

Laboratory Study on the Discharge Coefficient of Rectangular Piano Key Weir with Partially Sloped Crest

Hossein Sohrabzadeh Anzani^{1*}, Masoud Ghodsian²

1- Ex. M.Sc. Student of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* Sohrabzadeh@modares.ac.ir

Received: 5 August 2022

Accepted: 16 October 2022

Discussion: 21 June 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Spillways are simple and widely used hydraulic structures in water transfer, irrigation, and drainage systems. They are used in dams to pass excess water caused by floods and control the reservoir water level, as well as in irrigation and drainage canals to regulate the water level and measure the flow rate. Piano key weirs are the type of nonlinear weirs, which increase the discharge capacity up to 3-4 times the linear weirs. In this paper, results of experiments on rectangular piano key weirs with horizontal and partially sloped lateral crests are presented. The discharge and discharge coefficient for these experiments were analyzed and empirical models/equations were developed for the estimation of discharge coefficient.

Methodology: This study aims to examine effects of the partially sloped lateral crests to improve the estimation of discharge coefficient of the piano key weir. The experiments were carried out in a flume at the Tarbiat Modares University. The dimensionless equation for discharge coefficient was obtained by using the dimensional analysis. The discharge was measured by a flowmeter and depths of flow were measured by using digital point gauges. The range of discharges was from 55 L/s to 180 L/s; with steps of 5 L/s. Piano key weirs were located at a distance of 4 m from the flume entrance. Piano key weirs with similar ratio of weir width to weir length ($W/B = 2/3$) were used. Two types of piano key weir were used: one with horizontal crest and the other one with partially sloped lateral crests.

Results: For the weir with horizontal crest, when the total head $H_t < 8$ cm, flow nappe attached to the downstream walls of the weir. For the interval of $8 \text{ cm} < H_t < 12$ cm, with the increase of water head, the partial air entrainment beneath the nappe was observed with oscillating water surface. At higher values of the total head ($H_t > 12$ cm), the thickness of nappe increased with more air entrainment. In this condition, the nappe experienced more fluctuations. The variations of discharge versus total head were depicted for the weirs with horizontal crest and with partially sloped lateral crests. It was shown that the upstream head of the weir with partially sloped lateral crests has increased by an average of 8% compared to the weir with horizontal crest.

Equation 5 was used to calculate the discharge coefficient. Figure 6 compares the discharge coefficient of the two weirs. According to this figure and Table 2, the discharge coefficient

has increased by 6.7% in the weir with partially sloped lateral crests compared to the weir with horizontal crest. Moreover, it was found that (Figure 7) the efficiency of weir with partially sloped lateral crests increased by 7%, compared to the weir with horizontal crest. New equations were obtained for discharge confident of weir with horizontal crest and weir with partially sloped lateral crests.

Conclusion: The partially sloped lateral crests of rectangular piano key weir increases the upstream head. The efficiency of the weir with partially sloped lateral crests increased by 7%. The discharge coefficient in the partially sloped lateral crests increases by 6.7%.

Keywords: Rectangular piano key weir, weir crest, discharge coefficient, weir efficiency




© 2024 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/>)

بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با تاج شیب‌دار ناپیوسته

حسین سهراب زاده انزانی^{۱*}، مسعود قدسیان^۲

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس-تهران
۲ استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس-تهران

* Sohrabzadeh@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: سرریز کلید پیانویی نوعی سرریز غیرخطی است که برای بهبود ظرفیت آبگذری سدها طراحی شده است. از آنجاکه طول تاج سرریز کلیدپیانویی فراسنجه‌ای مهم و تأثیرگذار بر ظرفیت تخلیه‌ی سرریز می‌باشد، این پژوهش با اصلاح شیب دیواره‌ها و افزایش طول تاج سرریز، به دنبال راهکاری برای افزایش بهره‌وری سرریز کلیدپیانویی می‌باشد؛ به طوری که با اصلاح شیب دیواره‌ی سرریز کلیدپیانویی بتوان در آبراهه‌ها و رودخانه‌ها برای آبیگری از آن در زمان‌های کم‌آبی نیز بهره برد. به همین منظور آزمایش‌های مورد نیاز، در فلو می روی دو سرریز کلیدپیانویی مستطیلی با شیب دیواره‌های جانبی صفر و ۱۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که تراز سطح آب در بالادست سرریز با تاج شیب‌دار نسبت به سرریز با تاج افقی، حدود ۸ درصد افزایش یافته است، درحالی که ضریب آبگذری سرریز با تاج شیب‌دار، به طور میانگین حدود ۶/۷ درصد نسبت به سرریز با تاج افقی افزایش یافته است. همچنین کارایی سرریز با تاج شیب‌دار به‌طور میانگین در حدود ۷ درصد بیش از سرریز با تاج افقی می‌باشد.

کلیدواژگان: سرریز کلید پیانویی مستطیلی، تاج سرریز، آبگذری، کارایی سرریز.

۱- مقدمه

کوچک‌تر است (Blanc and Lempérière 2001). ساخت نخستین سرریز کلیدپیانویی در سال ۲۰۰۶ در سد گولورز^۳ فرانسه و دومین نمونه آن سد سنت مارک^۴ در سال ۲۰۰۸ رقم خورد. (Lempérière et al. (2011) چهار نوع سرریز کلیدپیانویی را معرفی کردند که تفاوت آن‌ها در بودن یا نبودن شیروانی می‌باشد. در صورتی که سرریز دارای شیروانی در بالادست و پائین دست خود باشد نوع A می‌باشد. سرریز نوع B دارای شیروانی در بالادست، سرریز نوع C دارای شیروانی در پایین دست، و سرریز نوع D بدون شیروانی می‌باشد. در گذشته بررسی و ارزیابی‌های فراوانی بر روی هیدرولیک جریان این نوع از سرریزها صورت پذیرفته است.

