

Evaluation of the Discharge Coefficient of Piano Key Weir under the Unsteady - Gradual Varied Flow with Increasing Discharge

Alireza Arafi¹, Elham Izadnia^{2*}, Ali Khoshfetrat³

1- M.Sc. Student, Engineering College, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan Branch), Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Engineering College, Department of Civil Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

3- Assistant Professor, Water Studies Research Center, Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan Branch), Isfahan, Iran.

* Elham.izadnia@gmail.com

Received: 5 September 2022, Accepted: 24 December 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Weirs or spillways are among of the most important types of hydraulic structures that are divided into the linear and nonlinear weir categories based on their plan shape. The most important types of nonlinear wires are labyrinth wires and piano key weirs that increase the discharge of flow by increasing the length of the spillway crown. These types of weirs are usually made outside the dam body. The most important advantages of these weirs is high flow coefficient, speed in construction and economic efficiency. These weirs are one of the most suitable options for dam weir implementation in free-flow mode. Floods, snow melting, performance changes of hydraulic structures and many other unsteady flow factors are observed abundantly in nature. Therefore, in this study, the discharge coefficient of piano key weirs under the unsteady-gradual varied flow with increasing discharge has been evaluated. Also, in this research, the calibration of discharge coefficient due to changes in the weir height and the effect of weir height changes on the discharge coefficient and other effective hydraulic parameters in the upstream of the spillway under the unsteady-gradual varied flow with increasing discharge has been investigated.

Methodology: The experiments were carried out in a rectangular channel of Islamic Azad University, Isfahan University (Khorasgan) with a length of 10 meters and a width of 0.6 meters. The height of the channel was the same and unchanged along the way, as well as its floor was made of galvanized sheets and its walls were made of tempered glass and completely sealed. Considering the relationships and previous studies and dimensional analysis, the effect of effective parameters on the flow discharge coefficient was investigated. In the current research, three types of A-type rectangular piano key weir with variable heights of 10, 15 and 20 cm were used. Other geometrical parameters were constant and experiments done under the unsteady-gradual varied flow with increasing discharge in the flow range of 30 to 50 Lit/s. The experiments has been studied under the range of discharge changes of 5,3 and 1 litter per second and range of time changes of 5,10 and 15 seconds. Therefore, according to the said contents, 27 different modes have been analysed in this thesis. Flow depth was reported by laser altimeter sensors at the top of the channel. PLC

device was used to measure discharge and water head at different times. A magnetic flow meter is attached to the PLC device, which measures the discharge in liters per second and the height of water from the channel floor by sensors installed in millimeters.

Results and Discussion: Discharge coefficient under the unsteady-gradual varied flow with increasing discharge was obtained by deriving from the relationship provided. Considering that the dc/dt value is not known, the relationships of past researchers for the flow discharge coefficient of type A rectangular piano key weir presented. And comparing the percentage of error in each relationship was done. Finally, it was concluded that the available relationship in the literature had a lower error percentage. It was also derived from this relationship relative to time, until determine the dc/dt value. Then, according to the experimental data and weir specifications of the discharge coefficient under the unsteady-gradual varied flow with increasing discharge, it was obtained. The results showed that with increasing the weir height, the slope of the discharge charts and the height of the water decreased and the slope of the head-discharge diagrams increased. With increasing the height of the weir, the discharge coefficient increased and in contrast to the Froude number and the ratio of water height to the height of the weir decreased. As a result, the height of the weir is directly related to the discharge coefficient and is in contrast to the Froude number and the height of the water at the inlet and upstream of the weir. According to the results obtained in the unsteady-gradual varied flow with increasing discharge that led to the calibration of the flow, it was found that the calibrated discharge coefficient (average) in three weirs with heights of 10, 15 and 20 cm is a number between 1.693 and 3.776.

Conclusion: By comparing three type A piano key weirs, it was found that the weir with a height of 20 cm is more efficient than the weir with heights of 10 and 15 cm according to the higher discharge coefficient. It can also be stated that the higher height weir is much more applicable in floods and high flow discharges and better diverts the flow. In fact, all the results indicate that the height of the weir plays an important role in the amount of the flow coefficient of the piano key weir. And by increasing it, the efficiency of the flow discharge can be increased.

Keywords: piano key weir, discharge coefficient, unsteady-gradual varied flow.



© 2023 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 ضریب دبی سرریز کلید پیانویی تحت جریان غیردائمی - متغیر تدریجی با افزایش دبی

علیرضا اعرفی^۱، الهام ایزدینیا^{۲*} و علی خوش فطرت^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول).

۳- استادیار، مرکز تحقیقاتی مطالعات آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

* Elham.izadnia@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: سرریزهای کلید پیانویی نوع اصلاح شده سرریزهای زیگزاگی هستند. از مهم‌ترین مزایای این سرریزها، می‌توان به ضریب جریان بالا، سرعت در اجرا و صرفه اقتصادی اشاره کرد. این سرریزها، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای اجرای سرریز سد در حالت جریان آزاد هستند. در این تحقیق با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود، میزان جریان عبوری به صورت تدریجی و در گام‌های زمانی مشخص افزایش یافت و تحت این شرایط با ارائه یک روش تحلیلی به تعیین ضریب دبی جریان در سرریز کلید پیانویی پرداخته شد. آزمایش‌های این پژوهش، در کانال تحقیقاتی مستطیلی شکل با طول ۱۰ متر و عرض ۰/۶ متر انجام شده است. در تحقیق حاضر، سه نوع سرریز کلید پیانویی مستطیلی نوع A با ارتفاع‌های متغیر ۱۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و سایر پارامترهای هندسی ثابت در محدوده دبی ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه تحت بازه تغییرات دبی ۵، ۳ و ۱ لیتر بر ثانیه و بازه تغییرات زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین در این تحقیق در ۲۷ شرایط هیدرولیکی متفاوت به بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع بر نمودارهای دبی-اشل، ضریب دبی و سایر پارامترهای مؤثر بی‌بعد پرداخته شده است. با توجه به نمودارهای رسم شده، با افزایش ارتفاع سرریز، شیب نمودارهای دبی-اشل افزایش یافته است. هم‌چنین با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی افزایش و در مقابل عدد فرود و نسبت ارتفاع آب به ارتفاع سرریز کاهش یافته است. در نتیجه ارتفاع سرریز با ضریب دبی رابطه مستقیم و با عدد فرود و ارتفاع آب در ورودی و بالادست سرریز رابطه عکس دارد.

کلید واژگان: سرریز کلید پیانویی، ضریب دبی، جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی.

۱- مقدمه

جریان با افزایش طول تاج سرریز، باعث افزایش دبی جریان می‌شوند. این نوع سرریزها اغلب بیرون از بدنه سد ساخته می‌شوند. از سرریزهای کلید پیانویی می‌توان هم به عنوان سرریز مستقیم و در راستای محور سد و هم به عنوان سرریز جانبی و عمود بر محور سد استفاده کرد. Blanc and Lempérière (2001) طرح اصلاح شده سرریزهای زیگزاگی را به منظور بهبود عملکرد هیدرولیکی و همچنین کاهش هزینه ساخت از طریق کاهش حجم بتن‌ریزی، به صورت سرریز کلید پیانویی ارائه کردند. در این نوع از سرریزها، برخلاف سرریزهای زیگزاگی، دهانه‌ها یک در میان شیب‌دار به سمت درون مخزن و بیرون هستند.

سرریزها از جمله مهم‌ترین انواع سازه‌های هیدرولیکی یا آبی هستند که کاربردهایی از جمله عبور و انتقال آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از سراب به پایاب سدها، کنترل سطح آب بالادست، اندازه‌گیری و انحراف جریان عبوری، کاهش فرسایش رودخانه و اندازه‌گیری میزان دبی عبوری را دارند. از عوامل مؤثر در طراحی سرریزها می‌توان، دبی سیل طرح، محل سد و اندازه و روند بهره‌برداری از مخزن را نام برد. سرریزها بر مبنای شکل پلان به دو دسته‌ی سرریز خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. از مهم‌ترین انواع سرریزهای غیرخطی می‌توان به سرریزهای زیگزاگی و کلید پیانویی اشاره کرد که ضمن افزایش طول عبوری

دهانه خروجی در نظر گرفته شود، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز می‌شود. همچنین نتایج آزمایش Chi Hien et al. (2006) نشان داد که برای بارهای پایین جریان (نزدیک به ۲ تا ۳ سانتی‌متر روی تاج سرریز) با زیاد کردن شمار دهانه‌های سرریز، کارایی افزایش می‌یابد. شمار ۷ دهانه برای بارهای پایین و ۵ تا ۶ دهانه برای بارهای بالای جریان (بیش از ۳ سانتی‌متر روی تاج) باعث افزایش ضریب‌دبی می‌شود. Anderson and Tullis (2011) در پژوهشی دیگر، به مقایسه سرریز کلید پیانویی با سرریز زیگزاگی مستطیلی با فراسنجه‌های هندسی همانند پرداختند و تأیید کردند که وجود لبه‌های آویزان تأثیر مثبتی بر ظرفیت تخلیه سرریز کلید پیانویی دارد. آنان با بیان این‌که سرریز کلید پیانویی نوع B به دلیل طول شیروانی بالادستی بزرگتر نسبت به نوع A راندمان دبی بزرگتری دارد، نسبت $\frac{H}{P} > 0.4$ (بار جریان در بالادست به ارتفاع سرریز) را برای این آزمایش مناسب دیدند. Lempérière et al. (2011) میزان‌های $\frac{L}{W}$ (طول کل تاج به عرض سرریز) بین ۴ و ۵ را میزان‌های مناسب از لحاظ کاهش هزینه ساخت و افزایش ظرفیت تخلیه سرریز معرفی کردند. با یکسان بودن نسبت $\frac{L}{W}$ ، شمار کلید واحد و ضخامت تاج، با معرفی $\frac{P}{W_u}$ به عنوان فراسنجه‌ای که بیشترین تأثیر را بر کارایی سرریز پس از $\frac{L}{W}$ دارد به بررسی تأثیر این فراسنجه بر ظرفیت تخلیه سرریز پرداختند. همچنین Ribeiro et al. (2011) با بررسی فراسنجه‌های مؤثر بر ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی، نسبت $\frac{L}{W}$ را به عنوان مؤثرترین عامل معرفی کردند و نتیجه‌گیری کردند که دیواره‌های سپری (پاراپت وال) روی کلیدهای ورودی مؤثر نیستند ولی وجود آن بر روی کلید خروجی کمی کارایی سرریز کلید پیانویی را بهبود می‌بخشد.

