



Experimental Investigation of the Effects of Number of Sides and Internal Angles on the Discharge Coefficient of Vertical Polygonal Inlet Spillways Under Free-Flow Conditions

Zahra Asadi¹, Ghorban Mahtabi²

1-Master's degree graduated, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2-Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received:2026-01-13

Accepted:2026-07-21

Revised:2026-07-20

Published online:2026-09-21

* Corresponding author:ghmahtabi@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Discharge coefficient,
Polygonal spillway,
Free flow,
Morning Glory spillway,
Spillway crest length,

Introduction

Vertical spillways are among the most common types of spillways emergency spillways used in reservoir dams. One of the key factors influencing the hydraulics performance of these spillways is the crest shape, which must ensure favorable hydraulic conditions, particularly adequate discharge capacity. Over the years, numerous studies have been carried out on modifying the inlet geometry of vertical spillways, and various solutions have been proposed. Among these, the use of piano key, polygonal, and zigzag inlet shapes has been introduced as an effective approach. These inlet configurations not only mitigate vortex formation but also increase the discharge capacity and reduce the water height over the spillway. A review of previous research indicates that the primary objectives in studying vertical spillways are to convey flood flows with maximum possible discharge and minimum water level rise, while minimizing the adverse effects of eddy currents. Despite extensive investigations on these aspects, the present study focuses specifically on the effect of the number of sides of polygonal inlet sections (with an even number of sides) on the flow discharge coefficient, using a physical laboratory model.

Materials and Methods

The experiments were carried out in the Hydraulic Laboratory of the Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, using various physical models of vertical spillway with modified inlet sections. The experimental setup consisted of a cubic metal reservoir (tank) with internal dimensions of 1.5 m in length, 1 m in width, and 1 m in height, along with a downstream storage tank. In this study, spillways with square, hexagonal, and octagonal inlet section were investigated, in addition to Morning Glory and Daisy spillways. The total crest length (L) was kept constant at 60 cm ($L/\ell = 2.5$, ℓ is circumference of the vertical shaft). The crest height measured from the shaft base (P) was also fixed at 7.6 cm ($P/D=1$). A total of 76 experiments were conducted to evaluate the effect of geometric parameters namely, the number of sides (N) and internal angles (θ), as well as the hydraulic condition (H/D),

How to cite:

Asadi, Z., Mahtabi, G. (2026). *Experimental Investigation of the Effects of Number of Sides and Internal Angles on the Discharge Coefficient of Vertical Polygonal Inlet Spillways Under Free-Flow Conditions*. Journal of Hydraulics and Water Science, 36 (2):13-30, <https://doi.org/10.22034/hws.2026.71640.1041>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



on the discharge coefficient. The results were subsequently compared and analyzed to assess the influence of varying spillway geometry on hydraulic performance under different water levels.

Results and Discussion

The results indicated that, for all models, the discharge coefficient decreased with increasing H/D , following a generally similar downward trend. Among the octagonal configurations, the star-shaped models O(S)1 and O(S)2 exhibited poor hydraulic performance. This was attributed to their small internal angles, which led to noticeable flow interference, particularly at high discharge rates. Within the octagonal group, the O2 model (with internal angles of 120° and 150°) was identified as the best-performing configuration and was therefore selected for further comparison with other models. This model also provided a 7% reduction in internal area relative to the Morning Glory spillway. In the hexagonal group, the H2 and H5 models yielded highest the discharge coefficient. Although the hydraulic performance of these two models differed by only about 3%, the H5 model offered a substantially greater area reduction (38.3%) compared to the H2 model (20%). Consequently, the H5 model was chosen for comparison with other spillway types. A comparative assessment of the octagonal, hexagonal, and square spillway revealed that the square model exhibited the highest discharge coefficient (C_d). In fact, within the range of hydraulic conditions tested, a decrease in the number of sides (or concourses), was consistently associated with an increase in the discharge coefficient, with the square (quadrilateral) outperforming the others in this regard. Furthermore, the Morning Glory, Square and Daisy spillways demonstrated nearly identical discharge coefficient values. However, the Daisy and Square spillway achieved internal area reduction of approximately 36.1% and 21%, respectively, compared to the Morning Glory spillway.

Conclusions

In this research, the effect of the number of sides of vertical spillway with a polygonal inlet section on the flow discharge coefficient was investigated experimentally. Five hexagonal and five octagonal spillway models, including two star-shaped configurations (with identical total crest length), were constructed and their discharge coefficients were compared with those of square, Morning Glory and Daisy spillways of the same length. Comparing of the results for octagonal, hexagonal, and square spillways revealed that reducing the number of crest cycles (concourses) leads to an increase in the discharge coefficient. Accordingly, the square spillway exhibited a higher discharge coefficient than the best-performing hexagonal and octagonal models. Overall, the Square, Daisy and hexagonal H5 spillways demonstrated nearly similar hydraulic performance, while offering a significant reduction in internal area (ranging from 21% to 38%) compared to the Morning Glory model. The final selection among them, however, should be made based on other technical and site-specific considerations, such as spatial constraints, topographic conditions, and construction feasibility.

Keywords: Discharge coefficient, free flow, morning glory spillway, crest length, polygonal spillway.



بررسی آزمایشگاهی تأثیر تعداد اضلاع و زوایای داخلی بر ضریب دبی سرریزهای قائم با مقطع ورودی چندضلعی در شرایط جریان آزاد

زهرا اسدی^۱، قربان مهتابی^{۲*}

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

۲-دانش اموخته کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳-دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*نویسنده مسئول: ghmahtabi@gmail.com

چکیده

سرریزهای قائم، یکی از انواع رایج سرریزهای اضطراری در سدهای مخزنی هستند. از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان در این سرریزها، شکل تاج است که باید شرایط مطلوب هیدرولیکی، به‌ویژه تخلیه مناسب را تأمین نماید. در پژوهش حاضر، تأثیر تعداد اضلاع و زوایای داخلی سرریزهای قائم با مقطع ورودی چندضلعی بر ضریب دبی جریان، با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی شد. بدین منظور، آزمایش‌هایی تحت شرایط جریان آزاد، با دبی‌ها و ارتفاع‌های آب متفاوت، بر روی سرریز چهار، شش و هشت‌ضلعی (با زوایا و اضلاع متغیر)، سرریز نیلوفری و گلبرگی (با طول تاج یکسان) انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع آب روی تاج، ضریب دبی در همه مدل‌ها به‌طور کلی کاهش می‌یابد. در میان مدل‌های هشت‌ضلعی، مدل‌های ستاره‌ای (با زاویه داخلی کمتر از ۹۰ درجه)، عملکرد ضعیفی داشتند و مدل O2 (با زوایای داخلی ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه) بهترین عملکرد را نشان داد. در مدل‌های شش‌ضلعی، مدل H5 (با زوایای داخلی ۲۲۰ و ۷۰ درجه) بیشترین ضریب دبی را به خود اختصاص داد. مقایسه نتایج سرریزهای هشت‌ضلعی، شش‌ضلعی و چهارضلعی (مربع) نشان داد که با کاهش تعداد اضلاع، ضریب دبی افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که سرریز مربعی نسبت به بهترین مدل‌های شش و هشت‌ضلعی، ضریب دبی بالاتری (حدود ۵/۱ درصد) داشت. همچنین، ضریب دبی سرریز مربعی نسبت به سرریزهای نیلوفری و گلبرگی بیشتر بود (حدود ۴/۷ درصد)، در حالی که عملکرد دو سرریز اخیر تقریباً مشابه یکدیگر بود.

