

Research Paper

Experimental Investigation of the Effect of the Geometry of Trapezoidal Arced Labyrinth Weirs on Flow Discharge Coefficient

Jamal Feili¹, Mohammad Heidarnejad^{2*}, Alireza Masjedi², Mahdi Asadi Lor³

1. Phd Student, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Associate Prof. Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3. Assistance Prof. Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Received: 2020/11/05

Revised: 2021/01/08

Accepted: 2021/02/03

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2022.26472.2276

Keywords:

Labyrinth Weirs or Weirs, Trapezoidal Arc Weirs, Nose Width Ratio

Abstract

Introduction: Labyrinth weirs are structures that are designed to transfer large currents at low heads. In other words, labyrinth weirs are a special type of nonlinear weirs, which are used as an economic and technical option for controlling the flow. They are usually used when the weir capacity cannot be enhanced by increasing the weir width due to topographic conditions.

Methods: The laboratory studies of this research were conducted on a flume in the hydraulic laboratory of Khuzestan Water and Electricity Organization, Iran. The weir laboratory models in this study were installed in a rectangular flume (length: 12 m; width: 0.6 m; height: 0.6 m). Due to the lack of comprehensive studies on examining the weir discharge coefficient in an arched plan mode, we conducted some studies on trapezoidal arc congressional weirs with different arc radii and cycle lengths. We also performed several experiments using physical modeling to evaluate the effect of the ratio of the nose width of the weir side cycles to the nose width of the middle cycle (w_2/w_1), the ratio of the radius of the arc to the width of the middle cycle (R/w_1), and the ratio of weir cycle length to the middle cycle width (B/w_1) on the weir discharge coefficient.

Discussion and Conclusion: Revealed by these experiments, the discharge coefficient shows an incremental trend of up to 33% by reducing the ratio of the nose width of the weir cycles (w_2/w_1).

Citation: Feili J, Heidarnejad M, Masjedi AR, Asadi Lor M. The Laboratory Study of the Effect of Geometry of Trapezoidal Arced Labyrinth Weirs on the Flow Discharge Coefficient. Water Resources Engineering Journal. Water Resources Engineering Journal. 2022;14 (51):73-86

***Corresponding author:** Mohammad Heidarnejad

Address: Dept. of of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Tell: +989113919533

Email: mo_he3197@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Labyrinth weirs are recognized by several iterations in their indirect axis. These types of weirs allow passing further flow rate by increasing the effective length of the crest in a certain width at the same hydraulic load compared to direct weirs. The efficiency of this type of weir appears to be significant in low hydraulic loads since the interference of the flow layers will be associated with the reduced discharge coefficient with the increased thickness of the water nappe on the weir (18). Weirs play a decisive and significant role in the safety of dams. Experts should inevitably choose floods with a high return period as the designed flood of weirs to minimize human and financial losses due to the failure of dams. Basically, the discharge of large floods can be done in two ways, either by increasing the length of the weir crest or by increasing the hydraulic load. In practice, increasing the hydraulic load is often realized by embedding valves in the weirs, which allows increasing the flow rate per unit length of the weir. However, it should be noted that the safety of these weirs may not be reliable in emergencies. On the other hand, it is not always possible to increase the weir capacity by increasing the weir width since the topographic conditions of the weir construction site can act as a limiting factor in choosing the length of the crest. In the meantime, the use of labyrinth (polygonal) weirs seems to be an approach to increase the discharge capacity of weirs. A weir with a labyrinth arced plan is known as a cost-effective solution to increase the efficiency of dams with high limits (for example, limited space, high flood discharge) (13). Except for the studies conducted by Crookston and Tullis (7,8), other studies have focused merely on labyrinth weirs with linear cycles, or finally, with an arched nose.

Crookston et al. provided a method for hydraulic design and analysis of labyrinth weirs based on the experimental results of a physical model and calculated and presented the discharge coefficient for labyrinth weirs with a quadrilateral and a semicircle crest shape and lateral angles of 6 to 35 degrees. In their study, they also examined the nappe

behavior that affects flow performance and provided specific hydraulic design considerations for nappe features (9). Monjezi et al. conducted a laboratory study on the flow discharge coefficient in arched labyrinth weirs with a triangular plan. According to the results of their experiments, an increase in the effective length of the weir as a result of its arching has been associated with improved efficiency of linear arc weirs by up to 21% and labyrinth arc weirs by about 57% (16).

Materials and Methods

The laboratory studies of this research were performed on a flume in the hydraulic laboratory of Khuzestan Water and Electricity Organization, Iran. The weir laboratory models in this study were installed in a rectangular flume (length: 12 m; width: 0.6 m; height: 0.6 m). The walls of the flume were transparent and made of Plexiglass and the flow passing over the weir was in a free state. The floor of the flume is a fixed bed with no slope and is horizontal. The water flow is first directed by the pump from the ground tank to the head tank. The water then enters the flume inlet tank through a pipeline controlled by a flap valve, which is calmed by the existing mesh sheet and then transferred to the main body of the flume. The flow enters the channel slowly and with a low flow rate and slowly passes over the weir, which is installed in the flume bed. In other words, by changing the flow rate (discharge), the hydraulic conditions passing through the weir are examined and recorded. Finally, after passing through the weir, the water flow reaches the end of the flume and enters its terminal tank, through which, it is transferred to the underground tank and returns to the cycle. According to the abovementioned, the flow was well established in the flume at first to perform the experiments. This procedure lasted for 15 minutes for low currents that have less turbulence or often no turbulence at all. However, it lasted longer for the flow to be calmed for high currents with more turbulence. In general, the hydraulic flow information was collected after establishing a uniform flow in the flume. A total of 360 experiments were conducted using 30 physical models of trapezoidal arc labyrinth

weirs with different middle cycles, with fixed parameters (total cycle width (W): 600 mm, thickness (T): 5 mm, number of cycles (N): 5), and with variable parameters (the ratio of the nose width of the side cycle to the middle cycle (w_2/w_1) as 0.42, 0.35, and 0.30, the ratio of cycle length to the middle nose width (B/w_1) as 1, 1.25, and 1.5) in three different arc modes. Each experiment was repeated three times, and in the case of close numbers of the two experiments, those numbers were recorded.

Findings

The results obtained from performing hydraulic tests on trapezoidal arc labyrinth weirs with different middle cycles with different ratios of noses' widths and cycles' lengths were discussed in the following three modes.