Machiels et al. (2011) با انجام آزمایش‌هایی به تعیین ویژگی‌های جریان در امتداد سرریز کلید پیانویی با افزایش بار بالادست پرداختند و شرایط جریان را از نظر دبی، سرعت، فشار و سطح آب مشخص کردند. نتایج نشان داد که ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی تا سه برابر کارآمدتر از سرریز اوجی است. همچنین اثرگذاری ضخامت دیوار و شکل سرریز بر ضریب‌دبی و کاهش کارایی دبی برای بارهای پایین به طور کامل مشخص است. آنان با مطالعه هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی نوع A و با مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی دریافتند که افزون بر

سرریزهای کلید پیانویی در واقع شکل توسعه یافته سرریزهای زیگزاگی هستند و برای کنترل جریان در حالت جریان آزاد طراحی شده‌اند، به طوری که برای یک دبی ثابت عمق آب بر روی این سرریز کم است (Lempérière and Ouamane., 2003). از جمله برتری‌های سرریزهای کلید پیانویی، کاهش فضای سازه‌ای مورد نیاز برای احداث و ظرفیت بالای تخلیه سیلاب بوده، که اجازه می‌دهد این سرریزها به آسانی روی تاج بسیاری از سدهای وزنی قابل احداث باشند. دبی عبوری از این سرریزها حداقل ۴ برابر سرریزهای معمولی با عرض سرریز و بار آب یکسان است، که باعث افزایش دبی مخصوص عبوری تا $10 \cdot \frac{m^3}{m.s}$ می‌شود (Lempérière and Ouamane., 2003). همچنین این سرریزها باعث افزایش ظرفیت مخزن گشته و از نظر اقتصادی به لحاظ امکان ساخت به صورت پیش‌ساخته و نصب در محل نسبت به دیگر سرریزها از جمله سرریزهای اوجی بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه نگهداری کمتری دارند (Barcouda et al., 2006). با توجه به این مورد و امکان اجرای سرریز کلید پیانویی به صورت قطعه‌های پیش ساخته و تسریع در اجرا و در نتیجه کاهش هزینه نهایی، سرریزهای کلید پیانویی از مناسب‌ترین گزینه‌ها در صورت اجرای سرریز سد از نوع آزاد خواهند بود. سرریزهای کلید پیانویی به واسطه فضای کمی که اشغال می‌کنند، می‌توانند به عنوان سرریز جانبی در کنترل سیلاب، کنترل سطح آب بالادست رودخانه‌ها و تأمین آب آبراهه‌های آبیاری استفاده شوند. Laugier (2007) اولین نمونه سرریز کلید پیانویی را در سد Goulours در فرانسه ساخت. همچنین (2009) et al. Laugier ساخت دومین نمونه سرریز کلید پیانویی را در سد Saint-Marc در فرانسه کامل کردند.

Barcouda et al. (2003) و Ouamane and Lempérière (2006) با بررسی نوع A و B سرریز کلید پیانویی به ازای ارتفاع سرریز (P) و شمار سیکل (n) یکسان به این نتیجه رسیدند که دبی عبوری نوع B به میزان ۱۰ درصد بیشتر از نوع A است. (2006) Ouamane and Lempérière بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که برای بارهای پایین، زیاد کردن شمار دهانه‌های سرریز، باعث افزایش کارایی سرریز می‌شود. آنان پیشنهاد دادند که نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ (عرض کلید ورودی به خروجی سرریز) برابر ۱/۲۵ به عنوان نسبت بهینه قرار گیرد و اگر دهانه ورودی بزرگتر از

Delisle (2013) با انجام آزمایش بر روی سه نوع سرریز کلید پیانویی A، B و C به بررسی اثرگذاری لبه‌های آویزان در شرایط جریان آزاد و مستغرق و بازده سرریز در جریان آزاد و مستغرق پرداختند. همچنین رفتار این سرریزها در شرایط مستغرق با رفتار دیگر سرریزهای خطی اعم از سرریزهای اوجی، لبه تیز و لبه پهن مقایسه شد. آنان همچنین رابطه‌ای برای ضریب‌دبی سرریزهای کلید پیانویی در شرایط جریان آزاد برای هر سه نوع سرریز کلید پیانویی A، B و C ارائه و نتیجه‌گیری کردند که میزان دبی تخلیه نوع C > نوع D > نوع A > نوع B است. Machiels et al. (2014) به بررسی و ارزیابی فراسنجه‌های تجربی و طراحی سرریزهای کلید پیانویی پرداختند. آنان در آزمایش‌های خود به بررسی ۳۱ حالت و بررسی تأثیر ارتفاع سرریز، عرض کلیدها و طول لبه‌های آویزان بر ظرفیت دبی و ویژگی‌های جریان با نسبت $\frac{L}{W} = 5$ پرداختند. آنان سرریز با نسبت‌های $\frac{P}{W_u} = 1/33$ ، $\frac{P}{W_u} = 1/25$ ، $\frac{B_o}{B_i} = 3$ و $\frac{W_i}{W_o}$ را دارای بالاترین کارایی تخلیه دبی و بهینه هیدرولیکی در پروژه‌های سدسازی معرفی کردند و سرریز با نسبت‌های $\frac{P}{W_u} = 0/5$ ، $\frac{W_i}{W_o} = 1$ و $\frac{B_o}{B_i} = 1$ را به عنوان بهینه اقتصادی در پروژه‌های با مقیاس کوچکتر پیشنهاد کردند. Crookston et al. (2018) با استفاده از پنج روش طراحی تجربی و شبیه‌سازی CFD که شامل دو مدل مختلف است، به ارائه‌ی یک رابطه‌ی تجربی جدید برای سرریزهای کلید پیانویی نوع A و سرریزهای زیگزاگی مستطیل شکل پرداختند. Kumar et al. (2019) با اشاره به اینکه سرریزهای کلید پیانویی جایگزین سرریزهای زیگزاگی و معمولی و بهترین نوع سرریز برای سدهای با بار پایین است، به مقایسه و ارزیابی چهار رابطه از محققان گذشته برای برآورد ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی در شرایط آزاد و دائمی پرداختند. آنان با مطالعه آماری و بازنمایی رابطه‌های ارائه شده توسط محققان پیشین نتیجه گرفتند که رابطه پیشنهادی توسط Crookston et al. و Cicero and Delisle (2019) ضریب‌دبی را برای $0/8 < \frac{H}{P} < 0/2$ بهتر از دیگر معادله برای مجموعه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق پیش‌بینی می‌کنند.

Seyed javad et al. (2019) به بررسی آزمایشگاهی ۱۶ مدل سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع A در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر با سه ارتفاع

فراسنجه‌های اصلی مانند طول تاج سرریز (L) و ارتفاع (P) که تأثیر مستقیم بر ظرفیت تخلیه دارند، فراسنجه‌های فرعی مانند نسبت عرض کلید ورودی به خروجی ($\frac{W_i}{W_o}$)، ارتفاع کلیدهای ورودی به خروجی ($\frac{P_i}{P_o}$) و طول لبه‌های آویزان ($\frac{B_i}{B_o}$) بر ضریب‌دبی مؤثر هستند.

Javaheri and Kabiri-Samani (2012) با استفاده از معادله‌ی عمومی سرریزها در جریان آزاد، رابطه‌هایی برای ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی در حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه کردند و به بررسی تأثیر فراسنجه‌های هندسی سرریز شامل طول و ارتفاع سرریز، عرض کلیدهای بالادست و پایین‌دست و همچنین لبه‌های آویزان بالادست و پایین‌دست بر ضریب‌دبی پرداختند. نتایج گویای آن بود که افزایش عرض کلید پایین‌دست منجر به افزایش ظرفیت تخلیه می‌شود و در نتیجه کاهش عرض کلید بالادست منجر به کاهش بازده تخلیه می‌گردد و اگر نسبت $1/67 < \frac{W_i}{W_o} < 1/2$ باشد، دبی عبوری از سرریز بیشینه می‌شود. لبه‌های آویزان بالادست سرریز، ضریب‌دبی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. همچنین افزایش ارتفاع سرریز، طول سرریز و شمار سیکل‌ها که در نهایت به افزایش طول کلی سرریز می‌انجامد، باعث افزایش ضریب دبی و سرانجام افزایش دبی عبوری از سرریز می‌شود.

