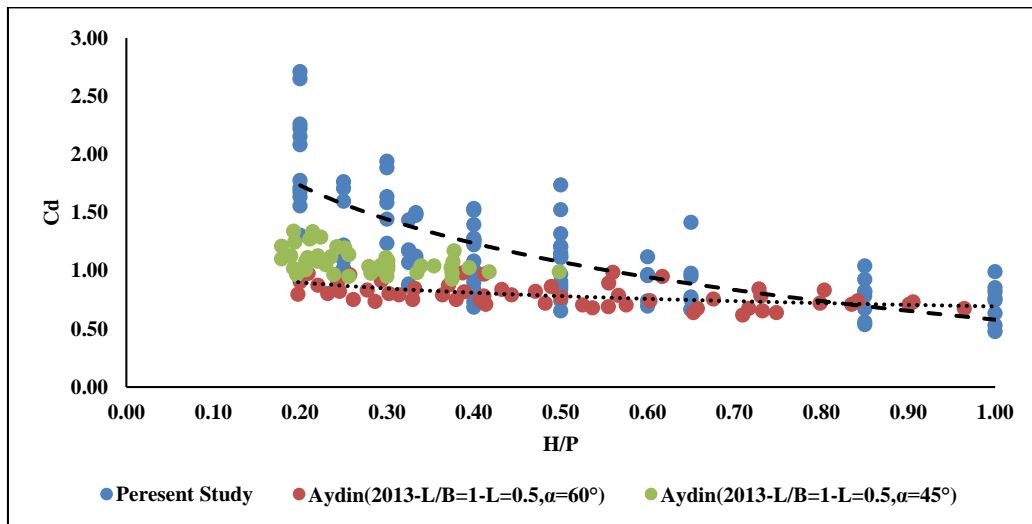


شکل ۱۵ - مقایسه ضریب دبی عبوری بر اساس L/W متفاوت

Fig. 15- Comparison between the discharge coefficients based on different L/W ratio

شکل ۱۷ میزان انرژی‌های اولیه و ثانویه در این بررسی در سرریزهای کلید پیانویی جانبی ذوزنقه‌ای را بیان می‌کند که این مقادیر نزدیکی مناسبی به یکدیگر دارند و بیان‌کننده این مطلب است که تحقیق حاضر از دقت مناسبی برخوردار است و می‌توان به ضرایب دبی به‌دست آمده اطمینان داشت.

شکل ۱۶، مقایسه بین ضریب دبی عبوری C_d بین سرریز جانبی مثلثی کنگره‌ای و سرریز جانبی کلید پیانویی ذوزنقه‌ای است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، در تمامی نسبت‌های H/P مقدار ضریب C_d سرریز جانبی کلید پیانویی ذوزنقه‌ای، در مقایسه با سرریز جانبی مثلثی کنگره‌ای، ضریب دبی عبوری $1/5$ برابر بیشتر است.

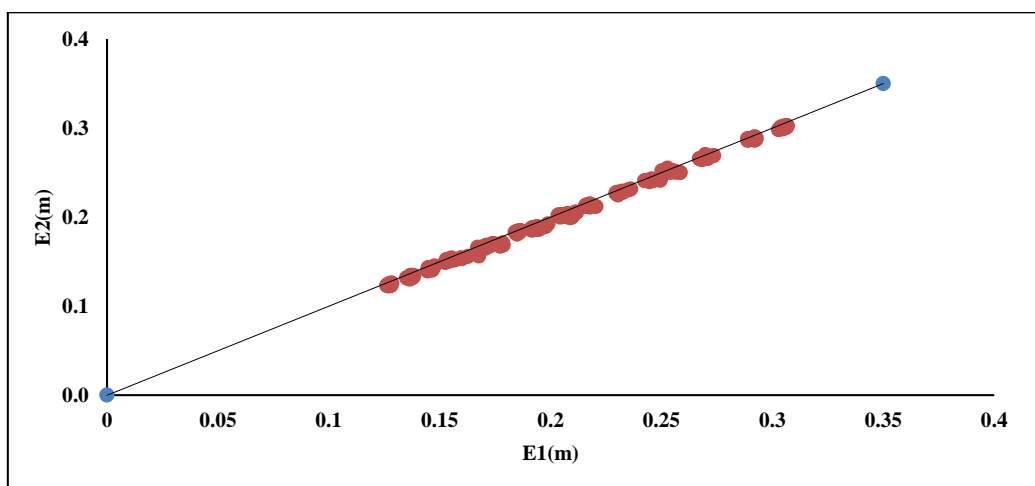


شکل ۱۶- مقایسه ضریب دبی عبوری سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای و مثلثی و سرریز کنگره‌ای مثلثی