1. The effect of the weir nose width ratio on the discharge coefficient in the arc radius ratio of $R/w_1 = 5$ and different length ratios (B/w_1)
2. The effect of the weir nose width ratio on the discharge coefficient in the arc radius ratio of $R/w_1 = 10$ and different length ratios (B/w_1)
3. The effect of the weir nose width ratio on the discharge coefficient in the arc radius ratio of $R/w_1 = 15$ and different length ratios (B/w_1)

Conclusion

The results of this study, carried out on trapezoidal arc labyrinth weirs with different nose widths and cycle lengths, revealed that the weir discharge coefficient increased from 13% to 33% by reducing the nose width ratio of the weir cycles from $w_2/w_1 = 0.42$ to $w_2/w_1 = 0.30$. It should be noted that the weir discharge coefficient increased by reducing the ratio of the nose width of the weir cycles due to the reduction of the wall width ahead of the passing flow and the resulting decreased hydraulic drop. Also, the weir discharge coefficient increased between 2% to 30% by reducing the weir length ratio from $B/w_1 = 1.5$ to $B/w_1 = 1$. This increase occurred due to the

decreased effective weir length in smaller longitudinal ratios. Based on the study findings, the flow discharge coefficient decreased from 22% to 66% in all weirs with increasing the hydraulic load due to the expansion of local submergence. Also, the weir discharge coefficient decreases up to 33% with increasing the ratio of the nose width of the side cycles to the middle cycle of the weir (W_2/W_1).

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

There were no specific ethical considerations for this study. However, we followed the general principles of research ethics.

Funding

To conduct this study were used solely the laboratory equipment of the Khuzestan Water and Power Authority.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Jamal Feili
Methodology and data analysis: Jamal Feili
Supervision and final writing: Jamal Feili, Mohammad Heidarnejad, Alireza Masjedi, and Mehdi Asadi Lor

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه سرریزهای زیگزاکی قوسی ذوزنقه‌ای بر ضریب دبی جریان

ججمال فیلی^۱، محمد حیدر نژاد^۲، علیرضا مسجدی^۲، مهدی اسدی لور^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

مقدمه: سرریزهای زیگزاکی سازه‌هایی هستند که برای انتقال جریان‌های بزرگ در هدهای کم، طراحی می‌شوند. به عبارت دیگر، سرریزهای زیگزاکی نوع خاصی از سرریز غیرخطی بوده که به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و فنی جهت کنترل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربری آنها زمانی است که افزایش ظرفیت سرریز از طریق افزایش عرض سرریز به دلیل شرایط توپوگرافی میسر نمی‌باشد.

روش: این نوع سرریزها ظرفیت تخلیه دبی بسیار بالایی دارند. با توجه به افزایش طول موثر و به دنبال آن افزایش راندمان تخلیه در این گونه سرریزها می‌توان از آنها در سرریز سدها و یا سازه‌های تنظیم آب استفاده نمود. با توجه به اینکه تاکنون در خصوص بررسی ضریب دبی سرریز در حالت پلان قوسی مطالعات جامعی انجام نشده است لذا در این تحقیق مطالعاتی بر روی سرریزهای کنگره ای قوسی ذوزنقه‌ای با شعاع قوس و طول سیکل متفاوت انجام شد. آزمایشات متعددی با استفاده از روش مدل‌سازی فیزیکی جهت بررسی تاثیر نسبت عرض دماغه سیکل‌های کناری سرریز به عرض دماغه سیکل میانی (w_2/w_1) نسبت شعاع قوس به عرض سیکل میانی (R/w_1) و نسبت طول سیکل سرریز به عرض سیکل میانی (B/w_1) بر ضریب دبی سرریز، انجام گردید.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری: این آزمایشات نشان دادند با کاهش نسبت عرض دماغه سیکل‌های سرریز (w_2/w_1)، ضریب دبی روند افزایشی تا ۳۳٪ از خود نشان می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2022.26472.2276

واژه‌های کلیدی:

سرریز زیگزاکی، سرریز قوسی ذوزنقه‌ای، نسبت عرض دماغه

* نویسنده مسئول: محمد حیدر نژاد

نشانی: گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۱۳۹۱۹۵۳۳

پست الکترونیکی: mo_he3197@yahoo.com

مقدمه

تحقیق همچنین رفتار nappe را که بر عملکرد جریان تاثیر می‌گذارد بررسی کرده و ملاحظات طراحی هیدرولیک خاص را برای ویژگی‌های nappe ارائه دادند (۹). دلگادو و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاکی ذوزنقه‌ای را به وسیله نصب سازه‌های هیدرودینامیکی در قسمت دماغه‌های بالادست سرریز، مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایشات خود را در یک فلوم آزمایشگاهی با عرض ۳۰ سانتی‌متری انجام دادند، طول تاج سازه‌های هیدرودینامیکی مورد استفاده در این تحقیق، متغیر و برابر ۶، ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر بود که بر روی دماغه‌های بالادست سرریز زیگزاکی ذوزنقه‌ای سه سیکل نصب شدند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد سازه‌های مورد استفاده، به‌عنوان یک روش هیدرودینامیکی، بر روی ضریب و نیز میزان ظرفیت آبگذری سرریز، تاثیر مثبت داشته‌اند (۱۰). لازم به ذکر است که در بین سازه‌های هیدرودینامیکی مورد مطالعه، طول تاج سازه‌ای که برابر با ۱۸ سانتی‌متر بود، بیشترین راندمان هیدرولیکی را داشت. نکته حائز اهمیت این است که به هر حال روش ساخت این سازه‌ها پرهزینه بوده و این امر به عنوان یک عامل مهم، باید در هنگام طراحی مورد توجه قرار گیرد. بلزتر و همکاران به مطالعه سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاکی با در نظر گرفتن شرایط جریان آزاد و مستغرق روی سرریزها پرداختند. آنان در تحقیق خود از مدل فیزیکی سرریزهای زیگزاکی مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای و سرریزهای کلید پیانویی بهره گرفتند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که حساسیت به استغراق در سرریزهای زیگزاکی ذوزنقه‌ای و مستطیلی نسبت به کلید پیانویی و سرریز زیگزاکی مثلثی بیش‌تر است اما سرریز زیگزاکی مثلثی راندمان هیدرولیکی کم‌تری دارد (۳). بی‌جن‌خان و کوچک‌زاده به تعیین رابطه‌ای برای سرریزهای کنگره‌ای مثلثی در شرایط جریان آزاد و مستغرق پرداختند وضعیت جریان توسط یک سری داده تجربی که در این مطالعه جمع‌آوری شد مورد مطالعه قرار گرفت. آنان با استفاده از آنالیز ابعادی به روش باکینگهام نسبت به تعیین فرمول دبی سرریز مثلثی کنگره‌ای اقدام نمودند. در نهایت نیز با استفاده از روش گام به گام فرمول ضریب دبی صحت‌سنجی شد (۴). بی‌جن‌خان و فرو به تحقیق در خصوص یافتن فرمول‌ها و روابط مناسب جهت بدست آوردن منحنی‌های سرریز با استفاده از روش باکینگهام پرداختند. آنها مروری بر روی سرریز مستطیلی به عنوان یک سرریز با ساختار هیدرولیکی و کاربرد بسیار متداول داشتند و پارامترهای کلیدی موثر بر آن را تشریح نمودند و سپس شرایط جریان برای انواع دیگر سرریزها را نیز بررسی کردند و در نهایت روابط تعیین دبی ارائه شده و حدود کاربردی آنها را مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان داشتند روابط استخراجی قابل استفاده طراحان شبکه‌های آبیاری زهکشی جهت طراحی سرریزها می‌باشد (۵). منجزی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری جریان در سرریزهای زیگزاکی قوسی با پلان مثلثی پرداختند و نتایج حاصل از انجام آزمایشات ایشان نشان داد افزایش طول موثر سرریز در نتیجه قوسی کردن آن، بهبود راندمان سرریزهای قوسی خطی را تا ۲۱٪ و سرریز قوسی زیگزاکی تا حدود ۵۷٪ در پی داشته است (۱۶). امامی و همکاران به بررسی عددی پارامترهای هندسی موثر سرریز کنگره‌ای بر ضریب دبی جریان پرداختند. مقایسه نتایج نشان داد که در کلیه موارد

