

## Experimental Study of Discharge Coefficient and Flow Streamlines in a Trapezoidal Piano Key Side Weir

MINA SADAT SEYEDJAVAD<sup>1</sup>, SEYEDAGHI OMID NAEINI<sup>1</sup>, MOJTABA SANEI<sup>2\*</sup>

1. Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Soil and Water Conservation Research Institute, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Tehran, Iran.

(Received: Apr. 3, 2019- Revised: May. 19, 2019- Accepted: June. 1, 2019)

### ABSTRACT

The main application of spillway in rivers and dams reservoirs is control and diversion of flood and protection of their related structures. In this research, a laboratory study was performed to test 16 trapezoid piano key A type weir models with different pillars 10, 15 and 20 cm in a canal with 10 meters length, 0.6 m width and 0.6 m height. The proposed weirs were placed on the main canal wall with two arrangements. The results showed that the maximum overflow rate coefficient was corresponded to weirs with  $p=15\text{cm}$  in both arrangements (1 and 2) and the dimensionless ratio of  $0.4 <H/P> 0.2$  and also to weir with dimensionless ratio of  $0.5 <H/P$  and  $p=20\text{cm}$ . Finally, the trapezoid piano key weir with a  $p=15\text{cm}$  and a  $B=50\text{cm}$  identified to pass the most appropriate flow regime.

**Keywords:** Discharge coefficient of Piano Key, Side Weir, and Streamline flow.

## بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی و خطوط جریان در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای

میناسادات سید جواد<sup>۱</sup>، سیدتقی امید نائینی<sup>۱</sup>، مجتبی صانعی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۱۱)

### چکیده

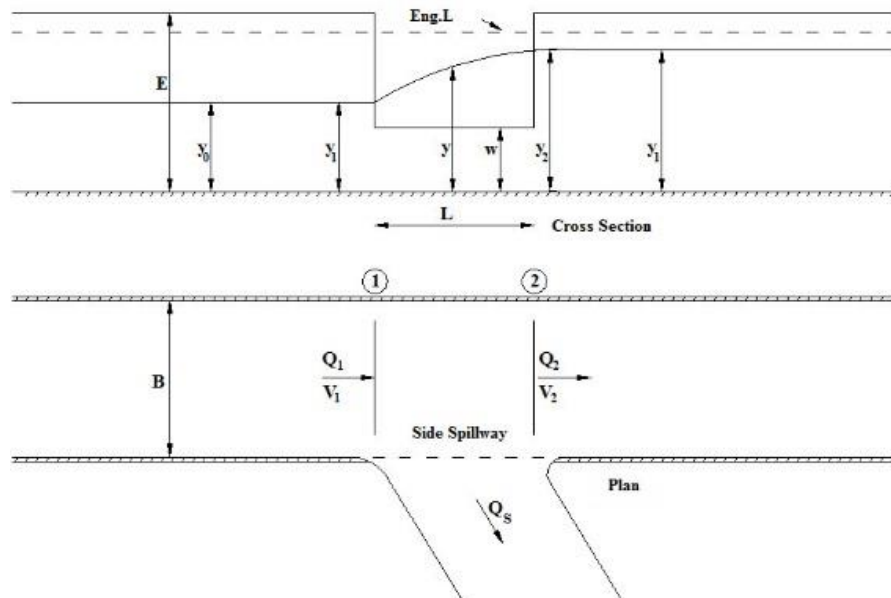
مهمترین کاربرد سرریزهای جانبی، کنترل و انحراف سیلاب و محافظت سازه مربوطه در مخازن سدها و رودخانه‌ها است. این تحقیق طی یک بررسی آزمایشگاهی در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و ۱۶ مدل سرریز دوزنقه‌ای کلید پیانویی تیپ A با سه پایه متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر انجام شده است. سرریزهای مذکور در دو حالت قرارگیری در دیواره کانال اصلی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان ضریب دبی عبوری ( $C_M$ ) مربوط به سرریزهای با  $p=15\text{ cm}$  در هر دو حالت ۱ و ۲ در نسبت بی‌بعد  $0.4 < H/P < 0.2$  و همچنین در سرریز با نسبت بی‌بعد  $H/P > 0.5$  و  $p=20\text{ cm}$  می‌باشند. در نهایت سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با  $p=15\text{ cm}$  و سرریز با  $B=50\text{ cm}$  مناسب‌ترین رژیم جریان را از خود عبور می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ضریب دبی عبوری سرریز کلید پیانویی، سرریز جانبی، خطوط جریان.

### مقدمه

و انحراف سیلاب در مخازن سدها، انحراف جریان و محافظت سازه در برابر سیلاب در رودخانه‌ها از دیگر موارد کاربرد سرریزهای جانبی است. در شکل (۱) نمای ساده‌ای از سرریز جانبی نشان داده شده است.

سرریز جانبی یکی از انواع سازه‌های انحراف آب است. جریان عبوری از سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است (Askari and Vatankhah Mohammadabadi, 2108). کنترل

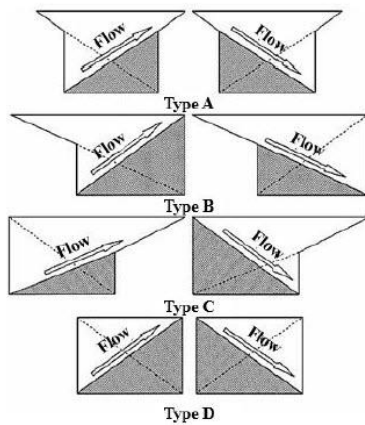


شکل ۱- نمایی از سرریز جانبی

جریان در قبل و بعد از سرریز است (Gandoshmin & Norouzi, 2014). جریان در سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با کاهش دبی است. تحقیقات زیادی بر روی این جریان

در شکل (۱)،  $y_1, y_2$  عمق آب در بالادست و پایین دست سرریز،  $w$  ارتفاع سرریز،  $B$  عرض کانال،  $L$  طول سرریز،  $Q_1, Q_2$  دبی جریان در قبل و بعد از سرریز،  $Q_s$  دبی سرریز،  $V_1, V_2$  سرعت

شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست، تیپ B، دارای شیروانی‌های بالادست و تیپ C، دارای شیروانی‌های پایین‌دست هستند و تیپ D، فاقد شیروانی است (Laugier, 2011). در واقع افزایش طول تاج سرریز در یک عرض ثابت آبراهه سرریز و به ازای یک‌بار آبی ثابت، دبی مؤثر این سرریزها را سه تا چهار برابر نسبت به سرریز خطی افزایش می‌دهد (Anderson & Tullis, 2012).



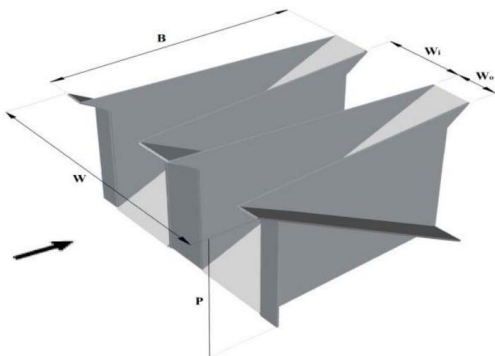
شکل ۲- انواع مختلف سرریز کلید پیانویی (لمپیر و همکاران، ۲۰۱۱)

دبی کل عبوری از روی سرریزهای کلید پیانویی به یک سری عوامل هیدرولیکی و هندسی به صورت رابطه (۲) مرتبط هستند (Riberio et al., 2007):

(رابطه ۲)

$$Q = f(\rho, g, \mu, H, L_t, P, W, W_i, W_o, B_i, B_o, L, S_{in}, S_{out}, t, R, \alpha)$$

که در آن،  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب بیانگر جرم مخصوص و لزجت دینامیکی سیال بوده و  $g$  شتاب ثقل است.  $H$  بیانگر هد کل جریان روی سرریز بوده و  $L_t$  طول کل تاج است. در رابطه مزبور  $P, W, W_i, W_o, B_i, B_o, L$  به ترتیب بیانگر ارتفاع سرریز، عرض کل، عرض کلید ورودی، عرض کلید خروجی، طول کنسول پایین‌دست، طول کنسول بالادست و طول تاج کناری است.  $S_{in}$  و  $S_{out}$  شیب کلیدهای ورودی و خروجی بوده و  $t$  ضخامت بدنه سرریز است. در شکل (۳) نمایی از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای تیپ A