نیازمندی‌ها برای افزایش ذخیره حجم مخزن و ضرورت بهبود ایمنی سدها و همچنین ناکافی بودن ظرفیت تخلیه‌ی سرریز سدها، نیاز به بازسازی و جایگزینی سرریزها را افزایش داده است (Anderson and Tullis, 2013). برای ذخیره بیشترین حجم آب، همراه با اطمینان از ایمنی سدها، محققان به دنبال راه‌حلی برای بهبود ساختار سرریزها هستند. در همین راستا موسسه هیدروکوپ^۱ فرانسه به همراه دانشگاه بیسکارا^۲ هندسه‌ی جدیدی از سرریزهای غیر خطی را به‌نام سرریز کلیدپیانویی ارائه کردند (Machiels 2012). این سرریزها شکل جدیدی از سرریزهای کنگره‌ای همراه با پی

3 Goulours
4 Saint-Marc

1 Hydrocoop
2 Biskra Uni

سرریز از طول کل سرریز استفاده شود. Mehboudi et al. (2017) به بررسی کارایی سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای پرداختند. نتایج ایشان نشان داد سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای کارایی بالاتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی دارد. Erpicum et al. (2017) با بررسی سرریز سد اوول^۱ روش‌های مختلفی را برای افزایش آبگذری آن ارائه کردند که یکی از آن موارد سرریز کلیدپیانویی بوده است. بررسی و مقایسه‌ی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی نوع A و C توسط Belzner et al. (2017) انجام شد و نتایج تحقیق آنان نشان داد سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A ضریب آبگذری بالاتری نسبت به سرریز کلیدپیانویی نوع C دارد. بررسی دیواره سپری شیب‌دار روی دو مدل سرریز کلیدپیانویی مستطیلی توسط Ahadian and Afzalian (2017) نشان داد، قابلیت این سرریزها در انحراف آب در زمان‌های کم‌آبی و نیز تخلیه جریان در هنگام سیلاب بالا می‌باشد. انسداد ناشی از جسم‌های شناور در پنج هندسه متفاوت سرریز کلیدپیانویی توسط Poshteh-Shirani et al. (2018) بررسی و مشخص شد کمترین انسداد مربوط به سرریز با نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی برابر ۰.۲۵ می‌باشد. Ghodsian and Ehsanifar (2020) به بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی با شکل‌های مختلف در طرح و نقشه پرداختند. نتایج ایشان گویای آن بود که اختلاف ضریب آبگذری در سرریز کلیدپیانویی مثلثی و دوزنقه‌ای به‌طور میانگین در حدود ۵ درصد می‌باشد و این دو سرریز نسبت به سرریز کلیدپیانویی مستطیلی به‌طور میانگین در حدود ۱۰ درصد ضریب آبگذری بیشتری دارند. Akbari et al. (2020) با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی نشان دادند در دبی‌های بالا و در یک دبی مشخص، بار آبی ایجاد شده در بالادست سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نسبت به سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیشتر است. بررسی‌های آزمایشگاهی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای و مستطیلی توسط Kumar et al. (2020) نشان داد که کارایی سرریز

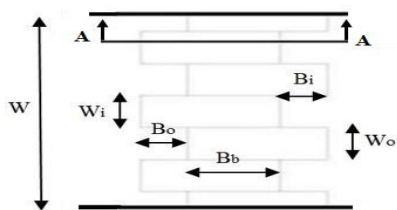
(2003) Lempérière and Ouamane مناسب‌ترین شمار کلیدهای سرریز را ۴ تا ۷ پیشنهاد کردند. این شمار کلید توسط Lempérière and Jun (2005)، ۵ عدد پیشنهاد شده است. (2006) Ouamane and Lempérière با بررسی دو نوع A و B سرریزهای کلیدپیانویی با ارتفاع و شمار کلیدهای همانند، کارایی سرریز نوع B را ۱۰ درصد بیشتر گزارش کردند. (2006) Ouamane and Lempérière در نتایج بررسی‌های خود نشان دادند که ظرفیت تخلیه‌ی سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی سه تا چهار برابر می‌باشد. (2009) Ribeiro et al. با بررسی روی هفت سد در فرانسه که دارای سرریز کلیدپیانویی بودند، اعلام کردند در بار آبی کم، جریان عبوری از روی سرریز تحت مکش قرار گرفته و باعث افزایش دبی عبوری آن می‌شود. همچنین آنان با بررسی تأثیر دیواره‌ی سپری بر کار سرریز کلیدپیانویی اعلام کردند با افزایش ۱۲/۳ درصد ارتفاع سرریز سد اترویت، کارایی سرریز ۱۵ درصد افزایش یافته است. (2011) Anderson and Tullis با بررسی نسبت‌های متفاوت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی، اعلام داشتند که با افزایش این نسبت ضریب آبگذری سرریز افزایش می‌یابد. (2012) Machiels به بررسی ابعاد بهینه سرریز از بعد فنی و اقتصادی پرداختند. ایشان نشان دادند بهترین نسبت عرض کلیدهای ورودی به عرض کلیدهای خروجی بین ۱/۲۵ تا ۱/۵، بیشترین کارایی سرریز را دارد. (2012) Anderson and Tullis با مقایسه کارایی سرریزهای کنگره‌ای با سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی اعلام داشتند که سرریزهای کلیدپیانویی کارایی بهتری در افت انرژی دارند. (2012) Kabiri-Samani and Javaheri به بررسی ویژگی‌های هندسی همچون ارتفاع سرریز، طول شیروانی‌ها و عرض کلیدها بر کارایی سرریز کلیدپیانویی نوع A پرداختند. آنان همین‌طور تأثیر استغراق پایین دست سرریز را بر کارایی سرریز بررسی کردند. (2013) Machiels et al. به بررسی تأثیر دیواره‌های سپری پرداختند. بنابر نتایج بررسی‌های (2014) Dabling، نسبت استغراق با افزایش نسبت بار کل به ارتفاع سرریز افزایش می‌یابد. (2016) Oertel and Bremer و (2011) Pralong et al. در نتایج بررسی‌های خود اعلام کردند برای بررسی کارایی