Machiels et al. (2013) با بررسی اثر دیواره سپری با ثابت نگه داشتن ارتفاع سرریز، اثرگذاری اصلی دیواره سپری را افزایش ارتفاع کل سرریز و ظرفیت دبی بیان کردند. در نتیجه اثرگذاری اصلی دیواره‌های سپری، افزایش ارتفاع دهانه ورودی سرریز و کاهش سرعت طولی و در نتیجه افزایش دبی جانبی است. با این حال آنان ادعان دارند که استفاده از سرریز کلید پیانویی استاندارد بدون دیواره سپری در طراحی عملی و به دلیل محدودیت‌های پروژه‌های راحت‌تر و مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. Pfister and Schleiss (2013) به مقایسه‌ی هیدرولیکی سه رابطه ارائه شده توسط محققان گذشته در سرریز کلید پیانویی نوع A پرداختند. سپس منحنی نسبت دبی-اشل را در آن رسم کردند و به مقایسه‌ی آن با منحنی سرریز اوجی پرداختند. پیش‌بینی‌ها از آزمایش برای یک بار خاص، دبی‌های همانندی را برای هر سه رابطه ارائه می‌کند. آنان نتیجه‌گیری کردند که ساختار هیدرولیکی و بازده دبی سرریزهای کلید پیانویی به طور معمول بالاتر از سرریزهای اوجی است. Cicero and

مسیر جریان وجود داشته که امکان آن در بسیاری از شرایط طبیعی وجود ندارد. در بسیاری از شرایط، انواع جریان‌های به وجود آمده در آبراهه‌های باز، ویژگی‌های جریان دائمی را نداشته و نمی‌توان در حل مسئله‌های مربوطه عامل زمان را حذف نمود. به همین علت مسئله‌های جریان غیردائمی بسیار پیچیده‌تر و دشوارتر گشته است. به طور کلی پیش از رخداد سیل، ابتدا جریان به صورت تدریجی افزایش یافته سپس موج ناشی از یک سیل تشکیل می‌شود. در حقیقت افزایش عمق جریان ناشی از افزایش دبی را می‌توان به‌عنوان یک جریان غیردائمی - متغیر تدریجی در نظر گرفت.

بنابراین در این تحقیق یک روش متفاوت مبتنی بر اندازه‌گیری ارتفاع در حین تغییر جریان بر مبنای پژوهش Bortoni et al. (2017) پیشنهاد شده است. لازم به یادآوری است اندازه‌گیری جریان از طریق اندازه‌گیری فشار ستون سیال به سادگی امکان‌پذیر است. همچنین به دلیل اینکه در بسیاری از شرایط طبیعی از جمله شرایط سیلاب جریان به صورت غیردائمی تبدیل می‌شود و نیاز به عبور سریع جریان وجود دارد در این پژوهش به بررسی سرریزهای کلید پیانویی با ضریب گذردهی بالاتر نسبت به دیگر سرریزها پرداخته شده است.

در این پژوهش با توجه به مجهز بودن کانال به دستگاه PLC امکان تغییر دبی در گام‌های زمانی مشخص، وجود داشت. از این رو ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی که یکی از سرریزهای به نسبت جدید و پرکاربرد در سدها است در شرایط جریان غیردائمی - متغیر تدریجی با افزایش دبی بررسی شد. در حقیقت می‌توان اذعان داشت که این سرریز در شاخه افزایشی هیدروگراف سیل بررسی شده است. همچنین در این تحقیق برای نخستین بار، به واسطه‌ی ضریب‌دبی در اثر تغییرات ارتفاع سرریز و تأثیر آن روی ضریب‌دبی، نسبت بدون بعد بار بالادست به ارتفاع سرریز و عدد فرود در جریان غیردائمی - متغیر تدریجی با افزایش دبی پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

Machiels et al. (2011) یک رابطه‌ی تجربی برای ظرفیت دبی سرریز کلید پیانویی در جریان آزاد و دائمی ارائه

متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری پرداختند. نتایج نشان داد که سرریز با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در نسبت بی‌بعد $0/4 < \frac{H}{p} < 0/2$ دارای بیشترین میزان ضریب‌دبی عبوری بوده و در نسبت بی‌بعد $0/5 > \frac{H}{p}$ سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر دارای بیشترین ضریب‌دبی عبوری است. همچنین در شرایط آزمایشگاهی همانند سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای ۴ برابر بیشتر از سرریز کلید پیانویی مستطیلی آب را از خود عبور می‌دهد. Karamvand et al. (2020) در پژوهشی دیگر به مقایسه‌ی سرریزهای کلید پیانویی قوسی با دو مدل سرریز کلید پیانویی بدون قوس (سرریز کلید پیانویی نوع A) در پلان پرداختند. طراحی سرریز کلید پیانویی قوسی، قوس‌ها در ابتدای کلید ورودی و انتهای کلید خروجی قرار می‌گیرند. نتیجه‌گیری شد که ضریب‌دبی به طور میانگین برای سرریز کلید پیانویی قوس‌دار حدود ۱۲ درصد از میانگین بهترین حالت سرریزهای کلید پیانویی بدون قوس در پلان بالاتر بوده است.

Abhash and Pandey (2022) در نتایج بررسی‌های خود بیان کردند که سرریزهای کلید پیانویی تمایل به کاهش استغراق موضعی بالادستی در مخزن‌ها یا دیگر سیستم‌های جریانی دارند و می‌توانند به طور مؤثری برای کاهش خطر سیل استفاده شوند. آنان به بررسی استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی جریان کانال‌های باز بر روی ساختارهای هیدرولیکی همچون سرریز کلید پیانویی برای دبی‌های کوچک پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های CFD می‌توانند عمق‌های جریان را در نزدیکی سرریز کلید پیانویی با دقت منطقی خوب محاسبه کنند.

به دلیل پیچیدگی ویژگی‌های جریان در شرایط غیردائمی، مطالعات اندکی در زمینه واسنجی سرریزها در این شرایط صورت گرفته است. از جمله بررسی‌های صورت گرفته، تحقیقات Bortoni et al. (2017) است که با فرضیات ساده کننده و ثابت در نظر گرفتن ضریب دبی در جریان غیر دائمی با مشتق‌گیری از رابطه کلی سرریزها، به واسنجی سرریزهای مستطیلی و مثلثی پرداختند. آنان اذعان کردند که این روش دارای قابلیت کاربرد برای سایر سرریزها نیز است.

روش‌های شناخته شده برای واسنجی در شرایط واقعی بسیار دشوار است و اغلب نیاز به وجود یک دبی سنج در

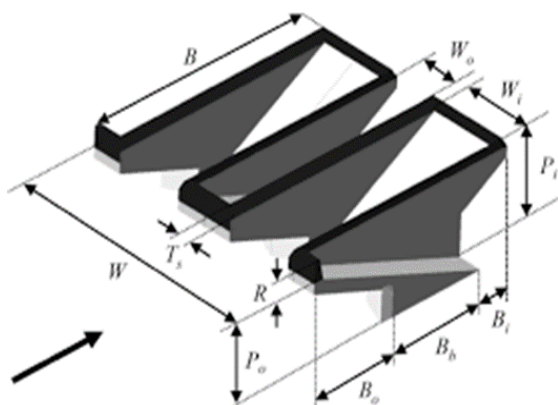


Fig. 1 Fundamental parameters of a PKW – 3D view (Pralong et al., 2011)

شکل ۱ نمایش سه بعدی فراسنجه‌های هندسی سرریز کلید پیانویی (Pralong et al., 2011)

به این ترتیب که با توجه به کم بودن شیب کانال می‌توان از فراسنجه شیب کانال صرف نظر کرده و اگر برای همه‌ی آزمایش‌ها بار جریان در بالادست سرریز از ۳ سانتی‌متر بیشتر باشد ($H > 3\text{cm}$)، می‌توان از اثرگذاری کشش سطحی نیز صرف نظر کرد، بنابراین عدد وبر (W_e) هم از تحلیل بیرون می‌شود (Novak and Cabelka., 1981). از این رو که جریان در کانال برای همه سرریزها در محدوده متلاطم است، اثر لزجت در مقایسه با اثر گرانش کوچک بوده (Henderson., 1966)، به طوری که عدد رینولدز (Re) از محاسبه بیرون می‌شود. در نتیجه فراسنجه‌های رابط‌های (۳) به صورت زیر در رابط‌های (۴) ساده می‌شود:

$$C_d = f \left(\frac{H}{P}, \frac{L}{W}, \frac{B}{P}, \frac{P}{W_u}, \frac{B_i}{B}, \frac{B_o}{B}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{R}{P}, Fr \right) \quad (4)$$

سرریزهای کلید پیانویی بر مبنای بودن و نبودن شیروانی به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. طبق شکل (۲) سرریز نوع A با شیروانی بالادست و پایین‌دست، سرریز نوع B تنها دارای شیروانی بالادست، سرریز نوع C تنها دارای شیروانی پایین‌دست و سرریز نوع D بدون شیروانی بالادست و پایین‌دست است.