انجام گرفته است. مطالعات دی مارچی در سال ۱۹۳۴ برای به دست آوردن معادله‌ای برای سرریزهای کناری و با توجه به شکل (۱)، فرضیات زیر را در نظر گرفت:

کانال مستطیلی و منشوری است (کانال منشوری کانالی است که در مسیر خود دارای سطح مقطع و شیب ثابت است)، سرریز کناری دارای طول کوتاه بوده و انرژی مخصوص بین مقاطع ۱ و ۲ ثابت است. این امر معادل فرض  $S_0 = 0$  یا  $S_0 - S_f = 0$  و  $S_f = 0$  بوده و نتایج تجربی نشان می‌دهد که یک فرض منطقی است. سرریز کناری معادل یک سرریز لبه تیز بوده که هوادهی کامل صورت گرفته و آب به صورت آزاد خارج می‌شود و ضریب تصحیح انرژی  $\alpha$  مساوی یک است. با توجه به فرضیات بالا، معادله دینامیکی مربوط به سرریزها به شکل زیر درمی‌آید:

(رابطه ۱)

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

معادله (۱) به عنوان معادله De Marchi معروف است.

مقادیر  $y$  و  $E$  عمق و انرژی در بالادست و پایین‌دست سرریز و  $w$  ارتفاع یا همان پایه سرریز ( $p$ )،  $B$  عرض کانال،  $x$  طول قرارگیری سرریز و  $C_M$  ضریب تخلیه دبی است. با توجه به عمومیت این رابطه، برای به دست آوردن دیگر سرریزهای جانبی و اشکال مختلف آن نیز از این رابطه استفاده شده است (De Marchi, 1934 و Gandoshmin & Norouzi, 2014). پایه و اساس سرریزهای کلید پیانویی، سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند. سرریزهای کنگره‌ای غالباً با استفاده از دیوارهای قائم ساخته شده و کارایی آن‌ها بسیار بهتر از سرریزهای خطی است، اما جریان نزدیک شونده به این نوع سرریزها، به‌ویژه جریان‌های تحتانی، پس از ورود به محدوده دو دیواره قائم تاج‌های کناری، به شدت دچار فشردگی شده و به همین علت، تاج‌های بالادست و پایین‌دست نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب ندارند. علاوه بر این نکات، عیب عمده این نوع سرریزها، سطح پی بزرگ موردنیاز برای نصب آن‌ها بر روی سدهای بتنی است. شکل جدیدی از سرریزهای غیرخطی، سرریزهای کلید پیانویی هستند که توسط مؤسسه هیدروکووپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک و محیط‌زیست دانشگاه بیسکارا الجزایر ارائه شده است (Lempérière and Ouamane, 2003). در این نوع از سرریزها، برخلاف سرریزهای کنگره‌ای، دهانه‌ها یک‌درمیان شیب‌دار به سمت داخل مخزن و بیرون است. این نوع سرریزها دارای چهار تیپ مختلف به نام‌های A, B, C, D می‌باشند. به‌طور کلی سرریزهای کلید پیانویی دارای چهار تیپ مختلف هستند که تفاوت آن‌ها در وجود یا عدم وجود شیروانی است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، تیپ A، دارای

نسبت عرض دهانه‌ها برابر ۱ باعث می‌شود که استغراق در این سرریزها دیرتر شروع شود و حد استغراق کامل آن‌ها تغییری نکند (Roshangar et al, 2018). Nasiri et al. (2016) در تحقیقی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در اطراف سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از سرریز کلید پیانویی مدور به‌عنوان ورودی شفت‌های قائم، یکی از روش‌های اصلاح ورودی سرریز مدور قائم است که تأثیر چشمگیری بر کاهش قدرت جریان گردابی دارد. سرریز کنگره‌ای دارای سه شکل کلی مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی است که مطالعه محدودی روی شکل مستطیلی انجام شده و خصوصیات هیدرولیکی آن به‌طور کامل مشخص نشده است. در پژوهشی رابطه دبی جریان و ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مستطیلی با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج و برای تعیین ضریب‌های ثابت رابطه‌ها از مدل فیزیکی استفاده شده است (Rezaei et al., 2015). سرریزهای زیگزاگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی است که برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در مخازن سدها استفاده می‌شود. عملکرد سرریزهای زیگزاگی در بارهای زیاد جریان، به جهت تداخل تیغه‌های جریان، تلاطم و استغراق در کلید خروجی مطلوب نیست؛ از این رو Hamidinia et al. (2018) در پژوهشی به بررسی اثر محل قرارگیری دیواره سپری بر استغراق ورودی سرریز پرداختند. این تحقیق نشان داد که دیواره‌های سپری نصب‌شده در خروجی سرریز حدود ۵ الی ۱۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به حالت نصب دیواره‌های سپری در ورودی از خود نشان می‌دهد. سرریزهای کلید پیانویی به‌واسطه فضای کمی که اشغال می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان سرریز جانبی در کنترل سیلاب، کنترل سطح آب بالادست رودخانه‌ها و تأمین آب کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرند. Mehri et al. (2018) برای بررسی سرریز کلید پیانویی مستطیلی تیپ C در دو قوس ۳۰ و ۱۲۰ درجه به‌عنوان سرریز جانبی استفاده کردند. نتایج بیانگر این مطلب بود که این نوع از سرریز می‌تواند عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر سرریزهای متداول داشته باشد. Karimi et al. (2018) به بررسی خصوصیات جریان سرریزهای جانبی کلید پیانویی مستطیلی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که میزان دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی بسیار بالاتر از سرریزهای دیگری است که در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. باوجود مطالعات گسترده در این نوع سرریز با یک فرم پلان مستطیل شکل (RPKW)، در کانال مستقیم، تحقیق و پرداختن به سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای شکل به‌صورت جانبی ضرورت پیدا کرده است. در تحقیق حاضر به بررسی ضریب دبی عبوری از این نوع سرریز در حالت جانبی پرداخته شده است. با

مطالعاتی که بر روی این نوع از سرریزها صورت گرفته است در کانال‌های مستقیم بوده و محققینی چون Kabiri-Samani & Javaheri (2012) مطالعاتی را به‌منظور تعیین ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی در حالت جریان آزاد انجام دادند. Anderson et al. (2013) به بررسی تأثیر عمق‌های متفاوت بالادست سد و شیب‌های کناری و تأثیر آن‌ها بر روی ضریب دبی  $C_d$  پرداختند. محققین دیگری به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر روی دبی سرریزهای کلید پیانویی شکل با آنالیز عددی سه‌بعدی پرداختند. این محققین برای این منظور از سرریز کلید پیانویی شکلی که در سال ۲۰۰۳ توسط Lemperiere و Ouamane طراحی شده است (تیپ A) استفاده کردند. نتایج نشان دادند که تمامی پارامترها می‌توانند تأثیر مستقیمی بر روی عملکرد این نوع از سرریزها بگذارند و از طرفی مدل نوشته‌شده می‌تواند نتایج خوبی را ارائه دهد (Lefebvre et al., 2013). Mehboudi et al. (2016) به بررسی مطالعات آزمایشگاهی بر روی ضریب دبی عبوری ( $C_d$ ) سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای شکل در کانال مستقیم پرداختند. نتایج نشان دادند که در کانال مستقیم میزان دبی عبوری و عملکرد این نوع از سرریزها از سرریزهای کلید پیانویی مستطیل شکل ۲۲٪ بالاتر است. Oertel (2015) به بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی شکل تیپ A پرداخت.

