Journal of Hydraulics and Water Science, Vol.34, NO.2, Summer 2024, pp. 1-15.
DOI: 10.22034/hws.2024.2508 ISSN: 3092-6114 https:// https://hws.tabrizu.ac.ir

Research Article

Experimental Study of Hydraulic Properties of Flow over Vertical Shaft Spillway with Different Shape of Inlet

S. Talebi[1], Gh. Mhatabi[2*], M. Karbasi[3], M. Akbari[4]

Received: December 17, 2022 Accepted: June 13, 2023
Revised: June 2, 2023 Published online: June 21, 2024

1- M.Sc. Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
2- Assoc. Prof., Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
3- Assoc. Professor, Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
4- Ph.D of Hydraulic Structures, Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran
* Corresponding Author, Email: ghmahtabi@gmail.com

Abstract

Background and Objectives

Spillway as a hydraulic structure is used to controlled release of water from a dam or levee downstream. One of the types of spillway used in dams is vertical shaft spillway or the same as Morning Glory spillway. One of the methods to increase the flow rate and reduce the occurrence of vortex currents in the spillway is to modify the inlet shape of the spillways. In recent years, spillways with Daisy, Piano key and Zigzag inlets have been proposed known as spiral spillways. A review of the results of previous research shows that the common goal in the study of vertical shaft spillways is to pass the flood flows with the highest possible discharge and the lowest water level and reducing the destructive effects of vortex currents. In previous researches, issues such as the effect of the inlet type of vertical shaft spillway and geometric parameters of the structure on the discharge coefficient and conditions of vortex occurrence and hydraulic of vertical shaft spillway flows have been studied. In this research new shapes of vertical shaft inlet in form of Bow-tied and Spindle spillways were introduced and discharge coefficient of these spillways was investigated using a series of experiments and the results compared with common shapes of vertical shaft inlet in form of the Daisy, Morning Glory, Square, Hexagonal and Octagonal spillways.

Methodology

In this research, the effect of different input shapes on the flow hydraulics of vertical shaft spillway was studied under the free surface flow. For this propose, models of Bow tie spillway with middle and without arches, Spindle, Daisy, Hexagonal, Octagonal and Square with the same total length were used and discharge coefficient of the models were calculated and the results were compared with a Morning Glory spillway. The experiments of this research were performed in a metal cube tank with 1.5 m length, 1 m height and 1 m width with transparent Plexiglas side walls in the hydraulic laboratory of Department of Water Engineering at Zanjan University. In this research, by preparing eight models of the studied spillways with a total length of 60 cm and considering the hydraulic conditions (H/D), 63 experiments were run to investigate the effect of the geometric shape of the spillway on the discharge coefficient.

Findings

The results showed that the Bow-tie without middle arch model cause to uniform the flow regime and has a significant effect on reducing water head and increase the discharge through the shaft, so

©: The Author(S)
Publisher: University of Tabriz

that Bow-tie without arch model has a higher discharge coefficient than other models. It has better hydraulic performance (10%) compared to Morning Glory spillway and also has lower geometric area (30%). Comparison of the Spindle, Daisy, Square, Hexagonal and Octagonal models with the Morning Glory spillway shows that in low and high discharge, the Daisy and square models have better performance, respectively (3and 5%, respectively). Also, the Bow-tie with middle arch model did not have a significant effect on the discharge coefficient and its hydraulic performance decreased in compared to the Morning Glory spillway (-2%), which could be due to low internal surface and interference of downstream flows.

Conclusion

Comparison of the hydraulic performance of Bow-tie and Spindle models with the other shapes shows that the model of Bow-tie without arch has the highest hydraulic performance and lower geometric area. In the construction of reservoir dams, especially earthen dams, the major part of the executive cost is related to the implementation of concrete structures of emergency spillway. In this situation, by choosing models with optimal geometry, a suitable hydraulic performance can be also achieved.

Keywords: Bow-Tie spillway, Daisy, Discharge coefficient, Morning Glory, Vertical shaft

نشریه دانش آب وهیدرولیک/ جلد ۳۴ شماره ۲ صفحه‌های ۱ تا ۱۵/ سال ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای مدور قائم با شکل‌های ورودی مختلف

سمیرا طالبی[۱]، قربان مهتابی[۲*]، مسعود کرباسی[۳]، مسعود اکبری[٤]

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰۹/۲٦ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ ویرایش:۱٤۰۲/۰۳/۱۲ تاریخ انتشار انلاین :۱٤۰۳/۰٤/۰۱

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

٤- دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghmahtabi@gmail.com

چکیده

در این تحقیق به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکل‌های ورودی مختلف بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم پرداخته شد. بدین منظور هندسه‌های پاپیونی با کمان میانی و بدون کمان، دوکی، گلبرگی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و مربعی با طول کلی سرریز برابر مورد استفاده و در محدوده جریان آزاد، ضریب دبی جریان در این نوع سرریزها محاسبه و نتایج حاصل با یک سرریز نیلوفری مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل پاپیونی بدون کمان میانی سبب یکنواخت کردن رژیم جریان ریزشی شده و تاثیر به سزایی در کاهش هد آب و افزایش دبی عبوری از سرریز را دارد، به طوری‌که دارای ضریب دبی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها بوده و در مقایسه با سرریز نیلوفری نیز دارای عملکرد هیدرولیکی بهتر (۱۰ درصد) و همچنین دارای مساحت هندسی کمتر (۳۱ درصد) می‌باشد. مقایسه مدل‌های دوکی، گلبرگی، مربعی، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی با مدل نیلوفری نشان داد که در دبی‌های کمتر مدل گلبرگی و در دبی‌های بیشتر مدل مربعی عملکرد بهتری دارند (به ترتیب ۳ و ٥ درصد). همچنین مدل پاپیونی با کمان میانی، برروی ضریب دبی جریان اثر محسوسی نداشت و عملکرد هیدرولیکی آن نسبت به سرریز نیلوفری کاهش یافت (۲- درصد) که علت آن می‌تواند سطح داخلی کم و تداخل جریان‌های ریزشی باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز پاپیونی، شفت قائم، ضریب دبی، گلبرگی، نیلوفری

مقدمه

سرریزهای اضطراری از سازه‌های هیدرولیکی سدها هستند که امکان تخلیه آب اضافی و سیلاب را از مخزن سد به روخانه پایین دست آن فراهم می‌آورند. انتخاب سرریز مناسب به منظور ایجاد حاشیه اطمینان بیشتر برای تخلیه آب دریاچه در مواقعی که احتمال سرریز آب روی تاج سد وجود دارد، از اهمیت زیادی برخوردار است (نواک و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از انواع سرریزهای مورد استفاده در سدها، سرریزهای مدور قائم با شکل ورودی نیلوفری یا لاله‌ای است. در سدهای کم عرض به لحاظ محدودیت فضا و همچنین حفظ ایمنی سد، این نوع سرریز جایگزین سرریزهای خطی شده و در خارج از بدنه سد ساخته می‌شوند (کولمن و همکاران ۲۰۰٤).

