


Study of the Labyrinth Rectangular Weirs Efficiency with Equal and Unequal Congresses in Plan

Mohammad Hosein Masoudi ¹, Jalal Sadeghian ^{2*}

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

Received: 24 July 2021, Accepted: 6 September 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Spillways are important hydraulic structures that are constructed to release flood discharge in the dam reservoirs. Spillways must have sufficient capacity, efficiency and safety in the passage of floods, and in addition it must have economic justification. One of the effective and economical solutions to increase the discharge capacity within a certain width of the spillways is to use labyrinth spillways. In most cases, it is observed that it is not possible to increase the length of the spillway due to the site conditions. In this case, using a labyrinth spillway to increase the length of the crest can be a good solution. As the result, it increases the efficiency and discharge capacity. In equal congress type of spillway, the overlap of the falling flows and the resulting compression of the flow during the spillway, reduces the efficiency and discharge coefficient. In this study, the reduction of falling flows interference, and the congressional spillways with the length of unequal congresses have been studied and compared.

Methodology: In this study, the labyrinth spillways with the length of unequal congresses in two types A and B in the flume of the hydraulic laboratory of Bu Ali Sina University have been investigated. All models includes of 5 cycles. The effective length of heights are equal to 336 cm and 10 cm, respectively. Thus, the effect of these two parameters on all models are the same.

In this research, two type of congress weirs have been considered. The first type (A) consists of 5 congressional weirs with different congress lengths, so that the closer we get to the center of the weir, the length of congress increases, and the second type (B) consists of 5 congressional weirs with different congress lengths. So, the closer we get to the center of the weir, the length of congress decreases, and the longest congress in this type is the first and last congress. To measure the water depth a point depth gauge with an accuracy of 0.1 mm has been used. To conduct this research, 10 laboratory models of labyrinth weirs with different congress lengths and one laboratory model of labyrinth weir with the equal length of congresses have been constructed for comparison with other models. In each type, the flow rate and water depth on the labyrinth crest were carefully monitored. This operation was repeated 3 times for each type to minimize the errors caused by the test and the average data of each type was used for analysis.

Results and Discussion: The results of this study in all labyrinth spillways with unequal congress lengths, show that by increasing the H_t/P ratio, the value of C decreases and in each weir for the lowest value of H_t/P has the highest discharge coefficient or C and with the

beginning of falling flows and their interference and subsequent submergence, the overflow discharge coefficient is drastically reduced. This reduction occurs with greater intensity for labyrinth weirs with unequal congress lengths than for labyrinth weir with equal congress lengths. It was found that, the discharge coefficients of the labyrinth weirs with different congress lengths in high discharges are not much different from each other and shows the same performance. According to the results of this study, in general, the efficiency and discharge coefficient of the spillways of congresses of type A is better than type B. It is also observed that the discharge coefficient of labyrinth weirs with different congresses lengths in high discharges are not much different from each other and show the same performance.

Conclusions: The results show that if the total length of that part of the congresses which is higher than the adjacent congress and there is no flow in front of it reaches 25% of the total effective length, it will increase the efficiency and improve the discharge coefficient. If it is more than 25%, the spillway efficiency will be reduced and the discharge coefficient will fall. Also, in the best type in this research, the discharge coefficient in the spillways of unequal congresses has increased by 40.7% compared to equal congresses.

Keywords: Labyrinth Rectangular Weirs, Discharge Coefficient, Unequal Congresses.



© 2021 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 کارایی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های یکسان و نایکسان در پلان

محمدحسین مسعودی^۱، جلال صادقیان^{۲*}

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

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: سرریزها جزء مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند. سرریز کنگره‌ای یکی از انواع آن می‌باشد. هدف از طرح کنگره‌ای سرریزها، افزایش طول تاج سرریز به وسیله غیرخطی کردن شکل آن در نقشه و طرح می‌باشد. این امر موجب افزایش بازده و کارایی (راندمان) و ضریب تخلیه در سرریز می‌شود. در سرریزهای کنگره‌ای تداخل تیغه‌های آب و بدنال آن ایجاد فشردگی جریان در هنگام سرریز، باعث کاهش بازده و کارایی و ضریب تخلیه سرریز می‌شود. در این تحقیق به منظور کاهش تداخل تیغه‌های آب، سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های نامساوی در دو حالت A و B و در ۵ چرخه با طول موثر و ارتفاع یکسان، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا بررسی و مقایسه شده. نتایج این بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد در همه‌ی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های نایکسان پذیرایی‌های C نسبت به H/P نزولی بوده و با افزایش نسبت H/P ، مقدار C کاهش می‌یابد. بنابر نتایج به دست آمده از این تحقیق در حالت کلی بازده (کارایی) و ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی حالت A بهتر از حالت B می‌باشد و کاهش طول برخورد تیغه‌های آب تا مرز ۲۵ درصد نسبت به سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان باعث افزایش کارایی و بهبود ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای می‌شود و کاهش طول برخورد تیغه‌های آب بیش از ۲۵ درصد کار سرریز را از حالت کنگره‌ای خارج ساخته و باعث کاهش کارایی و ضریب تخلیه سرریز می‌شود. همچنین در یکی از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق ضریب تخلیه سرریز به میزان ۴۰/۷ درصد نسبت به سرریز با طول کنگره‌های یکسان افزایش داشته است.

کلیدواژه‌گان: سرریز کنگره‌ای مستطیلی، کارایی، ضریب تخلیه، کنگره‌های نایکسان.

۱- مقدمه

تاثیر را در ظرفیت تخلیه ایفا می‌کند. هدف اصلی از طراحی کنگره‌ای سرریزها، افزایش طول سرریز به وسیله غیرخطی کردن شکل آن در طرح و نقشه می‌باشد. در بیشتر موارد مشاهده می‌شود که به دلایل اجرایی امکان افزایش طول سرریز به صورت خطی میسر نمی‌باشد، در این شرایط استفاده از سرریز کنگره‌ای برای افزایش طول سرریز می‌تواند راهکار مناسبی باشد. با توجه به تحقیقات و ارزیابی‌های صورت گرفته راه حل عددی مناسبی برای جریان روی سرریزهای کنگره‌ای که دقت کافی را دارا باشد، مشاهده نشده است که دلیل آن می‌تواند وجود مشخصه‌های سه بعدی جریان روی سرریزهای کنگره‌ای باشد که

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی بسیار مهمی می‌باشند که به مانند سوپاپ اطمینان برای تخلیه سیلاب در مخزن‌های سدها احداث می‌شوند. سرریزها باید توانایی، کارایی و ایمنی کافی در گذر سیل را داشته و افزون بر آن دارای توجیه اقتصادی نیز باشند. یکی از راهکارهای مؤثر و اقتصادی برای افزایش ظرفیت تخلیه در عرض مشخص سرریزها، استفاده از سرریز کنگره‌ای می‌باشد. از فراسنجه (پارامتر)های مؤثر بر میزان آبگذری سرریزها می‌توان به ارتفاع نسبی آب در بالادست، شکل تاج و طول تاج اشاره کرد. در بین فراسنجه‌های اشاره شده طول سرریز مهم‌ترین

در روش دوم ایشان کارایی و بازده سرریز کنگره‌ای در مقابل یک سرریز خطی با عرض یکسان را مقایسه و نسبت $\frac{Q_L}{Q_N}$ را برای آن بیان نمودند که تابعی از فراسنجه‌های بدون بعد $\frac{H}{P}$ ، $\frac{1}{W}$ ، $\frac{W}{P}$ ، α و n می‌باشد. در بررسی‌های ایشان، ارتفاع موثر بر روی سرریز، ارتفاع هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است و نسبت $\frac{Q_L}{Q_N}$ به‌عنوان بازده سرریز کنگره‌ای در مقابل $\frac{h}{p}$ طی نمودارهای طراحی ارائه شده است. این نمودارها در دو دسته و برای طرح ذوزنقه‌ای و مثلثی در چهار مرحله بنیادین جریان به ترتیب در شکل (۱) و شکل (۲) آورده شده است. دقت هر دو روش هی و تیلور به شناخت دقیق و درستی از Q_N بستگی دارد (Hay and Taylor, 1970).

