



# Experimental Study of the Discharge Coefficient in Side Weirs with the Piano Key and the Rectangular Labyrinth Crests

Saeid Jeddi <sup>1</sup>, Jalal Sadeghian <sup>2\*</sup>, Bahram Rezaei <sup>2</sup>

1- M.Sc. Student, Water Eng. and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\* [j.sadeghian@basu.ac.ir](mailto:j.sadeghian@basu.ac.ir)

Received: 4 August 2020, Accepted: 31 August 2020   J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Weirs or spillways are the oldest and the most important hydraulic structures. They have several applications such as evacuation of excess water flow due to floods, control of water level in the reservoir, flow diversion, reduction of river erosion and flow measurement. The side weir is one of the various types of weir which is used to control flow level, diversion and flood damage prevention in dams and hydraulic systems. Also, the side weirs are divided into linear and non-linear crests. Non-linear weirs come in a variety of forms, such as labyrinth weir and piano key weir. These structures are used to increase the length of the crest and their discharge capacity where there is length limitation for the weir construction. Due to the importance of the discharge coefficients in the side weirs with the piano key and the labyrinth crest shapes, in the present work a vast range of experiments were performed on those types of weirs with different height and geometries. The results of experiments are then used to compare the piano key side weir with the labyrinth one.

**Methodology:** The experiments were carried out on a 10 m flume at the Bu-Ali Sina University, civil engineering department. A simple rectangular cross section was selected with almost 10 m length, 0.60 m width and 0.60 m height. The rectangular labyrinth and piano key weirs experimental models are made using 5 mm plexiglass material in 3 cycles, and 4 heights of 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm. The side weirs models had 57 cm length and were fixed in the wall opening near the flume end. Since in this research the flow condition is the spatial varied flow, the De Marchi relationship and dimensional analysis have been used to investigate the discharge coefficients in the piano key weirs and the rectangular labyrinth weirs.

**Results and Discussion:** This study generally shows that, with increasing value of  $H_i/P$ , the weir discharge capacity will be increasing. For example, in rectangular labyrinth weir with 20 cm height the discharge coefficient is almost 34%, 7.3% and 14.1% larger than that for weir with height of 5 cm, 10 cm and 15 cm respectively. Also, a comparison between the 5, 10 and 15cm weirs, with the 20 cm height weir, revealed that the weir efficiency has increased by 35%, 7.8% and 14.5%, respectively. Meanwhile, in the rectangular labyrinth weir with heights of 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm by increasing  $H_i/P$  from 0.95, 0.66, 0.46 and 0.32, respectively, the weir efficiency decreases significantly and its performance will be closer to the linear weirs. Compared to the piano key weirs with 5 cm, 10 cm and 20 cm heights, in the weir with 15 cm height, the averaged discharge coefficient increased by 9.3%, 5.5% and 9.2%, respectively. The results of experiments on the piano key weir show that by choosing 15 cm as the weir height,

the average weir efficiency increases by 9.5%, 3.5% and 9.4% respectively (in comparison with 5 cm, 10 cm and 20 cm weir). Furthermore, according to the experimental results on the piano key weir with 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm height, by increasing the  $H/P$  ratio from 0.88, 0.6, 0.44 and 0.35 values, the weir performance also will be closer to linear weirs and the weir efficiency is reduced considerably. In rectangular labyrinth weir and piano key weir, the interference of the flow shedding blades causes a weir at the end of the outlet keys, which is the beginning of a significant decrease in the weir efficiency; and as the interference of these shedding blades increases, the weirs flow gradually deviates from its original function and acts as a linear weir.

**Conclusion:** For the weir with a specific value of  $H/P$ , the smallest weir has the highest discharge coefficient and the lowest discharge capacity. Previous studies on the labyrinth and piano key weirs indicate that when the weir axis is perpendicular to the flow direction, the efficiency of the piano key weir is much more than that for the rectangular labyrinth weir. However, for side weirs where the weir axis is parallel to the flow direction the rectangular labyrinth weir shows better efficiency and performance compared with the piano key weir. The Type A piano key side weir performs better than the Type C piano key side weir.

**Keywords:** Labyrinth side weir, Piano key side weir, Side weir, Discharge coefficient.



© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# ارزیابی آزمایشگاهی ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پانویی و کنگره‌های مستطیلی

سعید جدی<sup>۱</sup>، جلال صادقیان<sup>۲\*</sup>، بهرام رضائی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.  
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

\* [j.sadeghian@basu.ac.ir](mailto:j.sadeghian@basu.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** سرریزها از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند و نمونه‌ای از انواع آن‌ها، سرریز جانبی است. می‌توان از شکل‌های مختلف این سرریزها به سرریزهای غیرخطی در تاج مانند سرریز کنگره‌ای و کلید پانویی اشاره کرد. در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی ضریب تخلیه سرریزهای جانبی کنگره‌ای مستطیلی و کلید پانویی در ۳ چرخه و با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر بررسی و ارزیابی شده است. برای انجام آزمایش‌های این پژوهش از آبراهه موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در همه سرریزهای جانبی کنگره‌ای و کلید پانویی چگونگی تغییرپذیری‌های  $C_d$  و  $Q_L/Q_n$ ، نسبت به  $H/P$  نزولی بوده و با افزایش میزان  $H/P$  میزان‌های  $C_d$  و  $Q_L/Q_n$  کاهش می‌یابند. در این تحقیق که سرریزهای یاد شده به صورت جانبی در آبراهه تحت آزمایش قرار گرفتند نتایج نشان می‌دهد که سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی بازده و عملکرد بهتری نسبت به سرریز جانبی کلید پانویی دارد. همچنین سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برای میزان‌های بیش از  $H/P$ ، ۰/۹۵، ۰/۶۶، ۰/۴۶ و ۰/۳۲ با افزایش نسبت  $H/P$  سرریز از عملکرد مطلوب خود خارج شده و بازده آن به شدت کاهش پیدا می‌کند این میزان‌ها برای سرریزهای کلید پانویی به ترتیب برابر با ۰/۸۸، ۰/۶، ۰/۴۴ و ۰/۳۵ می‌باشد.

**کلید واژگان:** سرریز جانبی کنگره‌ای، سرریز جانبی کلید پانویی، سرریز جانبی، ضریب تخلیه.

## ۱- مقدمه

به آبراهه جانبی استفاده می‌شود و تخلیه آب از آبراهه اصلی به آبراهه جانبی به صورت آزاد توسط شتاب ثقل زمین صورت می‌گیرد. هدف از استفاده‌ی سرریز جانبی در سامانه‌های انتقال و توزیع آب، مهار سطح جریان، انحراف آب و جلوگیری از آسیب و یان‌های ناشی از رخداد سیل می‌باشد. می‌توان از شکل‌های مختلف سرریزهای جانبی به سرریزهای غیرخطی در تاج اشاره کرد. سرریزهای غیرخطی دارای انواع مختلفی هستند و در جایی که برای احداث سرریز محدودیت طول داشته باشیم برای افزایش طول تاج و در نتیجه افزایش ظرفیت تخلیه از سرریز غیرخطی استفاده می‌شود. از انواع مختلف سرریزهای غیرخطی می‌توان به سرریزهای کنگره‌ای و کلید پانویی اشاره کرد. در سرریزهای کنگره‌ای متغیرهایی مانند ارتفاع تاج، زاویه،

سرریزها از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند و کاربردهای چندی مانند عبور آب اضافی ناشی از سیلاب، مهار سطح آب در مخزن، انحراف جریان، کاهش فرسایش رودخانه و محاسبه میزان دبی عبوری را دارند. یک نمونه از انواع سرریزها، سرریز جانبی است. سرریز مستقیم در راستای محور سد تعبیه می‌شود در حالی که سرریز جانبی، عمود بر محور سد و خارج از بدنه سد ساخته می‌شود. همچنین استفاده از سرریز جانبی در سد هنگامی مناسب است که استفاده از سرریز مستقیم وجود نداشته باشد، مانند سد خاکی و یا سرریز اصلی به تنهایی قادر به تخلیه سیلاب طرح نباشد. سرریز جانبی در دیواره آبراهه یا در راستای محور جریان برای انحراف جریان از آبراهه اصلی