کلمات کلیدی: ضریب دبی، سرریز چندضلعی، جریان آزاد، سرریز نیلوفری، طول تاج سرریز

۱- مقدمه

سرریزهای اضطراری در سدها برای عبور آب اضافی ناشی از سیلابها و کنترل سطح آب مخزن سد مورد استفاده قرار می‌گیرند. هیدرولیک جریان در سرریز مدور قائم به سه دسته آزاد، روزنه‌ای و تحت فشار تقسیم می‌شود (Aghvami et al., 2025). هرگاه ارتفاع آب روی تاج سرریز کم باشد، جریان به صورت آزاد و کنترل دبی جریان در تاج سرریز خواهد بود. با افزایش ارتفاع آب، جریان مستغرق و به حالت روزنه عمل می‌کند و به اصطلاح کنترل دبی در گلوگاه یا تبدیل اتفاق می‌افتد. با افزایش بیشتر ارتفاع آب، استغراق کامل سرریز صورت می‌گیرد و دبی جریان توسط تونل پر به صورت مجاری تحت فشار کنترل می‌گردد (USBR, 1987).

در عملکرد بهینه یک سرریز، عبور مطمئن دبی سیلاب با نوسانات کم سطح آب، اعتماد پذیری طرح و ملاحظات اقتصادی مطرح است و از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر هیدرولیک جریان در این سرریزها، شکل تاج سرریز است. شکل ورودی تاج سرریز باید تامین کننده شرایط مطلوب هیدرولیکی نظیر تخلیه مناسب و توزیع کامل یکنواخت فشار در مجرا باشد (Mojdemi & Kabiri-Samani, 2016). ورودی سرریز مدور قائم مستعد ایجاد جریان گردابی است و سبب ایجاد آثار منفی بر سازه‌های هیدرولیکی پایین دست و خود سازه سرریز می‌شود. به همین جهت مطالعات متعددی پیرامون اصلاح ورودی سرریز مدور قائم توسط محققین انجام و راهکارهای مختلفی ارائه شده است. یکی از روش‌های اصلاح شکل ورودی سرریز مدور قائم، استفاده از شکل کلیدپیانویی^۱، چندضلعی^۲ و زیگزاگی^۳ است. این نوع ورودی‌ها علاوه بر تضعیف جریان گردابی، باعث افزایش دبی عبوری از سرریز قائم شده و در عین حال ارتفاع آب بر روی سرریز را کاهش می‌دهد و در مناطقی که محدودیت فضا برای ساخت انواع دیگر سرریز وجود دارد، استفاده می‌شود (Coleman et al., 2004). نقش عمده اینگونه سرریزها، افزایش انتقال جریان روی سرریز از طریق افزایش طول تاج سرریز در یک محدوده معین عرض است.

اولین مطالعات در خصوص ضوابط طراحی و کاربرد هیدرولیکی سرریزهای چندضلعی توسط Tayler (1968) و Hay & Taylor (1970) بر روی مدل‌های با پلان هندسی مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای با شکل تاج لبه تیز انجام شد. (Bagheri et al., 2010) به وسیله مدل فیزیکی به بررسی تأثیر ایجاد قوس در تاج سرریز روی ضریب تخلیه سرریز نیلوفری پرداختند. ایشان با انجام ۹۰ آزمایش مختلف روی سرریزهایی با مقطع چندوجهی (سه، پنج و هفت قوسی یا وجهی) دریافتند که چندوجهی کردن تاج سرریز باعث افزایش دبی عبوری و ضریب تخلیه سرریز می‌شود و بیشترین افزایش در حالت تاج سه وجهی حاصل شد. (Mojdemi & Kabiri-Samani, 2016) به مقایسه عملکرد ضریب دبی سرریز گلبرگی، نیلوفری و سرریز بدون

ورودی (شفت ساده) پرداختند. سرریز گلبرگی در مقایسه با سرریز نیلوفری و هر دو در مقایسه با سرریز بدون ورودی در هدر یکسان، دبی بیشتری را از خود عبور می‌دهند. این مقدار دبی عبوری با افزایش هدر آب و نزدیک شدن به آستانه روزنه‌ای شدن در سرریز نیلوفری کاهش می‌یابد. خصوصیات ساختاری طرح گلبرگی باعث ایجاد تاخیر در شکل‌گیری جریان گردابی می‌شود و این امر باعث می‌شود که سرریز دیرتر به عملکرد روزنه‌ای برسد.

(Shemshi & Kabiri-Samani, 2017) به بررسی جریان چرخشی در سرریز مدور قائم با ورودی کلید پیانویی مدور پرداختند. ایشان دریافتند که در شرایط جریان چرخشی ورودی کلید پیانویی باعث کاهش تلاطم جریان و افزایش قدرت تخلیه نسبت به حالت ورودی مدور ساده می‌گردد. ایشان همچنین نشان دادند که آستانه استغراق در نسبت‌های $0.5 \leq S_v/D \leq 1.5$ (S_v عمق استغراق و D قطر شفت) رخ می‌دهد. (Lashkar-Ara & Sheikhi, 2017) به بررسی سرریز تاج‌دندانه‌ای و میزان ضریب تخلیه آن در شرایط جریان آزاد پرداختند. چهار نوع سرریز با طول تاج دو، چهار، شش و هشت سیکل طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش تعداد سیکل‌ها در ارتفاع‌های کم آب منجر به افزایش میزان ضریب تخلیه جریان می‌شود ولیکن در ارتفاع‌های آبی زیاد، خاصیت گرداب شکنی سرریزهای با تعداد سیکل کمتر عملکرد مناسبی دارند. همچنین ضریب تخلیه جریان در سرریز تاج‌دندانه‌ای تا ۲/۲ برابر ضریب تخلیه سرریز مدور قائم با ورودی لبه تیز (شفت ساده) از خود افزایش نشان می‌دهد.

(Rouzegar et al., 2019) میزان دبی عبوری و ضریب تخلیه جریان را در حالت کنترل تاج با نصب پنج حالت زیگزاگ بر روی سرریز نیلوفری با دو مقطع دایره‌ای و مربعی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سرریز مربعی در شرایط بدون استفاده از تیغه-های گرداب شکن نسبت به سرریز دایره‌ای در همین شرایط، باعث افزایش دبی و ضریب دبی می‌شود. همچنین نتایج آنها نشان داد که هر چه تعداد اضلاع (تعداد کنگره‌ها) کاهش یابد، ضریب دبی افزایش می‌یابد. (Feili et al., 2020) ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با شعاع قوس و طول سیکل متفاوت را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش شعاع قوس در سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای، ضریب دبی تا ۲۷/۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش نسبت طول سیکل، ضریب دبی سرریز تا حدود ۲۹/۷ درصد افزایش یافت. (Bahrebar et al., 2021) تاثیر ترکیب سرریز کنگره‌ای با اشکال دوزنقه‌ای، مربعی و مثلثی به همراه روزنه را بر روی ضریب دبی جریان بررسی کردند. مطابق نتایج ایشان مدل‌های ساده سرریزها (کنگره‌ای مثلثی) عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های ترکیبی (کنگره‌ای روزنه دار) داشت.

³ Zigzag¹ Piano key² Polygonal

پارامترهای زاویه رأس دیواره‌ی سرریز، ارتفاع سرریز و بار آبی را بر روی ضریب دبی سرریز جانبی دوزنقه‌ای مطالعه کردند. سرریز جانبی با زاویه دیواره ۴۵ درجه نتایج بهتری در مقایسه با دو زاویه مورد بررسی دیگر داشت و همچنین با کاهش ارتفاع سرریز، ضریب دبی سرریز افزایش یافت. (Mahmoud et al. (2025 به ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای نیلوفری با بریدگی‌های نیمه‌بیضی پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب دبی سرریز نیلوفری با بریدگی‌های نیمه‌بیضی ۸ تایی نسبت به دو نمونه ۴ تایی و دو تایی بیشتر است.