دارواس در سال ۱۹۷۱ یک معادله تجربی برای ضریب تخلیه سرریز کنگره‌ای ارائه کرد که به‌صورت رابطه (۲) می‌باشد. وی همچنین بنابر نتایج معادله‌های خود یک چند منحنی برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای ارائه کرد.

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

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 V برابر V_1 (سرعت در ابتدای سرریز) و h برابر با ارتفاع

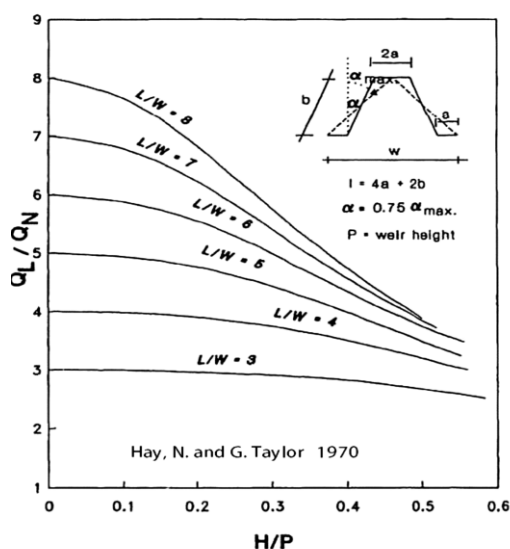


Fig. 1 Hay & Taylor design diagrams for trapezoidal labyrinth overflowweir (Hay and Taylor, 1970)

شکل ۱ نمودار طراحی هی و تیلور برای سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای (Hay and Taylor 1970)

راه حلی ریاضی وار، دقیق و دشوار دارد. بنابراین محققان از مدل‌های فیزیکی برای برآورد ضریب‌های مختلف در معادله‌ها بهره‌جسته‌اند. این ضریب‌های اغلب تابعی از مجموع انرژی در آبراهه (کانال)، عدد فرود، زاویه دیواره‌های هادی و ... می‌باشند. از انواع مختلف سرریزهای غیرخطی می‌توان به سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی اشاره کرد. در سرریزهای کنگره‌ای متغیرهایی نظیر ارتفاع تاج، زاویه، شمار چرخه‌ها، ضخامت و شکل تاج مهم می‌باشد. جنتلینی در سال ۱۹۴۰ نخستین بررسی هیدرولیکی برای سرریزهای کنگره‌ای را در دانشگاه پلی‌تکنیک میلان زیر نظر دیمارچی انجام داد. او ویژگی‌های سرریزهای کنگره‌ای مورب و زیگزاک را با تاج لبه تیز استاندارد آزمایش کرد (Gentilini, 1940). تیلور در سال ۱۹۶۸ کار سرریزهای کنگره‌ای مثلثی، ذوزنقه‌ای و مستطیلی با تاج لبه تیز و شمار چرخه متفاوت را در رساله دکتری خود ارزیابی کرد (Taylor, 1968). همچنین هی و تیلور در سال ۱۹۷۰ نخستین افرادی بودند که جامع‌ترین بررسی‌ها را بر روی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و ذوزنقه‌ای (با شکل تاج لبه تیز) انجام داده و به نتایج کاربردی در این زمینه دست یافتند. ایشان سرریزهای کنگره‌ای را با نسبت بزرگنمایی طولی $(\frac{L}{W})$ ، زاویه جانبی دیوار α و شمار کنگره‌ها n ، ارتفاع سرریز P ، بیان کردند و به‌لحاظ عمودی نیز نسبت وجه عمودی $(\frac{W}{P})$ را مطرح کردند. همچنین Q_N دبی عبوری از سرریز خطی، Q_L دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای، H ارتفاع آب روی تیغه سرریز و W طول دهانه سرریز می‌باشد. ایشان در آغاز دو راه حل زیر را پیشنهاد نمودند اما روش دوم را در تکمیل بررسی‌های خود و ارائه نمودارهای طراحی برگزیدند و بعدها هم همین روش بیشتر مورد استفاده طراحان بوده است.

در روش اول ترسیم پذیری‌های E با عنوان، ضریب تاثیر سرریز چند وجهی در مقابل نسبت $\frac{h}{p}$ سرریز است که E بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$E = \frac{(\frac{Q_L}{Q_N})}{(\frac{L}{W})} \times 100 \quad (1)$$

با اندازه‌گیری ضریب بدون بعد E می‌توان پی برد که تا چه اندازه‌ای با افزایش طول تاج می‌توان کارایی سرریز را افزایش داد.

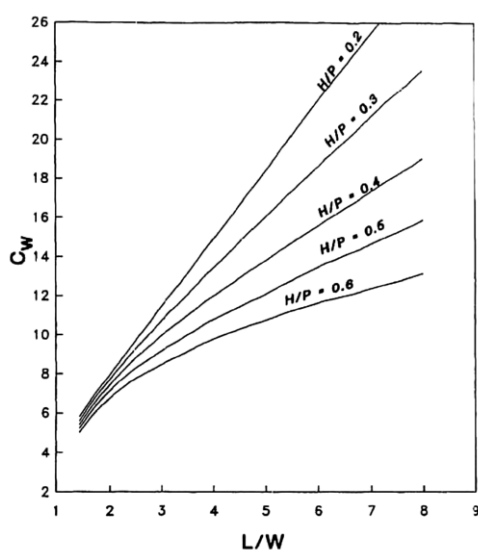


Fig. 3 Darvas design chart for trapezoidal labyrinth weir (Darvas, 1971)

شکل ۳ نمودار طراحی دارواس برای سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای (Darvas, 1971)

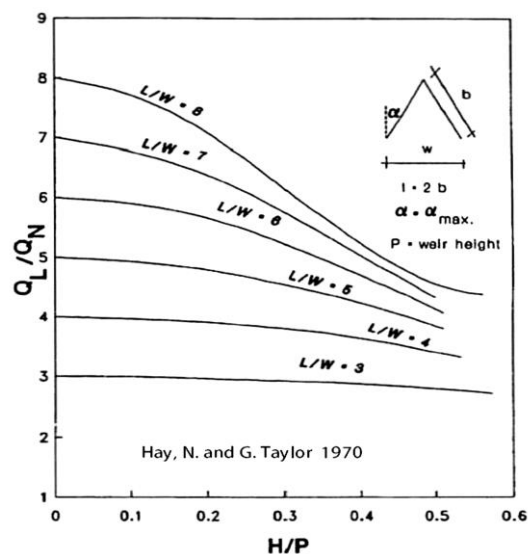


Fig. 2 Hay & Taylor design diagram for triangular labyrinth weir (Hay and Taylor, 1970)

شکل ۲ نمودار طراحی هی و تیلور برای سرریز کنگره‌ای مثلثی (Hay and Taylor, 1970)

تولیس و همکاران در سال ۱۹۹۵ با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده توسط Waldron (1994) و بررسی یک مدل برای دریاچه استندلی (Tullis, 1993) رابطه (۴) را برای محاسبه ضریب تخلیه سرریز کنگره‌ای ارائه کردند که یک ضریب بدون بعد است (Tullis et al., 1995).

$$C_d = \frac{3Q}{2L_e \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، 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.