در تحقیقی به بررسی سرریز کلید پیانویی با پاراپت وال‌های زاویه‌دار در دو مدل پرداخته شده است. نتایج نشان داد که مدل یک برای زاویه منفی ۳ درجه، توانایی بیشتری در تخلیه‌ی جریان نسبت به سرریز اوجی، تقریباً در حدود ۲/۴ برابر را دارا است (Afzalian & Ahadian, 2015). در پژوهشی دیگر به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان سرریز کلید پیانویی در ترکیب‌های مختلف دیواره سپری پرداخته شده است. نتایج نشان داد که قرارگیری دیواره سپری بدون شیب روی کل تاج سرریز در مدل یک، راندمان سرریز را حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین مقایسه سرریزهای کلید پیانویی با سرریزهای خطی نتیجه داد که قرارگیری دیواره سپری بدون شیب بر روی کل تاج سرریز در مدل یک، ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی را ۴ برابر نسبت به سرریز خطی افزایش می‌دهد (Yarahmadi & Ahadian, 2015). بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی در شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق در تحقیق دیگری انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که اصلاح سرریزهای کلید پیانویی با نسبت عرض دهانه‌ها برابر ۱ باعث می‌شود که در این سرریز شروع استغراق زودتر و استغراق کامل دیرتر به وجود آید و اصلاح سرریزهای کلید پیانویی با شیب‌های منحنی شکل و

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

$$C_M = \Phi_2 \left( Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{B}, \frac{P}{y_1}, \frac{B_i}{L}, \frac{B}{P}, \frac{L'}{y_1}, \frac{W_i}{W_o}, \delta, \alpha \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

لازم به ذکر است عدد فرود بالادست سرریز در همه مدل‌های آزمایش شده کمتر از یک بوده است که شرایط جریان زیر بحرانی را در بالادست سرریز ارضا می‌نمود. تمام آزمایش‌ها در یک کانال پلکسی گلاس مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شده است. برای جلوگیری از اغتشاش جریان در بالادست از یک آرام‌کننده در بالادست و 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 از دستگاه پروفیل‌سنج با حساسیت در دامنه  $0.1 \pm$  m استفاده شده است. شکل (۵) نمایی از پلان موقعیت آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این تحقیق از ۱۶ مدل سرریز تیپ A ذوزنقه‌ای استفاده شده است که در دو حالت ۱ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سرریزهای مورد استفاده دارای ضخامت ۳ میلی‌متر بوده و از پلکسی گلس برای ساخت آن‌ها استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات آزمایش‌های انجام شده را بیان می‌کند. در این تحقیق برای بررسی تأثیر تعداد سیکل ورودی سرریزهای مورد آزمایش، دو حالت مختلف در کانال اصلی مورد آزمایش قرار گرفت. حالت یک حالتی است که دارای دو سیکل کامل ورودی و حالت دو دارای یک سیکل کامل ورودی است. شکل (۴) نحوه قرارگیری سرریز به دو حالت بیان شده را نشان می‌دهد.

دانستن عمق‌های اولیه  $y_1$  و  $y_2$  و در دست داشتن دبی‌های عبوری اولیه و نقاط محاسباتی، مقدار  $C_M$  به صورت حل معکوس به دست آمد. در این تحقیق از سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای به عنوان سرریز جانبی استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

از جمله متغیرهای مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی جانبی عبارت‌اند از:

الف: مشخصات فیزیکی سیال: جرم مخصوص ( $\rho$ )، لزجت

دینامیکی ( $\mu$ ) و کشش سطحی ( $\sigma$ )

ب: مشخصات هیدرولیکی جریان: عمق آب در بالادست

سرریز ( $y_1$ )، عمق آب در پایین دست سرریز ( $y_2$ ). همچنین سرعت جریان در کانال در بالادست سرریز ( $V_1$ ) و سرعت جریان در پایین دست سرریز ( $V_2$ ) نیز با داشتن دبی‌ها و سطح مقطع جریان به عنوان متغیرهای وابسته و یا جایگزین دبی‌ها قابل استفاده هستند.

ج: مشخصات هندسی کانال و سرریز: طول بازشدگی سرریز

(L)، طول مؤثر سرریز ( $L'$ )، زاویه کنسول‌های سرریز ( $\delta$ )، زاویه قرارگیری سرریز ( $\alpha$ )، ارتفاع سرریز (P)، طول سرریز (B)، طول کنسول پایین دست ( $B_i$ )، عرض ورودی سرریز ( $W_i$ )، عرض خروجی سرریز ( $W_o$ )، شیب کف کانال ( $S_0$ )، تعداد کنگره‌ها و هندسه آن‌ها.

د: مشخصات عمومی: شتاب ثقل (g)، ضریب دبی  $C_M$ .

بر اساس متغیرهای موجود نتیجه می‌شود:

(رابطه ۳)

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

بر اساس تئوری  $\pi$  باکینگهام، ۱۶ متغیر وجود دارد و با در

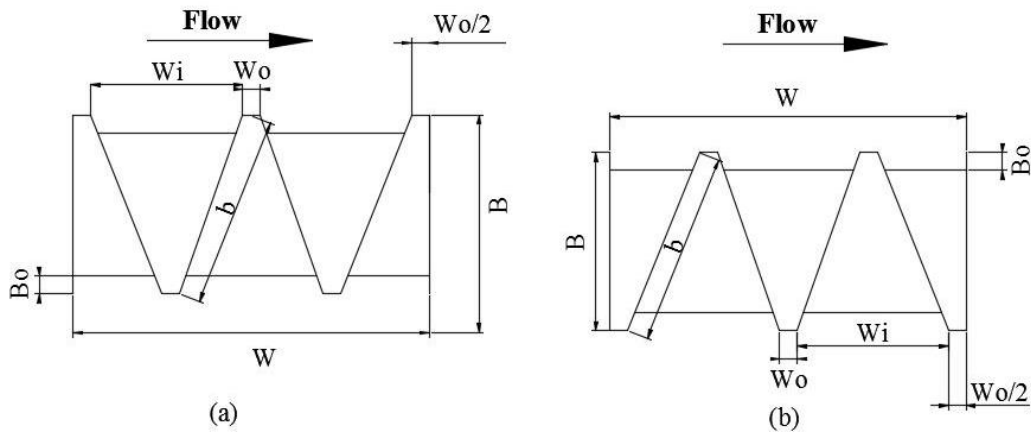
نظر گرفتن  $y_1$  (با بعد L)،  $V_1$  (با بعد  $LT^{-1}$ ) و  $\rho$  (با بعد  $ML^{-3}$ ) به عنوان سه متغیر اصلی (تکراری)، ۱۳ متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود. با ترکیب هر یک از متغیرها با متغیرهای اصلی، یک متغیر بی‌بعد حاصل می‌شود، بنابراین:

(رابطه ۴)

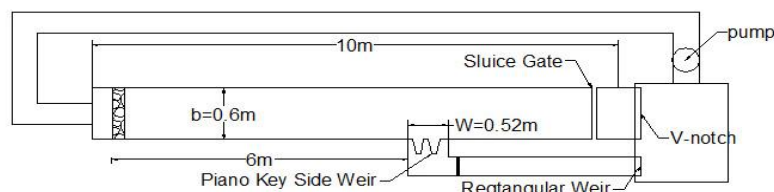
$$C_M = \Phi \left( \frac{V_1^2}{g y_1}, \frac{\mu}{\rho y_1 V_1}, \frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{B_i}{y_1}, \frac{B}{P}, \frac{L'}{y_1}, \frac{W_i}{W_o}, \alpha, \delta, S_0 \right)$$

جدول ۱- مشخصات سازه‌ها و آزمایش‌های انجام شده

Weir Type	B (cm)	P (cm)	b (m)	W (m)	W <sub>i</sub> /W <sub>o</sub>	L/W	Q <sub>1</sub> (L/s)	Fr
PKSW	۳۰	۱۰،۱۵،۲۰	۰/۶	۰/۵۲	۱/۳۳ - ۴	۲/۵-۶/۹	۶۰-۳۰	۰/۰-۱۵/۶
PKSW	۵۰	۱۰،۱۵،۲۰	۰/۶	۰/۵۲	۱/۳۳ - ۴	۲/۵-۶/۹	۶۰-۳۰	۰/۰-۱۵/۶
PKSW	۷۰	۱۰،۱۵،۲۰	۰/۶	۰/۵۲	۱/۳۳ - ۴	۲/۵-۶/۹	۶۰-۳۰	۰/۰-۱۵/۶