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 جریان‌های گردابی است و تاکنون مطالعات متعددی پیرامون این موضوع‌ها انجام گرفته است. البته تفاوت کار در بیشتر این تحقیقات پرداختن به موضوعاتی از قبیل تاثیر نوع ورودی سرریز مدور قائم و پارامترهای هندسی سازه بر روی ضریب دبی، بررسی شرایط وقوع گرداب و هیدرولیک جریان بوده است. شایان ذکر است که تحقیقات قبلی عمدتاً بر سرریزهای دایره‌ای یا گلبرگی متمرکز بوده و مطالعه سیستماتیک بر روی چندضلعی‌های با تعداد اضلاع زوج و زوایای مختلف کمتر انجام شده است. در این تحقیق، تأثیر تعداد اضلاع سرریزهای قائم با شکل مقطع چندضلعی (سرریز کنگره‌های چندضلعی با تعداد اضلاع زوج) بر روی ضریب دبی جریان با استفاده از مدل آزمایشگاهی مطالعه شد. با هدف ارائه مدل بهینه سرریز از نظر ترکیب بهترین عملکرد هیدرولیکی و کمترین مساحت سطح داخلی، آزمایشاتی تحت جریان آزاد با ارتفاع آب و دبی‌های متفاوت بر روی سرریز قائم با شکل مقطع شش، هشت ضلعی با زوایا و اضلاع متفاوت، یک سرریز مربع، سرریز نیلوفری و گلبرگی با طول تاج برابر سرریزهای چندضلعی انجام و نتایج حاصل مقایسه، تجزیه و تحلیل شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل فیزیکی مخزن

آزمایش‌ها بر روی مدل‌های مختلف سرریز مدور قائم با ورودی‌های اصلاح شده در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان انجام شد. مدل فیزیکی مخزن مورد استفاده در این تحقیق شامل یک مخزن فلزی مکعبی شکل به طول ۱/۵ متر، عرض و ارتفاع ۱ متر و یک مخزن ذخیره پایین دست است. مدل دارای سیستم گردش آب بوده و آب از طریق یک پمپ ۱۱ کیلوواتی از مخزن ذخیره روزمینی وارد مخزن اصلی می‌گردد. در مخزن اصلی به منظور مشاهده جریان ورودی به سرریز در هنگام آزمایش، دو دیواره کناری آن از جنس پلکسی‌گلس ساخته شده بود. در بخش ابتدایی مخزن، یکسری صفحات مشبک به منظور آرام‌سازی و یکنواخت کردن جریان آب ورودی به مخزن تعبیه شده است. در قسمت میانی کف مخزن، یک شفت قائم به‌عنوان سرریز مدور جهت

(Toroujeni et al. (2021) با مطالعه ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای دنداندار با سه شکل مختلف دندان (مستطیل، مثلث و دوزنقه) گزارش کردند که دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دنداندار با شکل دندان مستطیل بیشترین مقدار و با شکل دندان مثلث کمترین مقدار را دارد. (Nasiri et al. (2021 به مدل-سازی عددی میدان جریان در اطراف سرریزهای مدور قائم با ورودی از نوع کلیدپیانویی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزایش نسبت L/D (طول سرریز کلیدپیانویی، D قطر شفت قائم) باعث کاهش ارتفاع آب بر روی سرریز می‌شود. همچنین افزایش نسبت L/D آستانه استغراق روزه‌ای را کاهش می‌دهد. (Djillali et al. (2021 با جایگزینی مقطع دایره‌ای با پیکربندی چندضلعی با دوازده ضلع به مطالعه جریان بر روی شفت قائم سد Djedra واقع در شرق الجزایر پرداختند. آنها با اشاره به سادگی اجرای طرح مهندسی مدل جدید، گزارش کردند که ضمن افزایش ۲۰ درصدی ضریب دبی، علائم پدیده کاویتاسیون نیز مشاهده نشد. (Radmanesh et al. (2022 به مطالعه ضریب عبوردهی سرریز نیلوفری پلکانی و غیرپلکانی و بررسی رفتار آن با استفاده از گرداب شکن پرداختند. نتایج نشان داد شرایط انسداد در سرریز نیلوفری غیرپلکانی در محدوده H/D (عمق آب روی سرریز، D قطر شفت قائم) بیشتر از ۰/۶ و در سرریز نیلوفری پلکانی در محدوده H/D بیشتر از ۰/۷ رخ داد.

(Aydin & Ulu (2023 با انتخاب یک مدل ستاره‌ای ۱۲ ضلعی سرریز قائم به بررسی تاثیر زاویه راس اضلاع بر روی ضریب دبی پرداختند. مطابق نتایج آنها بهترین عملکرد ضریب دبی مربوط به مدل با زوایای بیشتر بود. در زوایای کم رأس اضلاع، به‌علت تداخل جریان در رأس بخصوص در ارتفاع آب بالاتر، ضریب دبی کاهش محسوسی نشان داد. (Arham Namazi & Mozaffari (2023 به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و قوسی با تعداد سیکل‌های یک تا سه پرداختند. مطابق نتایج، مقایسه سرریز کنگره‌ای مثلثی با سرریز کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای همسان (رأس رو به پایین) نشان داد که ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی تا حدودی بالاتر (۳/۵ الی ۹ درصد) است. با افزایش تعداد سیکل، تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی افزایش و ضریب دبی کاهش می‌یابد. (Sadeghian et al. (2023 با مقایسه آزمایشگاهی ضریب تخلیه جریان در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای شکل با طول کنگره‌های مساوی و نامساوی اظهار داشتند که ضریب سرریز کنگره‌ای با کنگره‌های نامساوی نسبت به حالت کنگره‌های مساوی بیشتر است.

(Talebi et al. (2024) به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکل‌های ورودی مختلف بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم پرداختند. مطابق نتایج مدل پایونی بدون کمان میانی نسبت به سایر مدل‌ها دارای بیشترین عملکرد هیدرولیکی بود. از طرفی این سرریز مساحت سطح داخلی کمتری (۳۱ درصد) نسبت به سرریز نیلوفری داشت. (Namdar Vandaei et al. (2025 با مدل عددی و آزمایشگاهی تأثیر

در مدل هشت ضلعی ستاره‌ای^۴ (زوایه داخلی کمتر از ۹۰ درجه)، نام اختصاری O-S1 و O-S2 استفاده شد.

مطابق شکل ۲-الف، پنج مدل سرریز شش ضلعی با زوایای داخلی و اضلاع مختلف شامل مدل H1 با طول اضلاع ۱۰ سانتی متر و زوایای داخلی ۱۰۰-۱۶۰ درجه، مدل H2 با طول اضلاع ۱۰ سانتی متر و زوایای داخلی ۱۱۰-۱۴۰ درجه، مدل H3 با طول اضلاع ۱۰ سانتی متر و زوایای داخلی ۱۲۰-۱۲۰ درجه، مدل H4 با طول اضلاع ۱۲/۱ و ۸/۹ سانتی متر و زوایای داخلی ۲۰۰-۸۰ درجه، مدل H5 با طول اضلاع ۷/۴ و ۱۵/۱ سانتی متر و زوایای داخلی ۲۲۰-۷۰ درجه تهیه شد. شایان ذکر است، مدل H3 به عنوان شش ضلعی منتظم شناخته می شود. پنج مدل سرریز هشت ضلعی نیز با زوایای داخلی و اضلاع شامل مدل های (O1) (۷/۵-۱۶۰)، (O2) (۷/۵-۱۲۰)، (O3) (۷/۵-۱۴۰)، (O(S)1) (۷/۵-۲۰۰)، (O(S)2) (۷/۵-۲۲۰) تهیه شد. در اسامی فوق، عدد داخل پارتیز، طول اضلاع هشت ضلعی بر حسب سانتی متر و دو عدد بعدی مقادیر زوایای داخلی بر حسب درجه است. مشاهده می شود که هندسه دو مدل آخر سرریز هشت ضلعی، به شکل ستاره است (مدل های O-S1، O-S2). همچنین یک مدل سرریز نیلوفری (با قطر ۱۹ سانتی متر) (شکل ۲-ج)، یک مدل سرریز مربعی (با طول اضلاع ۱۵ سانتی متر) و یک سرریز گلبرگی با طول اضلاع ۱۰ سانتی متر جهت مقایسه با عملکرد این سرریزها ساخته شد. لازم به ذکر است طول کلی همه سرریزها (L) یکسان و برابر ۶۰ سانتی متر ($L/\ell=2/5$) و ℓ محیط شفت قائم بود. مقدار ارتفاع تاج سرریز از محل شفت قائم (P)، ثابت و برابر ۷/۶ سانتی متر بود ($P/D=1$). با توجه به مطالعه اثر شکل تاج سرریز در این پژوهش، شرایط جریان آزاد مورد بررسی قرار گرفت.