امانیان در سال ۱۹۸۷ سرریزهای کنگره‌ای مثلثی با تاج نیم‌دایره و سرریز مستقیم با شکل تاج نیم‌دایره، ربع‌دایره، لبه صاف و تیز را بررسی کرد. نتایج نشان داد که کارایی و بازده سرریز کنگره‌ای با افزایش H کاهش می‌یابد. همچنین کارایی بازده شکل تاج نیم‌دایره‌ای بیشتر از ربع‌دایره‌ای، لبه صاف و لبه تیز است (Amanian, 1987).

تاکال و همکاران در سال ۱۹۹۰ نشان دادند که در عرض‌های همانند، سرریزهای کنگره‌ای دو (چرخه‌ای) سیکلی نسبت به سرریزهای کنگره‌ای سه سیکلی بهتر عمل می‌کنند. آنان همچنین نشان دادند که جریان عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای دریاچه‌دار ایمن‌تر و اقتصادی‌تر است (Tacaïl et al., 1990).

پیزومتریک تیغه آب روی سرریز می‌باشد. نتایجی که اداره زهکشی و فاضلاب متروپل (سیدنی-استرالیا)، (MWS&DB)، از آزمایش‌ها انجام شده بر روی مدل سدهای ورونورا و اون به دست آورد موید نمودار ارائه شده توسط دارواس بود. بررسی الگوی جریان بر روی سرریز از مهم‌ترین بخش از نگاه هیدرودینامیکی ایشان بوده است (Darvas, 1971).

در شکل (۳) یک دسته منحنی ارائه شده توسط دارواس که بر مبنای داده‌های حاصل از آزمایش‌ها بر روی سرریز ذوزنقه‌ای، با پروفیل تاج منحنی و در شرایط عبور آزاد جریان و محدوده $0.2 \leq \frac{h}{p} \leq 0.6$ ، $1 \leq \frac{L}{W} \leq 8$ ، تهیه شده، نشان داده شده است.

ماگالیاییز و لورنا در سال ۱۹۸۹ منحنی‌های توسعه یافته‌ای مانند دارواس برای سرریز کنگره‌ای ارائه کردند. آنان با توجه به نتایج بررسی‌های خود ضریب تخلیه بدون بعدی را برابر رابطه (۳) ارائه کردند.

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

در رابطه (۳)، C_d ضریب تخلیه سرریز، Q دبی عبوری از سرریز، H_t ارتفاع کل آب روی تاج سرریز و g شتاب ثقل می‌باشد (Magalhães and Lorena, 1989).

ضریب سرریز کنگره‌ای با طرح مثلثی انجام دادند. مقایسه نتایج نشان داد که با کاهش زاویه رأس سرریز، طول ناحیه تداخل جریان افزایش یافته و ضریب دبی جریان سرریز کاهش محسوسی می‌یابد. همچنین در این پژوهش رابطه‌هایی برای محاسبه ضریب دبی جریان با زوایای رأس مختلف ارائه شده است (Kumar et al., 2010).

کراکستون و تولیس در سال ۲۰۱۳ ویژگی‌های تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در سرریزهای کنگره‌ای با دو و چهار چرخه مثلثی و زاویه‌های رأس مختلف را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که در دبی‌های کم، به دلیل تداخل کم تیغه‌های ریزشی ضریب دبی جریان از سرریز خطی بیشتر بوده و به تدریج با افزایش دبی جریان شدت تداخل بیشتر می‌شود. این موضوع منجر به کاهش ضریب دبی جریان شده و میزان آن متمایل به ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن می‌گردد (Crookston and Tullis, 2013).

کراکستون و همکاران در سال ۲۰۱۳ تجزیه و تحلیل و طراحی بهینه سرریزهای کنگره‌ای برای هوادهی جریان، برآورد رابطه هد-دبی، پایدارسازی تیغه آبی روی سرریز را بررسی کردند و با برش قسمت‌هایی از دیواره و دماغه سرریز و همچنین با ایجاد زائده‌هایی بر روی دیواره‌ها و دماغه سرریز به بهبود عامل‌های یاد شده اقدام کردند (Crookston et al., 2013).

گوستاوو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با اجرای ابزار هیدرودینامیکی در بالادست پرداختند. در انجام این آزمایش‌ها از سه ابزار هیدرودینامیکی به طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج نشان داده است که این ابزارهای پویا (دینامیکی) باعث افزایش دبی به میزان شایان توجهی شده است (Gustavo et al., 2015).

بیلهان و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی ظرفیت دبی سرریزهای کنگره‌ای با و بدون شکافنده‌های جریان پرداختند. نتایج نشان داده است که قرار گرفتن تیغه‌های شکافنده جریان روی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای و دایره‌ای باعث کاهش در حدود ۴ درصدی ضریب دبی نسبت به حالت بدون تیغه شده است (Bilhan et al., 2016).

تولیس و همکاران در سال ۱۹۹۵ آزمایش‌هایی روی سرریز کنگره‌ای با زاویه‌های کناری مختلف انجام داده و رابطه‌ای برای ضریب دبی به دست آوردند. این پژوهشگران اظهار داشتند با استفاده از این رابطه و فرمول دبی سرریز خطی می‌توان میزان دبی سرریز کنگره‌ای را تخمین زد (Tullis et al., 1995).

تولیس و امانیان در سال ۱۹۹۵ با بررسی روی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای نتیجه گرفتند که افزایش طول دماغه به علت کاهش تداخل لایه‌های آب سبب افزایش ضریب گذردهی جریان می‌شود. اما این افزایش در زاویه‌های کوچکتر سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای به علت کاهش شایان در تداخل لایه‌های ریزشی قابل توجه می‌باشد. بر عکس در زاویه‌های بزرگ نشان دادند افزایش طول دماغه تأثیر بسیار ناچیز و در برخی زمان‌ها تأثیر معکوس در افزایش ضریب گذردهی جریان دارد (Tullis and Amanian, 1995).

تولیس و همکاران آزمایش‌هایی برای بهینه کردن کارایی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای با زاویه کناری ۸ و ۹ درجه در بار(هد)های کم با شکل تاج‌های مختلف انجام دادند. با استفاده از نتایج معیار طراحی را برای سرریز کنگره‌ای سد برازوس تعدیل کردند (Tullis et al., 2005).

تولیس و همکاران تأثیر استغراق پایین دست سرریزهای کنگره‌ای را بررسی و رابطه‌های بی‌بعدی ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد که استغراق باعث کاهش بازده هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای و مثلثی می‌شود (Tullis et al., 2005).