سرریزهای نیلوفری متشکل از یک گالری قائم با دهانه شیپوری شکل است که در ادامه به تونل انحراف متصل می‌گردد. هیدرولیک جریان در سرریزهای نیلوفری به سه دسته آزاد، روزنه‌ای و تحت‌فشار تقسیم‌بندی می‌شود. برای جریان‌های با ارتفاع کم آب ($H_0/R\leq0.4$، H_0 ارتفاع آب روی تاج و R شعاع تاج)، جریان آب عبوری از طریق تاج سرریز کنترل می‌شود و شفت قائم به صورت آزاد عمل می‌نماید. با افزایش ارتفاع آب ($H_0/R>0.4$)، عملکرد آن از حالت آزاد به حالت صورت روزنه‌ای و در نهایت با افزایش بیشتر ارتفاع آب، جریان به صورت تحت فشار عمل می‌کند (بی‌نام ۱۹۸۷). در عملکرد بهینه سرریزها، نوسانات کم سطح آب، تخلیه سریع سیلاب مازاد و پایداری سازه سد از نکات کلیدی می‌باشد. یکی از معایب هیدرولیکی این نوع سرریزها، تشکیل جریان‌های گردابی است. یکی از روش‌های افزایش آبگذری این سرریزها و کنترل یا کاهش قدرت جریان‌های گردابی، اصلاح شکل دهانه ورودی سرریز می‌باشد. در سال‌های اخیر برای این منظور سرریز با ورودی گلبرگی، کلیدپیانویی و زیگزاگی پیشنهاد شده است و به نام سرریزهای مارپیچی معروف هستند که باعث بهبود هیدرولیک جریان عبوری از سرریز مدور قائم می‌شود و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه نگهداری کمتری دارند (اسلیس ۲۰۱۱). تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه ظرفیت گذردهی جریان آب و خصوصیات جریان هیدرولیکی از جمله ضریب دبی در انواع سرریزها توسط محققین صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

باقری و همکاران (۲۰۱۰) به‌وسیله مدل فیزیکی به بررسی تاثیر تغییر هندسه تاج سرریز روی ضریب تخلیه سرریز نیلوفری پرداختند. آنها با انجام آزمایش‌های مختلف روی سرریزهایی با مقطع سه، پنج و هفت وجهی دریافتند که چند وجهی کردن تاج سرریز باعث افزایش ضریب تخلیه سرریز می‌شود و بیشترین افزایش ضریب دبی در حالت تاج سه‌وجهی حاصل شد. تیموری (۲۰۱۵) به بررسی ویژگی‌های جریان گردابی در سرریزهای مدور قائم با ورودی گلبرگی شکل با هندسه‌های مختلف پرداخت .آزمایش‌ها شامل هر سه رژیم آزاد، روزنه‌ای و تحت فشار بود و بیش از ۳۸۸ آزمایش انجام شد. برطبق نتایج، ورودی گلبرگی شکل نقش گرداب‌شکن و یک سرریز تاج طولانی را همزمان ایفا می‌کند و باعث تأخیر در شکل‌گیری جریان گردابی می‌شود و بهینه‌ترین تعداد پره‌ها ۳ عدد گزارش شد. مجدمی و کبیری سامانی (۲۰۱٦) تاثیر ورودی گلبرگی شکل را بر ظرفیت تخلیه سرریز مدور قائم بررسی نمودند و دریافتند که سرریز گلبرگی با ایجاد تاخیر در شکل‌گیری جریان گردابی، باعث می‌شود که سرریز دیرتر به عملکرد روزنه‌ای برسد. نتایج آنها نشان داد که در نسبت طول سرریز به قطر شفت برابر با ۳/۷۵ و نسبت ارتفاع سرریز به قطر شفت معادل یک بیشترین ضریب دبی جریان در حالت آزاد به دست می‌آید. افزایش تعداد پره‌های گلبرگی از دو به سه پره تاثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش ضریب دبی عبوری از

سرریز مدور قائم دارد. لشکرآرا و شیخی (۲۰۱۷) با معرفی سرریز تاج دندانه‌ای به مطالعه ضریب تخلیه آن تحت شرایط جریان آزاد پرداختند. چهار نوع سرریز با طول تاج دو سیکلی، چهار، شش و هشت سیکلی و با شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی مختلف بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش شیب کف کلیدها، ضریب دبی تخلیه جریان افزایش می‌یابد، همچنین افزایش تعداد سیکل در بارهای آبی کم منجر به افزایش میزان ضریب تخلیه جریان می‌شود. در بارهای آبی زیاد خاصیت گرداب شکنی سرریزهای با تعداد سیکل کمتر قابل توجه می‌باشد.

روزگار و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر هندسه پلان ورودی سرریز نیلوفری-زیگزاگی در شرایط با و بدون تیغه گرداب‌شکن بر ضریب دبی را بررسی نمودند. استفاده از سرریز نیلوفری مربعی و دایره‌ای در شرایط بدون استفاده از حالت زیگزاگ در افزایش ضریب دبی نسبت به حالتی که از این زیگزاگ‌ها استفاده می‌شود، مؤثرتر است. همچنین استفاده از سرریز مربعی در شرایط بدون استفاده از تیغه‌های گرداب شکن نسبت به سرریز دایره‌ای در همین شرایط، باعث افزایش ضریب دبی می‌شود. رستمی و همکاران (۲۰۱۶) و زرات و همکاران (۲۰۱۷) اثر پارامترهای زیگزاگ را در سرریزها بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد که با افزایش تعداد سیکل ضریب دبی افزایش می‌یابد. شمسی و کبیری سامانی (۲۰۱۷) با ساخت مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری تأثیر هندسه ورودی کلید پیانویی در تاج سرریز را بر آستانه استغراق و ضریب دبی مورد ارزیابی قرار دادند و مطابق نتایج، ورودی کلید پیانویی را در کاهش قدرت گرداب و افزایش ضریب دبی عبوری سرریزهای نیلوفری مناسب معرفی نمودند. شیرعلی و همکاران (۲۰۱۷) با ارزیابی اثر زیگزاگ کردن روی تخلیه دبی سرریزهای اظهار داشتند با تغییر شکل مقطع از دایره‌ای به مربعی در دبی و نقاط مشخص، فشار بیشتر شده و خطر کاویتاسیون کمتر می‌شود.

کبیری سامانی و کیهان‌پور (۲۰۲۰) به بررسی ویژگی‌های هیدرولیک جریان چرخشی در شفت قائم با ورودی مارگریت شکل پرداختند. آنها با آزمایش روی سرریزهای دو، چهار و پنج وجهی گلبرگی شکل مشاهده کردند که ورودی سه وجهی بهترین کارایی را داشت. دیلالی و همکاران (۲۰۲۱) با جایگزینی مقطع نیلوفری با یک مقطع ۱۲ضلعی نشان دادند که ورودی مقطع ۱۲ضلعی سرریز، ضریب تخلیه جریان را حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد بدون اینکه سرریز در معرض خطر کاویتاسیون قرار گیرد. نصیری و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌سازی عددی، میدان جریان را در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی کلیدپیانویی را مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از سرریز مدور قائم تاثیر چشم‌گیری بر کاهش قدرت جرین گردابی و افزایش ضریب دبی جریان دارد.