تخلیه جریان استفاده شده است. جریان ورودی آب از طریق لوله ای به قطر ۷/۶ سانتی متر که به بخش ابتدایی مخزن متصل شده صورت می گرفت. جریان آب قبل از ورود به مخزن اصلی به وسیله یک شیر فلکه تنظیم و در ادامه دبی جریان توسط یک دبی سنج حجمی با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه اندازه گیری می شد. جریان آب با عبور از صفحات مشبک وارد مخزن شده و از روی سرریز تعبیه شده بر شفت قائم به قطر ۷/۶ سانتی متر (تخلیه کننده تحتانی) عبور کرده و از طریق لوله ای به قطر ۱۲/۷ سانتی متر به مخزن پایین دست (روزمینی) تخلیه می شد. برای اندازه گیری ارتفاع آب بر روی سرریز، H، از یک عمق سنج نقطه ای با دقت ۰/۱ میلی متر استفاده می شد. لازم به ذکر است که مقادیر ارتفاع شفت قائم از کف مخزن (b) و قطر شفت قائم (D) به ترتیب برابر ۲۰ و ۷/۶ سانتی متر بود ($b/D=2/3$).

۲-۲- معرفی سرریزهای مورد مطالعه

در ابتدا هندسه تمام سرریزها در نرم افزار اتوکد ترسیم و سپس شابلون کاغذی هر مدل تهیه شد. در ادامه از ورق گالوانیزه ای به ضخامت ۰/۶ میلی متر برای ساخت مدل سرریزها استفاده شد. شایان ذکر است که تمام مدل ها با لبه تیز یکسان (۹۰ درجه و بدون پرداخت) ساخته شدند. پس از ساخت مدل ها، هر مدل بر روی شفت قائم نصب می شد و با استفاده از یک ترازبنایی از قرارگیری افقی مدل بر روی شفت قائم اطمینان حاصل می شد. به منظور آب بندی اتصال مدل روی شفت قائم از چسب آکواریوم استفاده شد. در این تحقیق سرریزهای چهار ضلعی (مربعی)^۱، شش ضلعی^۲ و هشت ضلعی^۳ در کنار سرریز نیلوفری^۴ و گلبرگی^۵ بررسی شد. جزئیات مربوط به سرریزهای مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است. در نام گذاری اختصاری مدل ها، از حروف اول نام انگلیسی شکل هندسی استفاده شده است. به عنوان مثال در مدل شش ضلعی، نام اختصاری H1، H2، H3، H4، H5 و یا