امیراوغلو و همکاران مدل آزمایشگاهی سرریز جانبی کنگره‌ای را با در نظر گرفتن متغیرهای هندسی و هیدرولیکی بررسی کردند. در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج دیگر پژوهشگران برای انواع سرریزهای جانبی، مشاهده شد که ضریب دبی افزایش چشمگیری داشته است. در این پژوهش ضریب دبی سرریز جانبی ۱/۵ تا ۴/۵ بار بیشتر از سرریز جانبی مستطیلی بود. آنان اظهار داشتند که یک همبستگی تجربی پیش بینی شده می‌تواند ضریب دبی سرریزهای جانبی کنگره‌ای را توسعه دهد (Emiroglu et al., 2010).

کومار و همکاران (۲۰۱۰) بررسی‌های آزمایشگاهی بر

$$C=f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{L_c}{P}, \frac{T_w}{W}, \frac{L_c}{W}, \frac{y}{P}, \frac{y}{W}, \alpha\right) \quad (۶)$$

تحقیق‌های پژوهشگران مختلف از جمله Tullis et al. (1995) و Hay and Taylor (1970) نشان می‌دهد که فراسنجه بدون بعد نسبت ارتفاع انرژی روی تاج سرریز (H_t) به ارتفاع سرریز (P) به عنوان مهم‌ترین فراسنجه موثر در رابطه ضریب تخلیه جریان می‌باشد.

۲-۲- شرایط آزمایش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در یک آبراهه با طول ۱۴ متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر که در یک متر انتهایی آبراهه عرض آن به ۹۶ سانتی‌متر رسیده انجام شده است. همه‌ی آزمایش‌های این تحقیق در یک متر انتهایی آبراهه که دارای عرض ۹۶ سانتی‌متر است انجام شده است. آبراهه یاد شده واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بوعلی سینا بوده و ۱۳ متر ابتدایی آن دارای دیواره و کف شیشه‌ای و یک متر انتهایی دارای دیواره و کف آهنی می‌باشد که محل اتصال این دو قسمت از دیواره و کف به کلی آب‌بندی شده است. محل قرارگیری نمونه‌های سرریز کنگره‌ای در انتهای آبراهه می‌باشد. جریان آب در این آبراهه توسط یک پمپ که دارای شیر برای کنترل جریان عبوری می‌باشد برقرار می‌شود. در طول این آبراهه از یک سرریز مثلثی شکل واسنجی شده برای اندازه‌گیری دبی جریان در آبراهه و مجموعه‌ای از چند بلوک سفالی و توری فلزی برای آرام کردن جریان و کاهش آشفتگی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری عمق آب در آبراهه اصلی از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. در زیر آبراهه اصلی، مخزن اصلی تامین جریان آب قرار گرفته است که بوسیله یک پمپ و از طریق یک لوله به قطر خارجی ۱۴۵ میلی‌متر به سمت آبراهه پمپاژ و پس از عبور از آبراهه و سرریزها دوباره به درون مخزن هدایت می‌شود.

شکل ۵ نمایی جانبی از آبراهه و مجموعه‌ی تامین آب را نشان می‌دهد.

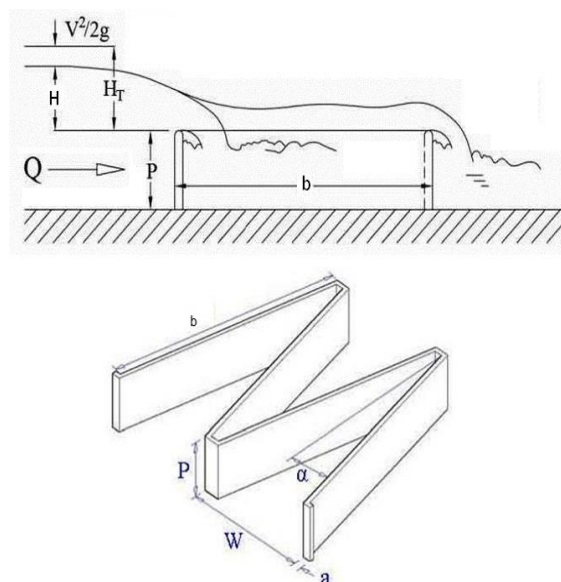
میزان جریان آب ورودی به آبراهه توسط یک شیر قابل کنترل است که در شکل ۵ قابل مشاهده است. برای انجام

سنگ‌سفیدی و همکاران ۲۰۱۸ به بررسی آزمایشگاهی جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای قوسی در مخزن پرداختند. نتایج نشان داده است که بازده سرریزهای کنگره‌ای قوسی تا ۴/۵ برابر سرریز خطی است و در نهایت یک روش طراحی برای سرریزهای کنگره‌ای قوسی در مخزن نیز ارائه شده است (Sangsefidi et al., 2018).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

فراسنجه‌های موثر بر ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای (C) افزون بر ویژگی‌های هندسی سرریز شامل ارتفاع سرریز (P)، عرض سرریز (W)، طول موثر سرریز (L_c)، زاویه بین دیواره سرریز (α)، ضخامت دیواره (t_w) و تابعی از ارتفاع انرژی روی تاج سرریز (H_t) و عمق جریان (y)، به‌عنوان مشخصه‌هایی از رفتار هیدرولیکی جریان می‌باشد. شکل (۴) برخی از فراسنجه‌های مربوط به ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۴ ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای

Fig. 4 Geometric and hydraulic specifications of labyrinth spillway

پس از انجام تحلیل ابعادی ضریب تخلیه جریان، تابعی از فراسنجه‌های بدون بعد به دست آمد. روابط (۵) و (۶):

$$C=f(H_t, L_c, P, W, t_w, y) \quad (۵)$$

در هر حالت میزان دبی عبوری و عمق آب روی تاج سرریز به صورت دقیق رصد و خوانده شده است و این عمل برای هر حالت ۳ بار تکرار شده است تا خطاهای ناشی از انجام آزمایش به کمترین برسد. در این پژوهش در مجموع ۱۱ مدل سرریز کنگره‌ای ساخته شده و آزمایش شده است. در آزمایش‌های انجام شده بالغ بر ۱۶۵ سری داده برداشت شده است. در جدول ۱ ویژگی‌های هندسی سرریزهای مورد آزمایش آمده است. شکل‌های ۹ الی ۱۲ نیز نمونه‌هایی از سرریزهای آزمایش شده را نشان می‌دهد. شکل ۱۳ و شکل ۱۴ به ترتیب معرف یک نمونه از سرریز کنگره‌ای حالت اول و حالت دوم می‌باشد.

۲-۳- رابطه و منحنی دبی - اشل آبراهه اصلی

برای محاسبه دبی آبراهه اصلی اقدام به انجام واسنجی (کالیبراسیون) دبی به صورت حجمی شده است. برای انجام این کار ۱۵ آزمایش بر روی سرریز مثلثی انجام شده است که با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها نمودار دبی - اشل سرریز مثلثی به دست آمده و در شکل (۶) آورده شده است. همچنین با استفاده از نمودار دبی - اشل به دست آمده رابطه‌ای برای محاسبه دبی خروجی با استفاده از سرریز مثلثی استخراج گردیده است که در رابطه (۷) آورده شده است.