شکل ۴- نحوه قرارگیری سرریز (a) حالت ۱: (b) حالت ۲



شکل ۵- نمایی از پلان شرایط آزمایشگاه

#### پارامترهای مورد استفاده

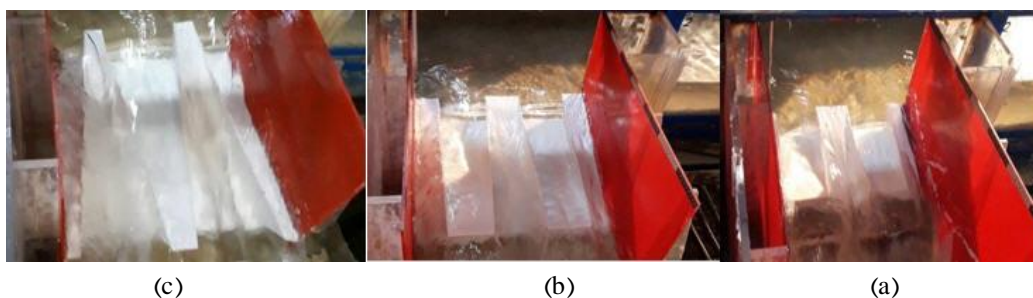
در این مطالعه، محورهای بدون بعد  $X$  و  $Y$  (هر دو از انتهای بالادست سمت بالایی) و  $Y$  (از انتهای کانال اصلی) تعریف می‌شوند:

$$X/W: X^* \text{ محور طولی به سمت پایین دست، } Y/b: Y^*$$

محور عرضی به سمت مخالف و  $Z/z_1: Z^*$  محور عمودی به سمت بالا است. در این تحقیق، با استفاده از یک سرعت‌سنج الکترومغناطیسی با دقت  $0.001 \text{ m/s}$ ، اجزای سرعت  $(V_Y)$ ،  $(V_X)$  در سه سطح  $(Z: 0.2, 0.6, 0.8)$  اندازه‌گیری شد. پروفیل سطح آب در طول مقطع اندازه‌گیری شد. برای این منظور از یک پروفیل‌سنج دیجیتال با دقت  $0.1 \text{ mm}$  استفاده شده است. پروفیل‌سنج و سرعت‌سنج می‌توانند بر روی یک ریل در هر دو جهت  $X$  و  $Y$  حرکت کنند.

#### بحث و نتایج

ویژگی‌های جریان مانند مشخصات سطح آب، ضریب تخلیه و توزیع سرعت، موضوعات بسیاری از مطالعات تحقیقاتی است. توزیع سرعت در امتداد عوارض جانبی یکی دیگر از ویژگی‌های مهم است که در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است (El-Khashab and Smith, 1976 و Bagheri and Heidarpour, 2012)، اما اخیراً ضرایب اصلاح انرژی و تحرک در امتداد جانبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Maranzoni et al, 2017; Michelazzo et al, 2015). همان‌طور که در جدول (۱) اشاره شده است در این تحقیق سه پایه متفاوت  $(P= 10, 15, 20 \text{ cm})$  و سه عرض متفاوت  $(B= 30, 50, 70 \text{ cm})$  در تیپ A سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ای از سرریزهای با عرض‌های متفاوت مورد استفاده‌شده در پایه  $10$  سانتی‌متر در شکل (۶) نمایش داده شده است.

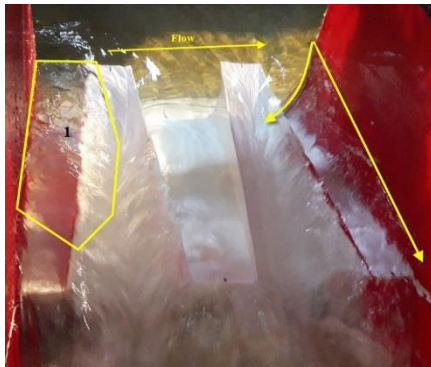


شکل ۶- (a) نمونه سرریز با عرض ۳۰ سانتی‌متر: (b) نمونه سرریز با عرض ۵۰ سانتی‌متر: (c) نمونه سرریز با عرض ۷۰ سانتی‌متر

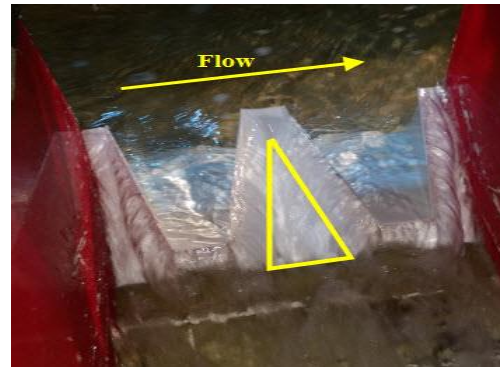
ریزش آب از سمت چپ جریان است. سمت چپ جریان حالت یکنواخت‌تری داشته در صورتی که سمت جریان حالت گردابی و تلاطمی دارد (شکل ۷).

در سرریزهایی که دارای  $w_0$  بالای ۱۳/۵ سانتی‌متر هستند، ریزش جریان در سیکل وسط سرریز به صورت یک شکاف عمیق همراه با جدائی جریان صورت می‌گیرد. عرض زیاد انتهای رمپ و نسبت ۳ برابری عرض ورودی و خروجی که باعث ایجاد شیب در رمپ موجود در سرریزها می‌گردد از دلایل ایجاد جدادگی جریان و شکاف عمیق در این نوع از سرریزها است (شکل ۸). نکته دیگری که در این نوع از سرریز می‌توان به آن اشاره کرد ریزش در قسمت کناری سرریز است که هرچه ارتفاع بالاتر می‌رود حقیقتاً ریزش کناری سرریز نیز به دیواره نزدیک‌تر می‌گردد (شکل ۹).

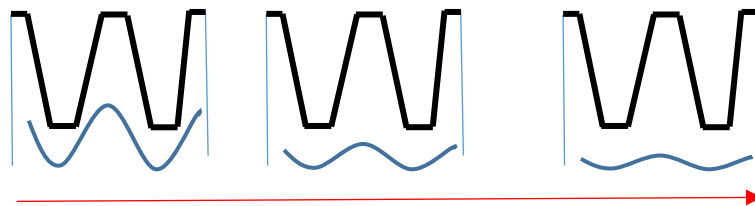
برای بررسی صحت عملکرد مناسب‌تر این نوع از سرریزها، به مقایسه انواع پارامترهای بی‌بعد استفاده شده در اندازه‌گیری‌ها با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌های دیگر محققین پرداخته شده است. در ادامه ابتدا به بررسی نتایج به‌دست‌آمده در شرایط کاملاً مشابه آزمایشگاهی با یک نوع از سرریزهای کلید پیاپویی پرداخته شده است و پارامترهایی نظیر پایه (P) و درجه قرارگیری زاویه بال‌های سازه‌ها ( $\alpha$ ) و از آن‌پس به ترتیب به بررسی انواع پارامترهای بی‌بعد از جمله  $L/W$ ،  $B/P$ ،  $L/B$  پرداخته شده است. در آزمایش‌هایی که بر روی ۱۶ سرریز مذکور انجام گرفته است، مشاهدات کلی در رژیم جریان و نحوه عبور آب از سرریز جانبی دیده شده است که در این قسمت از تحقیق بیان می‌گردد. در تمامی آزمایش‌های انجام شده مشاهده گردید که نحوه ریزش از سمت راست خیلی متفاوت‌تر از نحوه



شکل ۷ - تفاوت جریان در راست و چپ قرارگیری سرریز



شکل ۸ - جدادگی جریان در سرریز



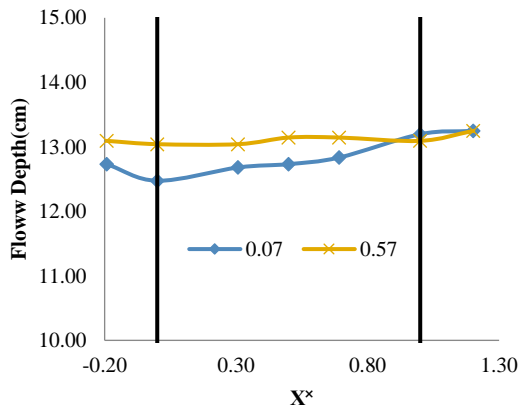
شکل ۹ - روند تغییرات ریزش جریان در حالت قرارگیری ۱ با افزایش ارتفاع آب بالادست سرریز