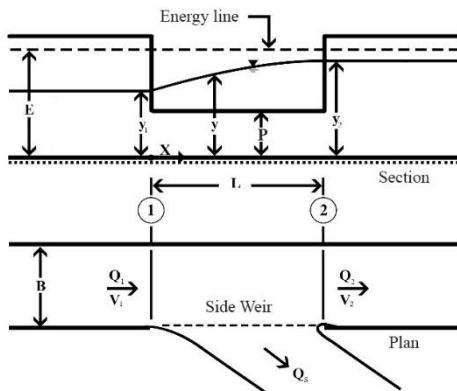


Fig. 1 Scheme of a side weir  
(Abrishami and Hosseini, 2017)

شکل ۱ نمای کلی یک سرریز جانبی  
(Abrishami and Hosseini, 2017)

استفاده کرد (Abrishami and Hosseini, 2017).  
پیش از ۱۹۷۰، شمار کمی از محققان مانند جنتلینی،  
تایسون و فرانسون به بررسی و ارزیابی ضریب تخلیه در  
سرریز کنگره‌ای پرداختند. پس از آنان تیلور نخستین کسی  
بود که به طور جدی ارزیابی‌هایی را در زمینه بررسی ضریب  
تخلیه سرریزهای کنگره‌ای انجام داد (Monjezi et al.,  
2018).  
Darvas (1971) یک معادله تجربی برای ضریب تخلیه  
سرریز کنگره‌ای ارائه کرد که به صورت رابطه (۳) می‌باشد.  
وی همچنین بنابر نتایج معادله‌های خود چند منحنی برای  
طراحی سرریزهای کنگره‌ای ارائه کرد.

$$C_d = \frac{Q}{W.H_t^2} \quad (3)$$

در این رابطه،  $C_d$  ضریب تخلیه سرریز،  $Q$  دبی عبوری از  
سرریز،  $W$  طول دهانه سرریز و  $H_t$  ارتفاع کل آب روی تاج  
سرریز می‌باشد. همچنین  $H_t$  برابر است با  $h + \frac{V^2}{2g}$  که  $h$  برابر  
 $V_1$  (سرعت در ابتدای سرریز) و  $h$  برابر با ارتفاع تیغه  
آب روی سرریز می‌باشد.

(Magalhães and Lorena (1989) منحنی‌های توسعه  
یافته‌ای مانند Darvas (1971) برای سرریز کنگره‌ای ارائه  
کردند. آنان با توجه به نتایج و بررسی‌های خود ضریب تخلیه  
بدون بعدی را برابر رابطه (۴) ارائه کردند.

$$C_d = \frac{Q}{W.\sqrt{2g}.H_t^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $C_d$  ضریب تخلیه سرریز،  $Q$  دبی عبوری از

شمار چرخه‌ها، ضخامت و شکل تاج مهم می‌باشد. همچنین  
از متغیرهای هیدرولیکی سرریز جانبی کنگره‌ای می‌توان به  
دبی ورودی، سرعت و نوع جریان، عمق و رخ نمای سطح  
آب اشاره کرد. سرریز کلید پیاپویی نیز دارای ویژگی‌های  
هندسی چندی است که می‌تواند روی عملکرد سرریز تاثیر  
بگذارد (Anderson and Tullis., 2012).

جریان حاکم روی سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با  
کاهش دبی می‌باشد. (De Marchi (1934) برای به دست  
آوردن معادله‌ای برای سرریزهای جانبی و با توجه به شکل  
(۱) فرضیه‌های زیر را در نظر گرفت:

۱. آبراهه مستطیلی و منشوری است.

۲. سرریز جانبی دارای طول کوتاه بوده و انرژی مخصوص  
بین مقطع‌های ۱ و ۲ ثابت است. این امر معادل فرض  
 $S_0 - S_f = 0$  یا  $S_0 = 0$  و  $S_f = 0$  بوده و نتایج تجربی  
نشان می‌دهد که یک فرض منطقی می‌باشد.

۳. سرریز جانبی معادل یک سرریز لبه تیز بوده که هوادهی  
کامل صورت گرفته و آب به صورت آزاد خارج می‌شود.

۴. ضریب تصحیح انرژی  $\alpha$  مساوی یک می‌باشد.

با توجه به فرضیه‌های یاد شده معادله پویایی مربوط به  
سرریزها به شکل رابطه (۱) در می‌آید.

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

رابطه (۱) به عنوان معادله دی‌مارچی معروف بوده و در آن  
 $E$  و  $y$  میزان‌های عمق و انرژی در بالادست و پایین دست  
سرریز،  $w$  ارتفاع سرریز،  $B$  عرض آبراهه و  $C_m$  ضریب تخلیه  
جریان می‌باشد. چنانچه خواسته شود فاصله بین دو مقطع  
۱ و ۲ ( $L$ ) محاسبه شود کافی است با داشتن  $Q_1$ ،  $Q_2$ ،  $y_1$  و  
 $y_2$  میزان‌های  $x_1$  و  $x_2$  را محاسبه و از تفاضل آن‌ها، طول  
سرریز را معین کرد. در تعیین طول ( $L$ ) حذف ثابت انتگرال  
تاثیری نداشته و با این توضیح میزان دبی خارج شده از روی  
سرریز ( $Q_s$ ) برابر خواهد بود با:

$$Q_s = Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

با توجه به عمومیت رابطه (۱) برای سرریزهای جانبی برای  
محاسبه ضریب تخلیه سرریز، می‌توان از همین رابطه برای  
محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای جانبی غیر خطی نیز

پیانویی می‌توان آن را به ۴ گروه تقسیم‌بندی کرد. برابر شکل (۲) سرریزی که دارای شیروانی بالادست و پایین‌دست باشد سرریز کلید پیانویی نوع A و اگر فاقد شیروانی بالادست یا پایین‌دست باشد به ترتیب نوع B و C است. همچنین اگر سرریز کلید پیانویی بدون هر دو شیروانی بالادست و پایین‌دست باشد از نوع D می‌باشد.

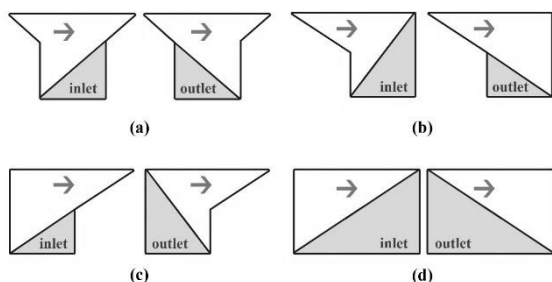


Fig. 2 PKW types (a) A, (b) B, (c) C, (d) D (Lempérière and Ouamane, 2003)

شکل ۲ انواع سرریز کلید پیانویی: (a) نوع A، (b) نوع B، (c) نوع C، (d) نوع D (Lempérière and Ouamane, 2003)

در شکل (۳) نمای سه بعدی از سرریز کلید پیانویی به همراه فراسنجه‌های اصلی آن قابل مشاهده می‌باشد.