در این پژوهش با توجه به جدول (۱) از سه نوع سرریز کلید پیانویی نوع A استفاده شده است. در این آزمایش‌ها فراسنجه‌هایی از مانند طول کل تاج سرریز ($L=4B+W$)، عرض سرریز ($W=2W_i + 2W_o$)، عرض کلید ورودی و خروجی (W_o و W_i)، طول سرریز ($B=B_b + B_i + B_o$)، طول شیروانی پایین‌دست و بالادست سرریز (B_o و B_i) و دیگر فراسنجه‌های یاد شده در سرریز کلید پیانویی ثابت و یکسان هستند و تنها ارتفاع سرریز ($P=P_i = P_o$) در هر

کردند که به صورت رابط‌های (۱) است. بنابراین ضریب‌دبی جریان عبوری به صورت رابط‌های (۲) به دست آید.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} WH^{3/2} \quad (1)$$

$$C_d = Q / \left(\frac{2}{3} \sqrt{2g} WH^{3/2} \right) \quad (2)$$

در این دو معادله، Q دبی عبوری از سرریز، C_d ضریب تخلیه سرریز، g شتاب ثقل، W عرض کانال یا عرض سرریز و H هد بالادست روی سرریز (بار پیزومتریک (h) نسبت به تاج سرریز به اضافه بار سرعت $\frac{v^2}{2g}$ که v سرعت در بالادست سرریز) است.

در شکل (۱) نمایش سه بعدی فراسنجه‌های هندسی سرریز کلید پیانویی قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۱) ضریب‌دبی تابعی از فراسنجه‌های زیر خواهد بود.

دبی عبوری از سرریز (Q)، ارتفاع سرریز (P)، عرض سرریز (W)، عرض کلید واحد (W_u) برابر با W تقسیم بر شمار سیکل، عرض کلید ورودی (W_i)، عرض کلید خروجی (W_o)، طول سرریز (B)، طول فونداسیون سرریز (B_b)، طول شیروانی پایین‌دست سرریز یا طول لبه آویزان پایین‌دست (B_i)، طول شیروانی بالادست سرریز یا طول لبه آویزان بالادست (B_o)، ارتفاع کلید ورودی (P_i)، ارتفاع کلید خروجی (P_o)، ضخامت تاج جانبی (T_s)، طول کل تاج (L)، ارتفاع دیواره تاج یا سپری (R)، شمار سیکل (n)، عمق جریان در بالادست سرریز (H)، سرعت بالادست (v)، شیب کف (s)، شتاب ثقل (g)، جرم واحد حجم مایع (ρ)، لزجت دینامیکی (μ)، کشش سطحی (σ).

با استفاده از تحلیل ابعادی، می‌توان ضریب‌دبی را به صورت تابعی از فراسنجه‌های بدون بعد زیر در رابط‌های (۳) نشان داد.

$$C_d = f \left(\frac{H}{P}, \frac{L}{W}, \frac{B}{P}, \frac{P}{W_u}, \frac{B_i}{B}, \frac{B_o}{B}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{R}{P}, W_e, Re, Fr \right) \quad (3)$$

که در این رابطه $W_e = (\rho H / \sigma)^{0.5} Q / [(H+P)W]$ ، عدد وبر $Fr = \rho QH / [(H+P)W\mu]$ و عدد رینولدز و $Re = \rho QH / [(H+P)W\mu]$ و $W_e = (Q / (W(H+P))) / (gH)^{0.5}$ ، عدد فرود جریان در بالادست است (Javaheri and Kabiri-Samani (2012)). بر مبنای تحقیقات صورت گرفته توسط دیگر محققان از برخی فراسنجه‌ها به دلیل کم بودن تأثیرشان بر ضریب‌دبی جریان می‌توان چشم‌پوشی نمود.

در انتهای سرریز و تاج سرریز نصب شدند و حسگر شماره ۳ در بالادست سرریز و با فاصله ۵ برابر بار آب روی تاج به منظور برداشت عمق آب بالادست نصب شد. میزان دبی جریان به گونه‌ای مهار می‌شد که حداقل بار آب روی سرریز بیش از ۳ سانتی‌متر شود، در نتیجه از تاثیر کشش سطحی در این پژوهش صرف‌نظر شد. آزمایش‌ها در محدوده دبی ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه بر روی سه سرریز کلید پیانویی با ارتفاع‌های متفاوت ۱۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر در جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی با الگوهای متفاوت تغییرات دبی برابر ۳، ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه و تغییرات زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه برای هر سرریز انجام گرفت. برای اندازه‌گیری دبی و بار آب در زمان‌های متفاوت در این جریان از دستگاه PLC استفاده شد. به این‌گونه که یک دبی‌سنج مغناطیسی متصل به دستگاه PLC است که امکان تغییر دبی را تحت الگوی ارائه شده از طرف کاربر، بیشینه میزان دبی و هیدروگراف‌های مربوطه فراهم می‌کند. دستگاه PLC میزان دبی را بر حسب لیتر بر ثانیه و با دقت ۰/۰۰۰۱ متر مکعب بر ثانیه و میزان ارتفاع آب را از کف کانال توسط حسگرهای نصب شده بر حسب میلی‌متر و خطای در حدود ۰/۰۰۱ متر اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه یک حافظه داشته که اطلاعات مربوط به ارتفاع، دبی و زمان را در خود ذخیره می‌کند و با اتصال فلش به دستگاه می‌توان اطلاعات را روی فلش ذخیره کرد. فایل‌های ذخیره شده به صورت اکسل هستند که متناظر با هر ارتفاع آب، یک زمان و یک جریان با دبی مشخص وجود دارد. این دستگاه دارای یک نمایشگر ۱۰ اینچی است که تنظیم‌ها از طریق آن انجام می‌شود. با توجه به داده‌های به‌دست آمده از آزمایش، نمودارهای دبی-زمان و ارتفاع-زمان و پس از آن نمودار دبی-اشل برای هر حالت در هر سرریز رسم شد و سپس به مقایسه نمودار دبی-اشل در سه سرریز پرداخته شد. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده و جدول (۲) در این تحقیق به بررسی ۲۷ شرایط متفاوت پرداخته شده و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها گزارش شده است. بدین منظور، نماد W برمی‌نمای ۳ نوع سرریز مورد بررسی با ارتفاع‌های متفاوت و نماد M براساس ۹ حالت شرایط متغیر دبی و

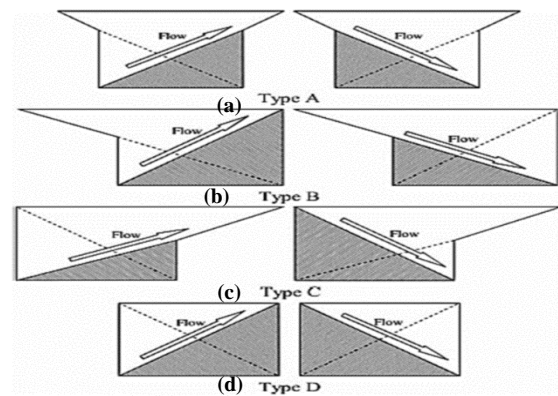


Fig. 2 PKW types (a) A, (b) B, (c) C, (d) D (modified from Lempérière et al. 2011)

شکل ۲ انواع سرریزهای کلید پیانویی از نظر بودن یا نبودن شیروانی: (a) نوع A، (b) نوع B، (c) نوع C، (d) نوع D (Lempérière et al. 2011)

یک از سه سرریز مورد بررسی متفاوت و برابر ۱۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر است. لازم به یادآوری است که سرریزهای کلید پیانویی مورد بررسی همگی مستطیلی و از نوع A با شیروانی بالادست و پایین دست و بدون دیواره سپری هستند. بنابراین در این تحقیق ضریب‌دبی در جریان آزاد و تنها تحت تاثیر تغییرات Fr و $\frac{H}{p}$ در بالادست سرریز تغییر می‌کند.

۲-۲- شرایط آزمایش

این پژوهش در کانال روباز و مستطیلی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۶ متر انجام گرفت. ارتفاع کانال در طول مسیر یکسان و بدون تغییر و همچنین کف آن از جنس ورق‌های گالوانیزه است. جداره‌های این کانال از شیشه‌های سکوریت است که به صورت کامل آب‌بندی شده بود. در شکل (۳) نمایی از کانال تحقیقاتی آورده شده است. به منظور توسعه‌یافتگی جریان، مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کلید پیانویی با ویژگی‌های هندسی یاد شده در جدول (۱) در فاصله ۵ متری از ورودی کانال (وسط کانال) نصب شدند. برای اندازه‌گیری عمق جریان از ۳ حسگر ارتفاع‌سنج لیزری که در بالای کانال به صورت ریلی جابه‌جا می‌شدند و به ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متر از کف کانال نصب شده بودند، استفاده شد. حسگرهای شماره ۱ و ۲ به ترتیب

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی سرریزهای کلید پیانویی مورد بررسی

Table 1 Geometric characteristics of the studied piano key Weirs

Weir Type	P(m)	L(m)	W(m)	n	B(m)	B _b (m)	B _i (m)	B _o (m)	W _i (m)	W _o (m)
W ₁	0.1	2.6	0.6	2	0.5	0.35	0.075	0.075	0.16	0.14
W ₂	0.15	2.6	0.6	2	0.5	0.35	0.075	0.075	0.16	0.14
W ₃	0.2	2.6	0.6	2	0.5	0.35	0.075	0.075	0.16	0.14

توجه به رابطه بالا برای به دست آوردن C_{pk} (ضریب دبی سرریز کلید پیانویی در شرایط غیر دائمی)، نیاز به میزان‌های $\frac{dQ}{dt}$ ، $\frac{dH}{dt}$ و $\frac{dc}{dt}$ وجود دارد. میزان $\frac{dQ}{dt}$ و $\frac{dH}{dt}$ با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و با رسم نمودارهای $Q-t$ و $H-t$ و به دست آوردن شیب این نمودارها قابل محاسبه است. برای به دست آوردن $\frac{dc}{dt}$ در ادامه به بررسی رابطه‌های مورد نظر محققان گذشته برای ضریب دبی در شرایط دائمی و انتخاب رابطه با کمترین درصد خطا و تبدیل آن به شرایط غیردائمی پرداخته شده است.