شکل ۱۰ - نمونه‌ای از پیچیدگی جریان در تیغه سمت چپ سیکل وسط سرریزهای پایه ۱۰ سانتی‌متری

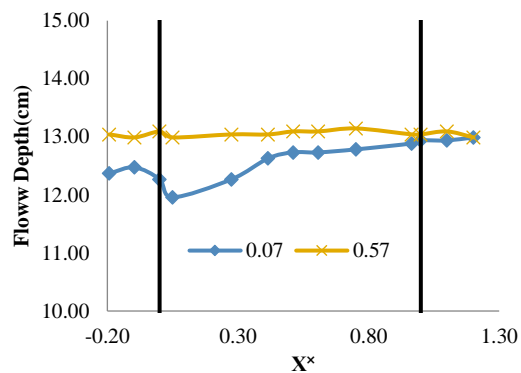
نکته قابل توجهی که در سرریزهای پایه ۱۰ سانتی‌متری در مشاهدات دیده شد این است که در حالت قرارگیری ۱، جریان به صورت مثلث شکلی از سیکل وسطی سرریز عبور می‌کند و در تیغه سمت چپ سیکل وسط، یک پیچی در جریان ایجاد می‌گردد که مطابق با عرض موجود در روی سرریز این نحوه پیچیدگی می‌تواند کم یا زیاد گردد (شکل ۱۰). در این سرریز نیز مانند دیگر سرریزها زمانی که ارتفاع آب بالادست وسط سرریز افزایش پیدا می‌کند، در هنگام ریزش در انتهای سرریز جانبی، جریان به هم آمیخته می‌شود و اغتشاش و تلاطم جریان مشهود است.

سانتی متری درگیر خروجی سرریز هستند و جبهه خروجی در ۴ سانتی متری به صورت سهوی خارج می گردد و در کل می توان گفت لبه ورودی سرریز دارای مانع نبوده و می تواند تأثیر بیشتری در خروج آب از حالت جانبی داشته باشند، در این حالت قرارگیری ارتفاعات بالاتر دارای فواصل بیشتری بین سطح قرارگیری ۴ و ۱۳ سانتی متری هستند. در کل حالت های قرارگیری در فواصل ۳۱ و ۳۴ سانتی متری انطباق بین خطوط بیشتر سرریزها وجود دارد و بنابراین می توان اذعان داشت که از اواسط کانال به بعد تأثیری در خروج آب از سرریز جانبی ندارد. نمودارهای (۱) و (۲) نمونه های از پروفیل های سطح آب محاسبه شده در این تحقیق را نشان می دهد. این پروفیل ها در  $H/P = 0.2$  برای سرریز با پایه ۱۰ سانتی متری در مقایسه با سرریز شاهد مستطیلی هستند.



نمودار ۱- پروفیل سطح آب LSW، در  $H/P = 0.2$

نتایج حاصل از بررسی های پروفیل سطح جریان بیان می کند که در حالت قرارگیری ۱، به علت وجود سه پایه در محل وجود سرریز، بیشترین خروجی سرریز تا اواسط آن صورت می گیرد و خطوط پروفیل سطح آب دارای فواصل کمتری است و جریان یکنواخت تر عبور می کند. این موضوع بیشتر در ارتفاعات کم بالادست سرریز رخ می دهد. در بیشتر سرریزها در حالت قرارگیری ۱، جبهه ورودی آب به صورت برآمده بوده و بیشترین کشش تا ۱۰ سانتی متری محل قرارگیری سرریز صورت می گیرد. هر چه سرریز دارای عرض کمتری باشد فواصل سطوح پروفیل آب در حالت قرارگیری ۱ به یکدیگر نزدیک بوده و انسجام بیشتری دارند. در حالت قرارگیری ۲، به خاطر وجود یک پایه در محل قرارگیری سرریز و در تمامی سرریزها، به طور کلی تا ۴۰



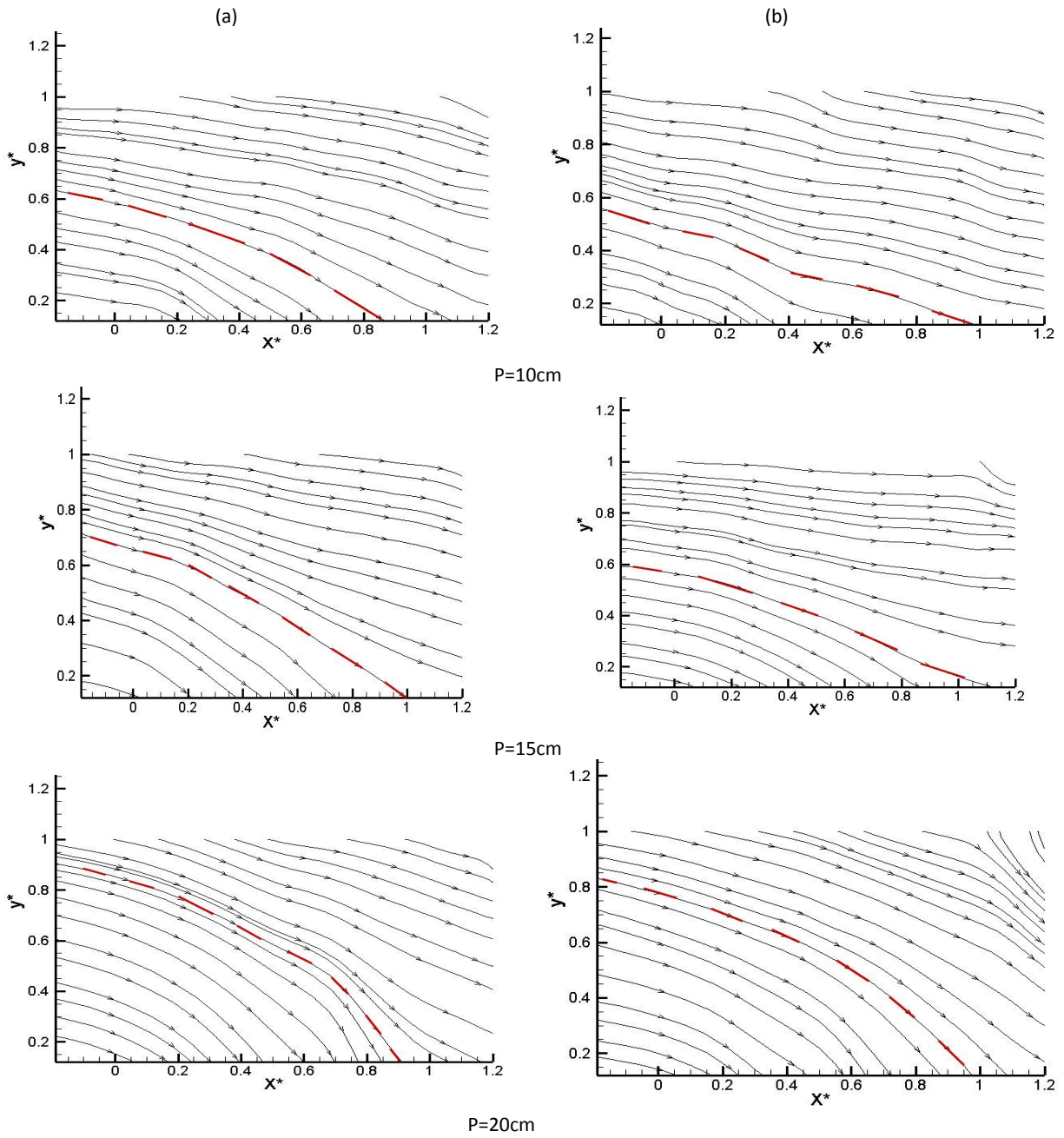
نمودار ۲- پروفیل سطح آب TPKW، در  $H/P = 0.2$

مستطیلی شکل تیپ C نسبت به دیگر سرریزهای معمول ساده و کنگره ای، سرریز جانبی کلید پیاپویی عرض بیشتری از کانال را در دبی یکسان درگیر می کند.