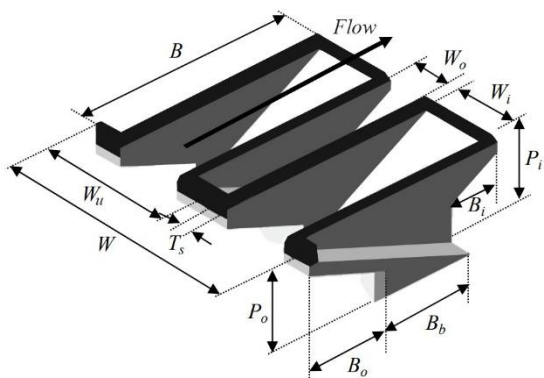


Fig. 3 Fundamental parameters on an entire PKW 3D-view (Pralong et al., 2011)

شکل ۳ نمای سه بعدی از سرریز کلید پیانویی به همراه فراسنجه‌های اصلی (Pralong et al., 2011)

در شکل (۳) کل عرض سرریز،  $W_o$  عرض کلید خروجی،  $W_i$  عرض کلید ورودی،  $W_u$  عرض یک چرخه،  $T_s$  ضخامت سرریز،  $P_i$  ارتفاع کلید ورودی سرریز،  $P_o$  ارتفاع کلید خروجی سرریز،  $B$  طول کل سرریز،  $B_b$  طول پایه سرریز،  $B_o$  طول شیروانی پایین‌دست سرریز و  $B_i$  طول شیروانی بالادست سرریز می‌باشد.

سرریز،  $W$  طول دهانه سرریز،  $H_t$  ارتفاع کل آب روی تاج سرریز و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد.

(Tullis et al., 1995) با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط (Waldron, 1994) و بررسی یک مدل برای دریاچه استندلی (Tullis, 1993) رابطه (۵) را برای محاسبه ضریب تخلیه سرریز کنگره‌ای ارائه کردند که یک ضریب بدون بعد است.

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

در رابطه (۵)،  $C_d$  ضریب تخلیه سرریز،  $Q$  دبی عبوری از سرریز،  $L_e$  طول موثر سرریز،  $H_t$  ارتفاع کل آب روی تاج سرریز و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد.

(Lempérière and Ouamane, 2003) یک نوع بهبود یافته از نوع سنتی سرریز کنگره‌ای را پیشنهاد دادند که در طی آن نمایش طرح و نقشه سرریز شبیه کلیدهای پیانو بود، به همین خاطر این نوع سرریز را سرریز کلید پیانویی (PKW) نامیدند. این طرح نوآورانه در سال ۲۰۰۶ با ساخت نخستین سرریز کلید پیانویی در سد *Goulours* (فرانسه) متعلق به وزارت آب و برق فرانسه (EDF) اجرا شد. پس از آن چهار سرریز کلید پیانویی دیگر در فرانسه بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ ساخته شد. در واقع سرریزهای کلید پیانویی نوع جدید سرریزهای کنگره‌ای هستند. در بررسی‌های انجام شده روی آن‌ها مشخص شده است که توانایی عبور جریان قابل توجهی از خود را دارند. با توجه به نتایج و بررسی‌های انجام شده توسط موسسه هیدروکوپ و دانشگاه بیسکرا روی طرح‌های پر شمار سرریز کلید پیانویی، برتری‌های این سرریز را این‌گونه می‌توان بیان کرد؛ قابلیت احداث روی سدهای موجود (سدهای وزنی و سدهایی که محدودیت طول تاج دارند)، آسانی در ساخت و سادگی ساختمان سرریز، توانایی عبور دبی ویژه بیش از  $100 \text{ m}^3/\text{s.m}$  از روی سرریز. شکل و نوع‌های مختلف این سرریز و فراسنجه‌های پر شمار آن که بر روی ضریب تخلیه این سازه موثر هستند، رفتار هیدرولیکی این سرریزها را بسیار پیچیده کرده است. به همین خاطر می‌توان با ساخت مدل‌های فیزیکی گامی در جهت رفع عیب و کاستی‌های آن‌ها برداشت (Anderson, 2011).

بر مبنای وجود و عدم وجود شیروانی‌های سرریز کلید

کمترین اثر را داشته است. همچنین چند نمودار و جدول را برای طراحی سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای در حالت‌های بازده بالا ( $C_d > 2$ )، بازده بهینه ( $1 < C_d < 2$ ) و بازده کم ( $C_d < 1$ ) ارائه کردند. به عنوان مثال، سرریز در محدوده بالا بالا در نظر گرفته می‌شود، اگر نسبت  $\frac{H}{P} < 0.25$  و  $\frac{L}{W} > 5$ ،  $\frac{W_i}{W_o} = 4$  و  $\frac{B}{P} > 1/6$  باشد. همچنین تحقیقات آنان نشان داد که بدون در نظر گرفتن میزان  $\frac{L}{W}$ ، بیشترین میزان ضریب تخلیه مربوط به زمانی است که نسبت  $\frac{H_t}{P}$  نزدیک به ۰/۲ باشد.

Mahmoudian (2016) برای نخستین بار از سرریز کلید پیاپویی به عنوان سرریز جانبی استفاده کرد و ویژگی‌های هیدرولیکی سرریزهای کلید پیاپویی مانند ضریب تخلیه، عمق جریان روی تاج سرریز و تاثیر تغییر در فراسنجه‌های هندسی این نوع سرریز را بر ویژگی‌های هیدرولیکی سرریزهای کلید پیاپویی در ۱۲۰ آزمایش بررسی کرد که نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد به دلیل افزایش طول موثر سرریز و نبود جدایش جریان از بدنه سرریز ضریب تخلیه دبی در سرریزهای جانبی کلید پیاپویی نسبت به دیگر سرریزهای لبه پهن مستطیلی افزایش می‌یابد که این افزایش به طور میانگین تا ۱۵۰ درصد هم مشاهده شده است. همچنین آنان از انجام بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که اجرای سرریزهای کلید پیاپویی به صورت سرریز جانبی در مقایسه با دیگر سرریزهای لبه پهن مستطیلی، ضمن کاهش در طول سرریز، افزایش بازده هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی را به دنبال دارد. میزان ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیاپویی به‌طور متوسط ۱/۵ برابر بیشتر از دیگر سرریزهای جانبی لبه‌پهن مانند سرریز مستطیلی، سرریز استوانه‌ای و نیمه استوانه‌ای است. میزان ضریب تخلیه با افزایش بار کل نسبی در بالادست کاهش می‌یابد. در یک ارتفاع ثابت میزان دبی عبوری از سرریز جانبی کلید پیاپویی بیشتر از مدل با دیواره جان‌پناه و مدل با دماغه می‌باشد.

Karimi et al. (2017) در بررسی‌های خود ضریب تخلیه ۹ سرریز جانبی کلید پیاپویی نوع C را با هندسه‌های مختلف بررسی و ارزیابی کردند. آزمایش‌های آنان در یک آبراهه ۱۰ متری با عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام

(Lempérière and Ouamane (2003) و Baracouda et al. (2006) در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که در سرریز کلید پیاپویی نوع A و نوع B اگر میزان‌های  $n$  (شمار چرخه) و  $P$  (ارتفاع سرریز) یکسان باشد، سرریز کلید پیاپویی نوع B نسبت به نوع A دارای ۱۰ درصد بازده بیشتر است.

Machiels (2012) بررسی‌های گسترده و جامعی را روی سرریز کلید پیاپویی انجام دادند. آنان مدل‌های آزمایشگاهی خود را به صورت ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ چرخه ساختند. آزمایش‌های آنان روی آبراهه‌ای به طول ۷/۲ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۲ متر انجام شده است. از نتایج به دست آمده دریافتند که در نسبت‌های کم، تبدیل جت‌های جریان، مانند تبدیل جت چسبنده به فشرده و از جت فشرده به جت آزاد روی سرریز کلید پیاپویی قابل مشاهده می‌باشد. تبدیل‌ها به شکل و ضخامت تاج سرریز کلید پیاپویی بستگی دارند. آنان تاثیر وجود دیواره‌های سپری را نیز بر بازده سرریز کلید پیاپویی بررسی کردند که نتایج نشان داد بازده سرریز برای مدل‌های ساخته شده با  $\frac{P}{W_u} = 0.34$  بیشتر از مدل‌هایی است که با  $\frac{P}{W_u} = 1.33$  ساخته شده‌اند. همچنین میزان بهینه نسبت  $\frac{P}{W_u}$  را ۱/۳۳ پیشنهاد دادند. در آزمایش‌های صورت گرفته توسط آنان تاثیر نسبت عرض کلید ورودی بر کلید خروجی نیز بررسی شد که در طی آن مشخص شد بهترین میزان برای فراسنجه بدون بعد  $\frac{W_i}{W_o}$  عددی بزرگ‌تر از ۱ می‌باشد. برابر نتایج بررسی‌های آنان برای میزان‌های  $\frac{H_t}{W_u} \geq 30$  نسبت  $\frac{W_i}{W_o}$  بین اعداد ۱/۲۵ و ۱/۵ بیشترین بازده را دارد. همچنین Machiels (2012) تاثیر نسبت طول شیروانی بالادست به پایین‌دست بررسی کرد و مشخص شد برای سرریزی که با ارتفاع بهینه هیدرولیکی ساخته شده است، برای میزان‌های  $\frac{H_t}{W_u} \geq 0$  تاثیر شیروانی بالادست در بازده سرریز بیشتر از شیروانی پایین‌دست می‌باشد.