⁴ Morning Glory

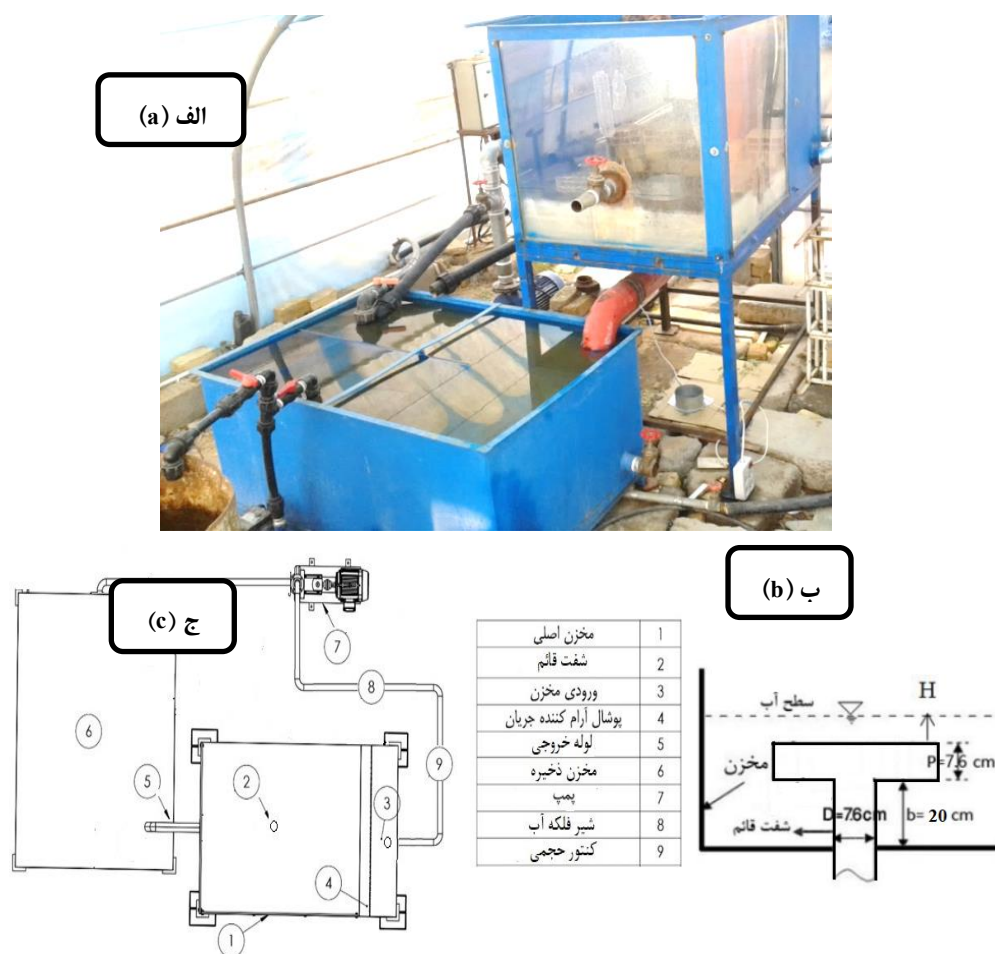
⁵ Daisy

⁶ Star-shaped Octagonal

¹ Square

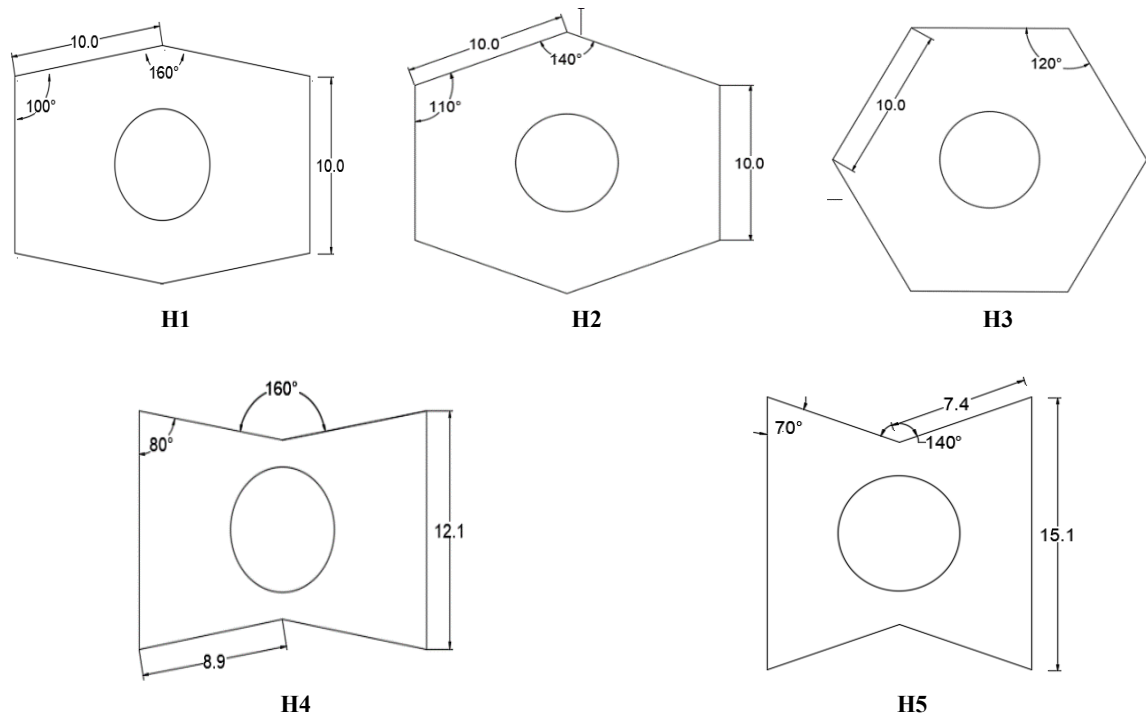
² Hexagonal

³ Octagonal



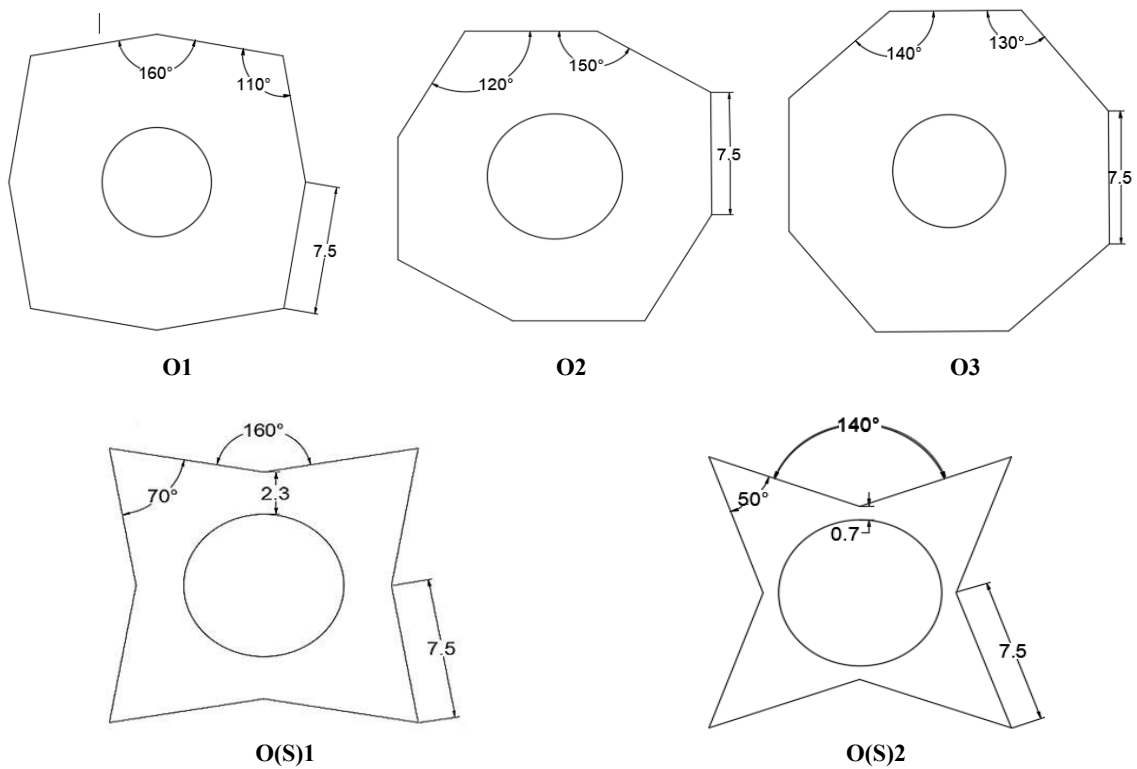
شکل ۱- مخزن اصلی و مخزن پایین دست (الف)، پلان مدل آزمایشگاهی به همراه اجزای مختلف آن (ب)، و پارامترهای هندسی سرریز و هیدرولیکی جریان (ج)

Fig. 1. Main and downstream reservoirs (a), plan view of the laboratory model with its various components (b), and geometric and hydraulic parameters of the flow (c)



الف) سرریزهای شش ضلعی

A) Hexagonal spillways

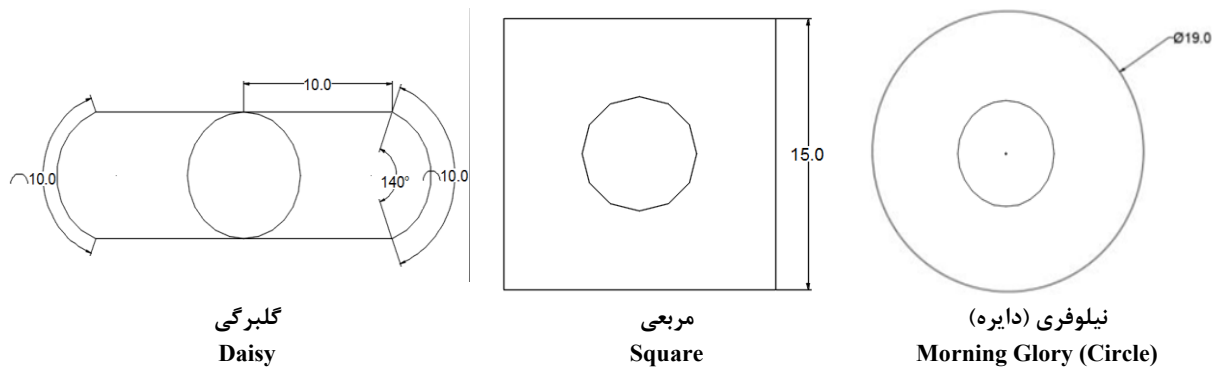


ب) سرریزهای هشت ضلعی

B) Octagonal spillways

شکل ۲- جزئیات مربوط به سرریزهای مورد آزمایش به همراه نام اختصاری آنها

Fig. 2. Details of the tested spillways along with their abbreviations



(ج) سرریزهای نیلوفری، مربعی و گلبرگی
(C) Daisy, square and Morning Glory spillways

ادامه شکل ۲- جزئیات مربوط به سرریزهای مورد آزمایش به همراه نام اختصاری آنها

Fig. 2. Details of the tested spillways along with their abbreviations, Continued

$$Q = LH^{2.5} g^{0.5} \times f_4\left(\frac{H}{D}, \theta, N\right) \quad (5)$$

با مقایسه فرم رابطه (۵) با رابطه عمومی سرریز برابر با $Q = C_d LH^{(3/2)}$ (Bagheri et al., 2010)، می‌توان رابطه ضریب دبی در سرریزهای مورد مطالعه را به صورت رابطه (۶) نوشت:

$$C_d = f_5\left(\frac{H}{D}, \theta, N\right) \quad (6)$$

در این تحقیق با توجه به در نظر گرفتن شرایط هیدرولیکی جریان (H/D) و پارامتر θ و N به عنوان متغیر هندسی سرریزهای مورد مطالعه مطابق مدل‌های شکل ۲، تعداد ۷۶ آزمایش به منظور بررسی تاثیر ابعاد مختلف هندسه سرریز تحت ترازهای سطح آب بر روی ضریب دبی انجام و نتایج حاصل مقایسه، تجزیه و تحلیل شد. محدوده متغیرهای هیدرولیکی آزمایش‌ها شامل دبی، عمق آب روی سرریز و عدد فروود در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- محدوده متغیرهای هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 1. Range of hydraulic variables in the experiments		
پارامتر	حداقل	حداکثر
دبی جریان (L/S)	۱/۳۳	۴/۷۶
عمق آب روی سرریز (mm)	۹	۲۳
عدد فروود (-)	۰/۳۳	۱/۲۱