مروری بر نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که هدف مشترک در مطالعه سرریزهای مدور قائم، تخلیه جریان‌های سیلابی با بیشترین دبی ممکن و کمترین تراز سطح آب و تقلیل اثرات جریان گردابی می‌باشد و تاکنون مطالعات متعددی پیرامون این موضوع‌ها انجام گرفته است. البته تفاوت پژوهش در بیشتر این تحقیقات پرداختن به موضوعاتی از قبیل تاثیر نوع ورودی سرریز مدور قائم و پارامترهای هندسی سازه برروی ضریب دبی، بررسی شرایط وقوع گرداب و هیدرولیک جریان می‌باشد. در این تحقیق اشکال متفاوتی از دهانه ورودی سرریز مدور قائم شامل شکل پاپیونی با کمان میانی و بدون کمان، دوکی، گلبرگی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و مربعی درنظرگرفته شده و با انجام یک سری آزمایش‌ها، خصوصیات جریان در این نوع سرریزها مطالعه گردید. در آزمایش‌ها تاثیر شکل هندسه سرریز تحت ترازهای سطح آب بر روی ضریب دبی بررسی گردید و نتایج حاصل نسبت به سرریز نیلوفری ساده با طول کلی یکسان مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی جریان و پارامترهای هندسی سرریزها و شفت قائم، رابطه دبی عبوری (Q) از سرریزها را می‌توان به صورت رابطه ۱ نوشت:

$$Q= f_1 (D, H, g, \rho, \mu, \sigma, L, \theta) \quad [1]$$

که در این رابطه، Q دبی عبوری از سرریز (متر مکعب بر ثانیه)، D قطر شفت (متر)، H ارتفاع آب روی سرریز (متر)، g شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)، ρ جرم مخصوص سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)، μ لزوجت دینامیک (کیلوگرم بر متر–ثانیه)، σ کشش سطحی (نیوتون بر متر)، L طول کلی سرریز (متر) و θ زاویه مابین دو ضلع سرریزهای پاپیونی، دوکی، شش و یا هشت‌ضلعی (درجه) است. با در نظر گرفتن پارامترهای تکراری (Q، H و ρ) و با به‌کارگیری آنالیز ابعادی و به‌دست آوردن پارامترهای بی‌بعد، می‌توان نوشت:

$$f_2 \left(\frac{Q}{H^{5/2} g^{1/2}}, \frac{D}{H}, \frac{Q}{\upsilon H}, \frac{\rho Q^2}{\sigma H^3}, \frac{L}{H}, \theta\right) = 0 \quad [2]$$

در پارامتر $\frac{Q}{H^{5/2} g^{1/2}}$ با اعمال پارامتر بی‌بعد $\frac{H}{L}$ می‌توان رابطه ۲ را به صورت زیر نوشت:

$$f_3 \left(\frac{Q}{L H^{3/2} g^{1/2}}, \frac{H}{D}, R_e, W_e, \theta\right) = 0 \quad [3]$$

که در این رابطه، R_e عدد رینولدز و W_e عدد وبر می‌باشد. در آزمایش‌های تحقیق حاضر شرایط جریان طوری تنظیم گردید که اثر عدد وبر ($W_e > 100$) و عدد رینولدز ($R_e > 10^4$) بر روی دبی عبوری (انوار و همکاران ۱۹۸، جین و همکاران ۱۹۷۸) حذف شود. در رابطه ۳ با حذف پارامترهای بی‌بعد ثابت و بی‌اثر می‌توان نوشت:

$$\frac{Q}{L H^{3/2} g^{1/2}} = f_4 \left(\frac{H}{D}\right) \quad [4]$$

و یا

$$Q = L H^{3/2} g^{1/2} \times f_4 \left(\frac{H}{D}\right) \quad [5]$$

با مقایسه فرم رابطه ۵ با رابطه عمومی سرریز تحت شرایط کنترل در تاج ($Q = C_d L H^{3/2}$)، می‌توان رابطه ضریب دبی در سرریزهای مورد مطالعه را به صورت رابطه ٦ نوشت:

$$C_d = f_5 \left(\frac{H}{D}, \text{Shape}\right) \quad [6]$$

در این تحقیق با تهیه ۸ شکل هندسی (Shape) مختلف سرریز با طول کلی برابر ٦٠ سانتی‌متر و با درنظر گرفتن شرایط هیدرولیکی جریان (H/D)، تعداد ٦٣ آزمایش به منظور بررسی اثر شکل هندسی سرریز بر روی ضریب دبی انجام شد. به منظور محاسبه مقدار ضریب دبی در هر آزمایش از رابطه سرریز تحت شرایط کنترل در تاج ($Q = C_d L H^{3/2}$) استفاده شد (باقری و همکاران ۲۰۱۰).

شرایط آزمایشگاهی

در این تحقیق آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان در یک مخزن مکعبی فلزی با دیواره‌های کناری از جنس پلکسی‌گلس شفاف به طول ۱/۵متر، ارتفاع و عرض ۱ متر انجام شد (شکل ۱). آب از یک منبع رو زمینی به وسیله یک پمپ ۱۱ کیلووات وارد مخزن اصلی می‌شد. در بخش ورودی آب به مخزن، برای آرام و یکنواخت کردن جریان از صفحه‌های مشبک متوالی استفاده شد. جریان آب قبل از ورود به مخزن به وسیله یک شیرفلکه تنظیم و سپس توسط یک کنتور حجمی با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌گردید و تخلیه جریان مخزن توسط یک شفت قائم (به عنوان سرریز مدور) به قطر ۷/٦ سانتی‌متر به منبع رو زمینی صورت گرفت. برای اندازه‌گیری عمق جریان در مخزن (ارتفاع آب بر روی سرریز، H) از یک عمق‌سنج نقطه‌ای استفاده شد. مقادیر ارتفاع شفت قائم از کف مخزن (b) و قطر شفت قائم (D) به ترتیب برابر ۲۰ و ۷/٦ سانتی‌متر بود.

مشخصات مدل سرریزها

به منظور ساخت مدل سرریزها، شابلون کاغذی هر مدل توسط نرم افزار اتوکد تهیه گردید. برای ساخت آنها از ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/٦ میلی‌متر استفاده شد. پس از برش‌کاری ورق‌ها، هر مدل سرریز بر روی شفت قائم نصب و آب‌بندی کامل محل اتصال و لبه‌های داخلی آنها انجام می‌شد. در این تحقیق هشت سری سرریز متفاوت شامل پاپیونی (با کمان میانی و بدون کمان میانی)، دوکی، گلبرگی متقارن، مربعی، هشت‌ضلعی، شش‌ضلعی و نیلوفری مورد بررسی قرار گرفت.