Fig. 16- Comparison between the discharge coefficients of the labyrinth triangular side weir and side trapezoidal piano key weir

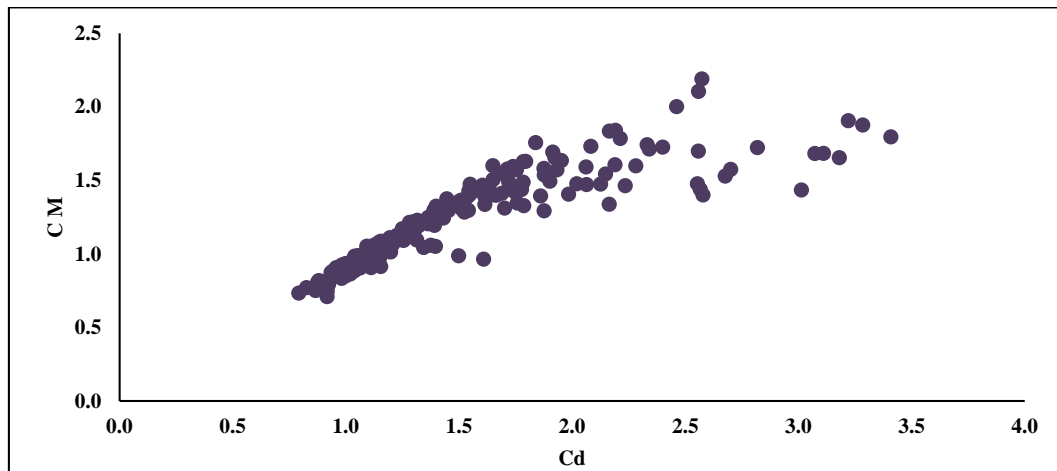
شکل ۱۸، مقایسه بین ضریب دبی عبوری C_d محاسبه شده از رابطه $Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H^{1.5}$ (در این معادله L معادل طول مؤثر سرریز و H معادل ارتفاع آب در بالادست سرریز است) و C_M از رابطه ۱ (معادله دی‌مارچی) در این تحقیق را نشان می‌دهد. طبق نمودار به‌دست آمده و برحسب پارامتر بی‌بعد H/P ، زمانی که $0.4 < H/P < 0.7$ ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی از نزدیکی خوبی برخوردار خواهند بود و میزان اختلاف بسیار کمی با یکدیگر خواهند داشت و از $H/P > 0.7$ اختلاف بین ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی فراوان است.

شکل ۱۸، مقایسه بین ضریب دبی عبوری C_d محاسبه شده از رابطه $Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H^{1.5}$ (در این معادله L معادل طول مؤثر سرریز و H معادل ارتفاع آب در بالادست سرریز است) و C_M از رابطه ۱ (معادله دی‌مارچی) در این تحقیق را نشان می‌دهد. طبق نمودار به‌دست آمده و برحسب پارامتر بی‌بعد H/P ، زمانی که $0.4 < H/P < 0.7$ ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی از نزدیکی خوبی برخوردار خواهند بود و میزان اختلاف بسیار کمی با یکدیگر خواهند داشت و از $H/P > 0.7$ اختلاف بین ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی فراوان است.