همان‌گونه که بیان شد، برای تعیین ضریب دبی میزان $\frac{dc}{dt}$ نیاز است. با توجه به نبود رابطه‌ای برای سرریزهای کلید پیانویی در شرایط غیردائمی از رابطه‌های موجود در شرایط دائمی برحسب زمان مشتق گرفته شد. بنا برنتایج بررسی‌های مطالعات گذشته ۴ رابطه برای ضریب دبی در سرریز کلید پیانویی مستطیلی نوع A در جریان دائمی انتخاب شد، که در زیر به اختصار توضیحی در رابطه با آن داده می‌شود.

(Kabiri-Samani and Javaheri (2012) از رابطه (۱) برای ارتباط دبی و بار برای سرریز کلید پیانویی استفاده کردند و رابطه (۶) را برای محاسبه ضریب دبی سرریز کلید پیانویی در شرایط جریان آزاد بر مبنای بررسی‌های تجربی و برقراری شرایط $0.1 < \frac{H}{P} < 0.6$ ، $0.1 < \frac{L}{W} < 0.7$ ، $0.2 < \frac{B}{P} < 0.5$ ، $1 < \frac{W_i}{W_o} < 1.22$ و $0.33 < \frac{W_i}{W_o} < 0.33$ و $3 \text{ cm} < h$ پیشنهاد کردند.

$$C_d = 0.212 \left(\frac{H}{P}\right)^{-0.675} \left(\frac{L}{W}\right)^{0.377} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.426} \left(\frac{B}{P}\right)^{0.306} \left(\exp(1.504 \left(\frac{B_o}{B} + 0.093 \left(\frac{B_i}{B}\right)\right) + 0.606\right) \quad (6)$$

در این آزمایش با توجه به میزان‌های ارائه شده در جدول (۱) می‌توان رابطه (۶) را به صورت رابطه (۷) ساده کرد.

$$C_d = \left(\frac{0.400905 \times P^{0.369}}{H^{0.675}}\right) + 0.606 \quad (7)$$

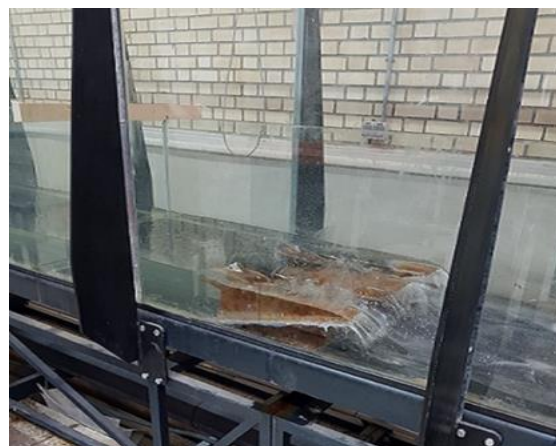


Fig. 3 A view of type A Rectangular Piano Key Weir P=10cm

شکل ۳ نمایی از سرریز کلید پیانویی مستطیلی نوع A به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر

زمان برای هر سرریز، نام‌گذاری شده‌اند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تعیین ضریب دبی جریان غیردائمی-متغیر

تدریجی با افزایش دبی

به دلیل آنکه آزمایش‌ها در جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی است و دبی و ارتفاع آب با گذشت زمان تغییر می‌کنند، برای به دست آوردن ضریب دبی در این شرایط جریان بایستی از دو طرف رابطه (۱) که مربوط به ظرفیت دبی سرریز کلید پیانویی در شرایط دائمی بود، نسبت به زمان مشتق گرفته شود. بنابراین رابطه (۵) برای ضریب دبی به صورت زیر به دست آید.

$$C_{pk} = \frac{\frac{dQ}{dt} - \frac{2}{3} \sqrt{2g} W H^{1.5} \frac{dc}{dt}}{\sqrt{2g} W H^{0.5} \frac{dH}{dt}} \quad (5)$$

که در رابطه (۵)، $\frac{dH}{dt}$ تغییرات بار نسبت به زمان، $\frac{dQ}{dt}$ تغییرات دبی نسبت به زمان و $\frac{dc}{dt}$ تغییرات ضریب دبی سرریز کلید پیانویی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. با

جدول ۲ مدل‌های مختلف آزمایش در سرریزهای کلید پیانویی مورد مطالعه

Table 2 Different models of experiment in the studied piano key weirs

ΔQ and Δt for test	$\Delta Q=5\text{Lit/s}$ $\Delta t=5\text{sec}$	$\Delta Q=5\text{Lit/s}$ $\Delta t=10\text{sec}$	$\Delta Q=5\text{Lit/s}$ $\Delta t=15\text{sec}$	$\Delta Q=3\text{Lit/s}$ $\Delta t=5\text{sec}$	$\Delta Q=3\text{Lit/s}$ $\Delta t=10\text{sec}$	$\Delta Q=3\text{Lit/s}$ $\Delta t=15\text{sec}$	$\Delta Q=1\text{Lit/s}$ $\Delta t=5\text{sec}$	$\Delta Q=1\text{Lit/s}$ $\Delta t=10\text{sec}$	$\Delta Q=1\text{Lit/s}$ $\Delta t=15\text{sec}$
P=10cm	W ₁ M ₁	W ₁ M ₂	W ₁ M ₃	W ₁ M ₄	W ₁ M ₅	W ₁ M ₆	W ₁ M ₇	W ₁ M ₈	W ₁ M ₉
P=15cm	W ₂ M ₁	W ₂ M ₂	W ₂ M ₃	W ₂ M ₄	W ₂ M ₅	W ₂ M ₆	W ₂ M ₇	W ₂ M ₈	W ₂ M ₉
P=20cm	W ₃ M ₁	W ₃ M ₂	W ₃ M ₃	W ₃ M ₄	W ₃ M ₅	W ₃ M ₆	W ₃ M ₇	W ₃ M ₈	W ₃ M ₉

ثانویه کمی وجود دارند که تأثیر بسیار کمی بر کارایی آزادسازی جریان از سرریز کلید پیانویی داشته باشند. این فراسنجه‌های ثانویه شامل نسبت عرض کلید ورودی به خروجی $(\frac{W_i}{W_o})$ ، نسبت ارتفاع کلید ورودی و خروجی سرریز کلید پیانویی $(\frac{P_o}{P_i})$ ، طول برآمدگی نسبی $(\frac{B_o+B_i}{B})$ و ارتفاع دیواره تاج نسبی $(\frac{R_o}{P_o})$ است. فراسنجه‌های جزئی به صورت جداگانه با عامل‌های اصلاح یعنی W_1 ، P_1 ، a_2 و b_2 بیان شده است. در بررسی‌های این محققان، فراسنجه‌های ثانویه به عنوان واحد در نظر گرفته شده است.

در آزمایش‌های انجام شده با توجه به جدول (۱) و برابر بودن P_i و P_o در هر سرریز و نبودن دیواره تاج نسبی یا همان دیواره‌های سپری میزان‌های P_1 و a_2 برابر یک و W_1 و b_2 به ترتیب برابر $1/0.67$ و $1/2.91$ هستند. بنابراین میزان r به صورت رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$r = 1 + 0.92178 \left(\frac{P}{H}\right)^{0.9} \quad (14)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۱۴)، رابطه (۱۳) در این آزمایش به صورت رابطه (۱۵) ساده می‌شود.

$$C_d = 0.63 + 0.58072 \left(\frac{P}{H}\right)^{0.9} \quad (15)$$

همچنین در بررسی‌های انجام شده و معادله پیشنهاد شده توسط Cicero and Delisle (2013) میزان C_d با برقراری شرایط $0.1 < \frac{H}{P} < 0.72$ و جریان آزاد، از رابطه (۱۶) بدست می‌آید.

$$C_d = \frac{3}{2} [a_3 + a_4 \left(\frac{H}{P}\right) + a_5 \left(\frac{H}{P}\right)^2 + a_6 \left(\frac{H}{P}\right)^3 + a_7 \left(\frac{H}{P}\right)^4] \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) a_7 ، a_6 ، a_5 ، a_4 ، a_3 (۱۶) و a_7 ضریب‌های تجربی هستند که برای سرریز کلید پیانویی نوع A با رعایت نسبت $0.1 < \frac{H}{P} < 0.72$ ، $a_5 = -11.56$ ، $a_4 = 0.59$ ، $a_3 = 1.63$ ، $0.1 < \frac{H}{P} < 0.72$

(Ribeiro et al. (2012) مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را انجام دادند و همچنین از داده‌های پیشین برای ایجاد معادله ضریب‌دبی برای سرریز کلید پیانویی استفاده کردند. رابطه r با فراسنجه‌های اصلی و ثانویه در زیر ارائه شده است. r نسبت افزایش تخلیه است که در اصل تابعی از $\frac{L}{W}$ بوده و میزان آن به طور عمده به فراسنجه‌های اصلی و جزئی بستگی دارد. رابطه (۸) برای $0 < 0.24 \left(\frac{L-W}{WH}\right)^{0.9} < 20$ و $1.2 \leq r \leq 5.3$ استفاده شده است.