بررسی‌های Mehboudi et al. (2016) به منظور ارزیابی فراسنجه‌های هندسی موثر بر روی ضریب تخلیه سرریز کلید پیاپویی دوزنقه‌ای در شرایط مختلف جریان انجام شد. از نتایج به دست آمده در بررسی‌های آنان مشخص شد که بیشترین تاثیر مربوط به فراسنجه  $\frac{L}{W}$  بوده و فراسنجه  $\frac{W_i}{W_o}$

پایین دست سرریز ( $V_1$ ) و ( $V_2$ )، سرعت جریان درون آبراهه اصلی در بالادست و پایین دست سرریز ( $V_1$ ) و ( $V_2$ ) که با وجود میزان‌های متفاوت دبی‌ها و سطح مقطع آبراهه به عنوان متغیر وابسته و یا جایگزین دبی‌ها می‌توانند استفاده شوند.

ج: ویژگی‌های هندسی آبراهه و سرریز: طول دهانه سرریز ( $W$ )، طول مؤثر سرریز ( $L$ )، زاویه قرار گیری سرریز ( $\alpha$ )، زاویه شیروانی‌های سرریز ( $\delta$ )، طول شیروانی بالادست و پایین دست سرریز ( $B_i$ ) و ( $B_o$ )، ارتفاع سرریز ( $P$ )، عرض سرریز ( $B$ )، عرض کلیدهای ورودی و خروجی سرریز ( $W_i$ ) و ( $W_o$ )، شیب کف آبراهه اصلی ( $S_0$ )، شمار کنگره‌ها ( $n$ ) و هندسه آن‌ها.

بنابر نظریه باکینگهام، ۱۶ متغیر وجود دارد و با در نظر گرفتن عمق آب در بالادست سرریز، سرعت جریان درون آبراهه اصلی در بالادست سرریز و جرم مخصوص آب به عنوان سه متغیر اصلی، ۱۳ متغیر بی بعد حاصل می‌شود. با ترکیب هر یک از متغیرها با متغیرهای اصلی یک متغیر بی بعد حاصل می‌شود، بنابراین:

$$Cm = \varphi_1 \left( \frac{V_1^2}{gV_1}, \frac{\mu}{\rho V_1 V_1}, \frac{\sigma}{\rho V_1 V_1^2}, \frac{y_2 W}{y_1 y_1}, \frac{B}{y_1}, \frac{B_i}{y_1}, \frac{B_o}{P}, \frac{L}{y_1}, \frac{W_i}{W_o}, S_0, \delta, \alpha \right) \quad (6)$$

در هیدرولیک آبراهه‌های باز هنگامی که جریان آشفته باشد، تأثیر نیروهای لزوجت در مقابل اینرسی ناچیز و اندک است و از آن جهت که در اصل وضعیت جریان در آبراهه‌ها به صورت آشفته است از تأثیر نیروی لزوجت یا همان عدد رینولدز ( $\frac{\mu}{\rho V_1 V_1}$ ) صرفه‌نظر می‌شود (Seyed Javad et al., 2019). تأثیر نیروی کشش سطحی نیز در هنگامی است که عمق آب کمتر از ۳ سانتی‌متر باشد و از آنجا که عمق آب در آزمایش‌های این پژوهش بیشتر از ۳ سانتی‌متر است از تأثیر نیروی کشش سطحی یا همان عدد وبر ( $\frac{\sigma}{\rho y_1 V_1^2}$ ) صرفه‌نظر می‌شود (kazemi et al., 2016). برخی محققان تأثیر شیب کف آبراهه را در جریان فرو بحرانی ناچیز دانسته و از تأثیر آن صرفه‌نظر کرده‌اند و این پژوهش نیز با توجه به اینکه همگی اعداد فرود بالادست سرریز کمتر از یک بوده است جریان فرو بحرانی بوده و از تأثیر شیب کف آبراهه صرفه‌نظر شده است. با در نظر گرفتن تأثیر متغیرهای بی بعد و ترکیب آن‌ها در متغیرهای دیگر رابطه ( $V$ ) به دست می‌آید.

شد و مدل‌های خود را با شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر ساختند. آنان ضریب تخلیه محاسبه شده را با ضریب تخلیه سرریز جانبی مستطیلی مقایسه کردند که ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی به‌طور قابل توجهی بیشتر از ضریب تخلیه سرریز جانبی مستطیلی بود. همچنین از تحقیقات خود نتیجه گرفتند که ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی با افزایش عدد فرود بالادست کاهش پیدا می‌کند. مانند سرریزهای کلید پیانویی، ظرفیت تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی نیز با افزایش ارتفاع آب در بالادست کاهش پیدا می‌کند. ضریب دبی سرریز جانبی کلید پیانویی زمانی که نسبت  $\frac{H_d}{H^*}$  بزرگ‌تر ۰/۵ باشد به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی با افزایش نسبت  $\frac{L}{W}$ ، افزایش پیدا می‌کند. (Seyed javad et al. (2019) در آبراهه‌ای با طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بررسی‌هایی روی ۱۶ مدل سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع پایه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر انجام دادند. آنان در پژوهش خود به نتایج زیر دست یافته‌اند: سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای نسبت به سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی عملکردی بهتری دارد. میزان دبی عبوری از سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای نسبت به سرریز خطی بیشتر می‌باشد. هرچه طول عرض سرریز بیشتر باشد ضریب دبی عبوری نیز بیشتر خواهد بود. سرریز با ارتفاع پایه ۱۵ سانتی‌متر در نسبت بی بعد  $\frac{H_t}{P}$  بین ۰/۲ و ۰/۴ دارای بیشترین میزان ضریب دبی عبوری می‌باشد. در نسبت بی بعد  $\frac{H_t}{P}$  برابر با ۰/۵ سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر دارای بیشترین میزان ضریب دبی می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل ابعادی

ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی افزون بر ویژگی‌های عمومی سرریزها مانند شتاب ثقل زمین ( $g$ ) و ضریب دبی ( $C_m$ ) تابعی از موارد زیر است که عبارت‌اند از: الف: ویژگی‌های فیزیکی سیال: جرم مخصوص ( $\rho$ )، لزوجت دینامیکی ( $\mu$ ) و کشش سطحی ( $\sigma$ )  
ب: ویژگی‌های هیدرولیکی جریان: عمق آب در بالادست و