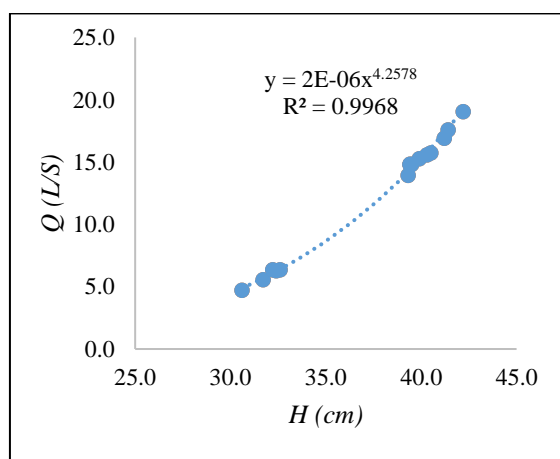


Fig. 6 Variations of Q versus H for Triangle Weirs

شکل ۶ نمودار پذیرایی دبی در برابر ارتفاع برای سرریز مثلثی

$$Q = 2 \times 10^{-6} \times H^{4.2578} \quad (7)$$

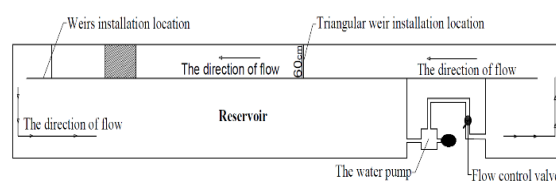


Fig. 5 Side view of the laboratory flume

شکل ۵ نمای جانبی از آبراهه آزمایشگاهی

این پژوهش ۱۰ مدل آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت و یک مدل آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان برای انجام مقایسه با مدل‌های دیگر ساخته شده است. برای ساخت مدل‌های آزمایشی سرریزها از یک سطح شیشه‌ای به ضخامت ۱۰ میلی‌متر به ابعاد ۹۶ سانتی‌متر در ۵۰ سانتی‌متر استفاده شده که ساخت سرریز بر روی این سطح انجام شده است. همچنین برای ساخت مدل‌های آزمایشی سرریزهای کنگره‌ای بر روی سطح یاد شده از شیشه ۶ میلی‌متری با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برای همه نمونه‌ها استفاده شده است. طراحی همه‌ی مدل‌های سرریزهای کنگره‌ای به گونه‌ای است که همگی در ۵ چرخه و طول موثر در همه نمونه‌ها یکسان و معادل ۳۳۶ سانتی‌متر می‌باشد تا تاثیر این دو فراسنجه بر ضریب تخلیه سرریز در همه نمونه‌ها برابر باشد. همه‌ی سرریزها با استفاده از چسب سیلیکون ساخته و آب‌بندی شده‌اند. در این پژوهش برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت دو حالت در نظر گرفته شده است. همه‌ی سرریزهای کنگره‌ای طراحی شده دارای شمار چرخه و طول موثر یکسان می‌باشند. حالت اول شامل ۵ سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت است به طوری که هر چه به مرکز سرریز نزدیک‌تر می‌شویم طول کنگره‌های میانی افزایش می‌یابد و حالت دوم شامل ۵ سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت است به طوری که هر چه به مرکز سرریز نزدیک‌تر می‌شویم طول کنگره‌های میانی کاهش می‌یابد و بلندترین کنگره‌ها در این حالت کنگره‌های ابتدایی و انتهایی است. در این تحقیق برای هر سرریز ۵ حالت شیر کنترل جریان در نظر گرفته شده است که در حالت اول کمترین میزان دبی عبوری و حالت پنجم بیشترین میزان دبی عبوری ثبت شده است و

برخورد تیغه‌های آب می‌باشد که به این شکل تعریف می‌شود: نسبت مجموع طول کنگره‌هایی که با کنگره‌های مجاور تداخل تیغه آب ندارد به بخشی از مجموع طول موثر سرریز که در راستای جریان می‌باشد. $A1$ تا $A5$ سرریز کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های متفاوت به طوری که

در این رابطه Q دبی عبوری از سرریز بر حسب لیتر بر ثانیه و H ارتفاع سطح آب درون آبراهه اصلی بر حسب سانتی متر می‌باشد. همچنین در شکل (۷) ویژگی‌های سرریز مثلثی آورده شده است.

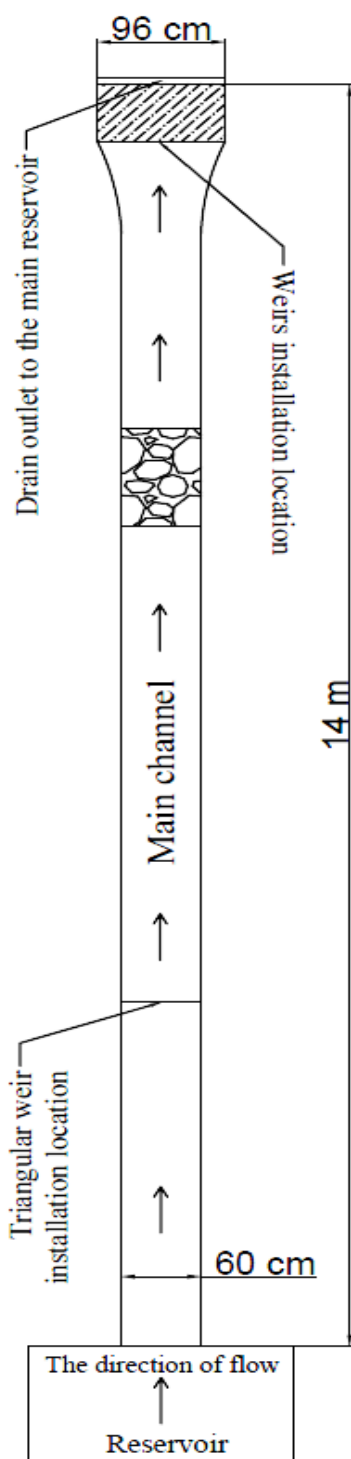


Fig. 8 View of laboratory flume
شکل ۸ نمایی از فلوم آزمایشگاهی

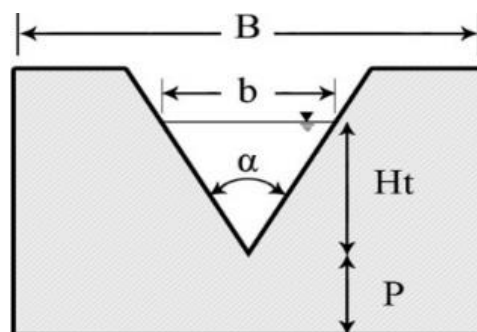


Fig. 7 View of Triangle Weirs
شکل ۷ نگاره نمای کلی سرریز مثلثی

در شکل (۷)، B عرض آبراهه اصلی به طول ۶۰ سانتی‌متر، b عرض سرریز به طول ۳۰ سانتی متر، H_t هد بالادست، α زاویه رأس سرریز برابر با $38/7$ درجه و P ارتفاع سرریز به میزان ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۸ نمایی از طرح و نقشه آبراهه آزمایشگاهی ۱۴ متری را نشان می‌دهد.

۴-۲- محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش

ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش با استفاده از رابطه (۸) که توسط Tullis et al. (1995) پیشنهاد شده است محاسبه می‌شود.

$$C_d = \frac{3Q}{2L_e \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

در این رابطه، 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.