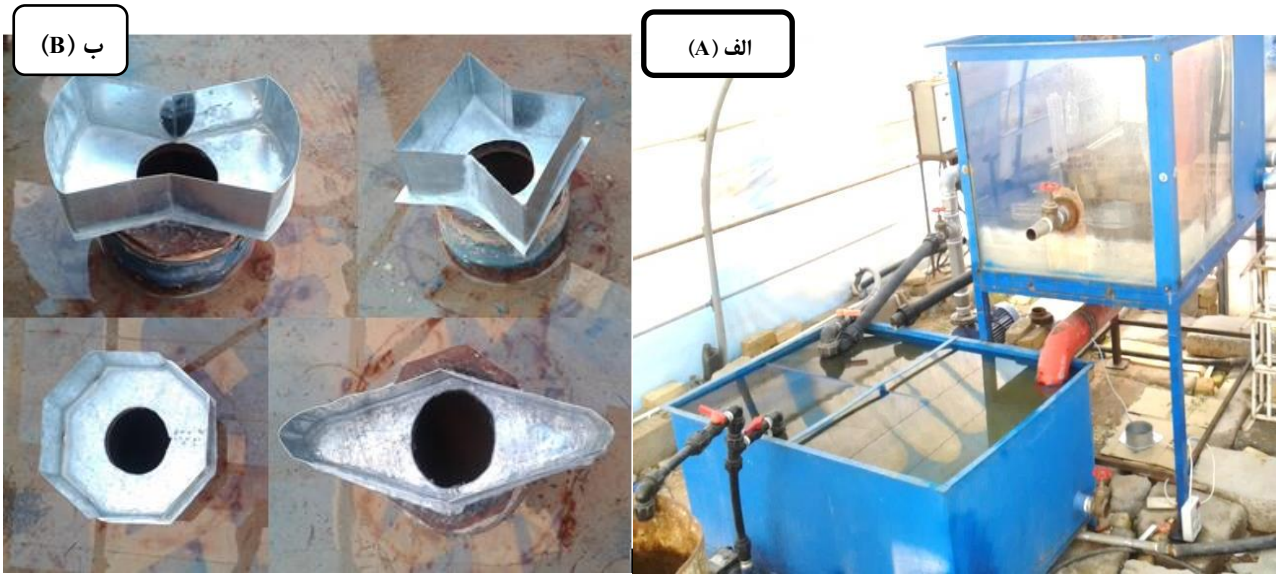
در شکل ۲ جزئیات مربوط به سرریزهای مورد آزمایش به همراه نام اختصاری آنها ارائه شده است. مطابق این شکل، یک سرریز پاپیونی با کمان میانی[1] (شکل ۲-الف) با زاویه بین اضلاع میانی ۱۲۰ درجه و طول کمان شش سانتی‌متر، یک سرریز پاپیونی بدون کمان میانی[2] (شکل ۲-ب) با زاویه بین اضلاع میانی ۱۵۰ درجه و راس پاپیون متصل به شفت، یک سرریز گلبرگی متقارن[3] (شکل۲-ج) با طول اضلاع اصلی ۱۰ سانتی‌متر، یک سرریز دوکی[4] (شکل ۲-د) با زوایه اضلاع جانبی ۱۵۰ درجه، یک سرریز هشت‌ضلعی[5] (شکل ۲-ر) با زاویه داخلی ۱٤۰ و ۱۳۰ درجه و طول اضلاع ۷/۵ سانتی‌متر، یک سرریز شش‌ضلعی[6] (شکل ۲-م) با زاویه داخلی ۱٤۰ و ۱۱۰ درجه و طول اضلاع ۱۰ سانتی‌متر، یک سرریز مربعی[7] (شکل ۲-ل) با اضلاع ۱۵ سانتی‌متر و یک سرریز نیلوفری[8] (شکل ۲-ه) با قطر ۱۹ سانتی‌متر تهیه شدند. لازم به ذکر است طول کلی همه سرریزها (L) یکسان و برابر ٦۰ سانتی‌متر (L/ ℓ=۲/۵ و ℓ محیط شفت قائم) بود. مقدار ارتفاع تاج سرریز از محل شفت قائم (P)، ثابت و برابر ۷/٦ سانتی‌متر انتخاب شد (P/D=1). باتوجه به مطالعه اثر شکل تاج سرریز در این پژوهش، شرایط جریان آزاد بررسی شد.

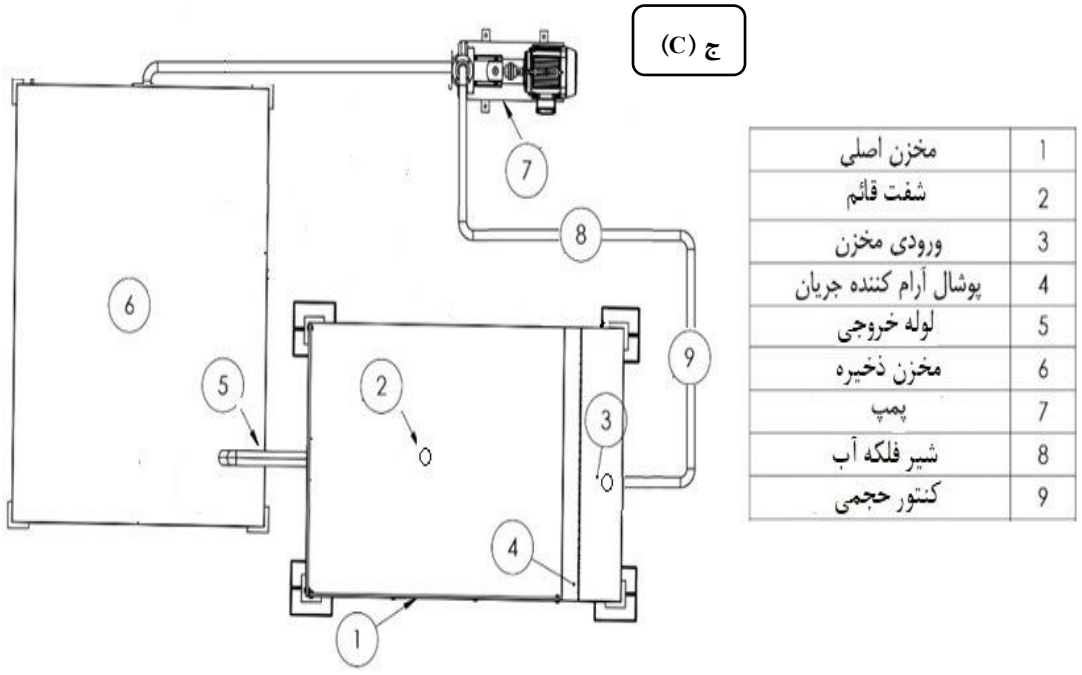
نتایج و بحث

شرح مشاهدات آزمایش‌ها

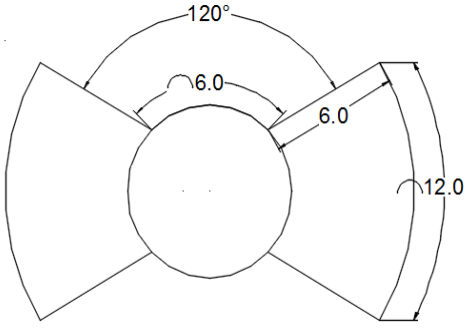
شکل ۳ نمای شرایط جریان‌های ریزشی سرریزها در دبی‌های پایین را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌ها جریان به صورت آزاد می‌باشد و کنترل جریان در تاج سرریز برقرار است. در مدل پاپیونی بدون کمان میانی، دو جت اصلی جریان از محل پاپیون‌ها به درون شفت قائم ایجاد می‌شد که با افزایش تراز سطح آب، یکنواختی رژیم جریان ریزشی افزایش و تداخل جریان‌های ریزشی به تدریج کاهش یافت که این امر موجب می‌شد دیرتر به استغراق برسد. سرریزهای پاپیونی با کمان میانی دارای چهار جت ریزشی بود که شامل دو جت ریزشی از کمان‌های میانی مماس بر شفت قائم و دو جریان ریزشی از محل پاپیون‌ها به درون شفت قائم بود. با افزایش ارتفاع آب برروی سرریز، فاصله این جت‌ها از هم کم شده و خصوصا به علت وجود جت‌های ریزشی کمان‌های میانی، تداخل جریان‌های ریزشی شدت بیشتری می‌یافت و حالت استغراق زودتر مشاهده می‌شد. در مدل دوکی دو جت ریزشی از محل قوس‌های نزدیک به شفت ایجاد شده و با کمترین برخورد تخلیه می‌شد. از محل زاویه نزدیک به خروجی نیز دو جت کوچک ایجاد شده که عبور جریان را تسریع می‌بخشید.