سرریزهای زیگزاکی (کنگره‌ای یا چندوجهی) به واسطه‌ی چندین تکرار در محور غیرمستقیم خود، شناخته می‌شوند. این نوع سرریزها از طریق افزایش طول مؤثر تاج در یک عرض مشخص، دبی بیشتری را به‌زای بار هیدرولیکی یکسان، در مقایسه با سرریزهای مستقیم از خود عبور می‌دهند. کارایی این نوع سرریز در بارهای هیدرولیکی کم قابل توجه می‌باشد، چرا که با افزایش ضخامت تیغه آب بر روی سرریز، تداخل لایه‌های جریان، کاهش ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت (۱۸). سرریزها نقش تعیین‌کننده‌ای در ایمنی سدها بر عهده دارند. کارشناسان برای به حداقل رساندن تلفات جانی و مالی ناشی از شکست سدها، مجبور به انتخاب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا، به‌عنوان سیلاب طراحی سرریزها هستند. اصولاً تخلیه سیلاب‌های بزرگ به دو صورت افزایش طول تاج سرریز و افزایش بار هیدرولیکی امکان‌پذیر است. در عمل، افزایش بار هیدرولیکی غالباً با درجه‌دار کردن سرریزها صورت می‌پذیرد که افزایش دبی در واحد طول سرریز را ممکن می‌سازد. اما باید توجه داشت که ایمنی این سرریزها در شرایط اضطراری قابل اعتماد نیست. از طرف دیگر افزایش ظرفیت سرریز از طریق افزایش عرض سرریز، همواره میسر نمی‌باشد، چرا که شرایط توپوگرافی محل احداث سرریز می‌تواند عاملی محدودکننده در انتخاب طول تاج آن باشد. در این میان یکی از راه‌های افزایش ظرفیت آبگذری سرریزها، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای (زیگزاکی یا چندوجهی) است. سرریز با پلان قوسی زیگزاکی یک راه حل مقرون به‌صرفه برای افزایش کارایی سدهای با محدودیت‌های زیاد، (به‌عنوان مثال فضای محدود، تخلیه سیل بالا) می‌باشد (۱۳). به‌جز مطالعات کورکستون و تولیس سایر تحقیقات انجام گرفته تنها معطوف به سرریزهای زیگزاکی با سیکل‌های خطی یا نهایتاً با دماغه قوسی می‌باشد (۷ و ۸).

پژوهش دیگری به منظور بهینه کردن و توسعه سرریزها، جریان روی سرریز ذوزنقه‌ای کنگره‌ای دو سیکل را با تغییر در زاویه دیواره جانبی از ۶ تا ۳۶ درجه مطالعه نموده و با ارزیابی آزمایشات در دامنه گسترده‌ای از مقادیر پارامترهای مهم به ارزیابی ویژگی‌های مختلف یک سرریز کنگره‌ای پرداخت (۱۴).

اژدری مقدم و جعفری ندوشن به بررسی مدل عددی سرریز زیگزاکی ذوزنقه‌ای با زوایا و طول‌های مختلف بدنه پرداخت، نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش زاویه دیواره سرریز در امتداد جریان (α)، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان ظرفیت آبگذری یا نسبت بدون‌بعد بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز (HO/P)، ضریب آبگذری برای همه زوایا (به دلیل افزایش تداخل تیغه و استغراق) کاهش می‌یابد. همچنین افزایش عرض دماغه به علت کاهش تداخل تیغه‌های جریان سبب افزایش ضریب آبگذری شده که این افزایش در زوایای کوچک به علت کاهش چشمگیر تداخل تیغه ریزشی جریان، قابل توجه است. برعکس زوایای بزرگ در آنها افزایش عرض دماغه تاثیر کمتری بر افزایش ضریب آبگذری جریان دارد (۱).

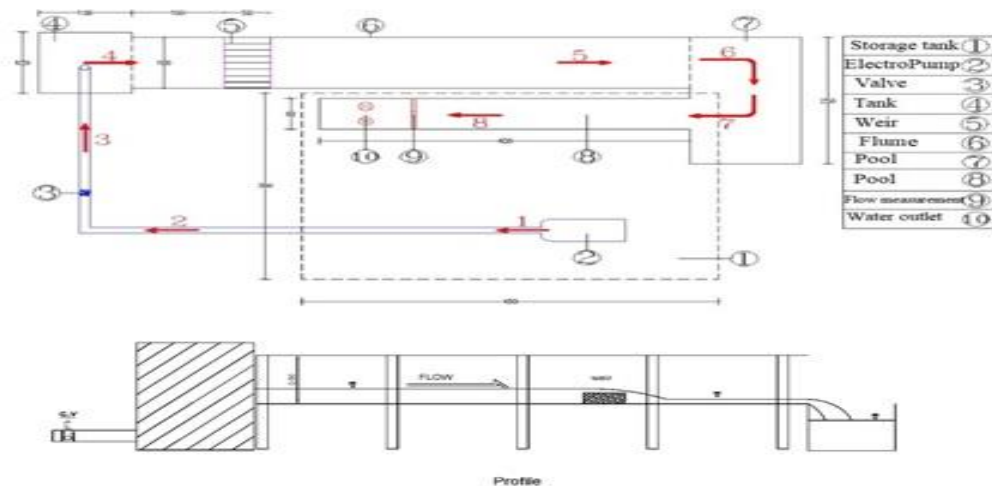
کروکستون و همکاران روشی جهت طراحی هیدرولیکی و آنالیز سرریزهای کنگره‌ای براساس نتایج تجربی مدل فیزیکی ارائه دادند و ضریب تخلیه را برای سرریزهای کنگره‌ای با شکل تاج ربع‌دایره و نیم‌دایره با زاویه‌های جانبی ۶ تا ۳۵ درجه ارائه نمودند. آنها در این

آزمایشگاهی نسبت عرض دماغه، شعاع قوس و طول سیکل به عرض سیکل میانی سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای و تاثیر آن بر ضریب دبی جریان می‌باشد که البته با توجه به مطالعات گذشته تاکنون در این خصوص بررسی جامعی انجام نشده است.