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات آزمایش‌ها

در تحقیق حاضر برای بررسی تعداد اضلاع (تعداد کنگره) و زوایای مختلف بر روی ضریب دبی، از سرریز با ورودی شش، هشت ضلعی با زوایا و اضلاع متفاوت، یک سرریز مربع، سرریز نیلوفری و گلبرگی با

۲-۳- آنالیز ابعادی

با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی جریان و متغیرهای هندسی سرریزهای مورد مطالعه و شفت قائم، پارامترهای موثر بر دبی عبوری از این سرریزها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

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

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 مجذورثانیه)، 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)، N تعداد اضلاع دهانه ورودی، P ارتفاع تاج سرریز از محل شفت قائم و θ زاویه داخلی اضلاع (درجه) است. با در نظر گرفتن پارامترهای تکراری (H و Q) و با بکارگیری آنالیز ابعادی و بدست آوردن پارامترهای بی‌بعد، می‌توان نوشت:

$$f_2\left(\frac{Q}{H^{2.5}g^{0.5}}, \frac{D}{H}, \frac{Q}{H^3}, \frac{L}{H}, \frac{P}{H}, \theta, N\right) = 0 \quad (2)$$

در پارامتر $\frac{Q}{H^{2.5}g^{0.5}}$ با اعمال پارامتر بی‌بعد $\frac{H}{L}$ ، می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر نوشت:

$$f_3\left(\frac{Q}{LH^{2.5}g^{0.5}}, \frac{H}{D}, R_e, W_e, \frac{P}{H}, \theta, N\right) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه، R_e عدد رینولدز و W_e عدد وبر است. در آزمایش‌های این تحقیق شرایط جریان طوری تنظیم شد که عدد وبر بزرگتر از ۱۰۰ و عدد رینولدز بالاتر از 10^4 باشد، در نتیجه این دو پارامتر بر نتایج تحقیق تاثیری نداشته و می‌توان آنها را حذف کرد (Anwar et al., 1978; Jain et al., 1978). در رابطه فوق با حذف پارامترهای بی‌بعد ثابت و بی‌اثر می‌توان نوشت:

$$\frac{Q}{LH^{2.5}g^{0.5}} = f_4\left(\frac{H}{D}, \theta, N\right) \quad (4)$$

و یا

شده و جت‌ها به یکدیگر برخورد داشتند که با افزایش دبی شدت برخورد بیشتر شده و منجر به افزایش تلاطم در دهانه ورودی شد. مدل O(S)2 در دبی کم ($Q < 2.5 \text{ L/S}$)، عملکرد بهتری نسبت به مدل O(S)1 دارد و در دبی‌های بالاتر عملکرد این دو سرریز برعکس شد. در شکل ۵ جریان ورودی مدل‌های سرریز زیگزاگی شش‌ضلعی نشان داده شده است. در مدل‌های H1, H2, H3 شش جت ایجاد شد که در دو مدل H1 و H3 در دبی پایین جت‌ها به یکدیگر برخورد کردند ولی در H2 جریان با برخورد جزئی عبور کردند. در مدل‌های H4 و H5 چهار جت ایجاد شده که در مدل H5 جت‌ها به یکدیگر برخورد کرد و در مدل H4 جریان به راحتی عبور کرد. با افزایش ارتفاع آب جت‌ها به تدریج از بین رفتند و تبدیل به جریان یکنواخت ریزشی شدند.

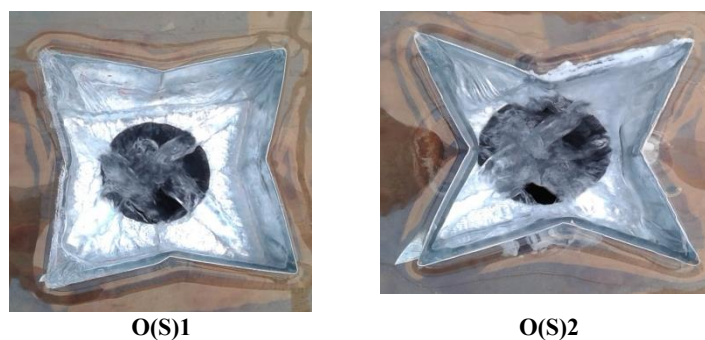
طول تاج برابر (60 سانتی‌متر یا $L/D = 7/89$) استفاده شد. در شکل ۳ جریان ورودی سه نوع از سرریزهای زیگزاگی هشت‌ضلعی نشان داده شده است. در مقادیر کم دبی، مدل O1 دارای ۴ جت کوچک (در زوایای بزرگتر) و ۴ جت بزرگ (در زوایای کوچکتر) است و جت‌های بزرگتر سریع‌تر به یکدیگر برخورد و منجر به کاهش دبی عبوری شد. مدل O2 و O3 دارای ۸ جت تقریباً یکسان است و هر دو مدل عملکرد مشابهی داشتند ولی مدل O3 در مقایسه با مدل O2 و سایر مدل‌های شش‌ضلعی عملکرد بهتری را داشت. با افزایش ارتفاع آب ($H > 15 \text{ mm}$) جت‌ها به تدریج از بین رفتند و تبدیل به جریان یکنواخت ریزشی شدند.

در شکل ۴ جریان ورودی سرریز زیگزاگی هشت‌ضلعی از نوع ستاره‌ای نشان داده شده است. در این مدل‌ها در دبی‌های پایین ($Q < 2.5 \text{ L/S}$)، ۴ جت (در زوایای داخلی کمتر از 90°) تشکیل



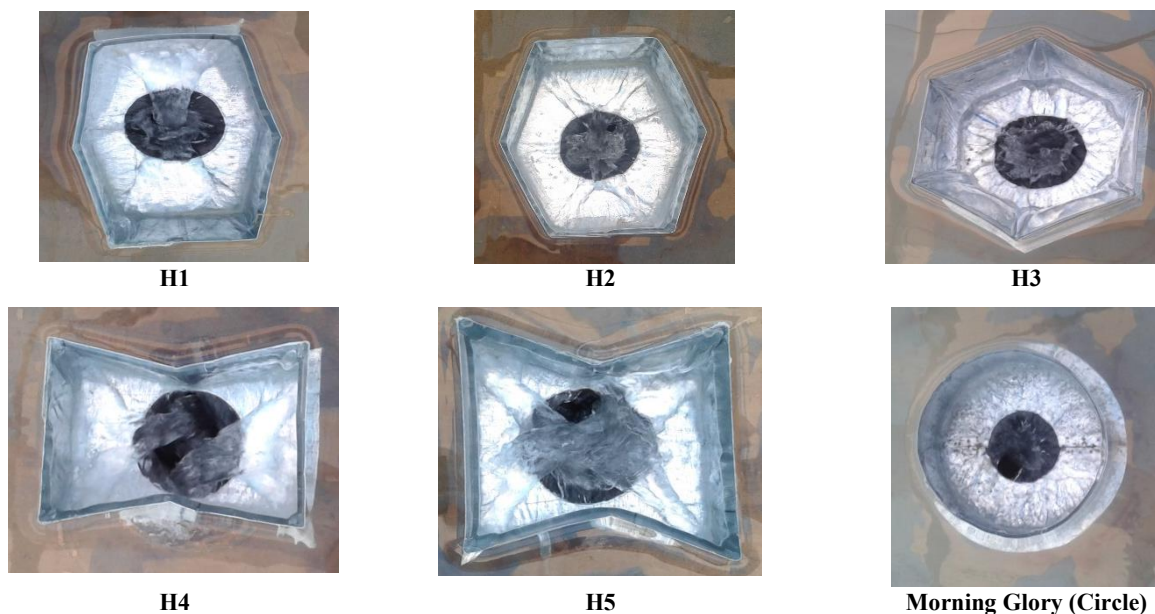
شکل ۳- نمای شرایط جریان‌های ریزشی در سرریزهای هشت‌ضلعی