[1] Bow-tied with middle arches (A) spillway
[2] Bow-tied without middle arches spillway
[3] Daisy spillway
[4] Spindle spillway
[5] Octagonal spillway
[6] Hexagonal spillway
[7] Square spillway
[8] Morning Glory spillway

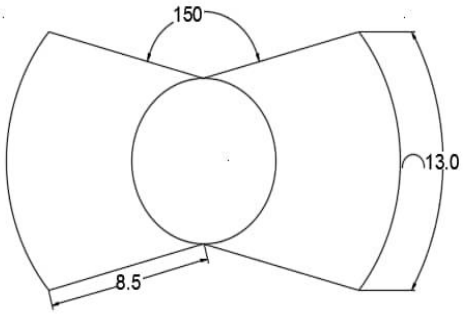




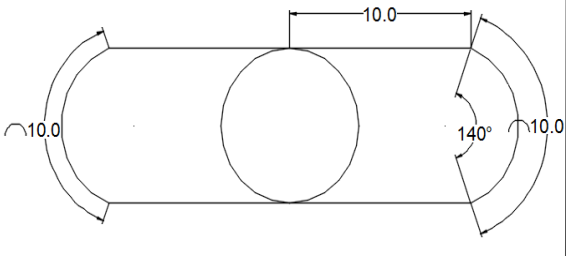
شکل ۱- مخزن اصلی و مخزن پایین دست (الف)، شفت قائم و نمونه ای از سرریز نصب شده بر روی آن (ب) و پلان شماتیک مدل آزمایشگاهی به همراه اجزای مختلف آن (ج).