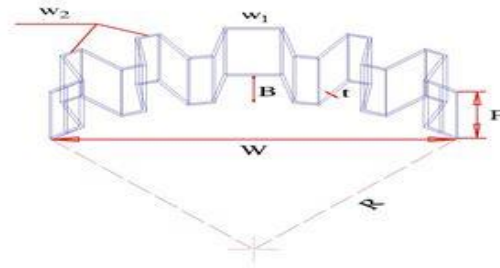
مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق بر روی یک فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان-ایران انجام گرفت. در این تحقیق مدل‌های آزمایشگاهی سرریز، درون یک فلوم مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر نصب گردیدند. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس پلکسی گلاس و جریان عبوری از روی سرریز به حالت آزاد بود. پلان و پروفیل فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ مشاهده می‌شود. کف فلوم به صورت بستر ثابت و بدون شیب و به صورت افقی می‌باشد. جریان آب ابتدا توسط پمپ از مخزن زمینی به سمت تانک هوایی (Head Tank) هدایت شده، سپس آب از طریق مجرای لوله‌ای که با یک عدد شیر فلکه کنترل می‌گردد به مخزن ورودی فلوم وارد شده و توسط ورق مشبک موجود آرام شده و بعد از آن به بدنه اصلی فلوم منتقل می‌گردد. جریان به آرامی و با دبی کم وارد کانال شده و به آرامی از روی سرریز که در بستر فلوم نصب شده است، عبور می‌نماید یا به عبارت دیگر با تغییر در میزان دبی شرایط هیدرولیکی گذرنده از سرریز بررسی و ثبت و در نهایت جریان آب پس از عبور از سرریز به انتهای فلوم رسیده و وارد مخزن انتهایی آن شده و از طریق این مخزن، به مخزن زیرزمینی انتقال و دوباره به چرخه باز می‌گردد. در شکل ۲ سرریز و فلوم آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

با زاویه مختلف دماغه، ضریب دبی جریان در محدوده رضایت بخش برای هد مؤثر نسبی کمتر از $0/3$ قرار دارد. ضریب دبی برای هد مؤثر نسبی بیش از $0/3$ به دلیل برخورد تیغه جریان کاهش می‌یابد. از سوی دیگر هرچه ارتفاع سرریز بیشتر باشد، ظرفیت آگذری بیشتر است. در نتیجه، سرریز کنگره‌ای در مقایسه با سرریز خطی عملکرد بهتری دارند (۱۱). عظیمی و سیدحکیم به بررسی هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی پرداختند، نتایج حاصل از آزمایشات تجربی نشان داد که در شرایط جریان مستغرق، سرریز کنگره‌ای مستطیلی نسبت به سرریز خطی لبه‌تیز دارای حساسیت بیشتری است (۲). غریبوند و همکاران به بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری بر روی سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای (دو سیکل) و کلید پیانویی (دو سیکل) با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان به کمک نرم افزار Flow3D و مقایسه آن با نتایج حاصل اطلاعات آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که داده‌های مدل عددی هماهنگی مناسبی با داده‌های مدل آزمایشگاهی داشتند. طبق نتایج بدست آمده، سرریزهای کلید پیانویی از ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریزهای زیگزاگی برخوردار بودند. مشاهده شد در سرریز کلید پیانویی، با افزایش ۵۰ درصدی در ارتفاع سرریز (P) از ۵ سانتی‌متر به ۷/۵ سانتی‌متر ضریب دبی حدود ۲۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین در سرریزهای زیگزاگی نیز با افزایش ۵۰ درصدی در ارتفاع سرریز از ۵ سانتی‌متر به ۷/۵ سانتی‌متر ضریب دبی حدود ۲۴٪ افزایش می‌یابد (۱۲). تولیس و همکاران به بررسی تاثیر مقیاس بر روی سرریزهای کنگره‌ای پرداختند آنان از مدل‌هایی با ارتفاع ۷/۶ سانتی‌متر و ۹/۱۴ سانتی‌متر برای ارزیابی ظرفیت آگیری استفاده نمودند آنها دریافتند که معیار اجتناب از تاثیرات اندازه مقیاس بستگی به اندازه مدل و میزان خطا قابل اغماض می‌باشد (۱۷). هدف از تحقیق حاضر بررسی



شکل ۱- پلان و پروفیل فلوم آزمایشگاهی در تحقیق حاضر



شکل ۲- سرریز و فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر



شکل ۳- نمایی از سرریز زیگزاکی قوسی ذوزنقه‌ای

با توجه به مطالب ذکر شده، جهت انجام آزمایشات، ابتدا جریان به خوبی در فلوم برقرار گردید که این مطلب برای جریانات کم که اغتشاش کمتری دارند و یا اغلب اصلاً اغتشاش ندارند به مدت ۱۵ دقیقه به طول انجامید، ولی برای جریانات زیاد که اغتشاش و تلاطم بیشتر داشته، مدت زمان آرام شدن جریان بیشتر شد. به طور کلی پس از برقراری جریان یکنواخت در فلوم، برداشت اطلاعات هیدرولیکی جریان انجام پذیرفت. تعداد آزمایش با استفاده از ۳۰ مدل فیزیکی از سرریزهای زیگزاکی قوسی ذوزنقه‌ای با سیکل میانی متفاوت با پارامترهای ثابتی هم‌چون عرض کل سیکل (W) ۶۰۰ میلی‌متر، ضخامت (T) ۵ میلی‌متر، تعداد سیکل (N) ۵ و با پارامترهای متغیری هم‌چون نسبت عرض دماغه سیکل کناری به سیکل میانی (w2/w1) ۰/۳۵، ۰/۴۲، ۰/۳۰ و نسبت طول سیکل به عرض دماغه میانی (B/w1) ۱ و ۱/۲۵ و ۱/۵ در سه حالت قوس مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هر آزمایش سه بار تکرار شده و در صورتی که اعداد دو آزمایش بهم نزدیک بوده، آن اعداد ثبت می‌شدند. شکل ۳ نمایی از سه مدل از سرریزهای مورد مطالعه در این تحقیق را که از جنس پلکسی گلاس بوده را نشان می‌دهد.

آنالیز ابعادی

معادله عمومی سرریزها بصورت رابطه ۱ برای سرریزهای زیگزاکی بکار گرفته شد. در این معادله، (Q) دبی عبوری از سرریز، (L) طول کل تاج سرریز، (g) شتاب ثقل و (Hd) بار هیدرولیکی کل، (Cd) ضریب جریان بدون بعد است که از طریق انجام آزمایش تعیین گردید (۱۸).