1 Oule Dam

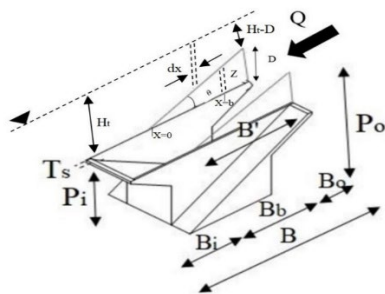
رابطه (۲) بیان کرد.

$$F(W, B, T_g, L, g, P_i, P_a, H_t, Q, \theta, \rho, \sigma) = 0 \quad (2)$$

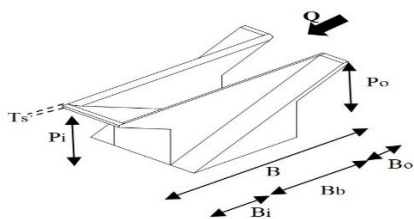
در این رابطه W عرض کل سرریز، $B = B_i + B_0 + B_b$ طول تاج جانبی سرریز، B_i طول شیروانی پائین دست، B_0 طول شیروانی بالادست، T_s ضخامت دیواره سرریز، L طول موثر تاج سرریز، P_i ارتفاع سرریز در پائین دست، P_0 ارتفاع سرریز در بالادست، $H_t = h + \frac{v^2}{2g}$ بار آبی کل، v سرعت جریان، h عمق آب در بالادست، g شتاب جاذبه، Q دبی سرریز، θ زاویه شیب تاج دیواره‌ی جانبی سرریز $(\theta = \tan^{-1} \frac{D}{B})$ ، D ارتفاع دیواره‌های شیروانی بالادست سرریز، ρ جرم مخصوص آب، σ ضریب کشش سطحی و F نماد تابع می‌باشد.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 PKW schematic: a) plan, b) with partially sloped crest and c) with horizontal crest

شکل ۱ سرریز کلیدپیانویی: (a) طرح، (b) با تاج شیبدار غیر پیوسته و (c) با تاج افقی

با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه (۲) را به صورت زیر

کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بیش از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی می‌باشد. بررسی ضریب آبگذری سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی و دوزنقه‌ای توسط Sangsefidi et al. (2021) نشان داد که در سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای ضریب آبگذری حدود ۵ درصد بیش از سرریز کلیدپیانویی مستطیلی می‌باشد. (Singh and Kumar 2022) با پلکانی کردن کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی نوع B، اعلام داشتند، بازده هدر رفت انرژی در بار آبی پائین، ۶/۴۳ درصد افزایش می‌یابد در حالی که در بار آبی بالا ۲/۰۵ درصد کاهش می‌یابد. آنان همچنین با بررسی هوادهی سرریز کلیدپیانویی نوع A برای بقای آبزیان، اعلام داشتند با افزایش ارتفاع ریزش، بازده هوادهی افزایش و با افزایش بار آبی، بازده هوادهی کاهش می‌یابد. (Sohrabzadeh and Ghodsian 2022) با بررسی سرریز کلیدپیانویی مثلثی با تاج شیبدار اعلام داشتند که تراز سطح آب در بالادست سرریز با تاج شیبدار نسبت به سرریز با تاج افقی، ۲۹ درصد افزایش یافته است. همچنین ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با تاج شیبدار، به طور میانگین ۵/۳ درصد نسبت به سرریز کلیدپیانویی با تاج افقی افزایش یافته است.

در این پژوهش با شیبدار کردن بخشی از تاج سرریز کلیدپیانویی به بررسی رفتار هیدرولیکی و میزان کارایی آن پرداخته می‌شود.

۲- تحلیل ابعادی

دبی سرریز کلید پیانویی Q را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به دست آورد:

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

که در آن C_d ضریب آبگذری سرریز، L طول تاج سرریز، g شتاب ثقل، $H_t = h + \frac{v^2}{2g}$ بار آبی کل، v سرعت جریان و h ارتفاع جریان روی تاج سرریز می‌باشد.

فراسنجه‌های هندسی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. فراسنجه‌های مؤثر بر ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی مستطیلی را می‌توان به صورت

می‌توان نوشت:

نقطه‌ای و با دقت ± 0.1 mm اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های سرریزهای استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است. سرریز با تاج افقی و سرریز با تاج شیب‌دار به ترتیب با Rec-B1 و Rec-Base نامگذاری شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های سرریزهای استفاده شده

Model	θ (o)	P_o (cm)	P_i (cm)	L (cm)
Rec-Base	0	20	20	381
Rec-B	10	26	20	384.2

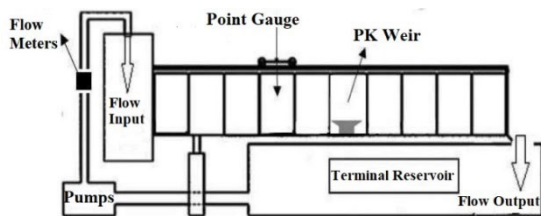


Fig. 2 Overview of implemented test set up
شکل ۲ اجزای مختلف فلوم آزمایشگاهی

$$F\left(\frac{Q}{L\sqrt{gH_t^3}}, \frac{L}{W}, \frac{B}{W}, \frac{P_i}{H_t}, \frac{T_S}{B}, \frac{T_S}{P_o}, \theta, We\right) = \dots \quad (3)$$

در این رابطه We عدد وبر است که تاثیر کشش سطحی را در نظر می‌گیرد. فراسنجه‌های $\frac{L}{W}$, $\frac{B}{W}$, $\frac{T_S}{B}$ و $\frac{T_S}{P_o}$ در همه‌ی سرریزها و آزمایش‌های این تحقیق دارای میزان ثابتی است.