$$r = 1 + 0.24 \left(\frac{L-W}{WH}\right)^{0.9} (W_1 P_1 b_2 a_2) \quad (8)$$

میزان عامل‌های اصلاحی منحصر به فرد مورد آزمایش بر روی مدل‌های مختلف بین 0.92 تا $1/2$ بودند. در رابطه (۸) عامل‌های اصلاح نسبت عرض کلید ورودی و خروجی (W_i) ، نسبت ارتفاع ورودی و خروجی (P_i) ، طول برآمدگی نسبی (b_2) و ارتفاع دیواره تاج نسبی (a_2) به صورت زیر تعریف شده است.

$$W_1 = \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.05} \quad (9)$$

$$P_1 = \left(\frac{P_o}{P_i}\right)^{0.25} \quad (10)$$

$$b_2 = \left(0.3 + \frac{B_i + B_o}{B}\right)^{-0.5} \quad (11)$$

$$a_2 = 1 + \left(\frac{R_o}{P_o}\right)^2 \quad (12)$$

آنان رابطه (۱۳) را برای محاسبه ضریب‌دبی سرریزهای کلید پیانویی در جریان آزاد ارائه کردند.

$$C_d = \left(\frac{3}{2}\right) \times 0.42 \times r \quad (13)$$

رابطه (۱۳) تنها برای سرریز کلید پیانویی نوع A معتبر است. فراسنجه‌های اصلی تأثیر قاطعی بر ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی دارند. فراسنجه‌های اصلی به طور عمده شامل L طول کل تاج سرریز، W عرض کانال یا سرریز، P_i ارتفاع کلید ورودی و H کل هد جریان است. فراسنجه‌های

عنوان بهینه‌ترین رابطه برای تعیین ضریب‌دبی در جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی انتخاب شد. بنابراین برای هر یک از سه سرریز مورد بررسی برابر میزان هندسی آزمایش از رابطه (۷) نسبت به زمان مشتق گرفته و رابطه‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) به ترتیب برای سرریز به ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به دست می‌آیند.

$$\frac{dc_d}{dt} = -\left(\frac{0.115703}{H^{1.675}}\right) \frac{dH}{dt} \quad (20)$$

$$\frac{dc_d}{dt} = -\left(\frac{0.134372}{H^{1.675}}\right) \frac{dH}{dt} \quad (21)$$

$$\frac{dc_d}{dt} = -\left(\frac{0.149426}{H^{1.675}}\right) \frac{dH}{dt} \quad (22)$$

براین مبنا با توجه به رابطه (۵) که ضریب‌دبی در جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی می‌باشد و با داشتن $\frac{dc_d}{dt}$ که از مشتق فرمول جواهری و کبیری سامانی (۲۰۱۲) به دست آمده است و همچنین $\frac{dQ}{dt}$ و $\frac{dH}{dt}$ که شیب نمودارهای دبی و ارتفاع آب در ورودی سرریز نسبت به زمان است که در ادامه رسم شده‌اند، ضریب‌دبی تحت جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی (C_{pk}) حاصل می‌شود. لازم به یادآوری است که Bortoni et al. (2017) نیز با بررسی بر روی سرریز مستطیلی و مثلثی و متغیر بودن ارتفاع آب روی سرریز و ثابت بودن دیگر فراسنجه‌ها به ارائه‌ی رابطه‌ای برای ضریب‌دبی جریان در حالت جریان غیردائمی با مشتق‌گیری از بار آب نسبت به زمان (dH/dt) و محاسبه شیب خط آن پرداختند و این روش را برای دیگر سرریزها قابل استفاده دانستند. به همین جهت در این تحقیق نیز از روش مشتق‌گیری برای جریان غیردائمی استفاده شده است.

۴- نتیجه‌گیری نمودارها

در این تحقیق، ابتدا به روند تغییرات دبی و ارتفاع آب با گذر زمان در بالادست سرریز پرداخته شد و شیب نمودارهای دبی-زمان و ارتفاع-زمان برای هر سه سرریز مورد بررسی رسم شد. نتایج گویای آن بود که هر چه بازه زمانی Δt بیشتر و ΔQ کمتر شود، شیب نمودارهای دبی و ارتفاع نسبت به زمان کمتر به دست می‌آیند. با توجه به شکل (۴) و (۵) و مقایسه آزمایش M_7 که دیگر آزمایش‌ها نیز مشابه این آزمایش است، مشخص است که با افزایش

در آزمایش‌های انجام شده و با توجه به جدول (۱) و استفاده از داده‌های ارائه شده برای سرریز کلید پیاوویی نوع A در رابطه (۱۶) این رابطه به صورت رابطه (۱۷) ساده می‌شود.

$$C_{dA} = -18.69\left(\frac{H}{P}\right)^4 + 32.58\left(\frac{H}{P}\right)^3 - 17.34\left(\frac{H}{P}\right)^2 + 0.885\left(\frac{H}{P}\right) + 2.445 \quad (17)$$

Anderson and Tullis بررسی‌های تجربی بر روی هندسه‌های مختلف سرریز کلید پیاوویی انجام دادند و بعدها Crookston et al. (2018) رابطه (۱۸) را برای ضریب‌دبی با برقراری شرایط $0.1 < \frac{H}{P} < 0.125$ و $1 \leq \frac{W_i}{W_o}$ پیشنهاد کردند.

$$C_d = [1/\{a_1 + b_1\left(\frac{H}{P}\right) + c_1/\left(\frac{H}{P}\right)\} + d_1]\left(\frac{L}{W}\right) \quad (18)$$

که در این رابطه a_1 و b_1 و c_1 و d_1 ضرایب تجربی هستند که میزان آن‌ها به ترتیب ۰/۴۲۶، ۹/۴۱۲، ۰/۱۰۲۷ و ۰/۱۱۱۴ برای سرریز کلید پیاوویی با $\frac{W_i}{W_o} = 1/25$ و ۰/۵۰۹۱، ۱۰/۲۹، ۰/۰۹۷۱۲، ۰/۱۱۶۴ برای سرریز کلید پیاوویی با $\frac{W_i}{W_o} = 1/0$ است. برای دیگر میزان‌های $\frac{W_i}{W_o}$ هم ضریب‌های تجربی موجود است. به دلیل اینکه در آزمایش‌های صورت گرفته با توجه به جدول (۱) میزان نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ برابر ۱/۱۴۲۸ است، با استفاده از ریاضیات و با توجه به میزان داده شده، میزان a_1 و b_1 و c_1 و d_1 به ترتیب ۰/۴۵۹۱، ۹/۷۸۸۵، ۰/۱۰۰۳ و ۰/۱۱۳۵ در رابطه (۱۸) قرار داده شد. سایر فراسنجه‌ها هم از طریق جدول (۱) در رابطه قرار داده شده و رابطه (۱۹) بدست آمد.

$$C_d = 0.4918[1/\{0.1003\left(\frac{P}{H}\right) + 9.7885\left(\frac{H}{P}\right) + 0.4591\}] \quad (19)$$

۳-۲- روش محاسبه ضریب‌دبی در جریان

غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی

برای تعیین بهترین رابطه برای ضریب‌دبی، با مقایسه میزان‌های به دست آمده از رابطه‌های بالا و تعیین میزان درصد خطای هر کدام نسبت به ضریب‌دبی آزمایشگاهی برابر جدول (۳) مشخص شد که به طور کلی درصد خطای ضریب‌دبی به دست آمده از رابطه‌ی Kabiri-Samani and Javaheri (2012) به نسبت دیگر محققان کمتر بوده و به

ارتفاع سرریز (P) شیب نمودارهای دبی و ارتفاع نسبت به زمان کاهش می‌یابند. بنابراین بیشترین $\frac{dH}{dt}$ و $\frac{dQ}{dt}$ مربوط به سرریز با $P=10\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.005\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=5\text{sec}$ و کمترین $\frac{dH}{dt}$ و $\frac{dQ}{dt}$ مربوط به سرریز با $P=20\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=15\text{sec}$ است. (W_3M_1) و کمترین میزان آن مربوط به $P=10\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=15\text{sec}$ است. (W_1M_9)

ارتفاع سرریز (P) شیب نمودارهای دبی و ارتفاع نسبت به زمان کاهش می‌یابند. بنابراین بیشترین $\frac{dH}{dt}$ و $\frac{dQ}{dt}$ مربوط به سرریز با $P=10\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.005\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=5\text{sec}$ و کمترین $\frac{dH}{dt}$ و $\frac{dQ}{dt}$ مربوط به سرریز با $P=20\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=15\text{sec}$ است. اقزون بر این

جدول ۳ مقایسه ضریب‌دبی محققان پیشین و بیشینه درصد خطای آن‌ها برای حالت M_7 در سه سرریز تحت جریان دائمی

Table 3 Comparison of discharge coefficient of previous researchers and their maximum error percentage for M_7 mode in three weirs under steady flow

	experimental	Kabiri-Samani and Javaheri	Ribeiro et al.	Cicero and Delisle	Crookston et al.
C_d range (W_1M_7)	1.97-1.37	2.16-1.58	2-1.36	1.67-1.16	1.46-1.03
M.E.P ¹ (W_1M_7)		19.53	10.46	20.84	32.23
range (W_2M_7) C_d	2.71-1.90	2.59-1.92	2.88-1.92	2.10-1.61	1.90-1.41
M.E.P (W_2M_7)		15.93	27.95	22.42	31.83
range (W_3M_7) C_d	2.72-2.26	2.86-2.15	3.63-2.44	2.26-1.93	2.12-1.71
M.E.P (W_3M_7)		13.87	43.26	18.76	26.89