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gC_d} L H_d^{1.5} \quad (1)$$

پارامترهای موثر بر ضریب جریان در سرریزهای قوسی زیگزاکی را می‌توان به صورت رابطه ۲ عنوان کرد:

با توجه به این که در تحقیق حاضر، (P) ، (W) ، (N) ، (S) ، (T) ، (D) ، (λ) ثابت بودند، حذف شدند. همچنین با توجه به آشفته بودن جریان و این که عمق جریان به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شد از اثر عدد بی بعد رینولدز $(\mu P/\rho Q)$ که در محدوده بیش از ۸۵۰۰ می‌باشد و عدد وبر $(\rho Q/2\mu p8)$ که در محدوده بیش از ۲۹۰۰ بود چشم‌پوشی گردید. لازم به ذکر است که تاثیر شتاب ثقل $(gP5/Q2)$ که بیان کننده عدد فرود است در پارامتر بی بعد (Hd/P) در نظر گرفته شد. با ترکیب عرض دماغه سیکل میانی $(w1/P)$ و عرض دماغه سیکل‌های کناری $(w2/P)$ پارامتر بی‌بعد $(w2/w1)$ و با ترکیب طول سیکل سرریز (B/P) و عرض سیکل میانی $(w1/P)$ پارامتر بی‌بعد و متغیر $(B/w1)$ و همچنین با ترکیب نسبت شعاع قوس (R/P) و عرض دماغه سیکل‌های کناری $(W1/P)$ پارامتر بی بعد $(R/w1)$ حاصل شد. بدین ترتیب معادله ۴ به شکل زیر است.

$$Cd = F (Hd/P, w2/w1, B/w1, R/w1) \quad (4)$$

$$Cd = f(Q, R, L, B, Si, So, S, W1, W2, t, P, D, N, Hd, \lambda, g, \mu, \rho, \epsilon) \quad (2)$$

که در آن (Q) دبی جریان، (B) طول سیکل سرریز در جهت جریان، (R) شعاع قوس سرریز، (L) طول سرریز، (S) شیب کانال، $(W1)$ عرض دماغه سیکل میانی، $(W2)$ عرض دماغه سیکل‌های کناری، (W) عرض یک سیکل، (T) ضخامت دیواره سرریز، (P) ارتفاع سرریز در بالادست، (D) ارتفاع سرریز در پایین‌دست، (N) تعداد سیکل‌ها، (Hd) بار هیدرولیکی کل جریان بر روی بالادست سرریز، (λ) فاکتور شکل مقطع تاج، (g) شتاب ثقل، (σ, ρ, μ) به ترتیب لزجت دینامیکی، چگالی و کشش سطحی آب می‌باشند. برای تحلیل ابعادی، پارامترهای (P, ρ, Q) به‌عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شدند و پارامترهای بی‌بعد به‌صورت رابطه ۳ بدست آمدند.

$$Cd = f(B/P, t/P, D/P, R/p, W/P, N, \lambda, Hd/P, S, gP5/Q2, \mu P/\rho Q, W1/P, W2/P, \rho p8/Q2 \epsilon) \quad (3)$$

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای قوسی خطی

ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)	عرض یک سیکل (سانتی‌متر)	R/W	طول سرریز (سانتی‌متر)	ضخامت دیواره سرریز (میلی‌متر)	شعاع قوس سرریز (سانتی‌متر)	پلان سرریز	تعداد آزمایش
۱۰	۶۰	۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵	۶۱ ۶۶	۵	۴۵، ۹۰، ۱۳۵	قوسی خطی	۳۶

جدول ۲- مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز قوسی دوزنقه‌ای

تعداد آزمایش	پلان سرریز	شعاع قوس سرریز (سانتی‌متر)	تعداد سیکل‌ها	ضخامت دیواره سرریز (میلی‌متر)	ارتفاع سرریز (سانتی‌متر)	عرض یک سیکل (سانتی‌متر)	عرض دماغه سیکل میانی (سانتی‌متر)	عرض دماغه سیکل کناری (سانتی‌متر)	طول سیکل سرریز در جهت جریان (سانتی‌متر)
۳۳۴	قوسی دوزنقه‌ای	۹۰، ۱۳۵، ۴۵	۵	۵	۱۰، ۱۳۵، ۱۶۳	۶۰	۳/۴، ۴، ۲/۹	۹/۶	۱۲، ۱۴/۴، ۹/۶

نمودارها نشان می‌دهند با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و همچنین نسبت عرض دماغه، ضریب دبی کاهش می‌یابد. نمودار شکل ۴ الف نشان داد در نسبت طولی $B/w1=1$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w2/w1=0/3$ به $w2/w1=0/42$ ضریب دبی سرریز حدود ۱۴/۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w2/w1=0/35$ نسبت به $w2/w1=0/42$ حدود ۷/۶ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/6$ در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت. نمودار شکل ۴ ب نشان داد در نسبت طولی $B/w1=1/25$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w2/w1=0/3$ به $w2/w1=0/42$ ضریب دبی سرریز حدود ۱۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w2/w1=0/35$ نسبت به $w2/w1=0/42$ حدود ۶/۱ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد

در جداول ۱ و ۲، W عرض سیکل فلوم، P ارتفاع سرریز، R شعاع قوس سرریز، L طول موثر سرریز، T ضخامت سرریز، B طول سیکل سرریز، $w2$ عرض دماغه سیکل‌های کناری و $w1$ عرض دماغه سیکل میانی و N تعداد سیکل در سرریز می‌باشد.

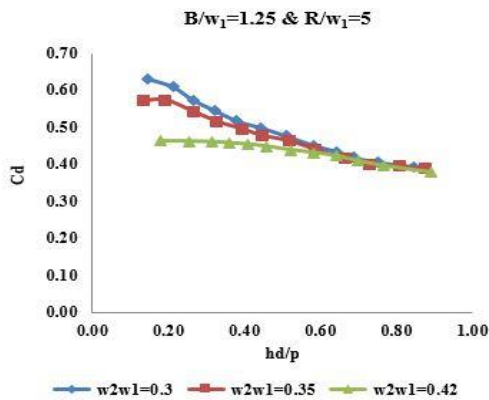
نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های هیدرولیکی سرریز زیگزاگی قوسی دوزنقه‌ای با سیکل میانی متفاوت با نسبت‌های عرض دماغه‌ها و طول سیکل‌های مختلف در سه حالت شعاع قوس ارائه شده و در ادامه به بررسی هر کدام از آنها به‌طور تفصیلی خواهیم پرداخت.

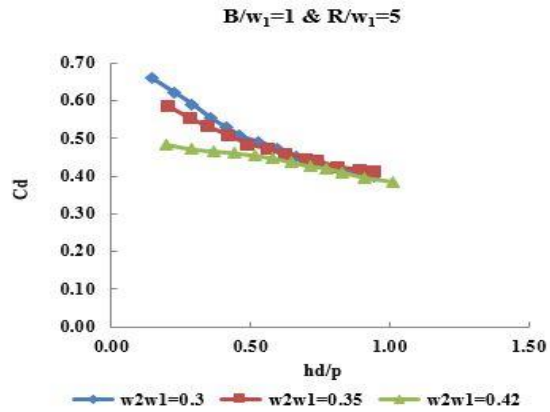
تاثیر نسبت عرض دماغه سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس $R/w1=5$ و نسبت‌های طولی مختلف $(B/w1)$
شکل ۴ تاثیر نسبت عرض دماغه بر ضریب دبی سرریز در نسبت شعاع قوس $R/w1=5$ در حالت‌های مختلف $B/w1$ را نشان می‌دهد. این

همچنین ضریب دبی در نسبت $w2/w1=0/35$ نسبت به $w2/w1=0/42$ حدود $6/6\%$ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/55$ ، در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت.