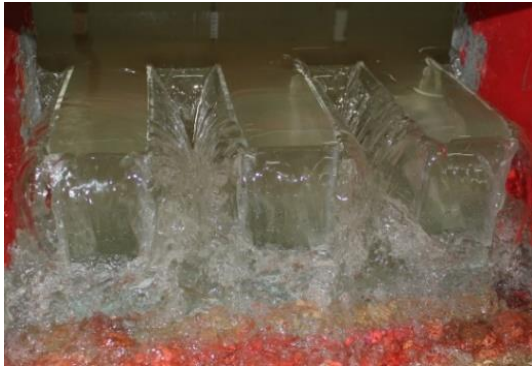


Fig. 5 A view of the Rectangular Labyrinth Side Weir P=15cm

شکل ۵ نمایی از سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی P=15cm

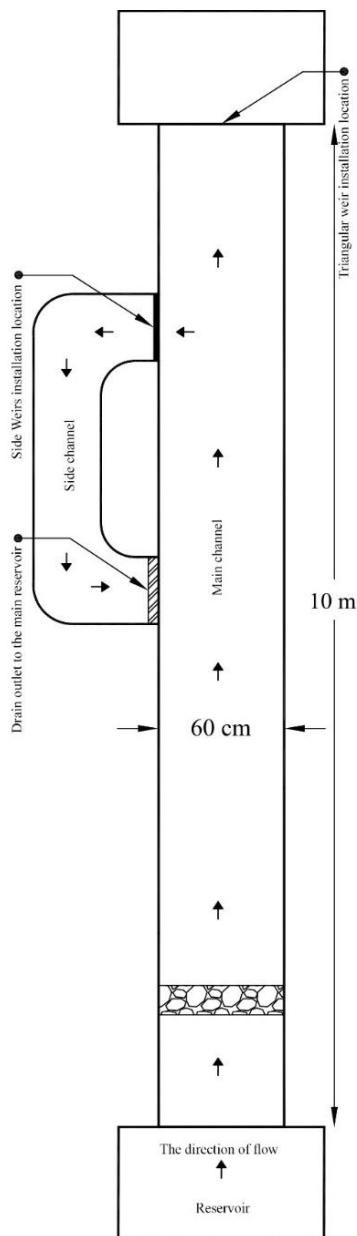


Fig. 4 Plan view of 10m flume

شکل ۴ نمایی از طرح و نقشه آبراهه آزمایشگاهی ۱۰ متری

$$C_m = \varphi_2 (Fr_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{W}{B}, \frac{P}{y_1}, \frac{L}{W}, \frac{B_i}{W}, \frac{B}{W}, \frac{L}{P}, \frac{W_i}{W_o}, S_0, \delta, \alpha) \quad (7)$$

## ۲-۱- شرایط آزمایش‌ها

مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی این پژوهش هر کدام در ۳ چرخه و ۴ ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر با استفاده از ورق‌های پلکسی گلس به ضخامت ۵ میلی‌متر در طول بازشدگی ۵۷ سانتی‌متر ساخته شده‌اند و سرریزهای کلید پیانویی از نوع A بوده است. برای بررسی آزمایشگاهی این مدل‌ها از آبراهه موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا استفاده شده است که ویژگی‌های این آبراهه عبارت است از: طول آبراهه ۱۰ متر، ارتفاع و عرض آن ۶۰ سانتی‌متر، دیواره و کف از جنس شیشه. سامانه گردش آب در این مجموعه بدین صورت است که آب توسط پمپ از مخزن به درون آبراهه منتقل شده و پس از سرریز کردن از سرریز یا به صورت مستقیم و یا توسط آبراهه جانبی دوباره به مخزن اصلی منتقل می‌شود. برای آرام کردن جریان ورودی به آبراهه اصلی، در بالادست آبراهه از یک حجم مشبک ساخته شده از سفال و مهار شده با توری‌های فلزی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری جریان از یک سرریز مثلثی واسنجی شده در پایین دست آبراهه اصلی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری عمق آب در آبراهه اصلی از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۴) نمایی از طرح و نقشه آبراهه اصلی و آبراهه جانبی مورد استفاده در آزمایشگاه نمایش داده شده است. در جدول (۱) ویژگی‌های سرریز و آزمایش‌های انجام شده بیان شده است. شکل‌های (۵) الی (۸) نیز نمونه‌ای از سرریزهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۹) نیز نمایی از آبراهه اصلی آزمایشگاه و آبراهه جانبی نمایش داده شده است.

در جدول (۱)،  $PKSW$  سرریز جانبی کلید پیانویی و  $RLSW$  سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی می‌باشد. همچنین  $Q_L$  میزان دبی عبوری از سرریز جانبی،  $Q_n$  میزان دبی عبوری از سرریز خطی،  $C_d$  ضریب تخلیه سرریز جانبی،  $P$  ارتفاع سرریز جانبی،  $Fr_1$  عدد فرود در بالادست سرریز،  $W$  طول بازشدگی سرریز جانبی و  $L$  طول موثر سرریز جانبی می‌باشد.



جدول ۱ جزئیات بیشتری از مدل‌های سرریز جانبی و آزمایش‌های انجام شده  
**Table 1** More details of the side weir models and performed experiments

Weir Type	W (cm)	P (cm)	W <sub>i</sub> /W <sub>o</sub>	L/W	Q <sub>L</sub> (l/s)	C <sub>d</sub>	Fr <sub>1</sub>
PKSW	57	5,10,15,20	1	3.47	2.41-23.59	0.123-0.373	0.016-0.242
RLSW	57	5,10,15,20	1	3.47	1.33-20.47	0.135-0.535	0.011-0.263



**Fig. 9** A Plan View of the 10 m flume and the side channel

شکل ۹ نمایی از آبراهه ۱۰ متری و آبراهه جانبی



**Fig. 6** A view of the Rectangular Labyrinth Side Weir P=20cm

شکل ۶ نمایی از سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی P=20cm



**Fig. 7** A view of the Piano Key Side Weir P=15cm

شکل ۷ سرریز جانبی کلید پیانویی P=15cm



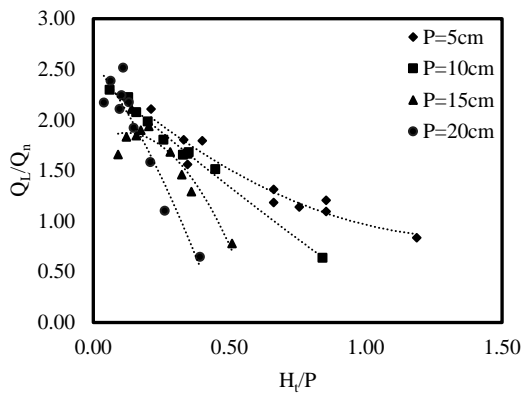
**Fig. 8** A view of the Piano Key Side Weir P=20cm

شکل ۸ نمایی از سرریز جانبی کلید پیانویی P=20cm

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- سرریزهای جانبی کنگره‌ای مستطیلی

در شکل (۱۰) تغییرپذیری‌های  $C_d$  در برابر  $\frac{H_t}{P}$  و در شکل (۱۱) تغییرپذیری‌های  $\frac{Q_L}{Q_n}$  در برابر  $\frac{H_t}{P}$  برای ۴ مدل مختلف سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵، و ۲۰ سانتی‌متر آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرپذیری‌های  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$  نسبت به  $\frac{H_t}{P}$  دارای رابطه عکس است و در هر سرریز میزان  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$  در میزان‌های کوچک‌تر  $\frac{H_t}{P}$  بیشترین مقدار خود را دارند و با افزایش میزان  $\frac{H_t}{P}$  به دلیل تداخل تیغه‌های جریان در ترازهای بالا میزان  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$  کاهش می‌یابند که این کاهش برای سرریز با ارتفاع ۵ سانتی‌متر با شدت کمتر و برای سرریزهای با ارتفاع بیشتر از ۵ سانتی‌متر با شدت بیشتر رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک نسبت ثابت  $\frac{H_t}{P}$  سرریزهای با ارتفاع کمتر میزان  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$  بیشتری را دارند. همچنین از شکل (۱۱) نیز می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت‌های کم  $\frac{H_t}{P}$  میزان دبی عبوری از سرریز



**Fig. 11** Relationship between  $\frac{Q_L}{Q_n}$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Rectangular Labyrinth Side Weirs