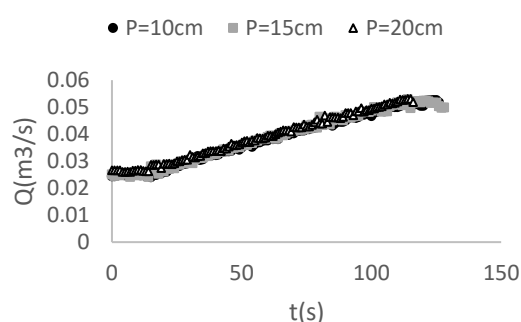


Fig. 5 Relationship between Discharge and time in Rectangular piano key weirs for M_7 mode ($\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5\text{sec}$) with heights of 10, 15 and 20 cm

شکل ۵ رابطه بین دبی و زمان در سرریزهای کلید پیانویی

مستطیلی برای حالت M_7 با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ($\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5\text{sec}$)

شکل ۴ رابطه بین بار و زمان در سرریزهای کلید پیانویی

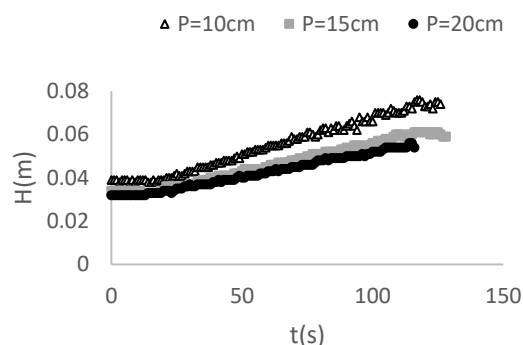


Fig. 4 Relationship between Head and time Rectangular piano key weirs for M_7 mode ($\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5\text{sec}$) with heights of 10, 15 and 20 cm

شکل ۴ رابطه بین بار و زمان در سرریزهای کلید پیانویی

مستطیلی برای حالت M_7 با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ($\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5\text{sec}$)

شکل ۴ رابطه بین بار و زمان در سرریزهای کلید پیانویی

نمودار دبی-اشل مربوط به سرریز با $P=20\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.005\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=5\text{sec}$ و کمترین شیب نمودار دبی-اشل مربوط به سرریز با $P=10\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=15\text{sec}$ است. شیب خط نمودار دبی-اشل سرریز با $P=10\text{cm}$ ، $P=15\text{cm}$ و $P=20\text{cm}$ به ترتیب برابر با ۰٫۷۵۴۳، ۰٫۹۷۴۱ و ۱٫۱۴۹۱ است.

با رسم نمودارهای دبی-اشل برای هر حالت در سه سرریز نتیجه‌گیری شد که به طور کلی با افزایش Δt و کاهش ΔQ شیب نمودار دبی-اشل کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه نمودار حالت‌های همانند تغییرات دبی و زمان در هر سه سرریز برابر با شکل (۶) که مربوط به آزمایش M_7 و همانند دیگر حالت‌ها است، مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع سرریز، شیب نمودار دبی-اشل افزایش یافته است. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده بیشترین شیب

1 Maximum error percentage

جریان دائمی و غیردائمی کاسته شده است. با توجه به شکل (۸) محدوده عدد فرود بین ۰/۳ تا ۰/۶ یعنی محدوده جریان زیر بحرانی است. با توجه به شکل با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی افزایش یافته و با افزایش عدد فرود ضریب دبی به صورت خطی کاهش می‌یابد. در اعداد فرود کوچک‌تر از ۰/۴ ضریب دبی در شرایط غیر دائمی بزرگ‌تر از ضریب دبی شرایط دائمی است و به ازای اعداد فرود بزرگ‌تر از ۰/۴ ضریب دبی در شرایط جریان دائمی و غیردائمی تا حدودی یکسان می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در جریان غیردائمی که به واسنجی جریان منجر شده است، مشخص شد که ضریب دبی واسنجی شده (میانگین) در سه سرریز به ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر عددی بین ۱/۶۹۳ تا ۳/۷۷۶ است. همچنین با مقایسه ضریب دبی کالیبره شده (میانگین) در همه حالت‌ها مشخص شد که با افزایش Δt و کاهش ΔQ ضریب دبی جریان غیردائمی کاهش می‌یابد و با افزایش ارتفاع سرریز ضریب دبی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین کمترین ضریب دبی مربوط به سرریز با ویژگی‌های (W_1M_9) $\Delta Q=0.001 \frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=15sec$ ، $P=10cm$ بیشترین ضریب دبی مربوط به سرریز با ویژگی‌های (W_3M_1) $\Delta Q=0.005 \frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=5sec$ ، $P=20cm$ است.

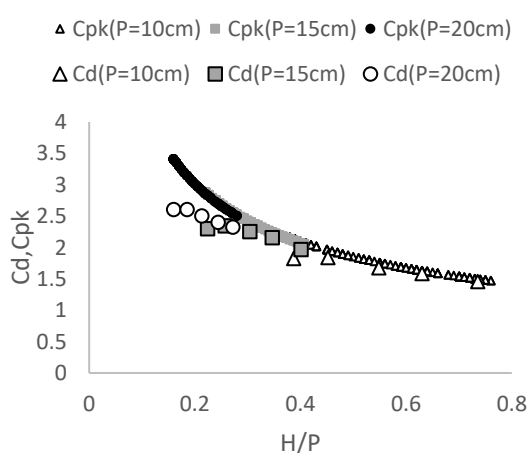


Fig. 7 Relationship between C_{PK}, C_d and H/P ratio in Rectangular piano key weirs for M_7 mode ($\Delta Q=0.001 \frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5sec$) with heights of 10, 15 and 20 cm
شکل ۷ رابطه بین C_{PK}, C_d و نسبت H/P در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی برای حالت M_7 با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر

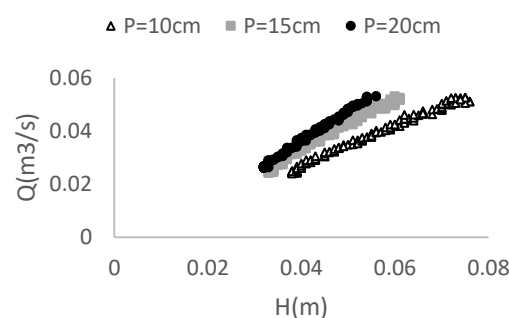


Fig. 6 Relationship between Head and Discharge in Rectangular piano key weirs for M_7 mode ($\Delta Q=0.001 \frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5sec$) with heights of 10, 15 and 20 cm
شکل ۶ رابطه بین بار و دبی در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی برای حالت M_7 با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ($\Delta Q=0.001 \frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5sec$)

برابر مطالب یاد شده اکنون با داشتن ضریب دبی در جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی به بررسی فراسنجه‌های موثر بی‌بعد نسبت به ضریب دبی پرداخته شده است. نمودارهای مربوط به فراسنجه‌های موثر نسبت به ضریب دبی در شکل‌های (۷) و (۸) مربوط به آزمایش M_7 که همانند دیگر آزمایش‌ها می‌باشد، آورده شده است. برابر شکل‌های (۷) و (۸) نتیجه‌گیری شد که با افزایش ارتفاع سرریز، عدد فرود و نسبت ارتفاع آب به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی افزایش یافته است. افزون بر این، شیب منفی در نمودارهای $C_{pk}-Fr$ و $C_{pk}-H/P$ نشان می‌دهد که با افزایش Fr و H/P ، ضریب دبی کاهش یافته است. بنابراین ضریب دبی با عدد فرود و بار آب در بالادست سرریز رابطه عکس دارد. در شکل‌های (۷) و (۸) ضریب دبی در حالت دائمی (C_d) نسبت به فراسنجه‌های موثر H/P و Fr نیز آورده شده است، که نتایج از آن همانند با نتایج به‌دست آمده از جریان غیردائمی است و محدوده این ضریب دبی بین ۱/۴۶ تا ۲/۶۰ است. می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی جریان دائمی نسبت به غیردائمی کمتر شده است و بر اختلاف این دو افزوده شده است. بیشینه درصد اختلاف بین آن‌ها برابر ۲۳/۵۶ برای سرریز به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و کمترین درصد اختلاف بین آن‌ها برابر ۲/۶۰ برای سرریز به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر است. همچنین با کاهش ضریب دبی از درصد اختلاف بین ضریب دبی

به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب‌دبی افزایش یافته است. همچنین از شیب منفی در نمودارهای $C_{pk}-Fr$ و $C_{pk}-H/P$ مشخص است که با افزایش Fr و H/P ، ضریب‌دبی کاهش یافته است. بنابراین ضریب‌دبی نیز با عدد فرود و بار آب در بالادست سرریز رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر با کاهش ارتفاع سرریز، ضریب‌دبی نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه عمق آب در بالادست سرریز افزایش خواهد یافت. در حقیقت می‌توان ادعان کرد با افزایش بار آب روی سرریز به دلیل مستغرق شدن کلیدهای ورودی سرریز از کارایی آن کاسته می‌شود.

۵- محدوده ضریب‌دبی جریان دائمی بین ۱/۴۶ تا ۲/۶۰ است و با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب‌دبی جریان دائمی نسبت به غیردائمی کمتر شده است و بر اختلاف این دو افزوده شده است. بیشینه درصد اختلاف بین آن‌ها برابر ۲۳/۵۶ برای سرریز به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و کمینه درصد اختلاف بین آن‌ها برابر ۲/۶۰ برای سرریز به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر است. همچنین با کاهش ضریب‌دبی از درصد اختلاف بین ضریب‌دبی جریان دائمی و غیردائمی کاسته شده است.