Erpicum et al. (2016), Pfister et al. (2013) و Sangsefidi et al. (2021) با بررسی روی سرریزهای کلیدپیانویی بیان داشتند در شرایط $h > 3$ cm می‌توان از تاثیر کشش سطحی صرف‌نظر کرد. میزان h در آزمایش‌های انجام شده این تحقیق بزرگتر از ۳ سانتی‌متر بود و لذا می‌توان از عدد وبر صرف‌نظر کرد. بنابراین با حذف فراسنجه‌های ثابت و بی‌تاثیر، رابطه ۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C_d = \frac{Q}{L\sqrt{gH_t^3}} = F\left(\frac{P_i}{H_t}, \theta\right) \quad (4)$$

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

۴- منحنی آبگذری و مشاهده‌های آزمایشگاهی

تغییرپذیری‌های عمق آب بر حسب دبی برای هر دو سرریز استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

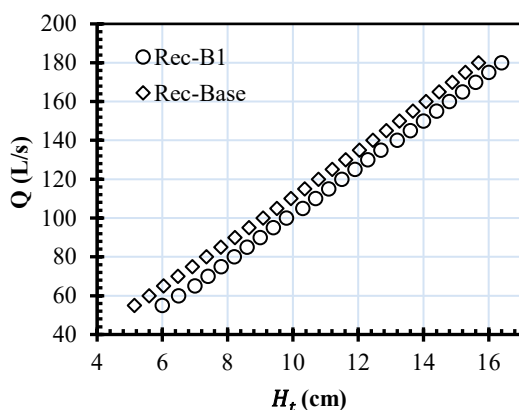


Fig. 3 Discharge Versus upstream head
شکل ۳ تغییرپذیری‌های بار آبی در بالادست سرریز

با توجه به شکل ۳ با افزایش شیب بخشی از تاج دیوارهای جانبی سرریز از صفر به ۱۰ درجه، تراز آب در بالادست سرریز به‌طور میانگین حدود ۸ درصد افزایش

آزمایش‌ها در آبراه‌ای به ابعاد $10 \times 75 \times 0.75 \times 0.9$ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام پذیرفت (شکل ۲). عرض آبراه از ۲ متر، به‌صورت همگرا به عرض ۷۵ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. آبراهه از یک چاهک زیرزمینی تغذیه شد. دیواره‌های آبراهه از شیشه لمینت انتخاب شد تا رفتار جریان مشاهده شود. جریان در کانال پس از گذر از روی سرریز وارد مخزن خروجی شده و سپس به چاهک زیرزمینی باز می‌گردد. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی در فاصله ۴ متری از ابتدای آبراهه نصب و آب‌بندی شد. برای انجام آزمایش‌ها دو مدل سرریز کلیدپیانویی با شیب‌های متفاوت استفاده شد. به‌منظور شیب‌دار کردن بخشی از تاج دیوارهای جانبی ($B' = 2/3B$)، میزان ارتفاع دیواره‌های شیروانی بالادست طوری انتخاب شد که شیب ۱۰ درجه ایجاد شود. به کمک تابلو کنترل نصب‌شده در آزمایشگاه که با تغییر دور پمپ‌ها کار می‌کنند دبی عبوری از روی سرریزها قابل تنظیم می‌باشد. آزمایش‌ها با دبی ۵۵ لیتر بر ثانیه تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه و با گام‌های ۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. عمق آب با عمق سنج

با افزایش دبی، تفاوت‌های شرح داده شده به صورت آشکارتر مشاهده می‌شود.

۵- ضریب آبگذری

دبی سرریز کلیدپیانویی برابر رابطه‌ی (۵) به سه قسمت تقسیم می‌شود:

$$Q_T = Q_{W_i} + Q_{W_o} + Q_{S_w} \quad (5)$$

در این رابطه، Q_T دبی کل سرریز، Q_{W_i} دبی عبوری از کلیدهای ورودی، Q_{W_o} دبی عبوری از کلیدهای خروجی و Q_{S_w} دبی عبوری از دیوارهای جانبی سرریز می‌باشد. دبی عبوری از کلیدهای ورودی از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Q_{W_i} = \frac{2}{3} C_{di} \sqrt{2g} (N W_i) H_t^{1.5} \quad (6)$$

دبی عبوری از کلیدهای خروجی از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$Q_{W_o} = \frac{2}{3} C_{do} \sqrt{2g} (N W_o) H_t^{1.5} \quad (7)$$

برای محاسبه‌ی دبی عبوری از دیوارهای جانبی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Q_{S_w} = \frac{2}{3} C_{dsw} \sqrt{2g} \left[\int_0^b (H_t - Z)^{1.5} dx + \int_{B'}^B H_t^{1.5} dx \right] \quad (8)$$

بنابراین محاسبه‌ی دبی نظری (تئوری) از سه رابطه‌ی بالا به صورت رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید:

$$Q_T = \frac{2}{3} C'_d \sqrt{2g} W H_t^{1.5} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} (2N) \times \quad (9)$$

$$\left[\frac{2B'}{5D} (H_t^{2.5} - (H_t - D)^{2.5}) + H_t^{1.5} (B - B') \right]$$

در اینجا ضریب آبگذری (C'_d) به صورت رابطه زیر است:

$$C'_d = f(C_{di}, C_{do}, C_{dsw}) \quad (10)$$

در نهایت ضریب آبگذری برابر رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید:

یافته است. دلیل این امر وجود دیواره‌های شیب‌دار بر روی سرریز بوده است که بر جریان بالادست تأثیر گذاشته و بار بالادست سرریز را افزایش می‌دهد.