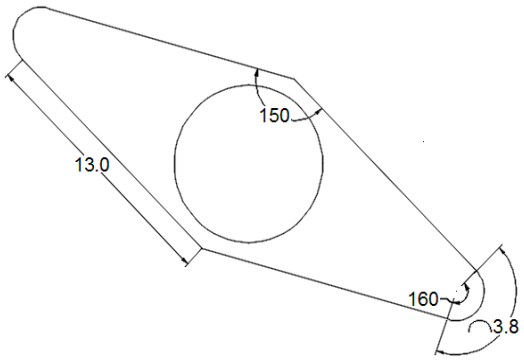
الف) سرریز پاپیونی با کمان میانی



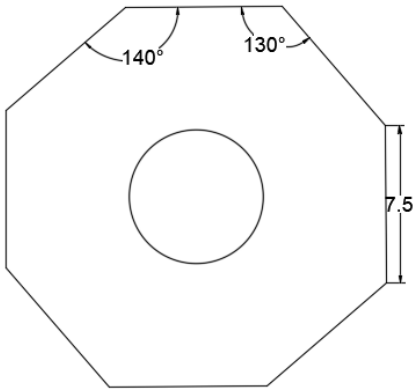
ب) سرریز پاپیونی بدون کمان میانی



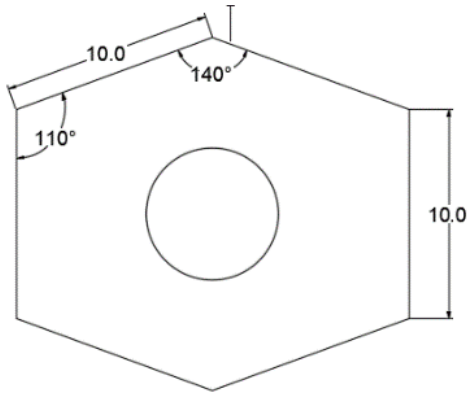
ج) سرریز گلبرگی



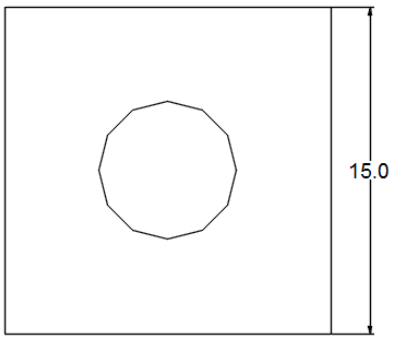
د) سرریز دوکی



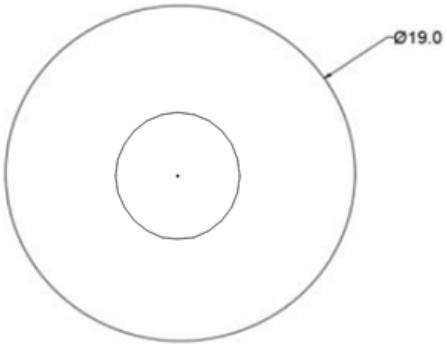
ر) سرریز هشت‌ضلعی



م) سرریز شش‌ضلعی



ل) سرریز مربعی

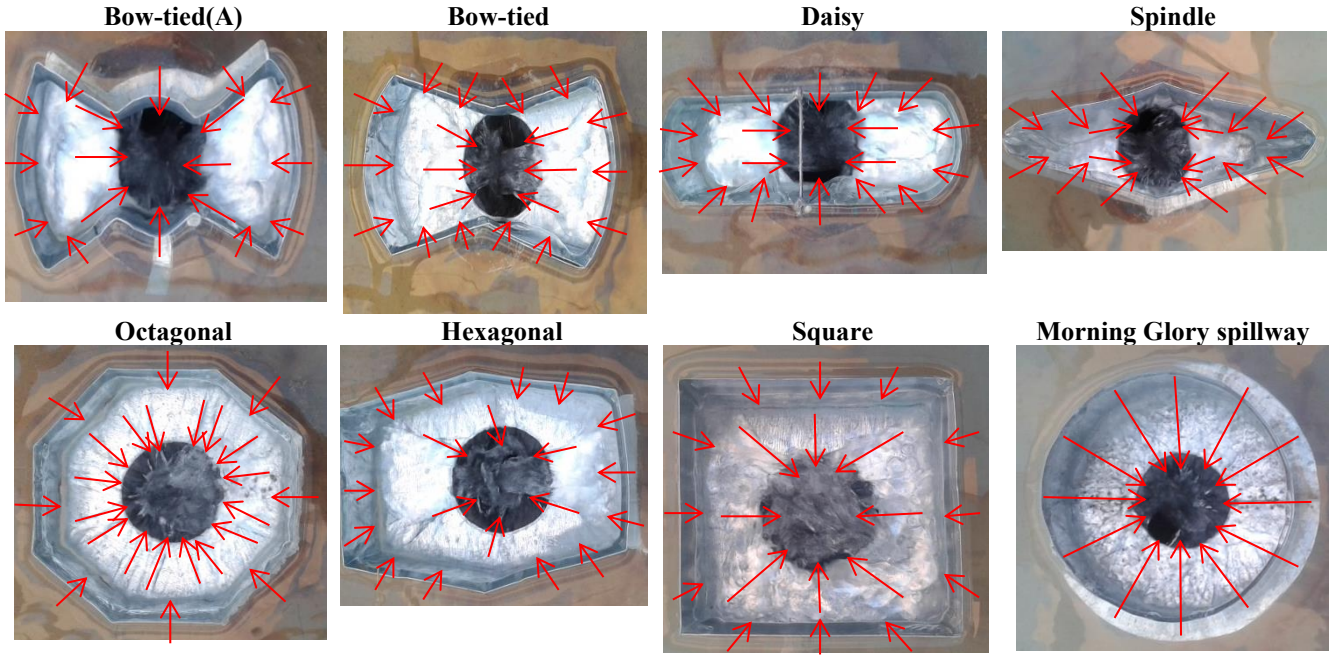


ه) سرریز نیلوفری

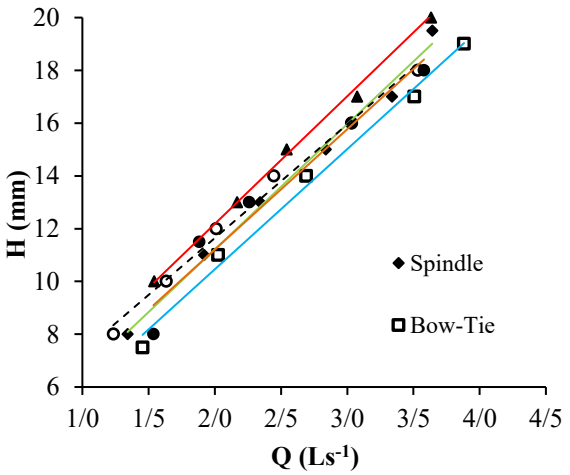
شکل ۲- جزئیات مربوط به سرریزهای مورد آزمایش به همراه نام اختصاری آنها (ابعاد بر حسب سانتی‌متر است).

در مدل گلبرگی جت‌های ریزشی از دو قوس کناری ایجاد شده و در هنگام تخلیه جریان با برخورد کمتری خارج شدند و با افزایش ارتفاع آب بر روی سرریز جریان به صورت یکنواخت ریزشی شد. در مدل شش‌ضلعی دو جت بزرگ و چهار جت کوچک از زوایای آن تشکیل شد و جریان با برخورد جزئی جت‌ها عبور نمود. در مدل هشت‌ضلعی هشت جت از زوایای آن ایجاد شد و بدون مشکلی از شفت عبور نمود. در سرریز مربعی چهار جت ریزشی از چهار زاویه آن ایجاد شد و با افزایش سطح آب، جریان به یکنواخت ریزشی تبدیل شد. مطابق شکل ۳، در سرریز نیلوفری جت‌های ریزشی در دبی پایین به صورت یکنواخت بود که با افزایش ارتفاع آب روی سرریز جت‌ها محو شده و منجر به تشکیل جریان گردابی می‌شود.

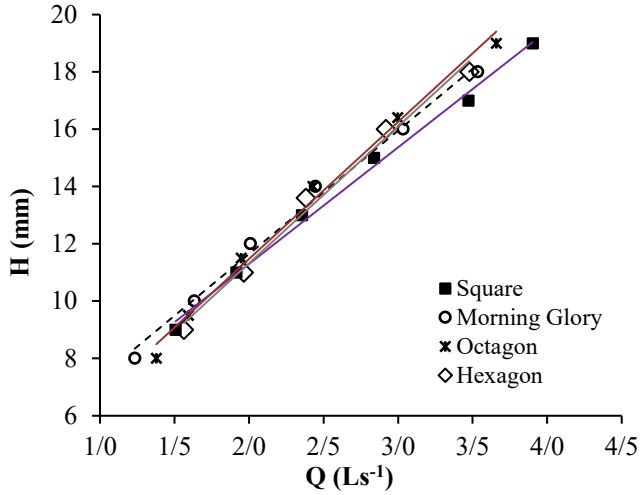
لازم است اشاره شود که شکل ٤ منحنی دبی-اشل سرریزهای پاپیونی با کمان میانی، پاپیونی بدون کمان میانی، دوکی، گلبرگی و شکل ٥ منحنی دبی-اشل سرریزهای مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی در مقایسه با سرریز نیلوفری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل پاپیونی با کمان میانی عملکرد ضعیفی در عبور جریان آب نسبت به سایر مدل‌ها هم در هد نسبی پایین (H/D=۰/۱۳) و هم در هد نسبی بالا (H/D=۰/۳۰) دارد. از طرفی در یک ارتفاع ثابت، منحنی دبی–اشل مدل پاپیونی بدون کمان میانی پایین‌تر از مدل‌های دیگر قرار دارد. منحنی دبی–اشل مدل گلبرگی و دوکی در محدوده تمامی دبی‌های آزمایش به هم نزدیک‌تر هستند و در مقایسه مدل نیلوفری با این دو مدل مشاهده می‌شود که در دبی پایین بیشترین تراز سطح آب مربوط به مدل نیلوفری بوده و با افزایش دبی منحنی دبی–اشل این سه مدل بر هم منطبق می‌شود. مقایسه مدل نیلوفری با بهترین مدل (سرریز پاپیونی بدون کمان میانی) نشان می‌دهد که در یک دبی ثابت، تراز آب کمتری روی سرریز پاپیونی بدون کمان میانی قرار می‌گیرد و آب با سهولت بیشتری از روی این سرریز رد شده است. مقایسه مدل‌های نیلوفری، مربعی، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی با یکدیگر نشان می‌دهد (شکل ٥) که منحنی دبی–اشل هر چهار مدل در دبی پایین به هم نزدیک هستند اما در دبی بالا مدل مربعی عملکرد بهتری در عبور جریان آب دارد.



شکل ۳- نمای شرایط جریان‌های ریزشی در دبی پایین سرریزها.



شکل ۴- منحنی دبی-اشل سرریزهای دوکی، پاپیونی، گلبرگی و نیلوفری.



شکل ۵- منحنی دبی-اشل سرریزهای مربعی، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی در مقایسه با سرریز نیلوفری.