همچنین می‌توان رابطه (۸) را به صورت رابطه (۹) تعریف کرد که در آن C ضریب تخلیه سرریز می‌باشد.

$$C = \frac{Q}{L_e H_t^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

در جدول (۱)، ستون آخر، نشان دهنده نرخ کاهش طول

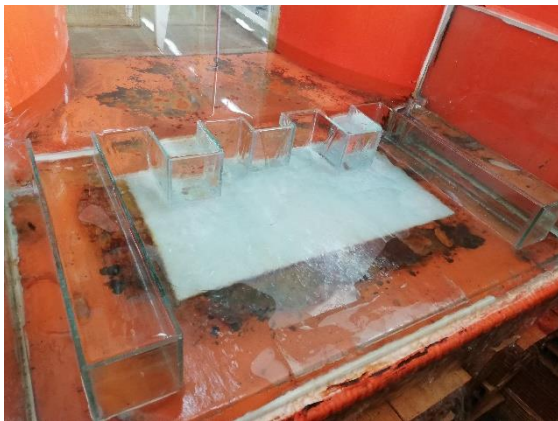


Fig. 10 labyrinth rectangular weir With unequal length of labyrinth (B5) $P=10\text{cm}$
 شکل ۱۰ سرریز کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره نایکسان (B5) $P=10\text{cm}$

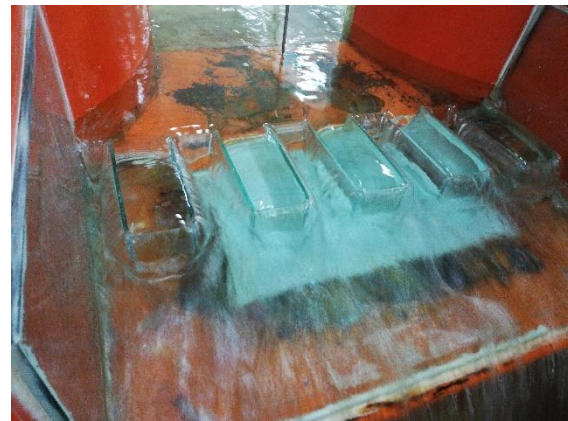


Fig. 9 labyrinth rectangular weir With equal length of labyrinth (C1) $P=10\text{cm}$
 شکل ۹ سرریز کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره یکسان (C1) $P=10\text{cm}$



Fig. 12 labyrinth rectangular weir With unequal length of labyrinth (A1) $P=10\text{cm}$
 شکل ۱۲ سرریز کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره نایکسان (A1) $P=10\text{cm}$



Fig. 11 labyrinth rectangular weir With unequal length of labyrinth (A3) $P=10\text{cm}$
 شکل ۱۱ سرریز کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره نایکسان (A3) $P=10\text{cm}$

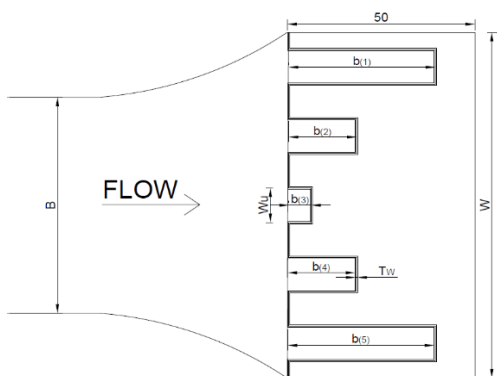


Fig. 14 type B of labyrinth weirs $P=10\text{cm}$
 شکل ۱۴ نمونه ای از سرریز کنگره‌ای نوع B

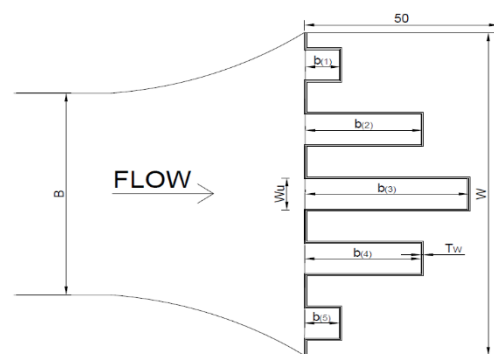


Fig. 13 type A of labyrinth weirs $P=10\text{cm}$
 شکل ۱۳ یک نمونه از سرریز کنگره‌ای نوع A

کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های متفاوت به طوری که هرچه به کنگره سوم که در مرکز سرریز است نزدیک‌تر

هر چه به کنگره سوم که در مرکز سرریز است نزدیک‌تر می‌شویم طول کنگره‌ها افزایش می‌یابد و $B1$ تا $B5$ سرریز

جدول ۱ ویژگی‌های مدل‌های آزمایشگاهی سرریزهای کنگره‌ای (استفاده شده)

Table 1 Characteristics of laboratory Labyrinth weirs models (used)

Weir Type	L (cm)	P (cm)	b ₍₁₎	b ₍₂₎	b ₍₃₎	b ₍₄₎	b ₍₅₎	The rate of reduction of water impact length
A1	336	10	18	24	36	24	18	15 %
A2	336	10	15	24	42	24	15	22.5 %
A3	336	10	9	30	42	30	9	27.5 %
A4	336	10	12	24	48	24	12	30 %
A5	336	10	6	30	48	30	6	35 %
B1	336	10	30	21	18	21	30	10 %
B2	336	10	30	24	12	24	30	15 %
B3	336	10	36	18	12	18	36	20 %
B4	336	10	39	18	6	18	39	27.5 %
B5	336	10	45	12	6	12	45	32.5 %
C1	336	10	24	24	24	24	24	0 %

متفاوت با شدت بیشتر و برای سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان با شدت کمتر رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت در دبی‌های بالا اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند و کار همانندی را به نمایش می‌گذارند. با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌های انجام شده بر روی سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت برای حالت اول مشخص شد که در سرریزهای کنگره‌ای با ایجاد تغییر در طول کنگره‌ها ضریب تخلیه سرریز به طور محسوسی افزایش می‌یابد که بالاترین ضریب تخلیه در همه‌ی نمونه‌ها در دبی‌های پایین و پیش از مستغرق شدن سرریز رخ می‌دهد و پس از مستغرق شدن سرریزها کار آنها تاحدودی همانند به یکدیگر می‌باشد، در این حالت به علت افزایش ارتفاع تیغه جریان و تداخل آن روی سرریز کنگره‌ای، سرریز کار به نسبت خطی به خود گرفته و دبی عبوری از آنها در همه‌ی نمونه‌ها تاحدودی با یکدیگر همانند می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، نمونه A4 و A5 با اینکه طول برخورد تیغه‌های آب درون کنگره‌های آنها کمتر از دیگر نمونه‌ها است ولی ضریب تخلیه سرریز کمتری را دارند که از این رخداد می‌توان نتیجه گرفت با نامتعارف شدن بیش از حد طول کنگره‌های سرریز کنگره‌ای کار آنها

می‌شود طول کنگره‌ها کاهش می‌یابد و همچنین CI سرریز کنگره‌ای مستطیلی با طول کنگره‌های یکسان می‌باشد. در این تحقیق، n شمار کنگره‌های سرریز، T_w ضخامت دیواره سرریز، P ارتفاع سرریز، W طول بازشدگی سرریز و L طول موثر سرریز در همه‌ی مدل‌ها و نمونه‌ها یکسان و با هم برابر می‌باشد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- سرریزهای کنگره‌ای حالت اول