با توجه به مشاهده‌های آزمایشگاهی، در مدل Re-Base در بازه‌ی $8 \text{ cm} < H_t < 12 \text{ cm}$ ، با افزایش بار آبی، با کاهش هوای زیر تیغه‌های جریان در پایین دست سرریز، سطح جریان حالت نوسانی پیدا می‌کند. در میزان‌های بالاتر بار ($H_t < 12 \text{ cm}$) جریان به صورت تیغه‌ای ضخیم از روی تاج سرریز عبور می‌کند. در این شرایط نیز نوسان‌هایی بر روی تیغه‌ی جریان مشاهده می‌شود (شکل ۴).

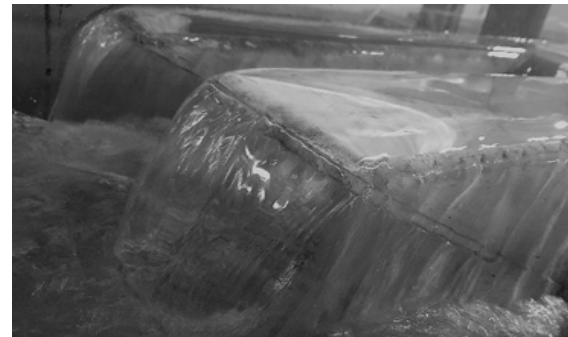


Fig. 4 Air entry beneath the flow nappe

شکل ۴ ورود هوا به زیر تیغه‌های جریان

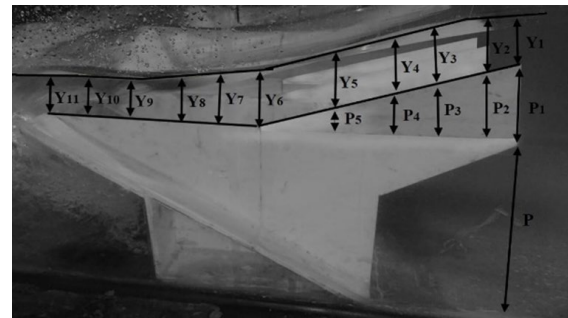


Fig. 5 Flow profile over the weir

شکل ۵ نیمرخ جریان روی سرریز

در شکل (۵) رخنمای جریان در طول تاج سرریز مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل ارتفاع جریان در آغاز ورود بر روی تاج سرریز (Y_1)، نسبت به عمق بالادست قدری افت می‌کند. پس از آن عمق جریان حالت افزایشی از Y_1 تا Y_3 به خود گرفته، سپس به صورت خطی عمق جریان از Y_4 تا Y_9 کاهش می‌یابد و در ادامه‌ی مسیر به میزان ثابتی میل می‌کند. برابر مشاهده‌های آزمایشگاهی در همه‌ی دبی‌های مورد بررسی چنین روندی روی سرریز طی شده است، اما

نسبت به سرریز با تاج افقی، به طور میانگین ۶/۷ درصد افزایش را در پی داشته است.

۶- کارایی سرریز

کارایی سرریز کلید پیمانویی برابر رابطه‌ی (۱۲) تعریف می‌شود (Sangsefidi et al. 2021):

$$\varepsilon = \frac{L}{W} C'_d \quad (12)$$

با توجه به شکل ۷ در هر دو سرریز با افزایش $\frac{P_i}{H_t}$ افزایش کارایی سرریز مشاهده می‌شود. کارایی سرریز با تاج شیب‌دار نسبت به سرریز با تاج افقی، با افزایش حدود ۷ درصدی همراه می‌باشد. بنابراین می‌توان از سرریز با تاج شیب‌دار برای افزایش کارایی سرریز بهره برد.

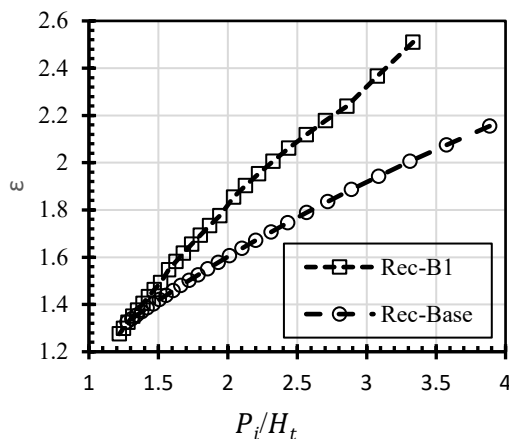


Fig. 7 Efficiency curves

شکل ۷ منحنی‌های کارایی سرریز

۷- رابطه‌ی ضریب آبگذری

با توجه به بررسی‌های انجام شده، رابطه (۱۳) برای برآورد ضریب آبگذری سرریز کلید پیمانویی با تاج افقی (Rec-Base) و تاج شیب‌دار (Rec-B₁) پیشنهاد می‌شود:

$$C'_d = \left(a \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^3 + b \left(\frac{H_t}{P_i} \right)^2 + c \left(\frac{H_t}{P_i} \right) + d \right)^e \quad (13)$$

که در آن a, b, c, d و e فراسنجه‌هایی هستند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمدند (جدول ۳).

$$C'_d = \frac{Q_E}{Q_T} \quad (11)$$

در رابطه‌ی بالا Q_E دبی آزمایشگاهی و Q_T دبی نظری (تئوری) می‌باشد (Yarmohammadi and Afzalian, 2017). تغییرپذیری‌های C'_d بر حسب P_i/H_t برای هر دو سرریز با تاج افقی و شیب‌دار در شکل ۶ نشان داده شده است.