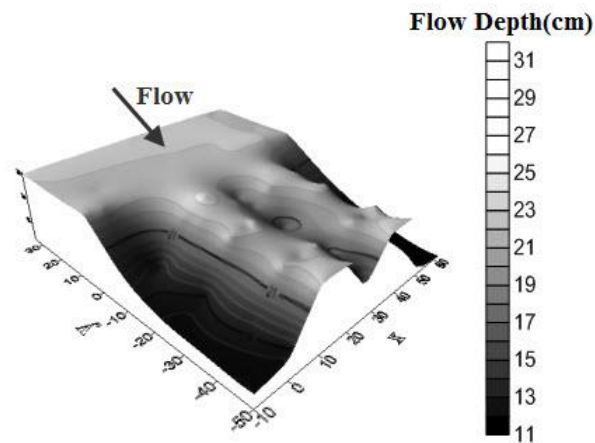
در تحلیل سه بعدی جریان بر روی سرریزها، در تمامی آزمایش های انجام شده، در سرریز پایه ۱۰ سانتی متری هر چه میزان عرض سرریز (B) از ۷۰ سانتی متر به ۳۰ سانتی متری کاهش میافتد، میزان تلاطم جریان نیز افزایش پیدا می کرد. از طرف دیگر با کاهش عرض سرریز و افزایش ارتفاع، فاصله ریزش از انتهای سرریز افزایش پیدا می کرد. همین نتایج در پایه ۱۵ و ۲۰ سانتی متری نیز حاصل شد با این تفاوت که در ارتفاع پایه ۲۰ سانتی متری با تشکیل حفره کناری در سمت چپ جریان، ورودی کمتر می گردید. در تمامی سرریزها در عرض ۷۰ سانتی متری آب بر روی سرریز با تلاطم کمتری عبور می کند. شکل (۱۲) نمونه ای از اشکال سه بعدی آب بر روی سرریز را نشان می دهد.

شکل (۱۱) نمونه ای از نتایج حاصل از بررسی خطوط جریان را در سه پایه متفاوت سرریز جانبی کلید پیاپویی دوزنقه ای در دو حالت قرارگیری ۱ و ۲ را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است، در یک نسبت ثابت  $H/P = 0.2$  در هر سه پایه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری در حالت قرارگیری ۱ (a)، با عرض های یکسان سرریز ( $B=50\text{cm}$ )، هر چه ارتفاع پایه سرریز افزایش پیدا می کند، عرض بیشتری از کانال نیز درگیر می شود ( $P=10\text{cm}-Y^*=0.62$ ;  $P=15\text{cm}-Y^*=0.72$ ;  $P=20\text{cm}-Y^*=0.90$ ). در حالت قرارگیری ۲ (b) مانند حالت قرارگیری ۱، عرض درگیری کف کانال با افزایش ارتفاع آب بالادست سرریز افزایش پیدا می کند؛ اما نکته قابل توجه این است که در این حالت با شرایط یکسان آزمایش، عرض بیشتری از سرریز جریان آب را از خود عبور می دهد. در بررسی خطوط جریان Karimi et al., 2018 نیز به این مهم دست یافتند که در سرریزهای کلید پیاپویی



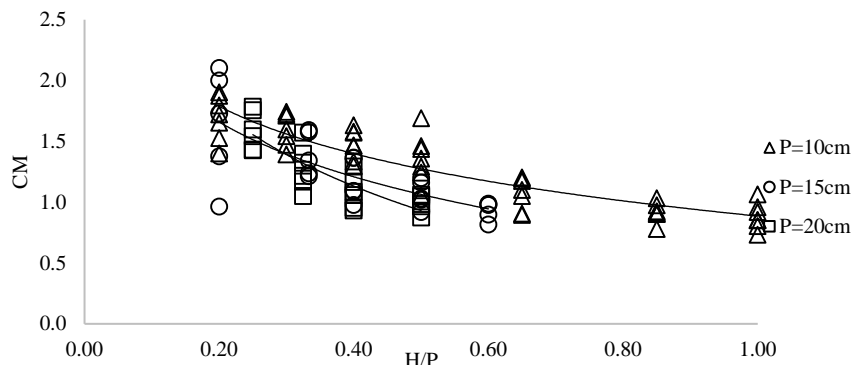


شکل ۱۱- نمایی از خطوط جریان عبوری در  $H/P = 0.2$



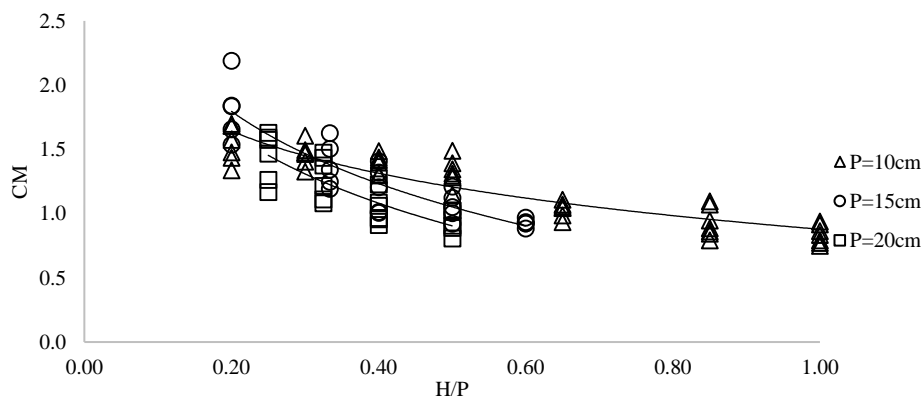
شکل ۱۲- نمای سه بعدی جریان بر روی سرریز

هرچه عرض سرریز (B) بیشتر باشد در نتیجه 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 اذعان داشت که اگر نسبت  $H/P > 0.5$  شود عملاً کارایی سرریز کاهش پیدا می کند. اگر  $B = 50\text{ cm}$  باشد در نسبت  $0.4 < H/P < 0.2$  ضریب دبی عبوری بین  $2/1$  تا  $1/36$  و از  $H/P > 0.5$  مقدار  $C_M$  بین  $1/2$  تا  $0.98$  متغیر است. اگر  $B = 30\text{ cm}$  باشد در نسبت  $0.4 < H/P < 0.2$  ضریب دبی عبوری در حالت ۱ سرریز بین  $0.96$  تا  $1/73$  است و از  $H/P > 0.5$  مقدار  $C_M$  بین  $1/0.2$  تا  $0.82$  متغیر است. همان طور که دیده می شود، در  $P = 15\text{ cm}$  اگر مقدار B کاهش پیدا کند به طبع L نیز کاهش پیدا کرده و در نتیجه ضریب دبی عبوری نیز کاهش پیدا می کند.



نمودار ۳- ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۱ سرریز

کرد که مقدار  $C_M$  بین  $1/76$  تا  $1/0.6$  در حال نوسان است و افت تقریباً زیادی بین  $B = 50\text{ cm}$  تا  $B = 70\text{ cm}$  در حالتی که  $0.2 = H/P$  رخ می دهد و حدود  $0.2$  واحد این مقدار کمتر می شود. البته در این مورد نیز مقدار  $C_M$  در حالت ۲ کمتر از حالت ۱ 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 می کند و تفاوت زیادی بین دو حالت  $B = 50\text{ cm}$  و  $B = 30\text{ cm}$  مشاهده می شود. ضریب  $C_M$  در حالتی که  $B = 50\text{ cm}$  است  $0.13$  بیشتر از دو حالت دیگر است.