در شکل (۱۵) پذیری‌های ضریب تخلیه سرریز (C) در برابر $\frac{H_t}{P}$ برای ۵ نمونه از سرریز حالت اول و یک سرریز کنگره‌ای با طول کنگره یکسان آورده شده است. با توجه به ثابت بودن ارتفاع همه‌ی سرریزها (P)، افزایش ارتفاع آب روی تیغه سرریز (H_t) تنها به دلیل افزایش میزان دبی عبوری می‌باشد که در نتیجه افزایش میزان Q افزایش H_t و $\frac{H_t}{P}$ را به دنبال دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پذیری‌های C نسبت به $\frac{H_t}{P}$ دارای رابطه عکس است و در هر سرریز ضریب تخلیه یا همان C به ازای $\frac{H_t}{P}$ پایین‌تر بیشترین میزان خود را دارد و با افزایش میزان $\frac{H_t}{P}$ به دلیل تداخل تیغه‌های جریان و مستغرق شدن سرریز میزان C کاهش می‌یابد که این کاهش برای سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های

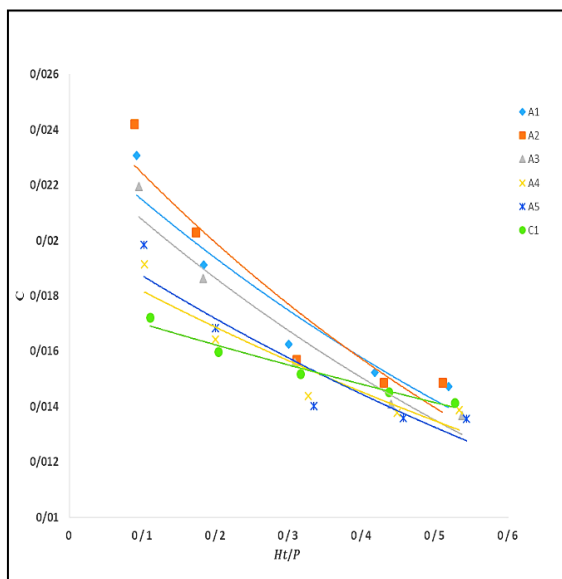


Fig. 15 Variations of C versus $\frac{H_t}{P}$ for Rectangular Labyrinth Weirs (Type A)
شکل ۱۵ پذیرای‌های C در مقابل نسبت $\frac{H_t}{P}$ برای سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی (حالت A)

طول کنگره‌های یکسان هستند، شکل‌های نامتعارف از حالت دوم می‌باشند و کار سرریز در این دو نمونه بسیار ضعیف شده بطوری‌که کار سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان به مراتب بهتر از آن‌هاست. با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌های انجام شده بر روی سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های متفاوت برای حالت دوم مشخص شد که کاهش طول برخورد تیغه‌های آب بیش از ۲۰ درصد سرریز را از شکل کنگره‌ای خارج می‌سازد که این حالت باعث کاهش چشمگیر بازده و ضریب تخلیه سرریز کنگره‌ای می‌شود ولی اگر کاهش طول برخورد تیغه‌های آب ۲۰ درصد و یا کمتر باشد در دبی‌های پایین و پیش از مستغرق شدن سرریز بازده و ضریب تخلیه آن افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در شکل (۱۶) مشخص است، بهترین راندمان سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های نایکسان در حالت دوم مربوط به نمونه B2 می‌باشد که طول برخورد تیغه‌های آب در این نمونه ۱۵ درصد نسبت به سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان کاهش پیدا کرده است و در این نمونه ضریب تخلیه (C) در بهترین وضعیت تا ۲۶ درصد نسبت به سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان بهبود یافته است.

به شدت کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که بهترین کار مربوط به نمونه‌های A1 و A2 می‌باشد که با ایجاد پذیرای‌های متعارف در طول کنگره‌های سرریز کنگره‌ای، کار بسیار بهتری نسبت به سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان را دارد. همچنین مشاهده می‌شود ضریب تخلیه (C) در سرریزهای کنگره‌ای حالت اول برای نمونه‌هایی که ۱۵ تا ۲۷/۵ درصد طول برخورد تیغه‌های آب کمتری نسبت به سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان دارند بسیار بهبود یافته و برای نمونه‌هایی که بیش از ۲۷/۵ درصد طول برخورد تیغه‌های آب کمتر می‌شود کارایی و ضریب تخلیه روندی کاهشی پیدا کرده است که حدس می‌زنیم دلیل این رخداد آن است که در حالت اول کاهش طول برخورد تیغه‌های آب بیش از ۲۷/۵ درصد باعث خارج شدن شکل سرریز از حالت کنگره‌ای می‌شود و جریان در هنگام سرریز شکل پیچیده‌ای به خود می‌گیرد که باعث کاهش کارایی و بازده سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های نایکسان در حالت اول می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، بهترین بازده سرریزهای کنگره‌ای با طول کنگره‌های نایکسان در حالت اول مربوط به نمونه A2 می‌باشد که طول برخورد تیغه‌های آب در این نمونه ۲۲/۵ درصد نسبت به سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان کاهش پیدا کرده است و در این نمونه ضریب تخلیه (C) در بهترین وضعیت تا ۴۰/۷ درصد نسبت به سرریز کنگره‌ای با طول کنگره‌های یکسان بهبود یافته است.

۳-۲- سرریزهای کنگره‌ای حالت دوم

در سرریز کنگره‌ای حالت دوم نیز بنا بر نتایج به دست آمده و برابر شکل (۱۵) به مانند سرریزهای کنگره‌ای حالت اول نحوه پذیرای‌های ضریب تخلیه (C)، نسبت به $\frac{H_t}{P}$ نزولی بوده و با افزایش مقدار $\frac{H_t}{P}$ ، ضریب تخلیه و کارایی سرریز کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش $\frac{H_t}{P}$ ، کارایی و ضریب تخلیه‌ی سرریزهای کنگره‌ای حالت دوم به شدت کاهش پیدا می‌کند. مشاهده می‌شود که در نمونه‌های B4 و B5 که به ترتیب دارای ۲۷/۵ و ۳۲/۵ درصد طول برخورد تیغه‌های آب کمتری نسبت به سرریز کنگره‌ای با

کنگره‌ای خارج می‌سازد و باعث کاهش کارایی و بازده و ضریب تخلیه سرریز می‌شود. همچنین برابر شکل (۱۷) که پذیریه‌های ضریب تخلیه (C) در برابر نسبت $\frac{H_t}{P}$ را برای نمونه‌های (A1)، (A2)، (A3)، (B1)، (B2)، (B3) و (C1) نشان می‌دهد، بهترین نمونه در کل آزمایش‌ها مربوط به نمونه (A2) می‌باشد که ضریب تخلیه را در بهترین حالت تا ۴۰/۷ درصد می‌تواند بهبود بخشد.