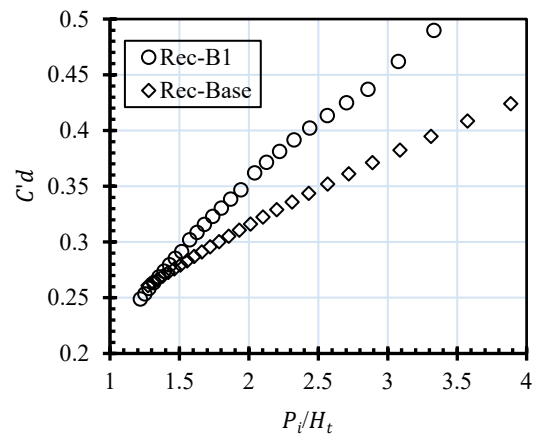


Fig. 6 Variations of discharge coefficient

شکل ۶ تغییرپذیری‌های ضریب آبگذری

با توجه به شکل ۶ برای سرریز با تاج افقی، در $\frac{P_i}{H_t} = 3/88$ بیشترین میزان C'_d و برابر ۰/۴۲۴ مشاهده می‌شود. همچنین برابر مشاهده‌های آزمایشگاهی با افزایش بار آبی، تداخل لایه‌های جریان از تاج پائینی سرریز به سمت تاج بالائی ادامه می‌یابد. بیشتر بودن ضریب آبگذری در سرریز با تاج شیب‌دار در مقایسه با تاج افقی در شکل مشخص است.

جدول ۲ بیشینه و میانگین ضریب‌های آبگذری کلید پیمانویی برای هر دو مدل سرریز را نشان می‌دهد. برابر این جدول میزان میانگین ضریب آبگذری در سرریز با تاج افقی برابر ۰/۳۱۹ و برای سرریز با تاج شیب‌دار برابر ۰/۳۳۹ می‌باشد. ضریب آبگذری سرریز با تاج شیب‌دار

جدول ۲ میزان‌های میانگین و بیشینه ضریب آبگذری

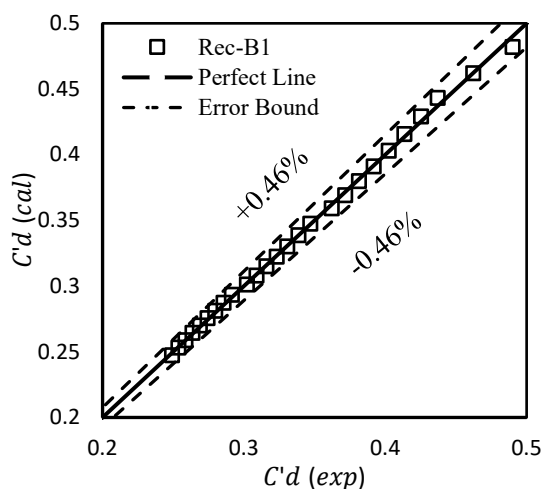
Table 2 Values of maximum and average C_d

Model	θ	P_i/H_t	\bar{C}_d	C_{dmax}
Rec-Base	0	1.2-3.8	0.319	0.42
Rec-B ₁	10	1.2-3.3	0.339	0.49

خطای میانگین E با استفاده از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه و برای سرریز با تاج افقی و تاج شیب‌دار به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۴۶ می‌باشد.

$$E = \sum_{i=1}^{n'} \left| \frac{C_{dcal} - C_{dexp}}{C_{dcal}} \right| \frac{100}{n'} \quad (14)$$

در این رابطه C_{dcal} و C_{dexp} به ترتیب میزان‌های محاسبه‌شده و میزان‌های واقعی ضریب آبگذری می‌باشد. همچنین n' شمار داده‌ها است. شکل ۸ برای مقایسه‌ای بین میزان‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده ضریب آبگذری رسم شده است.



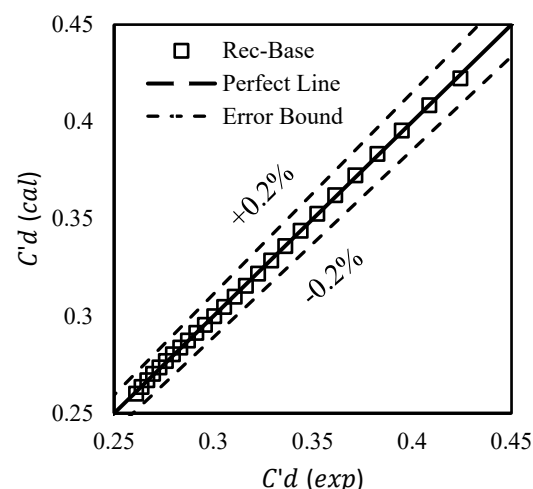
(b)

جدول ۳ میزان‌های ثابت تجربی رابطه‌ی (۱۳)

Table 3 Empirical constants in Eq. (14)

Model	a	b	e	d	E
Rec-Base	-0.814	1.738	-1.379	0.574	0.757
Rec-B ₁	-0.916	2.132	-1.894	0.783	0.758