۶- با توجه به نتایج به دست آمده در جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی که به واسنجی جریان منجر شده است، مشخص شد که ضریب‌دبی واسنجی شده (میانگین) در سه سرریز به ارتفاع‌های ۱۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر عددی بین ۱/۶۹۳ تا ۳/۷۷۶ است.

۷- با مقایسه ضریب‌دبی واسنجی شده (میانگین) در تمامی حالت‌ها مشخص شد که با افزایش Δt و کاهش ΔQ ضریب‌دبی جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی کاهش می‌یابد و با افزایش ارتفاع سرریز ضریب‌دبی افزایش می‌یابد. بنابراین کمترین ضریب‌دبی مربوط به سرریز با $P=10\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=15\text{sec}$ و بیشترین ضریب‌دبی مربوط به سرریز با $P=20\text{cm}$ ، $\Delta Q=0.005\frac{m^3}{s}$ و $\Delta t=5\text{sec}$ است.

۸- با مقایسه سه سرریز کلید پیانویی نوع A مشخص شد که سرریز با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به نسبت سرریز با ارتفاع‌های ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر با توجه به ضریب‌دبی بیشتر،

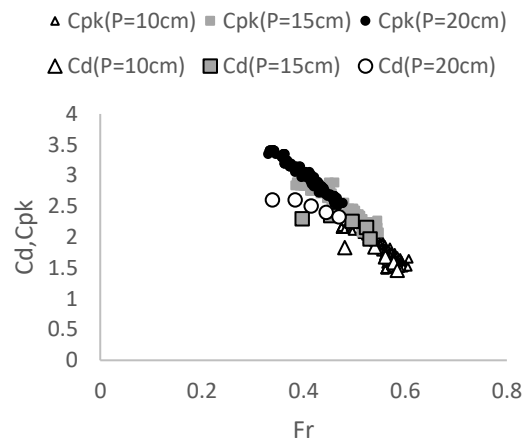


Fig. 8 Relationship between C_{PK}, C_d and Froude number in Rectangular piano key weirs for M_7 mode ($\Delta Q=0.001\frac{m^3}{s}$, $\Delta t=5\text{sec}$) with heights of 10, 15 and 20 cm

شکل ۸ رابطه بین C_{PK}, C_d و عدد فرود در سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی برای حالت M_7 با ارتفاع‌های ۱۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر

۵- نتیجه‌گیری کلی

۱- با توجه به دبی‌های داده شده به دستگاه، نمودار دبی و ارتفاع نسبت به زمان روند صعودی داشته و افزایش می‌یابند و هر چه بازه زمانی Δt بیشتر و ΔQ کمتر شود، شیب نمودارهای دبی و ارتفاع نسبت به زمان کمتر به دست می‌آیند. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز (P) شیب نمودارهای دبی و ارتفاع نسبت به زمان کاهش می‌یابند.

۲- نشانه منفی در $\frac{dc}{dt}$ بدین معناست که با گذشت زمان و افزایش دبی و بار آب، ضریب‌دبی تحت جریان غیردائمی-متغیر تدریجی با افزایش دبی کاهش می‌یابد. همچنین $\frac{dc}{dt}$ با افزایش Δt و کاهش ΔQ کمتر شده و با افزایش ارتفاع سرریز (P) بیشتر شده است.

۳- با مقایسه نمودار دبی-اشل در هر سرریز نتیجه‌گیری شد که به طور کلی با افزایش Δt و کاهش ΔQ شیب نمودار دبی-اشل کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه‌ی نمودارهای حالت‌های همانند در هر سه سرریز مشخص است که با افزایش ارتفاع سرریز، شیب نمودار دبی-اشل افزایش یافته است.

۴- با افزایش ارتفاع سرریز، عدد فرود و نسبت ارتفاع آب

proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs, 75-80.

Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B. A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C. and Vigny, J.P. (2006). Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or PK Weirs. Proc. 22nd CIGB/ICOLD congress, Barcelona, Spain.

Blanc, P. and Lempérière, F. (2001). Labyrinth spillways have a promising future. International Journal on Hydropower & Dams, 8(4), 129-131.

Bortoni, E.C., Rocha, M.S., Rodrigues, M.A. and Laurindo, B.C. (2017). Calibration of weirs using unsteady flow. Flow Measurement and Instrumentation, 57, 73-77.

Cicero, G.M. and Delisle, J.R. (2013). Discharge characteristics of Piano Key weirs under submerged flow. Labyrinth and Piano Key Weirs II-PKW 2013, 101-109.

Crookston, B.M., Anderson, R.M. and Tullis, B.P. (2018). Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries. Journal of Hydro-Environment Research, 19, 160-167.

Henderson, F.M. (1966). Open channel flow Mac Millan Publishing Co. Inc., New York, pp. 288-324.

Chi Hien, T., Thanh Son, H., Ho Ta Khanh, M. (2006). Results of some 'piano keys' weir hydraulic model tests in Vietnam. Proc. 22nd Intl Congress of Large Dams, Q87, R39, Vol. IV, ICOLD, Barcelona, Spain, 581-595.

Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(1), 114-120.

Karamvand, A., Hajikandi, H. and Sharafati, A. (2020). Comparison of Discharge Coefficient Between Arced Piano Key Weir and Non-Arc Piano Key Weirs. Water Resources Engineering, 13(47), 15-26. (In Persian)

Kumar, B., Kadia, S. and Ahmad, Z. (2019). Evaluation of discharge equations of the Piano Key Weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 68, 101577, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101577>

Laugier, F. (2007). Design and construction of the first Piano Key Weir spillway at Goulours dam. International Journal on Hydropower and Dams, 14(5), 94-101.

کارایی بیشتری دارد. همچنین می‌توان بیان کرد که سرریز با ارتفاع بیشتر در هنگام سیلابی و دبی جریان زیاد بسیار کاربردی‌تر است و بهتر جریان را منحرف می‌کند. در واقع همه نتایج گویای آن است که ارتفاع سرریز نقشی مهم در اندازه ضریب‌دبی سرریز کلید پیانویی دارد و با افزایش آن می‌توان بازده دبی عبوری از سرریز را افزایش داد.

۶- فهرست نشانه‌ها

Q	دبی عبوری از سرریز (m^3/s)
C_d, C_{PK}	ضریب‌دبی جریان دائمی و غیردائمی
P	ارتفاع سرریز (m)
W	عرض سرریز (m)
W_u	عرض کلید واحد سرریز (m)
W_i, W_o	عرض کلید ورودی و خروجی سرریز (m)
L	طول کل تاج سرریز (m)
B	طول سرریز (m)
B_b	طول پی‌ریزی سرریز (m)
B_i, B_o	طول شیروانی پایین‌دست و بالادست سرریز (m)
P_i, P_o	ارتفاع کلید ورودی و خروجی سرریز (m)
T_s	ضخامت تاج جانبی سرریز (m)
R	ارتفاع دیواره تاج یا سپری (m)
H	عمق جریان در بالادست سرریز (m)
n	شمار سیکل
v	سرعت بالادست (ms^{-1})
s	شیب کف
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
ρ	جرم واحد حجم مایع (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})

۷- منابع‌ها

Abhash, A. and Pandey, K.K. (2021). Nonlinear Regression Analysis Between Discharge and Head for Piano Key Weirs with Increasing Developed Length (L/W) Ratio and Constant Channel Width. Water Resources Management and Reservoir Operation, Chapter 20, 241-250. Springer Cham.

Anderson, R.M. and Tullis, B. (2011). Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. In

- Novák, P. and Čabelka, J. (1981). Models in Hydraulic Engineering: Physical principles and design applications. Monographs & surveys in water resources engineering.
- Ouamane, A. and Lempérière, F. (2006). Design of a new economic shape of weir. Proc. Intl Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain, 463-470.
- Ribeiro, M., Boillat, J.L. and Schleiss, A. (2011). Experimental parametric study for hydraulic design of PKWs. Proc. of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 183-190. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ribeiro, M.L., Pfister, M., Schleiss, A.J. and Boillat, J.L. (2012). Hydraulic design of A-type piano key weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(4), 400-408.
- Pfister, M. and Schleiss, A.J. (2013) Comparison of hydraulic design equations for A-Type Piano Key Weirs. Proceedings of the International Conference on Water Storage and Hydropower Development for Africa (AFRICA 2013), April, 1-8.
- 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. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 271-278.
- Seyedjavad, M., Naeeni, S. and Sanei, M. (2020). Experimental Study of Discharge Coefficient and Flow Streamlines in a Trapezoidal Piano Key Side Weir. Iranian Journal of Soil and Water Research, 50(9), 2261-2273. (In Persian)
- Laugier, F., Lochu, A., Gille, C., Leite Ribeiro, M. Boillat, J-L. (2009). Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. Hydropower & Dams, 15(5), 100-107.
- 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.
- Lempérière, F., Vigny, J.P., Ouamane, A. (2011). General comments on Piano Key Weirs: The past and present. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press, 17-25.
- Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P. and Piroton, M. (2011). Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. Journal of Hydraulic Research, 49(3), 359-366.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Piroton, M. (2013). Parapet wall effect on piano key weir efficiency. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139(6), 506-511.
- Machiels, O., Piroton, M., Pierre, A., Dewals, B. and Erpicum, S. (2014). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research, 52(3), 326-335.