شکل ۱۱ رابطه بین  $\frac{Q_L}{Q_n}$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کنگره‌ای مستطیلی

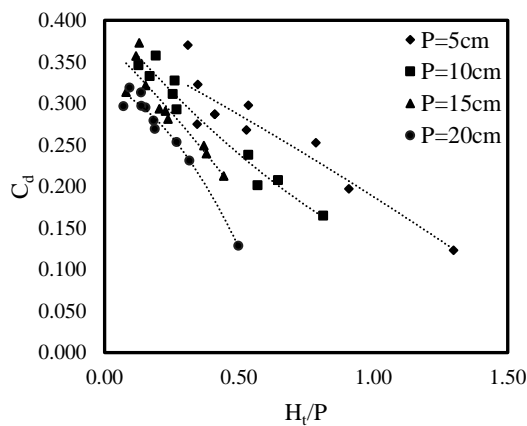
### ۲-۳- سرریزهای جانبی کلید پیانویی

در سرریز کلید پیانویی نیز بنابر نتایج به دست آمده و با توجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) چگونگی تغییرپذیری‌های  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$ ، نسبت به  $\frac{H_t}{P}$  نزولی بوده و با افزایش میزان  $\frac{H_t}{P}$  ضریب تخلیه و بازده سرریز کاهش پیدا کرده و در یک نسبت ثابت  $\frac{H_t}{P}$  سرریز با ارتفاع کوچک‌تر دارای ضریب تخلیه و بازده بیشتری نسبت به دیگر سرریزهای کلید پیانویی با ارتفاع بزرگ‌تر می‌باشد. همچنین در سرریزهای کلید پیانویی مورد آزمایش قرار گرفته ضریب تخلیه سرریز با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر به طور میانگین نسبت به سرریزهای با ارتفاع ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب ۹/۳،

جانبی کنگره‌ای مستطیلی در هر ۴ ارتفاع نسبت به سرریز جانبی معمولی بیشتر می‌باشد و هر چه میزان ارتفاع تیغه آب روی سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی افزایش پیدا می‌کند نسبت دبی عبوری از سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی به سرریز جانبی معمولی کاهش پیدا می‌کند که بیانگر کاهش بازده سرریز جانبی کنگره‌ای است و در این حالت به علت افزایش ارتفاع تیغه جریان و تداخل آن روی سرریز کنگره‌ای، سرریز عملکرد خطی به خود گرفته و دبی عبوری از آن کوچک‌تر یا برابر دبی عبوری از سرریز جانبی مستقیم می‌شود.

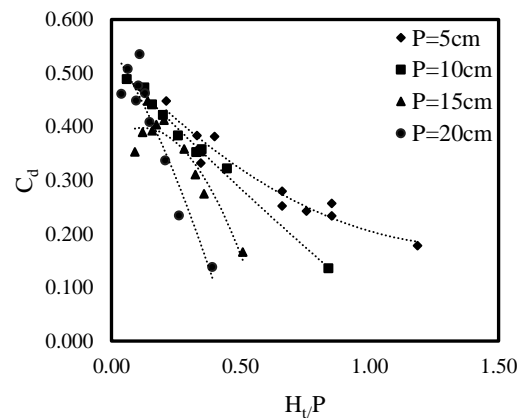
در سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی ضریب تخلیه سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به طور میانگین نسبت به سرریزهای با ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۳۴، ۷/۳ و ۱۴/۱ درصد افزایش داشته است. همچنین بازده سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به طور میانگین نسبت به سرریزهای با ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۳۵، ۷/۸ و ۱۴/۵ درصد افزایش داشته است.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برای میزان‌های بیش از  $\frac{H_t}{P}$  ۰/۹۵، ۰/۶۶، ۰/۴۶ و ۰/۳۲ با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$  سرریز از عملکرد مطلوب خود خارج شده و بازده آن به شدت کاهش پیدا می‌کند و سرریز حالت کنگره‌ای خود را از دست داده و عملکرد خطی به خود می‌گیرد.



**Fig. 12** Relationship between  $C_d$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Piano Key Side Weirs

شکل ۱۲ رابطه بین  $C_d$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کلید پیانویی



**Fig. 10** Relationship between  $C_d$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Rectangular Labyrinth Side Weirs

شکل ۱۰ رابطه بین  $C_d$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کنگره‌ای مستطیلی

نسبت  $\frac{H_t}{P}$  از یک فراسنجه که  $R$  تعریف شده است استفاده می‌شود. این فراسنجه از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$R = \frac{\frac{Q_L}{L}}{\frac{Q_n}{w}} \quad (8)$$

در این رابطه  $R$  بازده سرریز،  $Q_L$  دبی عبوری از سرریز جانبی کنگره‌ای یا کلید پیانویی،  $Q_n$  دبی عبوری از سرریز جانبی خطی،  $L$  طول موثر سرریز و  $w$  طول بازشدگی سرریز می‌باشد.

در شکل (۱۴) تغییرپذیری‌های بازده سرریزهای هم ارتفاع در برابر تغییرپذیری‌های نسبت  $\frac{H_t}{P}$  به ترتیب برای سرریزهای با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر قابل مشاهده می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود شده سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی نسبت به سرریز کلید پیانویی هم ارتفاع خود دارای بازده بیشتری می‌باشد و در یک نسبت ثابت  $\frac{H_t}{P}$  سرریز کنگره‌ای مستطیلی عملکرد بهتری دارد.

در سرریزهای با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی به ترتیب در میزان‌های  $\frac{H_t}{P}$  ۰/۷۴، ۰/۴۷ و ۰/۳۰ بازده برابری با سرریز کلید پیانویی دارد و با افزایش این میزان نسبت به سرریز کلید پیانویی دارای بازده کمتری می‌باشد.

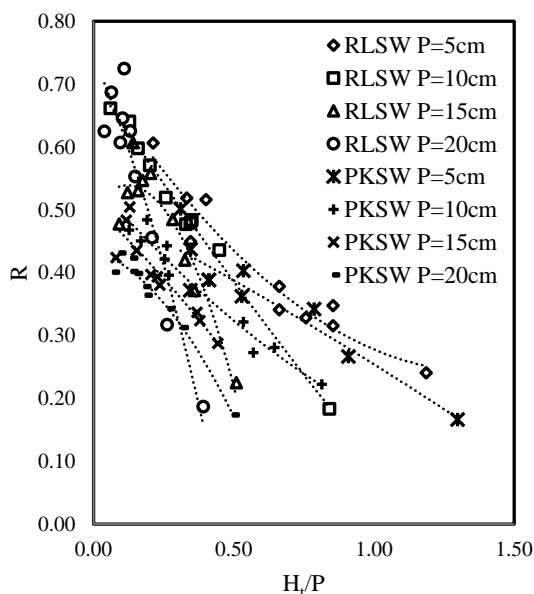


Fig. 14 Relationship between  $R$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Rectangular Labyrinth Side Weirs and Piano Key Side Weirs

شکل ۱۴ رابطه بین  $R$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی

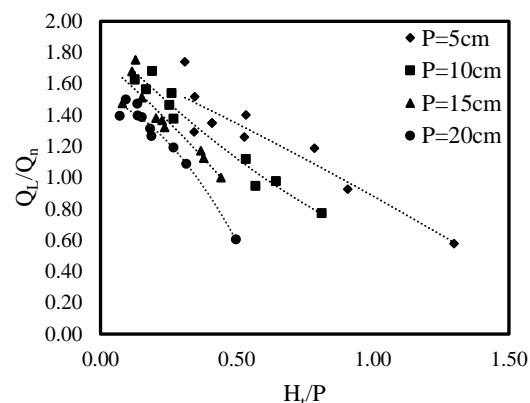


Fig. 13 Relationship between  $\frac{Q_L}{Q_n}$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Piano Key Side Weirs

شکل ۱۳ رابطه بین  $\frac{Q_L}{Q_n}$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کلید پیانویی

۵/۵ و ۹/۲ درصد افزایش داشته است. بازده سرریز کلید پیانویی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر نیز به طور میانگین نسبت به سرریزهای با ارتفاع ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب ۹/۵، ۵/۳ و ۹/۴ درصد افزایش داشته است. در سرریزهای کلید پیانویی با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب در میزان‌های بیش از  $\frac{H_t}{P}$  ۰/۸۸، ۰/۶، ۰/۴۴ و ۰/۳۵ با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$  سرریز عملکرد مطلوب خود را از دست داده و عملکرد سرریز خطی را به خود می‌گیرد که در این حالت بازده سرریز به شدت کاهش پیدا می‌کند.

در سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی در هر ۴ ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در ابتدا و در نسبت‌های کم  $\frac{H_t}{P}$  تیغه‌های ریزشی جریان با یکدیگر تداخل و برخورد ندارند در این حالت سرریز بیشترین بازده و ضریب تخلیه را دارد. در ادامه و با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$  تیغه‌های ریزشی جریان در کلیدهای خروجی با یکدیگر آغاز به تداخل و برخورد می‌کنند که نتیجه این تداخل بالازدگی جریان و استغراق موضعی در انتهای کلیدها، کاهش بازده و ضریب تخلیه سرریز را بدنبال دارد. این روند تا جایی ادامه دارد که سرریزها در بیشترین میزان‌های  $\frac{H_t}{P}$  از حالت کنگره‌ای و کلید پیانویی خارج شده و همانند یک سرریز خطی در کمترین بازده و ضریب تخلیه خود عمل می‌کنند.

### ۳-۳- مقایسه بازده سرریزهای جانبی

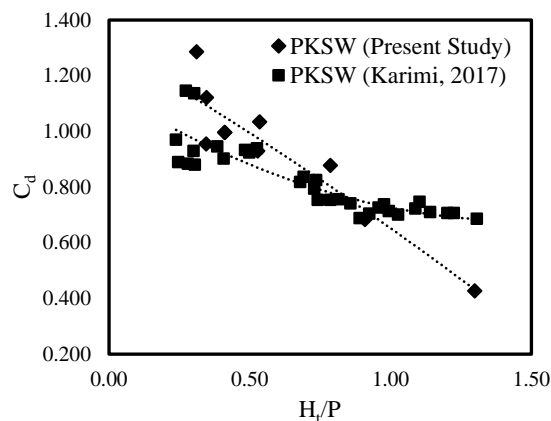
برای مقایسه بازده سرریزهای جانبی در برابر تغییرپذیری‌های

نیز سرریز کلید پیانویی نوع A بصورت سرریز جانبی در آبراهه مورد بررسی قرار گرفت. در این دو پژوهش پارامتر هندسی سرریزها تقریباً مشابه بوده به طوری که در پژوهش Karimi et al. (2017) میزان  $\frac{L}{W}$  برابر ۳/۴ و در این تحقیق این میزان برای سرریز برابر ۳/۴۷ می‌باشد.

برابر شکل (۱۶) مشاهده می‌شود که برای میزان‌های کم  $\frac{H_t}{P}$ ، سرریز نوع A نسبت به سرریز نوع C دارای عملکرد بهتری بوده و دارایی ضریب تخلیه بزرگتری است. همچنین شدت تغییرپذیری‌های  $C_d$  نسبت به افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریز نوع A بیشتر بوده و زودتر دچار کاهش ضریب تخلیه می‌شود. لازم به یادآوری است برای انجام مقایسه ضریب تخلیه این تحقیق با تحقیق یاد شده، ضریب تخلیه از روابط استفاده شده در پژوهش Karimi et al. (2017) محاسبه شده است که در رابطه (۹) آورده شده است.

$$C_d = \frac{3.Q}{2.W.\sqrt{2g.H_t^{\frac{3}{2}}}} \quad (9)$$

در رابطه (۹)  $Q$  دبی عبوری از سرریز جانبی و  $W$  طول دهانه سرریز می‌باشد.



**Fig. 16** Relationship between  $C_d$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Piano Key Side Weirs of type A and type C

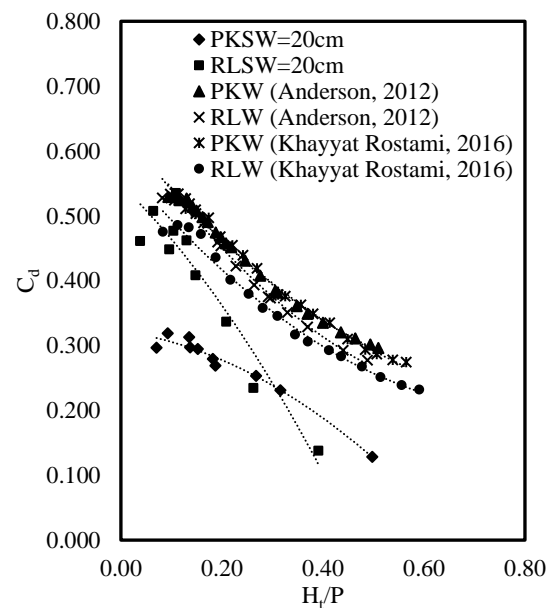
شکل ۱۶ رابطه بین  $C_d$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کلید پیانویی نوع A و نوع C

نتایج پژوهش Seyed Javad et al. (2019) روی سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع A نیز با نتایج سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی نوع A این پژوهش مقایسه شده است که در شکل (۱۷) نمودار تغییرپذیری‌های  $C_d$  در برابر  $\frac{H_t}{P}$  برای مقایسه نتایج هر دو پژوهش آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود با افزایش

### ۳-۴- مقایسه با پژوهش‌های دیگر

تغییرپذیری‌های ضریب  $C_d$  در برابر نسبت  $\frac{H_t}{P}$  به دست آمده از این تحقیق روی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی با نتایج پژوهش‌های Anderson and Tullis (2012) و Khayyat Rostami (2016) مقایسه شده است. تفاوت این تحقیق با دو پژوهش یاد شده چگونگی کاربرد سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی در آبراهه می‌باشد که در این تحقیق به صورت جانبی و در دو پژوهش دیگر به صورت مستقیم در آبراهه بوده است.

با توجه به شکل (۱۵) می‌توان مشاهده کرد در سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی که به صورت مستقیم در آبراهه نصب شده‌است، سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای در یک نسبت مشخص  $\frac{H_t}{P}$ ، ضریب تخلیه بیشتری داشته و عملکرد بهتری دارد. این موضوع در سرریزهای جانبی برعکس بوده و سرریز جانبی کنگره‌ای مستطیلی نسبت به سرریز جانبی کلید پیانویی در برابر جریان عملکرد بهتر و بازده بیشتری دارد.



**Fig. 15** Relationship between  $C_d$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Rectangular Labyrinth weirs and Piano Key weirs In the form of side and straight weirs

شکل ۱۵ رابطه بین  $C_d$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی به صورت مستقیم و جانبی

Karimi et al. (2017) سرریز کلید پیانویی نوع C را به صورت سرریز جانبی در آبراهه بررسی کردند. در این تحقیق

دارای بیشترین ضریب تخلیه و کمترین ظرفیت تخلیه می‌باشند و این نتیجه برای سرریزهای با ارتفاع بزرگ‌تر برعکس می‌باشد.

در سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی تداخل تیغه‌های ریزشی جریان باعث می‌شود تا یک بالازدگی در انتهای کلیدهای خروجی ایجاد شود که آغاز افت شدید بازده سرریز می‌باشد و با افزایش تداخل این تیغه‌های ریزشی جریان سرریز به تدریج از عملکرد مطلوب خود خارج می‌شود و شبیه یک سرریز خطی عمل می‌کند.