محدوده‌ی قابل استفاده از رابطه‌ی (۱۳) برای سرریز با تاج افقی و سرریز با تاج شیب‌دار به ترتیب $0.25 \leq \frac{H_t}{P_i} \leq 0.752$ و $0.3 \leq \frac{H_t}{P_i}$ می‌باشد. رابطه‌های پیشنهادی برای محاسبه‌ی ضریب آبگذری برای سرریز با تاج افقی و سرریز با تاج شیب‌دار به ترتیب دارای ضریب همبستگی (R^2) ، ۱ و ۰/۹۹۹ می‌باشد. درصد



(a)

Fig. 8 Comparison of measured and calculated values of discharge coefficient for weir with: (a) horizontal crest and (b) partially sloped crest

شکل ۸ مقایسه میزان‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده ضریب آبگذری در سرریز کلید پیانویی مستطیلی با: (a) تاج افقی و (b) تاج شیب‌دار

۸- نتیجه گیری‌ها

- ۱- در سرریز کلید پیانویی مستطیلی با افزایش شیب بخشی از تاج دیواره‌های جانبی از صفر به ۱۰ درجه، ضریب آبگذری افزایش یافته است.
- ۲- بیشترین نرخ افزایشی ضریب آبگذری در بارهای پایین رخ داده است و با افزایش بار از این میزان کاسته می‌شود.
- ۳- با شیب‌دار کردن بخشی از تاج دیواره‌های جانبی سرریز کلید پیانویی مستطیلی تراز آب در بالادست سرریز ۸ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴ مقایسه‌ی بین ضریب آبگذری محاسبه شده با رابطه‌های به دست آمده در این تحقیق و رابطه‌های ارایه شده توسط Sangsefidi et al. (2021) و Kumar et al. (2020) برای سرریز با تاج افقی را نشان می‌دهد. میزان ضریب‌های همبستگی برای رابطه‌های استفاده شده نیز در این جدول داده شده است. با توجه به ضریب همبستگی در جدول ۴، رابطه‌های Sangsefidi et al. (2021) و Kumar et al. (2020) نیز همخوانی مناسبی با داده‌های این تحقیق دارد. البته دقت رابطه Sangsefidi et al. (2021) کمی بیشتر است.

جدول ۴ مقایسه ضریب آبگذری سرریز کلیدپیانویی با برخی از رابطه‌های پیشنهادی دیگر محققان

Table 4 Comparison of discharge coefficient using Eq. 13 and some of available equations

Researcher	Type of weir	Suggested Eq.	H_t/P_i	R^2
Sangsefidi et al. (2021)	Rectangular	$C_d = -1.2809 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 + 2.5798 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 - 1.9019 \left(\frac{H_t}{P}\right) + 0.7625$	0.14-0.85	0.999
Kumar et al. (2020)	Rectangular	$C_d = -2.4112 \left(\frac{H_t}{P}\right) + 0.1944 \left(\frac{L}{W}\right) + 1.03$	> 0.25	0.93
Present Study	Rec-Base	$C_d = \left(-0.814 \left(\frac{H_t}{P_i}\right)^3 + 1.738 \left(\frac{H_t}{P_i}\right)^2 - 1.379 \left(\frac{H_t}{P_i}\right) + 0.574 \right)^{0.757}$	0.25-0.85	1
Present Study	Rec-B ₁	$C_d = \left(-0.916 \left(\frac{H_t}{P_i}\right)^3 + 2.132 \left(\frac{H_t}{P_i}\right)^2 - 1.894 \left(\frac{H_t}{P_i}\right) + 0.783 \right)^{0.758}$	0.3-0.82	0.999

W_i	عرض کلید ورودی	۴- ضریب آبگذری با شیب‌دار کردن بخشی از تاج
W_o	عرض کلید خروجی	دیوارهای جانبی سرریز، به طور میانگین ۶/۷ درصد
w	عرض یک چرخه	نسبت به سرریز با تاج افقی افزایش یافته است.
W	عرض فلوم	۵- با شیب‌دار کردن بخشی از تاج دیوارهای جانبی سرریز،
W_e	عدد وبر	کارایی آن به طور میانگین ۷ درصد بیشتر از سرریز
B_i	طول شیروانی پایین دست سرریز	با تاج افقی می‌شود.

B_o	طول شیروانی بالادست سرریز	
B	طول تاج جانبی سرریز	
t	ضخامت دیواره‌های سرریز	
D	ارتفاع دیواره‌های اضافه شده به تاج	
L	طول کل تاج	
g	شتاب گرانش زمین	
C_d	ضریب آبگذری	
\bar{C}_d	ضریب آبگذری میانگین	
C_{dcal}	ضریب آبگذری محاسبه شده	
C_{dexp}	ضریب آبگذری آزمایشگاهی	
C	ضریب آبگذری	
C_{dmax}	بیشینه ضریب آبگذری	

۹- فهرست نشانه‌ها

N	شمار کلیدهای سرریز
P_o	ارتفاع بالادست سرریز
P_i	ارتفاع پایین دست سرریز
P_o	ارتفاع بالادست سرریز
S_o	شیب کف آبراهه
Z	عمق جریان
h	بار(هد) آبی روی سرریز
H_t	بار کل بالادست سرریز
H_t	بار مؤثر
θ	زاویه‌ی تاج سرریز نسبت به افق
V	سرعت میانگین جریان
Q	دبی جریان
E	درصد خطای میانگین
F	نماد تابع
n	شمار دیواره‌های جانبی سرریز
n'	شمار داده‌های آزمایشگاهی

۱۰- منابع‌ها

Ahadian, J. & Afzalian, A. (2017). Applied analysis of piano key weir structures as a diversion dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 463-476.