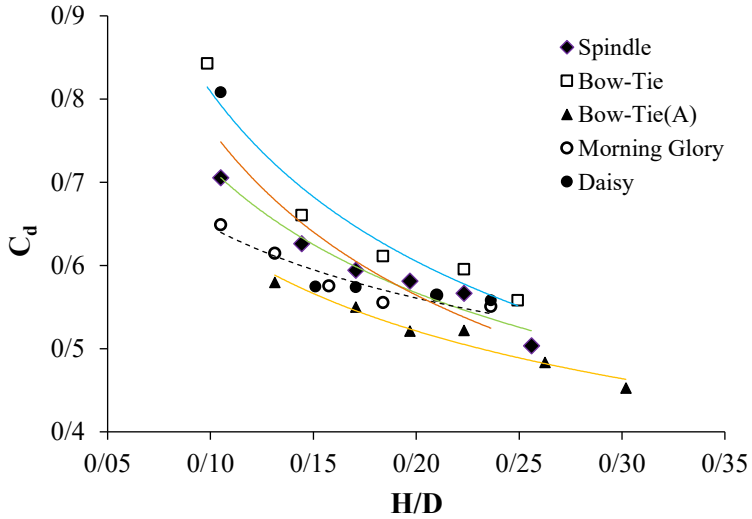
تغییرات ضریب دبی

شکل ٦ تغییرات ضریب دبی (C_d) نسبت به H/D در مدل‌های پاپیونی بدون و با کمان میانی، دوکی، گلبرگی و شکل ۷ تغییرات ضریب دبی (C_d) نسبت به H/D در مدل‌های مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی در مقایسه با سرریز نیلوفری را نشان می‌دهد. در همه مدل‌های مورد مطالعه، با افزایش H/D مقدار ضریب دبی روند کاهشی نشان می‌دهد. مدل پاپیونی با کمان میانی نسبت به سایر مدل‌ها کمترین مقدار ضریب دبی و مدل پاپیونی بدون کمان میانی نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین مقدار ضریب دبی را داشت. شایان ذکر است که در H/D پایین، مقدار ضریب دبی مدل پاپیونی بدون کمان میانی نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بود در حالی‌که در H/D بالا، مقادیر ضریب دبی مدل پاپیونی بدون کمان و مربعی تقریبا برابر هم شده است (شکل ۷). بین مدل‌های دوکی، گلبرگی و نیلوفری، در H/Dهای کمتر از ۰/۰-۱۷/۲۰ مدل گلبرگی نسبت به دو مدل دیگر، ضریب دبی بالاتری دارد ولیکن در H/Dهای بیشتر از این H/D، مقادیر ضریب دبی مدل گلبرگی کاهش می‌یابد. ضریب دبی دو مدل گلبرگی دوکی شکل نیز دارای مقادیر نزدیک به هم می‌باشد. مقایسه نتایج سرریزهای چهار، شش و هشت‌ضلعی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اضلاع سرریز، مقدار ضریب دبی کاهش یافته است (شکل ۷)، به طوری‌که سرریز مربعی نسبت به سرریزهای شش و هشت‌ضلعی و نیلوفری دارای ضریب دبی بالاتری است. روزگار و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که سرریز مربعی دارای ضریب بالاتری نسبت بـه سرریز نیلوفری است که با نتایج این تحقیق مطابقت خوبی نشان می‌دهد. برای سرریز نیلوفری در H/Dهای کمتر از ۰/۱۷، ضریب دبی کمتری نسبت به سه مدل مذکور دارد ولیکن در H/Dهای بیشتر از ۰/۱۷ مقادیر ضریب دبی این مدل نسبت به مدل شش و هشت‌ضلعی افزایش می‌یابد. جدول ۱ روابط خطوط برازش تغییرات ضریب دبی مدل‌های مختلف سرریز قائم را نشان می‌دهد. فرم روابط ارائه شده برای همه مدل‌ها توانی است و مقادیر R^2 روابط، نشان‌دهنده دقت مناسب آنها می‌باشد.

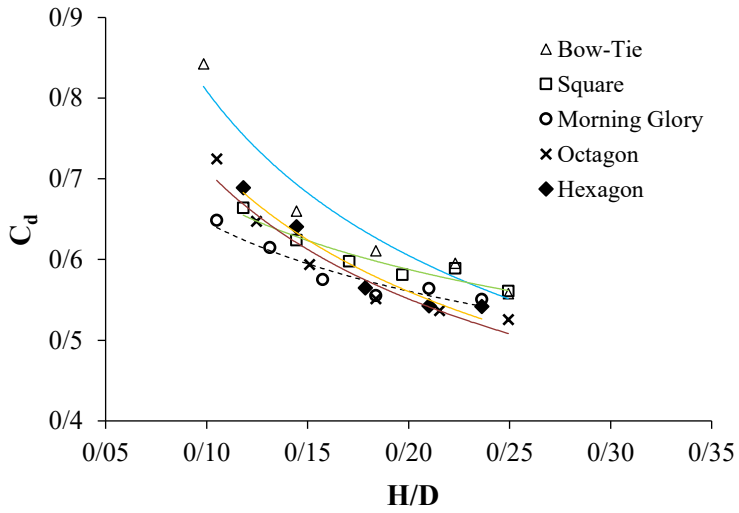
در جدول ۲ مقایسه کلی عملکرد هیدرولیکی و تغییرات مساحت هندسی سرریزها نسبت به سرریز نیلوفری ارائه شده است. این جدول درصد تغییرات

ضریب دبی و درصد تغییرات مساحت سطح داخلی سرریزها را نسبت به مدل نیلوفری نشان می‌دهد. مقایسه نتایج مدل‌های شش و هشت‌ضلعی نسبت به مدل نیلوفری نشان می‌دهد این دو مدل به لحاظ عملکرد هیدرولیکی و مساحت هندسی تفاوت محسوسی با مدل نیلوفری ندارد. مقایسه نتایج دو مدل مربعی و گلبرگی نشان می‌دهد که عملکرد هیدرولیکی مدل مربعی نسبت به مدل گلبرگی بهتر می‌باشد (۵ درصد) اما در مقابل مدل مربعی در مقایسه با مدل گلبرگی مساحت بیشتری دارد (۲۱ درصد). با توجه به اختلاف بیشتر مساحت هندسی مدل گلبرگی (۱۵ درصد) نسبت به مدل مربعی و از طرفی تفاوت ناچیز عملکرد هیدرولیکی این دو مدل (۲ درصد)، می‌توان گفت مدل گلبرگی نسبت به مدل مربعی ارجح می‌باشد. مجدمی و کبیری سامانی (۲۰۱۶) تاثیر ورودی گلبرگی شکل را بر ظرفیت تخلیه سرریز مدور قائم بررسی کردند و دریافتند که سرریز گلبرگی با عملکرد به صورت جانبی، در قیاس با دیگر شکل‌های ورودی در ارتفاع آب یکسان، دبی بیشتری از خود عبور می‌دهد. این سرریز، با ایجاد تاخیر در شکل‌گیری جریان گردابی، باعث می‌شود که دیرتر به عملکرد روزنه‌ای برسد.

مطابق نتایج جدول ۲، در بین تمامی مدل‌های مورد آزمایش، مساحت سرریز پاپیونی با کمان میانی ٤٨ درصد نسبت به سرریز نیلوفری کمتر است درحالی‌که دارای کمترین ضریب دبی می‌باشد (٦- درصد). علت این مسئله می‌تواند ناشی از زاویه کم بین پاپیون‌ها و در نتیجه تداخل بیشتر جریان ریزشی بوده که منجر به اتفاق سریع‌تر حالت مستغرق می‌باشد. در مقابل سرریز پاپیونی بدون کمان میانی دارای عملکرد هیدرولیکی بالاتری نسبت به سرریز نیلوفری می‌باشد (۱۰ درصد) و مساحت سطح داخلی این سرریز نسبت به سرریز نیلوفری کاهش ۳۱ درصد را نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان گفت سرریزهای پاپیونی بدون کمان میانی ضمن داشتن مساحت هندسی کمتر، شرایط هیدرولیکی مطلوبی را برای عبور آب تامین می‌کند.



شکل ۶- تغییرات ضریب دبی نسبت به H/D در سرریزهای دوکی، پاپیونی با کمان و بدون کمان، گلبرگی و نیلوفری.



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی نسبت به H/D در سرریزهای چهار، شش، هشت‌ضلعی و نیلوفری.

جدول ۱- روابط خطوط برازش تغییرات ضریب دبی مدل‌های مختلف سرریز قائم.