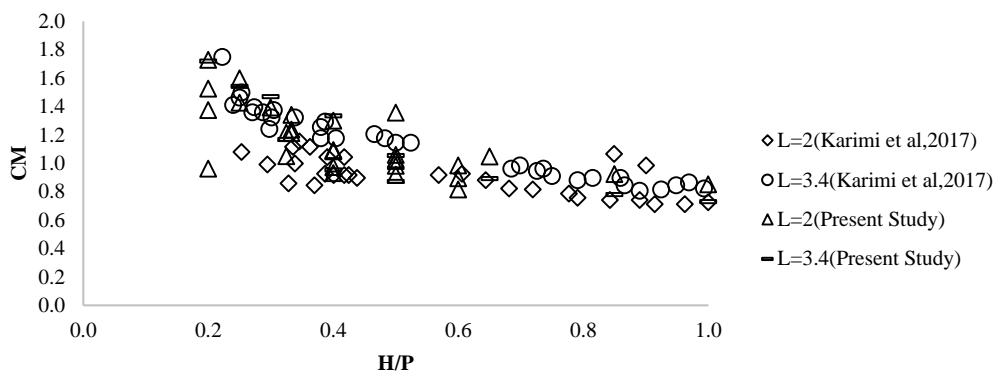
نمودار ۴- ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز

با توجه به نتایج به دست آمده در نمودار (۳)، 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  $1 < H/P < 0.5$  است، این مقدار بین  $1/7 < C_M < 0.7$  قرار می گیرد. نتایج بررسی سرریز با  $P = 10\text{ cm}$  در حالت ۲ در نمودار (۴) نشان داده شده است. میزان ضریب  $C_M$  در  $0.4 < H/P < 0.2$  بین  $1/9 - 1/3$  و در حالتی که  $1 < H/P < 0.5$  است، این ضریب بین  $1/7 - 0.7$  می رسد. در پایه  $P = 15\text{ cm}$  در کل داده های به دست آمده از آزمایش های سرریز در حالت ۱ با توجه به نمودار (۳) می توان این استنباط را داشت که

در  $P = 20\text{ cm}$  با توجه به کل داده های به دست آمده می توان استنباط کرد که هرچه عرض بال سرریز (B) بیشتر باشد در نتیجه ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود. اگر  $B = 70\text{ cm}$  باشد در نسبت  $0.4 < H/P < 0.2$ ، ضریب دبی عبوری ( $C_M$ ) بین  $1/78$  تا  $1/29$  است و بهتر است بیان شود در این نمونه از سرریزها  $H/P$  بالاتر از  $0.4$  قابل محاسبه نبوده است، البته در این مورد نیز باید متذکر شد که مقدار ضریب  $C_M$  در حالتی که سرریز به صورت حالت ۲ باشد، مقدار کمتری دارد. اگر ضریب  $C_M$  را در حالتی که  $B = 50\text{ cm}$  است مورد بررسی قرار دهیم می توان این برداشت را

جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/36$  تا  $0/82$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/07$  تا  $0/71$  است. برای حالتی که سرریزها دارای طول برابر  $3/4$  متر هستند، ضریب دبی عبوری در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/72$  تا  $0/95$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/72$  تا  $1/18$  است. در حالتی که  $H/P > 0/5$  باشد، ضریب دبی عبوری در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/47$  تا  $0/87$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی این ضریب بین  $1/21$  تا  $0/81$  است.

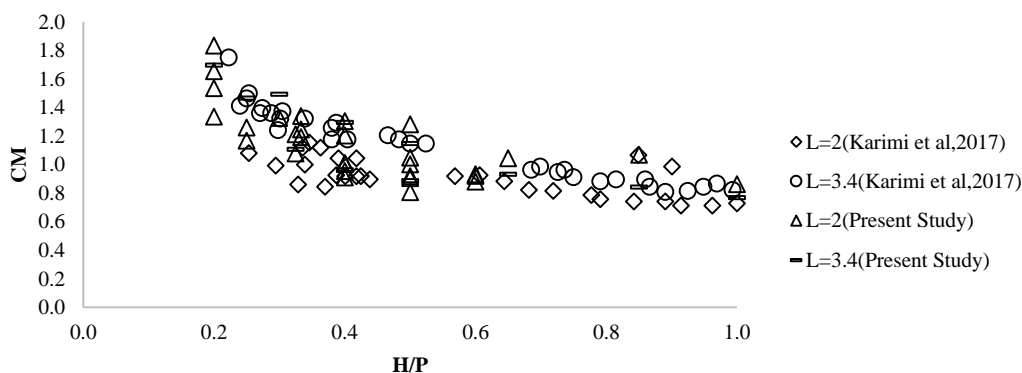
برای بررسی و صحت نتایج این تحقیق از نظر بهبود میزان ضریب دبی عبوری  $C_M$ ، نتایج تحقیق حاضر با شرایط مشابه مورد مقایسه قرار گرفت. در مقایسه نتایج سرریزها با یکدیگر، سرریز کلید پیانویی مستطیل شکل و سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در دو طول یکسان ۲ و  $3/4$  متر و در حالت ۱ مورد مقایسه قرار گرفتند (نمودار ۵). 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  $1/73$  تا  $0/93$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/15$  تا  $0/85$  است. در حالتی که  $H/P > 0/5$  باشد، ضریب دبی عبوری ( $C_M$ ) در سرریز



نمودار ۵- مقایسه ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۱ سرریز دوزنقه‌ای با سرریز مستطیلی

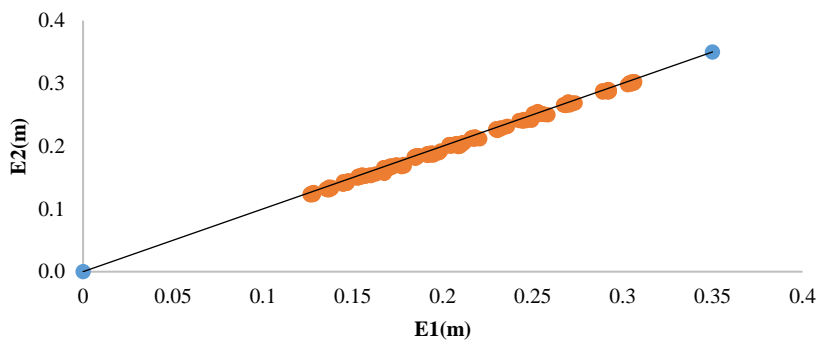
هستند، ضریب دبی عبوری در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/70$  تا  $0/96$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/72$  تا  $1/18$  است. در حالتی که  $H/P > 0/5$  باشد، ضریب دبی عبوری در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/15$  تا  $0/77$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/21$  تا  $0/81$  است. همان‌طور که نتایج نمودارهای (۵) و (۶) نشان می‌دهند سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای در عبور دبی در حالت جانبی عملکرد بهتری نسبت به حالت مستطیلی خواهد داشت.

نمودار (۶) نتایج آزمایش‌ها را در شرایطی که سرریزهای این تحقیق در حالت ۲ قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. اگر  $0/4 < H/P < 0/2$  قرار بگیرد و در حالتی که طول کل سرریز برابر ۲ متر باشد، ضریب دبی عبوری در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/83$  تا  $0/9$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/15$  تا  $0/85$  است. در حالتی که  $H/P > 0/5$  باشد، ضریب دبی عبوری در سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بین  $1/28$  تا  $0/8$  و در سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی بین  $1/07$  تا  $0/71$  است. برای حالتی که سرریزها دارای طول برابر  $3/4$  متر

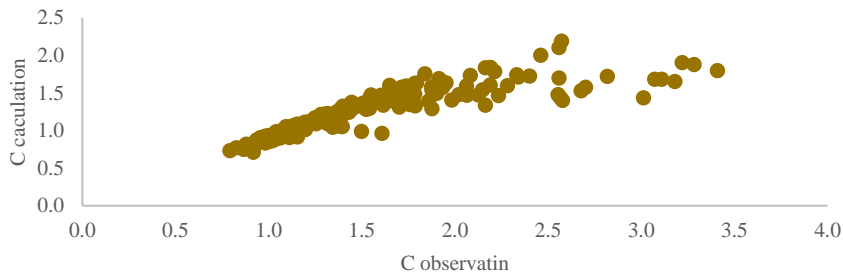


نمودار ۶- ضریب دبی عبوری در نحوه قرارگیری حالت ۲ سرریز دوزنقه‌ای با سرریز مستطیلی

نزدیکی خوبی برخوردار بوده و میزان اختلاف بسیار کمی با یکدیگر خواهند داشت. زمانی که  $H/P > 0.5$  باشد، اختلاف بین ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی زیاد است. برای محاسبه ضرایب دبی محاسباتی از معادله ضریب دی مارچی (معادله ۱) استفاده شده است و برای محاسبه ضریب مورد مقایسه از معادله طول مؤثر سرریز و  $H$  معادل ارتفاع آب در بالادست سرریز است.