Anderson, R. & Tullis, B. (2011). Influence of

- dam spillway (France). In: Labyrinth and piano key weirs III–PKW 2017, CRC Press, 195-204.
- Ghodsian, M. & Ehsanifar, A. (2020). Experimental investigation of flow over piano key weir with rectangular, triangular and trapezoidal plans. Proceedings of 18th Iranian Hydraulic Conference. (In Persian)
- Kabiri-Samani, A. & Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of hydraulic research*, 50(1), 114-120.
- Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N.K. & Ranjan, S. (2020). Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. *Appl. Water Sci.*, 10, 1–9.
- 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. & Jun, G. (2005). Low cost increase of dam's storage and flood mitigation: the piano keys weir. Proc. of 19th Congress of ICID, Beijing, China.
- Lempérière, F. & 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 labyrinths and piano key weirs: The past and present. Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW 2011, CRC press, London. 17- 24.
- Machiels, O. (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of piano key weirs, Université de Liège, Belgium.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Pirotton, M. (2013) Parapet wall effect on piano key weir efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 506-511.
- Mehboudi, A., Attari, J. & Hosseini, S.A. (2017). Flow regimes over trapezoidal piano key weirs. In: Labyrinth and Piano Key Weirs III–PKW, CRC Press, 65-73.
- Oertel, M. & Bremer, F. (2016). Analysis of various piano key weir geometries concerning discharge coefficient development. Proc. 4th IAHR Europe Congress.
- Ouamane, A. & Lempérière, F. (2006). Design of a piano key weir geometry on discharge. Proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs.
- Anderson, R. & Tullis, B. (2012). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(4), 358-361.
- Anderson, R. & Tullis, B. (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 139(3), 246-253.
- Akbari, M., Karami Moghadam, M., Sabzevari, T. & Ghadampour, Z. (2020). Experimental study of effect of sidewall angle and weir height on total head and discharge coefficient in trapezoidal piano key weir. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(79), 93-110. (In Persian)
- Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M. & Thorenz, C. (2017). Piano key and labyrinth weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. Labyrinth and Piano Key Weirs III–PKW 2017, CRC Press, 167-174.
- Bilhan, O., Aydin, M. C., Emiroglu, M. E., and Miller, C. J. (2018a). Experimental and CFD analysis of circular labyrinth weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6), 04018007.
- Blanc, P. and F. Lempérière (2001). Labyrinth spillways have a promising future. *International Journal on Hydropower & Dams* 8(4): 129-131.
- Crookston, B.M., Anderson, R.M. & Tullis, B.P. (2018). Free-flow discharge estimation method for piano key weir geometries. *Journal of Hydro-Environment Research*, 19, 160-167.
- Dabling, M.R. (2014). Nonlinear weir hydraulics, Utah State University.
- Erpicum, S., Silvestri, A., Dewals, B., Archambeau, P., Pirotton, M., Colombié, M. & Faramond, L. (2013). Escouloubre Piano Key weir: Prototype versus scale models. Labyrinth and Piano Key Weirs II, CRC press. London, 65-72.
- Erpicum, S., Tullis, B.P., Lodomez, M., Archambeau, P., Dewals, B.J. & Pirotton, M. (2016). Scale effects in physical piano key weirs models. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692-698.
- Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Pirotton, M., Tralli, H. & Alende, J. (2017). A Piano Key Weir to improve the discharge capacity of the Oule

440-446.

Yarmohammadi, B. & Ahadiyan, J. (2017). Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. *Scientific Journal of Agriculture*, 39(4), 47-58.

new economic shape of weir. Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, International Commission on Large Dams (ICOLD), Taylor and Francis. London, UK.

Pfister, M., Battisacco, E., De Cesare, G. & Schleiss, A.J. (2013). Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano Key weirs. Labyrinth and piano key weirs II, 73.

Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B. & Laugier, F. (2011). A naming convention for the Piano key weirs Geometrical parameters, Proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, CRC Press, Boca Raton, FL, 271-278.

Poshteh-Shirani, M., Rahimpour, M. & Ahmadi, M.M. (2018). The effect of upstream overhang on debris blocking and discharge capacity of Piano key weirs. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 30(2), 33-44. (In Persian)

Rao, N.S.L. (1975). Theory of weirs. *Advances in hydro science*, Elsevier, 10, 309-406.

Rezaei Ahvanooei, A., Mousavi, S.F. & Karami, H. (2019). Improvement of hydraulic performance of nonlinear Piano-key weirs in plan. *Modares Civil Engineering journal*, 19(4), 71-82. (In Persian)

Ribeiro, M.L., Boilat, J.L. & Laugier, F. (2009). Hydraulic capacity improvement of existing spillways—design of a Piano key weirs. Proceedings of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB-ICOLD.

Sangsefidi, Y., Tavakoli-Davani, H., Ghodsian, M. & Zarei, R. (2021). Hydrodynamics and free-flow characteristics of piano key weirs with different plan shapes. *Water*, 13(15), 2108, <https://doi.org/10.3390/w13152108>.

Singh, D. & Kumar, M. (2022a). Energy dissipation of flow over the type-B piano key weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 83, 102109, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102109>

Singh, D. & Kumar, M. (2022b). Study on aeration performance of different types of piano key weir. *Water Supply*, 22(5), 4810-4821.

Sohrabzadeh, H. & Ghodsian, M. (2022). Experimental study of the effect of sidewall slope over the triangular PK weir. *Journal of Hydraulics*, 17(4), 17-30. (In Persian)

Suprpto, M. (2013). Increase spillway capacity using labyrinth weir. *Procedia Engineering*, 54,