نام مدل	رابطه استخراجی	R^2
Spindle	C_d=۰/۳۳(H/D)$^{-۰/۳٤}$	۰/۹۵
Bow-Tie(A)	C_d=۰/۳۳(H/D)$^{-۰/۲۹}$	۰/۹۵
Bow-Tie	C_d=۰/۳۱(H/D)$^{-۰/٤۲}$	۰/۹۵
Daisy	C_d=۰/۲۸(H/D)$^{-۰/٤٤}$	۰/۷٦
Octagon	C_d=۰/۳۱(H/D)$^{-۰/۳۷}$	۰/۹٤
Hexagon	C_d=۰/۳۱(H/D)$^{-۰/۳۸}$	۰/۹۵
Square	C_d=۰/٤۲(H/D)$^{-۰/۲۱}$	۰/۹۳
Morning Glory	C_d=۰/٤۰(H/D)$^{-۰/۲۰}$	۰/۹۱

جدول ۲- متوسط درصد تغییرات ضریب دبی نسبت به مدل نیلوفری.

نام مدل	مساحت سطح داخلی سرریز (cm^2)	درصد تغییرات مساحت نسبت به مدل نیلوفری	درصد تغییرات ضریب دبی نسبت به مدل نیلوفری
Spindle	۱۵۸/۹	−٤٤/۲	-۲/۳
Bow-Tie(A)	۱٤۸/۹	−٤۷/۷	−٦/۲
Bow-Tie	۱۹٦/۹	−۳۰/۹	+۱۰/٤
Daisy	۱۸۱/۹	−۳٦/۱	+۳/۵
Octagon	۲۵۳/٦	−۱۱/۰	-۱/۱
Hexagon	۲٦۸/۰	−۵/۹	+۱/٦
Square	۲۲۵/۰	−۲۱/۰	+۵/۰
Morning Glory	۲۸٤/۹	---	---

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریزهای قائم با شکل دهانه ورودی متفاوت به مطالعه آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی آنها پرداخته شد. تعداد ۸ مدل سرریز با اشکال مختلف (با طول کلی یکسان سرریز) تهیه شد. مشاهدات آزمایشگاهی سرریز پاپیونی بدون کمان میانی نشان داد که در این مدل دو جت اصلی جریان از محل پاپیون به درون شفت قائم ایجاد می‌شود و در اثر افزایش تراز سطح آب، یکنواختی رژیم جریان ریزشی مشاهده می‌شد که این امر موجب دیرتر رسیدن به استغراق می‌باشد. مطابق نتایج منحنی‌های ضریب دبی، با افزایش مقدار H/D در همه مدل‌ها ضریب دبی روند کاهشی داشت. مقایسه عملکرد هیدورلیکی مدل‌های سرریز مورد مطالعه با سرریز نیلوفری نشان داد که مدل پاپیونی بدون کمان میانی نسبت به سایر مدل‌ها دارای بیشترین عملکرد هیدرولیکی (۱۰ درصد) می‌باشد. از طرفی این سرریز دارای مساحت هندسی کمتری (۳۱ درصد) نسبت به سرریز نیلوفری می‌باشد. در سرریز پاپیونی با کمان میانی، عملکرد هیدرولیکی این سرریز نسبت به سرریز نیلوفری ۲ درصد پایین‌تر می‌باشد. علت این مساله می‌تواند ناشی از تداخل جریان‌های ریزشی و سطح داخلی کمتر این مدل باشد. مدل‌های شش و هشت‌ضلعی عملکردی مشابه مدل نیلوفری داشتند. مدل مربعی و گلبرگی دارای عمکلرد هیدرولیکی بهتری نسبت به نیلوفری بودند، با این حال مساحت هندسی مدل گلبرگی کمتر از مدل مربعی است.

منابع مورد استفاده

Anonymous, 1987. Design of Small Dams. 3rd Edition, U.S. Bureau of Reclamation, USA.

Anwar HO, Waller JA and Amphlet MB, 1978. Similarity of free-vortex at horizontal intake. Journal of Hydraulic Research 16(2): 95–105.

Bagheri A, Bajestan MS, Jahromi HM, Kashkooli H and Sedghee H, 2010. Hydraulic evaluation of the flow over polyhedral morning glory spillways. World Applied Sciences Journal 9(7): 712-717.

Coleman HW, Wei CY and Lindell JE, 2004. Hydraulic Design of Spillway. McGrawHill, New York.

Djillali K, Abderrezak B, Petrovic GA and Sourenevna BE, 2021. Discharge capacity of shaft spillway with a polygonal section: a case study of Djedra dam (East Algeria). Water Supply 21(3): 1202–1215.

Jain AK, Raju KG and Garde RJ, 1978. Vortex formation at vertical pipe intakes. Journal of Hydraulic Division 104(10): 1429–1445.

Kabiri-Samani AR and Keihanpour M, 2020. Hydraulic characteristics of swirling flow at shaft spillways with the marguerite-shaped inlets. Journal of Hydraulic Research 59(5): 1-15.

Lashkar-Ara B and Sheikhi Y, 2017. Introduce of crown wheel spillway and study of its discharge coefficient under free flow regime. Irrigation Sciences And Engineering 40(2): 209-221 (In Persian with English abstract)

Mojdemi MJ and Kabiri-Samani AR, 2016. Investigation of the effect of daisy-shaped inlet on free-flow hydraulics in vertical circular spillway. Journal of Civil Engineering Modares 16(2): 202-191 (In Persian with English abstract)

Nasiri S, Kabiri-Samani AR, Asghari K and Bagheri S, 2021. Numerical modeling of the flow field around vertical circular spillway with piano-key input. Water Management 173(5): 53-63.

Noruzi S and Ahadiyan J 2017. Effect of vortex breaker blades 45 degree on discharge coefficient of morningglory spillway using Flow-3D. Journal of Irrigation Sciences and Engineering 40(1): 191-200.

Novak P, Moffat AIB, Nalluri C and Narayanan R, 2007. Hydraulic Structures. 4th Edition, CRC Press.

Rostami H, Heidarnejad M, Purmohammadi MH, Kamanbedast A and Bordbr A, 2016. An experimental study into discharge coefficient of labyrinth weirs with rectangular-shaped plans. Fresenius Environment Bulletin 25(12): 5138-5144.

Rouzegar J, Kamanbedast AA, Masjedi A, Heidarnejad M and Bordbar A, 2017. The experimental investigation of flow hydraulics in zigzag morning glory spillways. Journal of Water and Soil Science 26(3): 2389-2396 (In Persian with English abstract)

Sayedzadeh F, Musavi-Jahromi SH, Sedghi H and Khosrojerdi A, 2020. Pyramidal vortex breakers influenceson the flow dishcharge of morning glory spillway. Ain Shams Engineering Journal 11: 455-463.

Schleiss AJ, 2011. From Labyrinth to Piano Key Weirs. Ecolepoly Technique Federal de Lausanne, Switzerland.

Shemshi R and Kabiri-Samani AB, 2017. Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets. Journal of Hydraulic Research 55(2): 248-258.

Shirali M, Kamanbedast AA, Masjedi A, Bordbar A and Heidarnejad M, 2017. An experimental investigation on the effects of the shape of the cross section in morning glory spillways. Fresenius Environment Bulletin 26(11): 6532-6542.

Teymori A, 2015. Investigation of eddy current characteristics in vertical circular spillway with daisy-shaped inlet, MSc Thesis, Isfahan University of Technology. (In Persian with English abstract)

Zeraat B, Heidarnejad M, Masjedi A, Kamanbedast A and Hasoonizadeh H, 2017. Hydraulics of arch plan labyrinth weirs with two different cycles. Fresenius Environment Bulletin 26(4): 2862-2867.