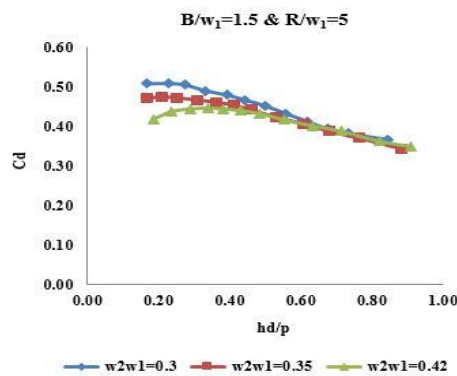
هیدرولیکی و در $hd/P > 0/55$ ، در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت. نمودار شکل ۴ ج نشان داد در نسبت طولی $B/w1=1/5$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w2/w1=0/3$ نسبت به $w2/w1=0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود 12% درصد کاهش می‌یابد.



(ب)



(الف)



(ج)

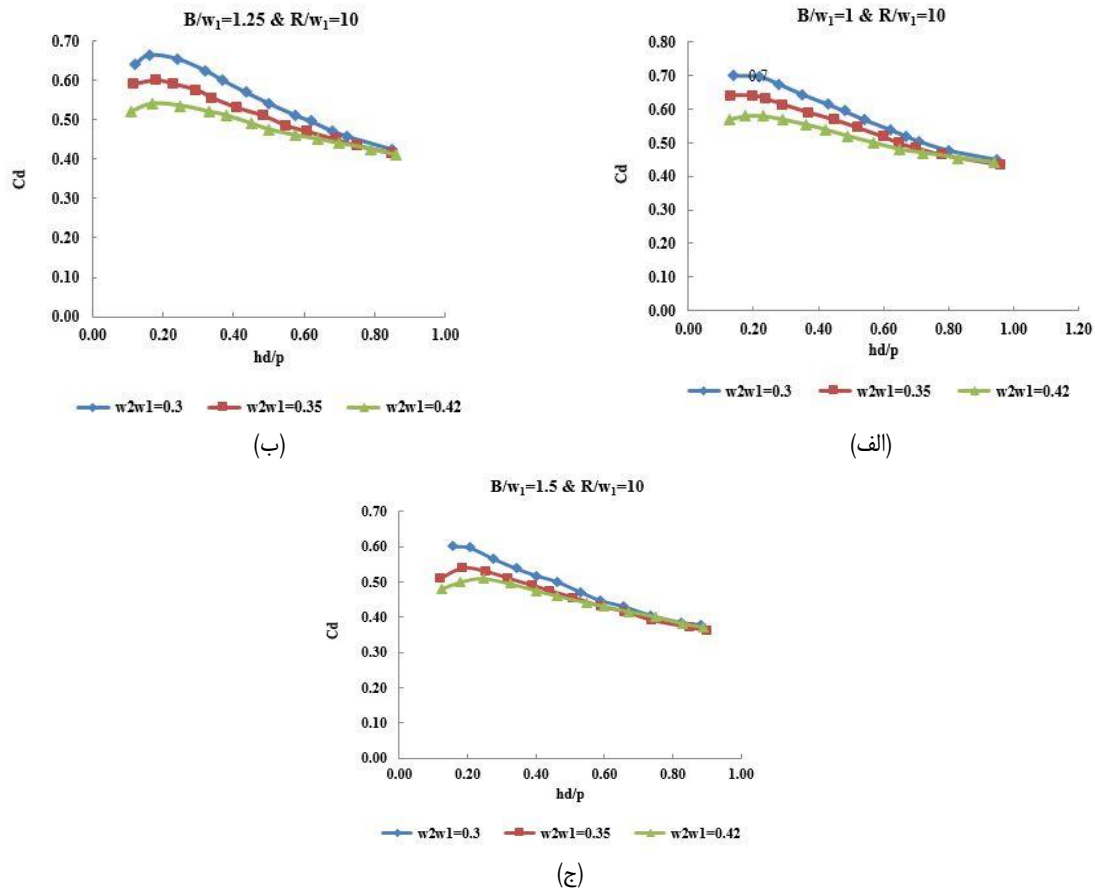
شکل ۴- تاثیر نسبت عرض دماغه سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس $R/w1=5$ و نسبت‌های طولی مختلف $(B/w1)$

دماغه $w2/w1=0/3$ نسبت به $w2/w1=0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود $18/8\%$ درصد کاهش نشان داد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w2/w1=0/35$ نسبت به $w2/w1=0/42$ حدود 10% درصد کاهش می‌یابد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/70$ ، در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت.

نمودار شکل ۵ ج نشان داد در نسبت طولی $B/w1=1/5$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w2/w1=0/3$ نسبت به $w2/w1=0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود $15/2\%$ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w2/w1=0/35$ نسبت به $w2/w1=0/42$ حدود $5/6\%$ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/55$ ، در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت.

تاثیر نسبت عرض دماغه سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس $R/w1=10$ و نسبت‌های طولی مختلف $(B/w1)$

شکل ۵ تاثیر نسبت عرض دماغه بر ضریب دبی سرریز در نسبت شعاع قوس $R/w1=10$ در حالت‌های مختلف $B/w1$ را نشان می‌دهد. نمودار شکل ۵ الف نشان داد در نسبت طولی $B/w1=1$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w2/w1=0/3$ به $w2/w1=0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود $17/1\%$ درصد کاهش نشان داد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w2/w1=0/35$ نسبت به $w2/w1=0/42$ حدود $9/5\%$ درصد کاهش می‌یابد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/65$ ، در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت. نمودار شکل ۵ ب نشان داد در نسبت طولی $B/w1=1/25$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت

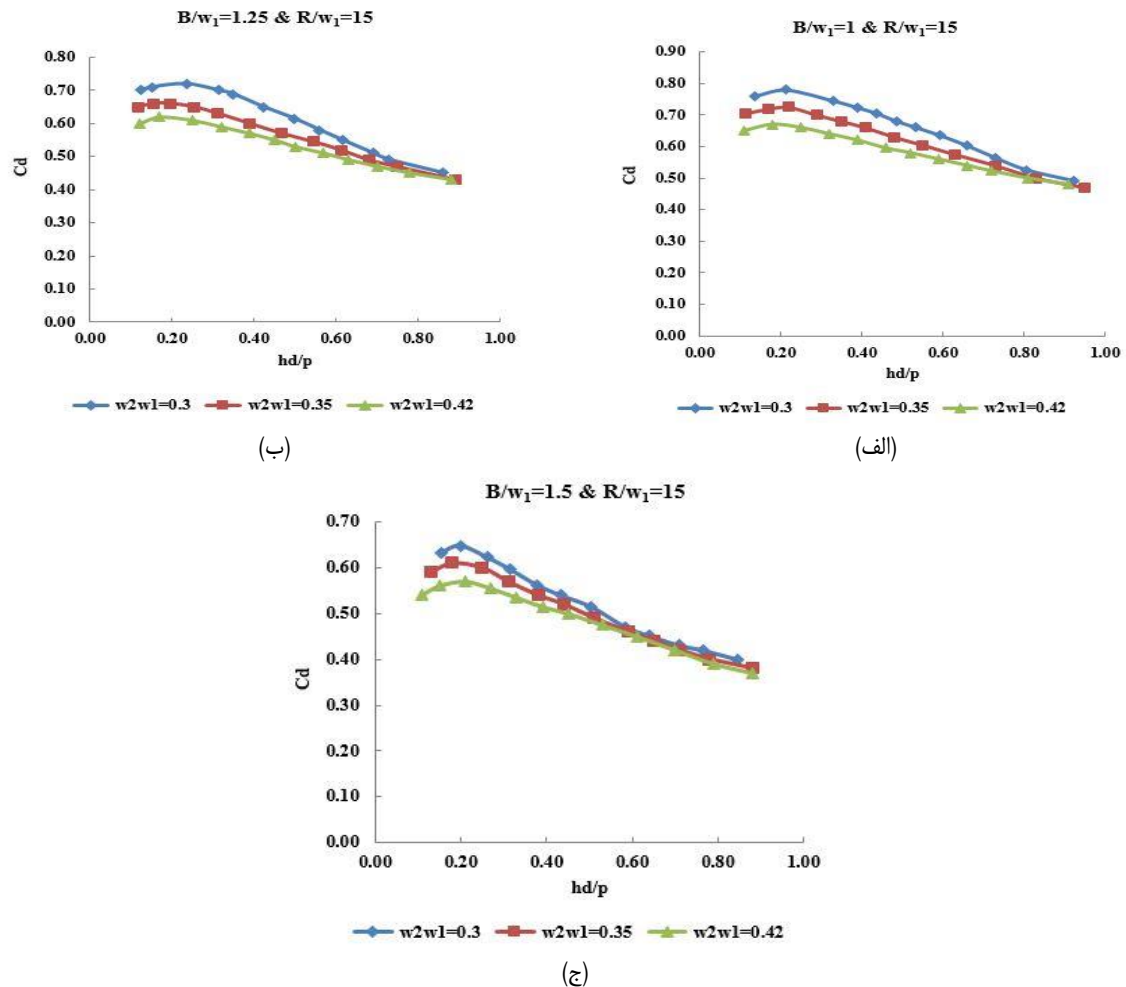


شکل ۵- تاثیر نسبت عرض دماغه سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس $R/w_1=10$ و نسبت‌های طولی مختلف (B/w_1)

در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت. نمودار شکل ۶ ب نشان داد در نسبت طولی $B/w_1=1/25$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w_2/w_1=0/3$ به $w_2/w_1=0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود ۲۶/۵ درصد کاهش نشان می‌یابد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w_2/w_1=0/35$ به $w_2/w_1=0/42$ حدود ۱۹/۳ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/80$ ، در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت.

تاثیر نسبت عرض دماغه سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس $R/w_1=15$ و نسبت‌های طولی مختلف (B/w_1)

شکل ۶ تاثیر نسبت عرض دماغه بر ضریب دبی سرریز در نسبت شعاع قوس $R/w_1=15$ در حالت‌های مختلف B/w_1 را نشان می‌دهد. نمودار شکل ۶ الف نشان داد در نسبت طولی $B/w_1=1$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w_2/w_1=0/3$ به $w_2/w_1=0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود ۲۶/۴ درصد کاهش نشان می‌یابد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w_2/w_1=0/35$ به $w_2/w_1=0/42$ حدود ۱۷/۳ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/80$ ،



شکل ۶- تاثیر نسبت عرض دماغه سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس $R/w_1 = 15$ و نسبت‌های طولی مختلف (B/w_1)

در حالت‌های مختلف نسبت عرض دماغه، ضریب دبی‌ها تفاوت معناداری با هم نخواهند داشت.

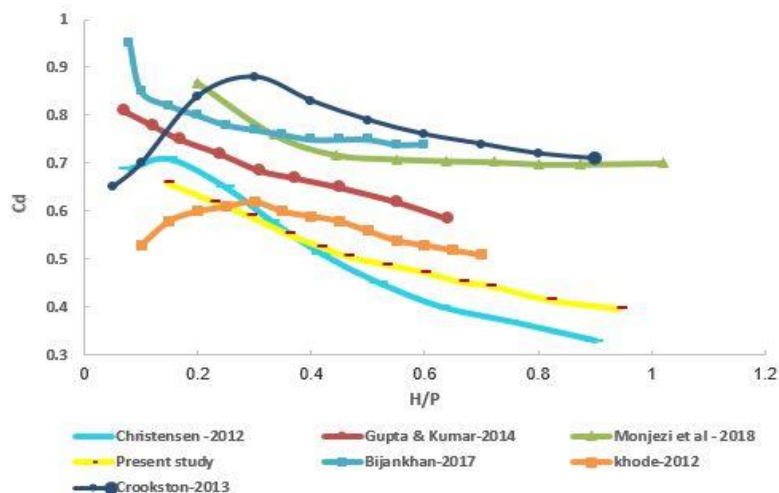
مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین

برخی مشخصات و ویژگی‌های تحقیقات انجام شده توسط محققین پیشین و تحقیق حاضر در جدول ۳ و شکل ۷ ارائه شده است.

نمودار شکل ۶ نشان داد در نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ با افزایش نسبت عرض دماغه از نسبت عرض دماغه $w_2/w_1 = 0/3$ نسبت به $w_2/w_1 = 0/42$ ، ضریب دبی سرریز حدود $12/4$ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ضریب دبی در نسبت $w_2/w_1 = 0/35$ نسبت به $w_2/w_1 = 0/42$ حدود $6/1$ درصد کاهش نشان داد. در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هد هیدرولیکی و در $hd/P > 0/45$.

جدول ۳- مقایسه ضریب دبی سرریز کنگره‌ای تحقیقات مختلف

ضریب دبی	دبی جریان (l/s)	محدوده Hd/P	تعداد سیکل	نوع سرریز کنگره‌ای	نویسنده یا محقق
0/58 - 0/82	2 - 10	0/07 - 0/64	1	مسطحی	کومار و همکاران (15)
0/7 - 0/87	2 - 20	0/19 - 1/02	4	قوسی مثلثی	منجری و همکاران (16)
0/32 - 0/72	88 - 433	0/1 - 0/9	5, 7, 10	قوسی ذوزنقه‌ای	کریستنسن و همکاران (6)
0/4 - 0/66	5 - 50	0/14 - 0/95	5	قوسی ذوزنقه‌ای	مطالعه حاضر
0/4 - 1	2/03 - 19/26	0/05 - 0/6	1	مثلثی	بی‌جی‌خان و همکاران (5و4)
0/27 - 0/73	3 - 22	0/1 - 0/7	2	ذوزنقه ای	خوده و همکاران (14)
0/2 - 0/81	1500	0/05 - 0/9	9	ذوزنقه ای	کروکستون و همکاران (9)