نمودار ۷ - انرژی اولیه و ثانویه سرریز



نمودار ۸ - ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی

میزان ضریب دبی عبوری در سرریز دارای پایه ۱۵ سانتی‌متر و نسبت بی‌بعد  $0.2 < H/P < 0.4$  برابر  $2/2$  و در سرریز دارای پایه ۲۰ و نسبت بی‌بعد  $H/P > 0.5$  برابر  $1/63$  برآورد شد. بررسی خطوط جریان نشان داد که سرریزهای با پایه ۱۰ سانتی‌متری، کشش بیشتری به سمت خروجی از سرریز جانبی دارند. دلیل این امر کوتاه بودن پایه در این نوع از سرریزها است. نتایج حاصله از تحلیل سه‌بعدی نشان داد که در ارتفاع پایه ۱۵ سانتی‌متری و عرض ۵۰ سانتی‌متری، مناسب‌ترین نوع رژیم عبوری جریان از سرریزها وجود دارد. نتایج حاصل از مشاهدات نیز این مطلب را بیان می‌کند که هرچه ارتفاع آب بالادست سرریز بیشتر گردد میزان ورتکس جریان بر روی تیغه سمت راست سیکل اول در هر دو حالت قرارگیری افزایش پیدا می‌کند.

## REFERENCES

- Afzalian, A. and Ahadian J. (2015). Piano Key Weir with Angular Parameters. *National Science and Irrigation Engineering*, 38 (2), 91-102. . (In Farsi)  
Anderson, R. and Tullis, B. (2012). Piano Key Weir:

نمودار (۷) نشان‌دهنده میزان انرژی‌های اولیه و ثانویه در سرریزهای کلید پیانویی جانبی دوزنقه‌ای است که تقریباً نزدیک به هم می‌باشند و بیان‌کننده این مطلب است که تحقیق حاضر از دقت مناسبی برخوردار بوده است و می‌توان به ضرایب دبی به‌دست‌آمده اطمینان داشت. نمودار (۸) مقایسه ضریب دبی عبوری محاسبه‌شده و مشاهده‌شده را نشان می‌دهد که طبق نمودار حاصله و برحسب پارامتر بی‌بعد  $H/P$ ، زمانی که  $0.4 < H/P < 0.2$  قرار بگیرد، ضرایب دبی محاسباتی و مشاهداتی از

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان بیان داشت که سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای می‌تواند در حالت جانبی عملکرد مناسبی نسبت به دیگر سرریزهای مورد استفاده در این زمینه داشته باشد. در مقایسه بین پایه‌های متفاوت در این بررسی، نتیجه نهایی بدین صورت است که سرریز با  $p=15$  cm در شرایطی که به صورت حالت ۱ قرار بگیرد، در نسبت بی‌بعد  $0.2 < H/P < 0.4$  دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری ( $C_M=2/1$ ) بوده و با  $p=20$  cm و  $H/P > 0.5$  دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری ( $C_M=1/79$ ) می‌باشند. این مقادیر در حالت ۲ نیز صادق بود، به طوری که بیشترین

Reservoir versus channel application. *J. Irrig. Drain Eng*, 138(8): 773-776.

Anderson, R. M. and Tullis, B. P. (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison.

- J. Irr&Dra Eng*, 139(3): 246-253.
- Askari, R. And Vatankhah Mohammadabadi, A.(2018). Theoretical and laboratory study of lateral trapezoid lateral overflow in underwater conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. doi: 10.22059/ ijswr. 2018. 262443. 667972. g. (In Farsi)
- Bagheri, S., and M. Heidarpour. (2012). Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng*, 138 (6),541–547. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000433).
- De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria Del funzionamento degli stramazzi laterali. [In Italian.] *L'Energia Elettrica*, 11 (11): 849–860.
- El-Khashab, A., and K. V. H. Smith. (1976). Experimental investigation of flow over side weirs. *J. Hydral. Eng. Div*, 102 (9), 1255–1268.
- Ercicum, S., Silvestri, A., Dewals, B., Archambeau, P., Pirotton, M., Colombié, M. And Faramond, L. (2013). Escouloubre Piano Key weir: *Prototype versus scale models, Labyrinth and Piano Key weirs II*. CRC press. London, 65–72.
- Gandoshmin, A. and Norouzi, B. (2014). 3D hydrodynamics of curved piano key overflows on plan. *J. Hydraulic*, 9 (3):61-79. (In Farsi)
- Hamidinia, M., Hydarnezhad, M., Pourmohammadi, M.H., Masjedi, A. and Bordbar, A. (2018). Numerical modeling of the flow field around vertical circular weirs with piano key input. *Iranian Journal of Soil and Water Research, Articles ready for publication*.
- Kabiri-Samani, A.R. and Javaheri, A. (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over the piano key weirs. *J. Hydraulic Res*, 50(1): 114-120.
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili Ghazizadeh, M. R. (2018). Side Weir Flow Characteristics: Comparison of Piano Key, Labyrinth, and Linear Types. *J. Hydraul. Eng*, 144(12),1-13.
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili, M. (2017). Experimental study of discharge coefficient of a Piano Key Side Weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW* .109-116.
- Kazemi, J., Sanei, M. and Azhdari Moghadam, M. (2016). The effect of the scale on the profile of the water surface in an Ogee Weir with curvature in plan and with converging lateral walls. *Journal of Applied Research of Irrigation and Drainage Structures Engineering*, 17(66), 119-136.
- Laugier, F.(2011). Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *Int. J. Hydropower & Dams*, 14 (5), 94-101.
- Lefebvre, V., Vermeulen, J. and Blancher, B. (2013). Influence of geometrical parameters on PK-Weirs discharge with 3D numerical analysis Labyrinth and piano key weirs-PKW. *CRCpress, London*. 49-56.
- Lempérière, F., and Ouamane. A., (2003). The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower & Dams*, 10.5: 144-149
- Maranzoni, A., M. Pilotti, and M. Tomirotti. (2017). Experimental and numerical analysis of side weir flows in a converging channel. *J. Hydraul. Eng*, 143 (7), 04017009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001296).
- Mehboudi, A., Attari, J. and Hosseini, S.A. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *J. Flow Measurement and Instrumentation*. Elsevier, 50, 65-72.
- Mehri, Y., Soltani, J., Saneie, M. and Rostami, M. (2018). " Discharge Coefficient of a C- Type Piano Key Side Weir at 30° and 120° Sections of a Curved Channel". *J. Civil Engineering*, 4(7), 1702-1713.
- Michelazzo, G., H. Oumeraci, and E. Paris.( 2015). Laboratory study on 3D flow structures induced by zero-height side weir and implications for 1D modeling. *J. Hydraul. Eng*, 141 (10): 04015023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001027](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001027).
- Nasiri, S., Kabiri Samani, A.R. And Asghari, K.(2016). Numerical modeling of the flow field around vertical circular with piano key weir. *J. Hydraulic Res*, 11(1): 53-66.
- Oertel, M. (2015). Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models. 36th IAHR World Congress the Hague. the Netherlands.
- Rezaei, M., Amedi, A. And Aghajani Mazandarani, Gh. (2015). Experimental study of Labyrinth rectangular Weir. *Journal of Water and Soil*, 29 (6), 1438-1446.
- Riberio, M.L., Boillat, J.L., Schleiss, A., Laugier, F. and Albalat, C. (2007). Rehabilitation of smarc dam- experimental optimization of a piano key weir. Proc. of 32nd Congress of IAHR. Vince. Italy.
- Roshangar, K., Majediasl, M., Alami, M.T. And Shiri, J.(2018). Evaluation of the effect of arc-cycle angular variations on discharge coefficient of Labyrinth arches and arc Piano key. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 341-351. DOI:10/22059/ijswr.2018.231028.667658
- Yarahmadi, B. and Ahadian, j. (2015). Hydraulic Experimental Piano Key Weir Flow in Different Blend Spacers. *National Science and Irrigation Engineering*, 39(4), 47-58. (In Farsi)