Fig 3. View of the overtopping flow conditions in octagonal spillways



شکل ۴- نمای شرایط جریان‌های ریزشی در سرریزهای هشت‌ضلعی ستاره‌ای

Fig. 4. View of the overtopping flow conditions in the octagonal star spillways



شکل ۵- نمای شرایط جریان‌های ریزشی در سرریزهای شش‌ضلعی و نیلوفری

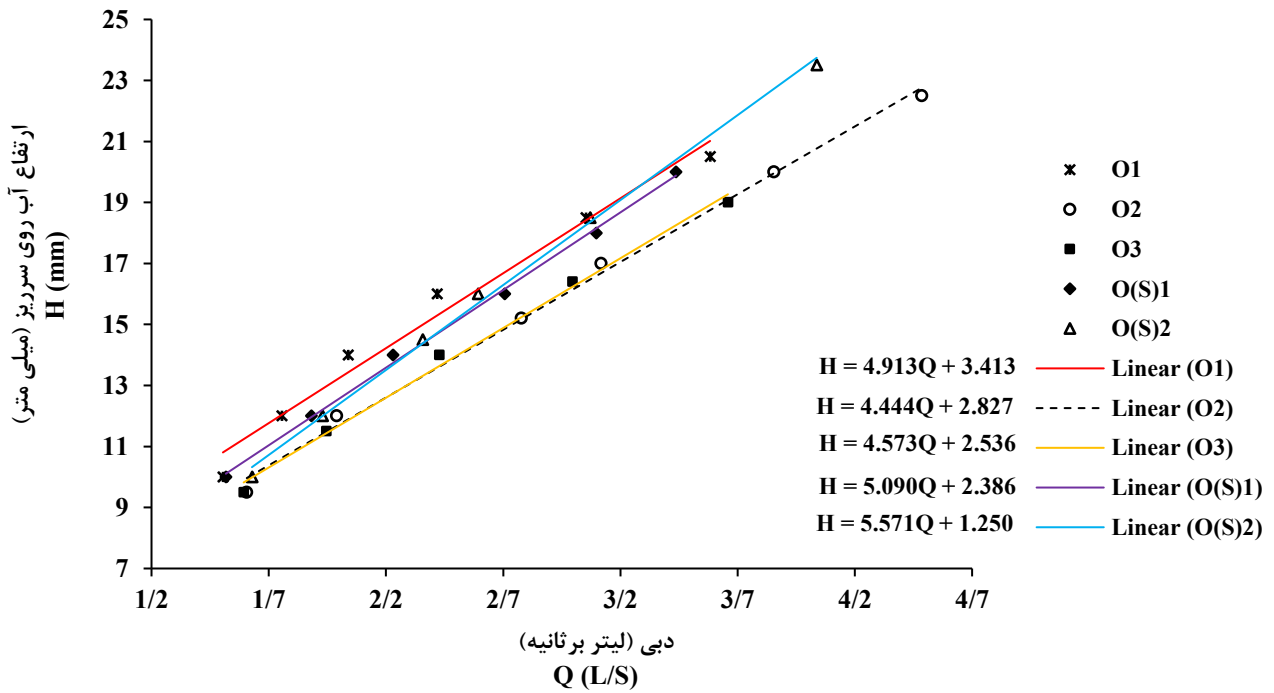
Fig. 5. View of the overtopping flow conditions in the hexagonal and Morning Glory spillways

۲-۳- منحنی‌های دبی - اشل

در شکل ۶ منحنی دبی-اشل (H-Q) سرریزهای مدل هشت‌ضلعی ارائه شده است. مطابق شکل، منحنی دبی-اشل در تمام مدل‌های هشت‌ضلعی روند افزایشی با شیب تقریباً مشابه را دارد. البته در مدل $O(S)2$ شیب منحنی نسبت به بقیه تندتر است (شیب برابر $5/5714$). در این مدل با توجه به زاویه‌ی کم کنگره‌ها (50°) به علت تداخل جریان ریزشی و انقباض در محل راس کنگره‌ها در دبی‌های بالا، ارتفاع سطح آب افزایش بیشتری نشان می‌دهد. منحنی دبی-اشل دو مدل $O2$ و $O3$ مشابه یکدیگر بوده و به ازای یک دبی ثابت ارتفاع آب روی سرریز کمتری نسبت به مدل‌های دیگر دارند. در مقابل منحنی دبی-اشل مدل $O1$ نسبت به بقیه مدل‌ها بالاتر است. مقایسه منحنی دبی-اشل دو مدل $O1$ و $O3$ با زاویه راس به ترتیب 160° و 140° نشان می‌دهد که با کاهش زاویه راس مدل و نزدیک شدن زاوایای داخلی هشت‌ضلعی به هم، به ازای یک دبی ثابت تراز پایین‌تری مشاهده می‌شود. در دو مدل $O(S)1$ و $O(S)2$ منحنی دبی-اشل تا حدودی نزدیک به هم می‌باشند. البته در دبی‌های بالا ($Q > 2.5 \text{ L/S}$) مقادیر تراز سطح

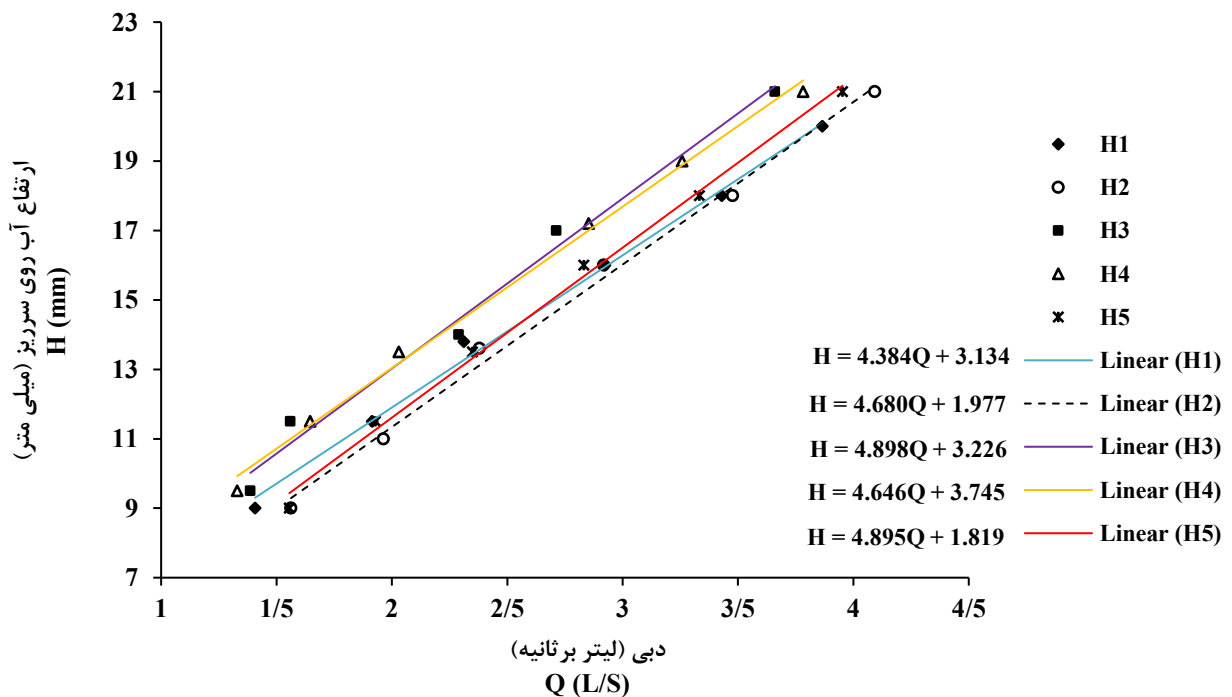
آب افزایش بیشتری نشان می‌دهد به‌طوری‌که به مقادیر مدل $O1$ نزدیک شده است.