شکل ۱۷- انرژی اولیه و ثانویه سرریز

Fig. 17- Primary and secondary energies of the weir



شکل ۱۸- ضرایب دبی C_M و C_d
 Fig. 18- Discharge coefficients of C_d and C_M

نتیجه‌گیری

می‌دهد. در این بررسی، نتیجه نهایی بدین صورت است که سرریز با پایه ۱۵ سانتی‌متر در شرایطی که به صورت حالت ۱ قرار بگیرد، در نسبت بی‌بعد $0/4 < H/P < 0/2$ دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری $C_M=2/1$ است و در نسبت بی‌بعد $H/P > 0/5$ سرریز با پایه ۲۰ سانتی‌متر دارای ضریب دبی عبوری $C_M=1/79$ دارای بیشترین میزان دبی عبوری است. این مقادیر در حالت ۲ نیز صادق است و در حالتی که سرریز دارای پایه ۱۵ سانتی‌متر است در نسبت بی‌بعد $0/4 < H/P < 0/2$ ، میزان ضریب دبی عبوری $C_M=2/2$ است و در نسبت بی‌بعد $H/P > 0/5$ سرریز با پایه ۲۰ سانتی‌متر دارای ضریب دبی عبوری $C_M=1/63$ دارای بیشترین میزان دبی عبوری است.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای می‌تواند در حالت جانبی عملکرد مناسبی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مثلی داشته باشد. در مقایسه‌هایی که در این تحقیق صورت گرفته است، در مقایسه ضریب دبی عبوری از سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای با سرریز جانبی کنگره‌ای ۱۲ درجه و کنگره‌ای ۶ درجه دوزنقه‌ای به ترتیب $1/2$ و $1/87$ برابر و از سرریز جانبی کنگره‌ای مثلی $1/5$ برابر دبی بیشتری آب از خود عبور می‌هد.

سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در هر دو حالت جانبی و مستقیم $1/55$ برابر بیش از سرریز مستطیلی کلید پیانویی مستقیم دبی را عبور

مراجع

- Abrishami, J., & Hosseini, M. (2017). *Hydraulic Open Canals*. Mashhad University Press, 19th Ed. (in Persian)
- Anderson, R., & Tullis, B. (2012). Piano key weir: Reservoir versus channel application. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(8): pp. 773-776.
- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3): pp. 246-253.

- Askari, R., & Vatankhah-Mohammadabadi, A. (2018). Theoretical and laboratory study of lateral trapezoid lateral overflow in underwater conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(5): pp. 1169-1181. (in Persian)
- De-Marchi, G. (1934). Saggio di teoria di funzionamento delgi stramazzi laterali. *Energia Elettrica*, 11(11): pp. 849-860. (in Italian)
- Emiroglu, M. E., Kaya, N., & Agaccioglu, H. (2009). Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(1): pp. 37-46
- Erpicum, S., Silvestri, A., Dewals, B., Archambeau, P., Piroton, M., Colombié, M., & Faramond, L. (2013). *Escouloubre piano key weir: Prototype versus scale models. International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs II-PKW*, Nov. 20-22, Paris, France. CRC Press.
- Esmailpour, L., Farsadizadeh, D., & Hosseinzadeh-Dalir, A. (2016). Investigation of hydraulic characteristics of one-side semi-circular labyrinth side weir. *Journal of Water and Soil Science*, 26(1.1): pp. 187-195. (in Persian)
- Gandoshmin, A., & Norouzi, B. (2014). 3D hydrodynamics of curved piano key overflows on plan. *Journal of Hydraulic*, 9(3): pp. 61-79. (in Persian)
- Kabiri-Samani, A. R., & Javaheri, A. (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over the piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1): pp. 114-120.
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M., & Jalili-Ghazizadeh, M. R. (2018). Side weir flow characteristics: Comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydrology Engineering*, 144(12): pp. 1-13.
- Kazemi, J., Sanei, M., & Azhdari-Moghadam, M. (2016). Scale effect of the water surface profile on ogee weir with curvature in plan and training walls. *Journal of Applied Research of Irrigation and Drainage Structures Engineering*. 17(66): pp. 119-136. (in Persian)
- Lempérière, F., Vigny, J. P., & Ouamane, A. (2011). *General comments on labyrinths and piano key weirs: The past and present. International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs I-PKW*, Feb. 9-11, Liège, Belgium. CRC Press.
- Mehboudi, A., Attari, J., & Hosseini, S. A. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 50, pp. 65-72.
- Mehri, Y., Soltani, J., Saneie, M., & Rostami, M. (2018a). Discharge coefficient of a c-type piano key side weir at 30° and 120° sections of a curved canal. *Journal of Civil Engineering*, 4(7): pp. 1702-1713.
- Mehri, Y., Soltani, J., Saneie, M., & Rostami, M. (2018b). Discharge Coefficient of type-c piano key side weir in 30-degree sector of a channel having longitudinal curvature. *Journal of Agricultural Mechanization and Systems Research*, 19(70): pp. 133-148. (in Persian)
- Oertel, M. (2015). *Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models. 36th IAHR World Congress*, Jun. 28-Jul. 3. The Hague. The Netherlands.