شکل ۷- نمودار مقایسه نتایج این تحقیق با محققین دیگر

سرریز، به دلیل کاهش عرض دیواره در مقابل جریان عبوری و کاهش افت هیدرولیکی ناشی از آن ضریب دبی سرریز افزایش یافت. همچنین با کاهش نسبت طولی سرریز از $B/w1=1/5$ به $B/w1=1$ ضریب دبی سرریز بین ۲ تا ۳۰٪ افزایش یافت که این افزایش به دلیل کاهش طول موثر سرریز در نسبت‌های طولی کوچکتر است. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش بار هیدرولیکی به دلیل گسترش استغراق موضعی، ضریب دبی جریان در تمامی سرریزها از ۲۲ تا ۶۶٪ کاهش یافت. همچنین با افزایش نسبت عرض دماغه سیکل‌های کناری به سیکل میانی سرریز ($W2/W1$) ضریب دبی تا ۳۳٪ کاهش می‌یابد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: جمال فیلی؛
روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: جمال فیلی؛
نظارت و نگارش نهایی: جمال فیلی، محمد حیدر نژاد، علیرضا مسجدی، مهدی اسدی لور.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Azhdari Moghadam, M., and Jafari Nadoushan, E. 2003. Hydraulic Design of

شکل ۷ نتایج تحقیق حاضر با تحقیق دیگر محققین را نشان می‌دهد. از لحاظ شکل سرریز در تحقیق کریستینسن همانند این تحقیق بر روی سرریز قوسی زیگزاگی دوزنقه انجام شده و دیگر محققین بر روی اشکال دیگر سرریز از قبیل سرریز قوسی مثلثی و زیگزاگی دوزنقه‌ای و مستطیلی تحقیق نموده‌اند. از این رو اختلاف و تفاوت موجود در نمودارهای مقایسه به دلیل شکل سرریز در تحقیق‌ها، متفاوت است (۶). بطور کلی مقایسه نتایج ایشان نشان می‌دهد که از لحاظ روند تغییرات Cd نسبت به Hd/P نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق گوپتا و همکاران مطابقت دارد بطور کلی روند و شکل تغییرات ضریب دبی نسبت به بار هیدرولیکی در این تحقیق با تحقیق کومار و همکاران که بر روی سرریز مستطیلی انجام شد مشابه است همانطور که در نمودار مشخص است نمودار ضریب دبی سرریز مستطیلی تحقیق گوپتا و همکاران بطور متوسط حدود ۲۳ درصد بیشتر از تحقیق حاضر شده است که به دلیل نوع متفاوت سرریز در آن تحقیق می‌باشد (۱۵). همچنین نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد که نتایج ارائه شده در این تحقیق از نظر مقدار ضریب دبی نیز با نتایج کریستینسن که بر روی سرریز قوسی زیگزاگی دوزنقه‌ای نزدیک است. بطوریکه در نسبت‌های بار هیدرولیکی کمتر از $0/3$ نمودار کریستینسن و همکاران حدود $5/7$ درصد بیشتر از نمودار تحقیق حاضر است و در نسبت $0/3$ مقادیر ضریب دبی در هر دو تحقیق برابر و برای نسبت‌های بیشتر از $0/3$ نتایج تحقیق حاضر حدود ۱۰ درصد بیشتر از نتایج تحقیق کریستینسن بود (۶).

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق که بر روی سرریزهای زیگزاگی قوسی دوزنقه‌ای شکل با عرض دماغه و طول سیکل متفاوت انجام شد نشان داد با کاهش نسبت عرض دماغه سیکل‌های سرریز از $w2/w1=0/42$ به $w2/w1=0/30$ ضریب دبی سرریز بین ۱۳ تا ۳۳ درصد افزایش یافت. لازم به ذکر است با کاهش نسبت عرض دماغه سیکل‌های

a Trapezoidal Labyrinth Spillway Using Computational Hydrodynamics. Civil Engineering of Journal, (Tarbiat

- Modarres University, Tehran, Iran), 13 (3): 123-135.
2. Azimi, A.H., and Seyed Hakim, S. 2018. Hydraulics of flow over rectangular labyrinth weirs. Irrigation Science Springer, 37 (12): [https://doi/10.1007/s00271-018-0616-6].
 3. Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M., and Thorenz, C. 2017. Piano Key and Labyrinth Weirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. PP. 167-174. In: Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 – Erpicum et al. (Eds) © 2017 Taylor and Francis Group, London. [https://hdl.handle.net/20.500.11970/105138].
 4. Bijankhan, M., and Ferro, V. 2017. Dimensional analysis and stage-discharge relationship for weirs: A review. Journal of Agricultural Engineering 48(1): 1–11. [https://doi.org/10.4081/jae.2017.575].
 5. Bijankhan, M., and Kouchakzadeh, S. 2017. Unified discharge coefficient formula for free and submerged triangular labyrinth weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 57: 46-56. [https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASI NST.2017.08.007].
 6. Christensen, N.A. 2012. Flow Characteristics of Arced Labyrinth Weirs. MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah.
 7. Crookston, B.M., and Tullis, B.P. 2012a . Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138 (8): 757-767. [https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000466].
 8. Crookston, B.M., and Tullis, B.P. 2012b. Arced labyrinth weirs. Journal of Hydraulic Engineering, 138(6): 555-562. [https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000553].
 9. Crookston, B.M., and Tullis, B.P. 2013. Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139(5): 363–370. [https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000558].
 10. Delgado, F., Mann, P., Toneatti, P., and Camino, F. 2015. Discharge Coefficients Spillways Labyrinth Implementing Hydrodynamic Devices in the upstream side. Proceedings 36th IAHR World Congress. Hague, Netherlands.
 11. Emami, S., Arvanaghi, H., and Parsa, J. 2018. Numerical Investigation of Geometric Parameters Effect of the Labyrinth Weir on the Discharge Coefficient. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 6-1: 1-9. [https://doi.org.10.22075/JRCE.2017.11428.1188].
 12. Gharibvand, R., Heidarnejad, M., Kashkoli, H.A., Hasounizadeh, H., and Kamanbedast, A.A. 2018. Numerical analysis of flow hydraulic in trapezoidal labyrinths and piano key weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 64: 64-70. [In Persian].
 13. Ghodsian, D., and Amanian, N. 2001. Discharge Coefficient of Semicircular Labyrinth Weirs. Amirkabir. Journal of Civil Engineering, 13 (49): 76-83.
 14. Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D., and Ingle, R.V. 2012. Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(6): 548–552. [https://doi.org.10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000336].
 15. Kumar, S., Gupta, K.K., and Ahmad, Z. 2014. An approach to analyze the flow characteristics of sharp-crested triangular planform contracted weirs. World Applied Sciences Journal, 32(7): 13111317. [https://doi.org.10.5829/idos i.wasj.2014.32.07.2026].
 16. Monjezi, R., Heidarnejad, M., Masjedi, A.R., Purmohammadi, M.H., Kamanbedast, A.A. 2018. Laboratory Investigation of the Discharge Coefficient of Flow in Arced Labyrinth Weirs with Triangular Plans. Flow Measurement and Instrumentation, 64: 64-70. [https://doi.org. 10.1016 / j. flowmeasinst. 2018.10.011].
 17. Tullis, B.P., Young, N. and Crookston, B. 2018. Size-Scale Effects of Labyrinth Weir Hydraulics. Proceedings of 7th International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany.
 18. Tullis, P., Amanian, N., and Waldron, D. 1995. Design of labyrinth weir spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 121(3): 247–255.

[[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:3\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247))]