در مقایسه سرریزهای جانبی کنگره‌ای مستطیلی و کلید پیانویی به صورت جانبی و مستقیم، بنابر نتایج بررسی‌های محققان دیگر هنگامی که سرریز در آبراهه به صورت عمود بر محور جریان و مستقیم استفاده می‌شود سرریز کلید پیانویی دارای بازده بیشتری نسبت به سرریز کنگره‌ای مستطیلی است اما در این تحقیق که سرریزهای یاد شده به صورت جانبی در آبراهه تحت آزمایش قرار گرفتند نتیجه برعکس بوده و سرریز کنگره‌ای مستطیلی بازده و عملکرد بهتری نسبت به سرریز کلید پیانویی دارد.

سرریز جانبی کلید پیانویی نوع A نسبت به سرریز کلید پیانویی نوع C دارای عملکرد بهتری می‌باشد. در سرریزهای جانبی کلید پیانویی نوع A، سرریز جانبی کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نسبت به سرریز جانبی کلید پیانویی مستطیلی دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

#### ۵- فهرست نشانه‌ها

$P$ (cm)	ارتفاع سرریز
$B$ (cm)	عرض آبراهه اصلی
$W$ (cm)	طول دهانه سرریز
$L$ (cm)	طول مؤثر سرریز
$W_i, W_o$ (cm)	عرض کلید ورودی و خروجی سرریز
$B_i, B_o$ (cm)	طول شیروانی بالادست و پایین دست سرریز
$Q_s$ (l/s)	دبی خروجی از سرریز جانبی
$Q_1, Q_2$ (m <sup>3</sup> /s)	دبی در مقطع قبل و بعد سرریز جانبی
$V_1, V_2$ (m/s)	سرعت در مقطع قبل و بعد سرریز جانبی
$y_1, y_2$ (cm)	ارتفاع در مقطع قبل و بعد سرریز جانبی
$\alpha$	ضریب تصحیح انرژی
$Fr_1$	عدد فرود

نسبت  $\frac{H_t}{P}$  میزان  $C_d$  کاهش پیدا می‌کند و به طور کلی سرریز کلید پیانویی ذوزنقه‌ای نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی در یک نسبت مشخص  $\frac{H_t}{P}$  دارای ضریب تخلیه بیشتری می‌باشد و عملکرد بهتری دارد.

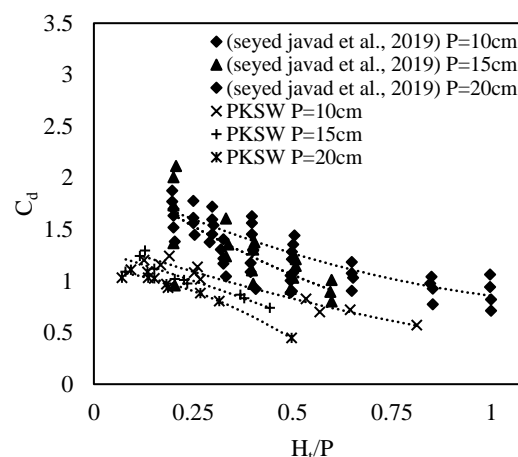


Fig. 17 Relationship between  $C_d$  and  $\frac{H_t}{P}$  ratio in the Piano Key Side Weirs of type A

شکل ۱۷ رابطه بین  $C_d$  و نسبت  $\frac{H_t}{P}$  در سرریزهای جانبی کلید پیانویی نوع A

#### ۴- نتیجه‌گیری

در همه‌ی سرریزهای جانبی کنگره‌ای و کلید پیانویی چگونگی تغییرپذیری‌های  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$ ، نسبت به  $\frac{H_t}{P}$  کاهش یافته و با افزایش میزان  $\frac{H_t}{P}$  میزان‌های  $C_d$  و  $\frac{Q_L}{Q_n}$  کاهش می‌یابند، این روند کاهش برای سرریزهای با ارتفاع بزرگ‌تر، شدیدتر بوده و با کاهش ارتفاع سرریز از شدت آن کاسته می‌شود که نتیجه آن در نهایت تغییر عملکرد سرریز کنگره‌ای و کلید پیانویی به عملکرد سرریز خطی می‌باشد. سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برای میزان‌های بیش از  $\frac{H_t}{P}$  ۰/۹۵، ۰/۶۶، ۰/۴۶ و ۰/۳۲ با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$  سرریز از عملکرد مطلوب خود خارج شده و بازده آن به شدت کاهش پیدا می‌کند.

سرریزهای کلید پیانویی با ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برای میزان‌های بیش از  $\frac{H_t}{P}$  ۰/۸۸، ۰/۶، ۰/۴۴ و ۰/۳۵ با افزایش نسبت  $\frac{H_t}{P}$  سرریز از عملکرد مطلوب خود را از دست داده و عملکرد سرریز خطی را به خود می‌گیرند. در یک نسبت مشخص  $\frac{H_t}{P}$  سرریزهای با ارتفاع کوچک‌تر

Magalhães, A. and Lorena, M. (1989). Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. Report No. 736, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behavior of Piano key weir. PhD Thesis ULgetd, Univerity of Liege.

Mahmoudian, S. (2016). Discharge Coefficient Analysis of Piano Key Side Weir in Subcritical Flow. Master of Science Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, 136p. (In Persian)

Mehboudi, A., Attari, J. and Hosseini, S.A. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 50, 65-72.

Monjezi, R., Heidarnejad, M., Masjedi, A., Hossein Purmohammadi, M. and Kamanbedastb, A. (2018). Laboratory investigation of the Discharge Coefficient of flow in arced labyrinth weirs with triangular plans. Flow Measurement and Instrumentation, 64, 64-70.

Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., Piroton, M., Boillat, J. L., Leite Ribeiro, M. and Schleiss, A.J. (2011). A naming convention for the piano key weirs geometrical parameters. Proc. Int. Conf. In Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 271-278. Boca Raton, FL, CRC Press.

Seyed Javad, M., Saneie, M. and Omid Naeeni, S. (2019). Experimental study of discharge coefficient of a Trapezoidal Piano Key Side Weir. Journal of Hydraulics, 14(2), 33-46.

Tullis, J.P., Amanian, N. and Waldron, D. (1995). Design of labyrinth spillways, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 121(3), 247-255.

$Q_L(l/s)$	دبی عبوری از سرریز جانبی
$Q_n(l/s)$	دبی عبوری از سرریز خطی
$C_d$	ضریب تخلیه
$C_m$	ضریب دیمارچی
$g$	شتاب ثقل
$H_t(cm)$	ارتفاع تیغه آب روی سرریز

## ۶- منابعها

Abrishami, J. and Hosseini, M. (2017). Hydraulic Open Canals. Mashhad University Press, 19th edition. (In Persian)

Anderson, R.M. (2011). Piano key weir head discharge relationships. All Graduate Theses and Dissertations, Utah State University, 80p.

Anderson, R.M. and Tullis, B.P. (2012). Comparison of piano Key and rectangular Labyrinth Weir Hydraulics. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 138(4), 358-361.

Baracouda, M., Cazaillet, O., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F. and Odeyer, J.P. (2006). Cost-effective increase in stroge and safety of most dams using fuse gates or P.K. weirs. Proc. 22nd ICOLD Congress. Barcelona, Spain.

Darvas, L.A. (1971). Performance and design of labyrinth weirs. Journal of Hydraulic Division, ASCE 97(8), 1246-1251.

De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria de funzionamento degli stramazzi letarali, L'Energia Elettrica, 11(11), 849-860.

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 2017, CRC Press, London, 109-116.

Kazemi, J., Saneie, 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. (In Persian)

Khayyat Rostami, S. (2016). Comparison of Hydraulics of Trapezoidal Piano Key and Labyrinth Weir. Master of Science Thesis, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, 204p. (In Persian)

Lempérière, F. and Ouamane, A. (2003). The Piano Key weir: A new cost effective solution for spillway. Hydraulic and Dams. Official Journal of the International Hydro Power Association. 10(5), 144-149.