- Roushangar, K., Alami, M. T., Majedi-Asl, M., & Shiri, J. (2017). Modeling discharge coefficient of normal and inverted orientation labyrinth weirs using machine learning techniques. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(3): pp. 1-10.
- Saghari, A., Sanei, M., & Hosseini, Kh. (2019). Experimental Study of one and two-cycle trapezoidal piano key side weirs in a curve channel. *Water Science & Technology Water Supply*, 19, doi:10.2166/ws.2019.029.

Laboratory Investigation on Discharge Coefficient of Trapezoidal Piano Key Side Weirs

M. S. Seyedjavad*, S. T. Omid-Naeini and M. Sanei

* Corresponding Author: Ph. D. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: minamfsj@gmail.com.

Received: 12 October 2018, Accepted: 7 May 2019

Extended Abstract

Introduction

The flow passing through a side weir, one of the varieties of water diversion structures, is a variable flow with decreasing flow rate. Labyrinth weir is the basis for piano key weirs. They are often constructed with vertical walls and are much more efficient than the linear weirs. Nevertheless, the flow, especially the bottom flow, enters this type of weirs and passes through two vertical walls of the side crests. Then it becomes squeezed and therefore the upstream and downstream crests come up with inappropriate hydraulic behavior. Also, the most outstanding disadvantage of this type of weirs is the large foundation area needed to be constructed on the concrete dams. The piano key weirs are a modern type of the nonlinear weirs which have been developed by Hydro Coop Institute of France and the Hydraulic and Environmental laboratory of the Biskara University of Algeria. In general, these weirs comprise of 4 different types, the differences of which lie in the presence or the absence of slopes created for them. Type A is sloped both upstream and downstream, Type B is sloped upstream, Type C is sloped downstream and Type D lacks any slope. The present study conducted show the effective geometrical parameters on the hydraulic performance and discharge coefficient (CM) of the trapezoidal piano key side weirs (TPKSW). The type of flow and its variations in a side weir can be considered as the C_M of the side weir, using simplifications and assumptions suggested by De-Marchi in 1934 to obtain suitable equivalents for side weirs.

Methodology

All tests have been conducted in a closed-loop rectangular Plexiglas flume in Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran. The study canal was 10 m long, 0.6m wide and 0.6m high. All tests have been carried out on the 0.6 m wide canal. To prevent flow turbulence upstream of the canal, tranquilizing racks were used at the upstream. A calibrated triangular weir was also applied to measure the flow at upstream. Also, a calibrated rectangular sharp-crested weir was used downstream. The water surface profiles were measured longitudinally. For this purpose, a digital depth profiler with 0.1 mm precision was used. The profiler accuracy was valid for almost stable water surface but it could be decreased in

highly turbulent flows. An electromagnetic velocity meter with 0.001 m/s precision was used to determine velocity components to obtain parallel (V_x) and perpendicular (V_y) to the side weir. The profiler and the velocity meter could move on a rail in both X and Y directions. Flow rates at the main and the collection canal were measured by a calibrated 90° V-notched and a rectangular weir, respectively. Figure 6 shows a general view of the laboratory. In this research, 16 models of Type-A trapezoidal weirs have been studied in two cases of 1 and 2. The weirs had 3mm thickness made of Plexiglas. The tests were carried out preventing the effects of viscosity and surface tension over the weir and considering the height of more than 3 cm.

Results and Discussion

In this research, for investigating the effects of a number of inlet cycles, the weirs were tested at two different directions of the side weirs located in the main canal. The results showed that the weirs with 15cm and 20cm had the highest discharge coefficient C_M in dimensionless ratios of $0.2 < H/P < 0.4$ and $H/P > 0.5$ respectively. Having reviewed previous studies, it could be concluded that the trapezoidal piano key side weir was capable of releasing a flow 1.2 times more than that of the linear trapezoidal labyrinth weir with 12 degrees angle and 1.87 times more than the one with 6 degrees angle, and 1.5 times more than that of the triangular labyrinth weir.

Conclusions

The result of the present study showed that these types of weirs could have a better lateral performance than other weirs. In addition to this research, other researchers can conduct detailed studies on sedimentation and sediment control in this type of weir.

Keywords: Discharge, flow, water diversion structure