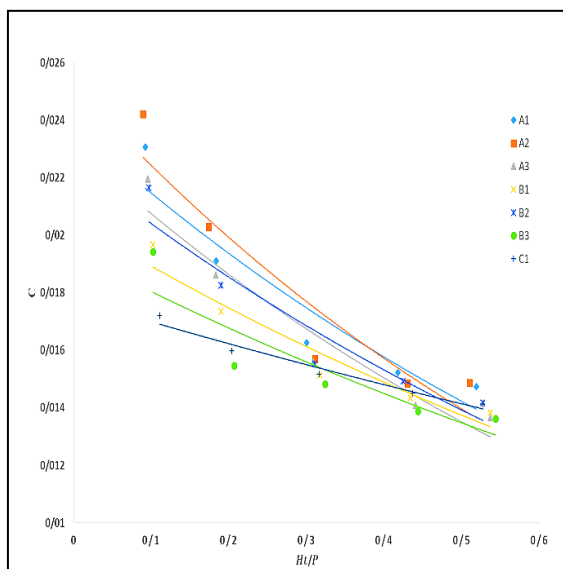


Fig. 17 Variations of C versus $\frac{H_t}{P}$ for all of Rectangular Labyrinth Weirs (Type A and B)
 شکل ۱۷ پذیریه‌های C در مقابل نسبت $\frac{H_t}{P}$ برای همه‌ی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی (حالت A و B)

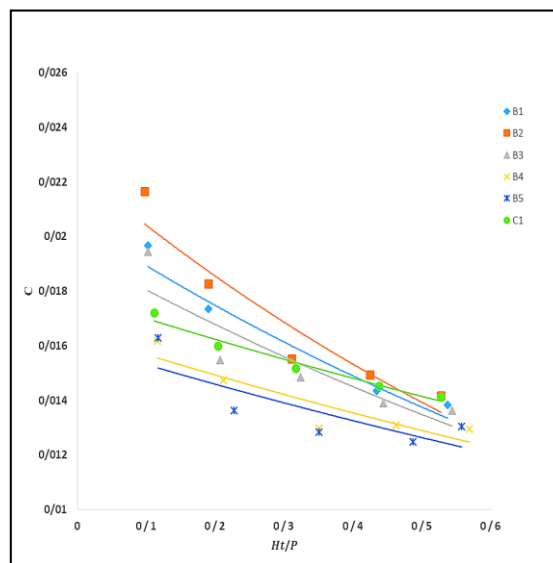


Fig. 16 Variations of C versus $\frac{H_t}{P}$ for Rectangular Labyrinth Weirs (Type B)
 شکل ۱۶ پذیریه‌های C در مقابل نسبت $\frac{H_t}{P}$ برای سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی (حالت B)

۴- نتیجه گیری

در همه‌ی سرریزهای کنگره‌ای مورد آزمایش چگونگی پذیریه‌های C نسبت به $\frac{H_t}{P}$ نزولی بوده و با افزایش میزان نسبت $\frac{H_t}{P}$ میزان C کاهش می‌یابد، این روند کاهشی برای سرریزهای کنگره‌ای حالت اول نسبت به سرریزهای کنگره‌ای حالت دوم بیشتر می‌باشد، همچنین بنابر نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که در حالت کلی کارایی و بازده و ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای حالت اول بهتر از حالت دوم می‌باشد و در نسبت‌های $\frac{H_t}{P}$ کمتر، هر دو حالت بهترین کار خود را نشان می‌دهند. نمونه‌های A4 و A5 در حالت اول به ترتیب با ۳۰ و ۳۵ درصد کاهش طول برخورد تیغه‌های آب از شکل متعارف سرریزهای کنگره‌ای خارج شدند که این امر موجب کاهش کارایی و بازده و ضریب تخلیه آن‌ها شده است و همین رخداد برای نمونه‌های B4 و B5 به ترتیب با ۲۷/۵ و ۳۲/۵ درصد کاهش طول برخورد تیغه‌های آب از حالت دوم با شدت بیشتر رخ داده است لذا از این تحقیق برای حالت‌های اول و دوم می‌توان نتیجه گرفت، کاهش طول برخورد تیغه‌های آب تا مرز ۲۵ درصد باعث افزایش کارایی و بازده و بهبود ضریب تخلیه سرریزهای کنگره‌ای می‌شود و کاهش طول برخورد تیغه‌های آب بیش از ۲۵ درصد شکل سرریز را از حالت

۵- فهرست نشانه‌ها

w (cm)	عرض سرریز
P (cm)	ارتفاع سرریز
H_t (cm)	ارتفاع تیغه آب روی سرریز
B (cm)	عرض آبراهه اصلی
W (cm)	طول دهانه سرریز
L, L_e (cm)	طول مؤثر سرریز
b (cm)	عرض سرریز مثلثی
y (cm)	عمق جریان
t_w (cm)	ضخامت دیواره سرریز
Q_N (l/s)	دبی عبوری از سرریز خطی
Q_L (l/s)	دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای
Q_s (l/s)	دبی خروجی از سرریز

Design of Labyrinth Weirs. Report No. 736, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

Sangsefidi, Y., Mehraein, M. and Ghodsian, M. (2018). Experimental study on flow over in-reservoir arced labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 59, 215-224.

Tacail, F.G., Even, B. and Babb, A. (1990). Case study of a labyrinth spillway. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 17, 1-7.

Taylor, G. (1968). The Performance of Labyrinth Weirs. Phd Thesis, University of Nottingham.

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

Tullis J.P., Willmore, C.M. and Wolfhope, J.S. (2005). Improving performance of low-head labyrinth weirs. Proc. of the 2005 World Water and Environmental Resources Congress, May 15-19, Anchorage, Alaska.

Waldron, D.R. (1994). Design of Labyrinth Spillways, MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah.

α	زاویه بین دیواره سرریز (درجه)
Fr_1	عدد فرود
C, C_d	ضریب تخلیه
n	شمار کنگره‌ها
E	ضریب تاثیر سرریز چند وجهی
$g (m/s^2)$	شتاب ثقل

۶- منابع

Amanian, N. (1987). Performance of and design of labyrinth spillways. M.S. thesis, Utah State University, Logan, Utah.

Bilhan, O., Emin Emiroglu, M., and Miller, C.J. (2016). Experimental investigation of discharge capacity of labyrinth weirs with and without nappe breakers. *World Journal of Mechanics*. 6, 207-221.

Crookston, B. and Tullis, B. (2013). Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge relationships, *J. Irrigation and Drainage Eng.* 139(5), 363-370.

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

Emiroglu, M.E., Kaya, N. and Agaccioglu, H. (2010). Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel, *J Irrig Drain Eng ASCE*. 136 (1), 37- 46.

Gentilini, B. (1940). Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. *Memorie e Studi dell istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano*, 48. (in Italian)

Delgado, F.G.A., Paulina, M.A., Camino, S.F.J. (2015). Discharge coefficient spillways labyrinth implementing hydrodynamic devices in the upstream side. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June-3 July, The Hague, The Netherlands, 1-7.

Hay, N. and Taylor, G. (1970). Performance and design of labyrinth weirs, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 96(11), 2337-2357.

Kumar, V., Aksoy, L., Donkers, B., Venkatesan, R., Wiesel, T. & Tillmans, S. (2010). Undervalued or Overvalued Customers: Capturing Total Customer Engagement Value. *Journal of Service Research*, 13(3), 297-310.

Magalhães, A. and Lorena, M. (1989). Hydraulic