در شکل ۷ منحنی دبی-اشل (H-Q) سرریزهای مدل شش‌ضلعی ارائه شده است. مطابق شکل منحنی دبی-اشل همه مدل‌ها دارای روند افزایشی با شیب تقریباً یکسان است. دو مدل $H3$ و $H4$ با منحنی‌های تقریباً بر هم منطبق، دارای بالاترین منحنی دبی-اشل می‌باشند. در مقابل منحنی دبی-اشل مدل $H2$ نسبت به مدل‌های دیگر به ازای یک دبی ثابت دارای کم‌ترین مقادیر تراز سطح آب است. مقایسه منحنی دبی-اشل $H4$ و $H5$ (با شکل مشابه) نشان می‌دهد که با کاهش زاویه داخلی یا خارجی مدل، مقادیر تراز سطح آب به ازای یک دبی ثابت کاهش یافته است. علت این مسئله ناشی از افزایش تداخل جریان ریزشی در زوایای کم است. در مدل $H5$ با دبی‌های کم، تراز سطح آب تقریباً مشابه $H2$ است و با افزایش دبی جریان اختلاف دو منحنی دبی-اشل بیشتر شده است. مقادیر منحنی دبی-اشل مدل $H1$ در دبی‌های کم نسبت به مدل $H2$ بالاتر قرار دارد که با افزایش دبی جریان این اختلاف کاهش پیدا کرده و در دبی‌های بالا دو منحنی تقریباً برهم منطبق شده است.



شکل ۶- منحنی‌های دبی-اشار سرریزهای هشت ضلعی

Fig. 6. Head-discharge rating curves of octagonal spillways



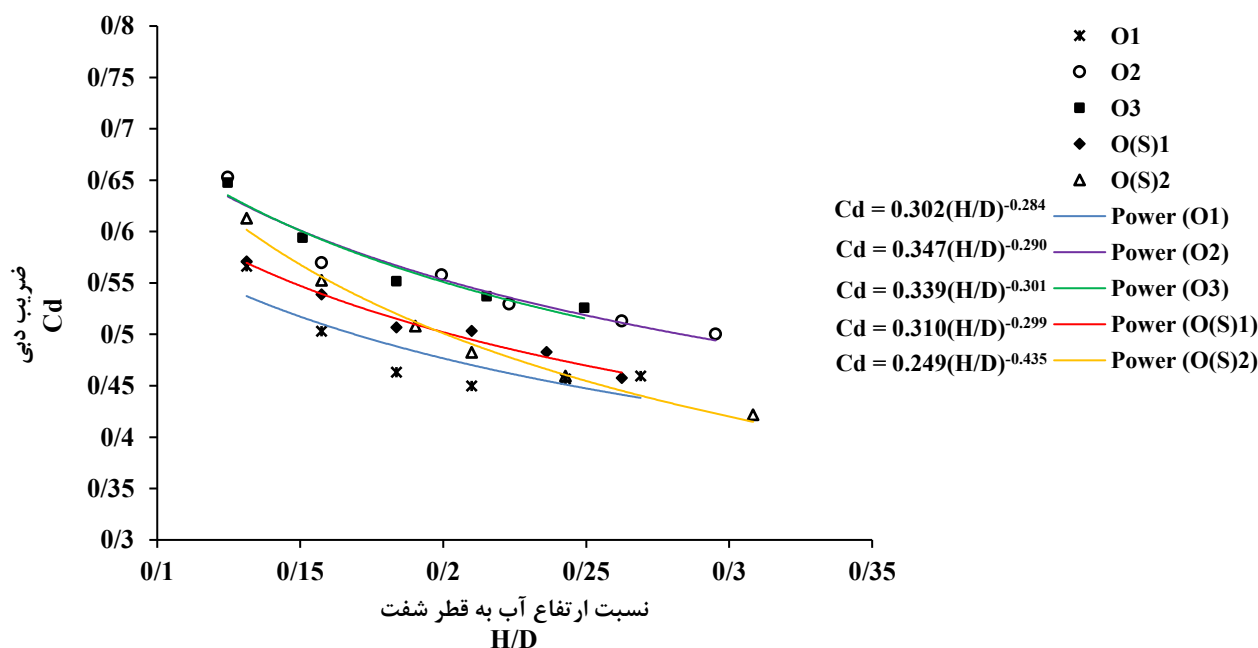
شکل ۷- منحنی‌های دبی-اشار سرریزهای شش ضلعی

Fig. 7. Head-discharge rating curves of the tested hexagonal spillways

۳-۳- تغییرات ضریب دبی

در شکل ۸ تغییرات ضریب دبی نسبت به مقادیر H/D در مدل های هشت‌ضلعی ارائه شده است. همچنین جدول ۲ مقایسه کلی عملکرد هیدرولیکی (متوسط درصد تغییرات ضریب دبی) و عملکرد هندسی (درصد تغییرات مساحت) سرریزهای مورد مطالعه را نسبت به سرریز نیلوفری نشان می‌دهد. در این جدول، درصد متوسط تغییرات ضریب دبی و درصد تغییرات مساحت سطح داخلی سرریزهای مورد مطالعه نسبت به مدل نیلوفری ارائه شده است. برای هر سری داده ضریب دبی مدل‌های مورد بررسی، فرم روابط مختلف بررسی و بهترین رابطه به فرم توانی برازش شد که رابطه آنها در شکل ارائه شده است. مطابق شکل ۸ با افزایش H/D مقادیر ضریب دبی در همه مدل‌ها با شیب مشابه روند کاهشی دارد. البته در مدل $O(S)2$ روند کاهشی ضریب دبی شدیدتر است. به ازای مقادیر H/D ثابت، دو مدل $O2$ و $O3$ دارای بیشترین مقادیر C_d بوده و درصد تغییرات مساحت آنها نسبت به مدل نیلوفری تقریباً برابر است ($5/5$ و 7 درصد کاهش مساحت)، در مقابل مدل $O1$ کمترین مقادیر ضریب دبی را نشان داده است. در مدل $O1$ زوایای داخلی هشت‌ضلعی به صورت 160° به 110° است، در حالی که در مدل $O2$ و یا $O3$ مقادیر زوایای داخلی

اختلافشان کمتر است. نتایج ضریب دبی مدل $O(S)1$ با عملکرد بهتر نسبت به مدل $O1$ نشان می‌دهد که اثر نزدیک شدن موقعیت اتصال کنگره‌ها به محل شفت نسبت به اثر زاویه راس کنگره‌ها تأثیر بیشتری در افزایش دبی دارد. به عبارت دیگر زمانی که موقعیت اتصال کنگره‌ها به محل شفت آنگیر نزدیک می‌شود، ظرفیت آنگیری افزایش بیشتری نشان می‌دهد. مقایسه دو مدل ستاره ای $O(S)1$ و $O(S)2$ نشان می‌دهد که با وجود عملکرد بهتر $O(S)2$ در مقادیر H/D پایین‌تر از $0/2$ ، عملکرد مدل $O(S)1$ در مقادیر H/D بیشتر از $0/2$ بهتر شده است. در مجموع مشاهده می‌شود این دو مدل با عملکرد تقریباً یکسان نسبت به مدل‌های $O2$ و $O3$ عملکرد کمتری را نشان می‌دهند، این درحالی است که در دو مدل ستاره‌ای $O(S)1$ و $O(S)2$ درصد کاهش تغییرات مساحت نسبت به مدل نیلوفری قابل توجه است ($36/7$ و 55 درصد کاهش). در بین مدل‌های هشت‌ضلعی مدل $O2$ (با زوایای داخلی 120° و 150°) به‌عنوان مدل انتخابی جهت مقایسه با مدل‌های دیگر در نظر گرفته شد. (Tullis et al. (1995) با بررسی تأثیر زوایای مختلف راس در سرریزهای کنگره‌ای گزارش کردند با افزایش زاویه راس سرریز، ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد که این مسئله را می‌توان به دلیل کاهش تداخل لایه‌های جریان به‌علت دور شدن دیواره‌های دانست.



شکل ۸- تغییرات ضریب دبی سرریزهای هشت‌ضلعی نسبت به مقادیر H/D

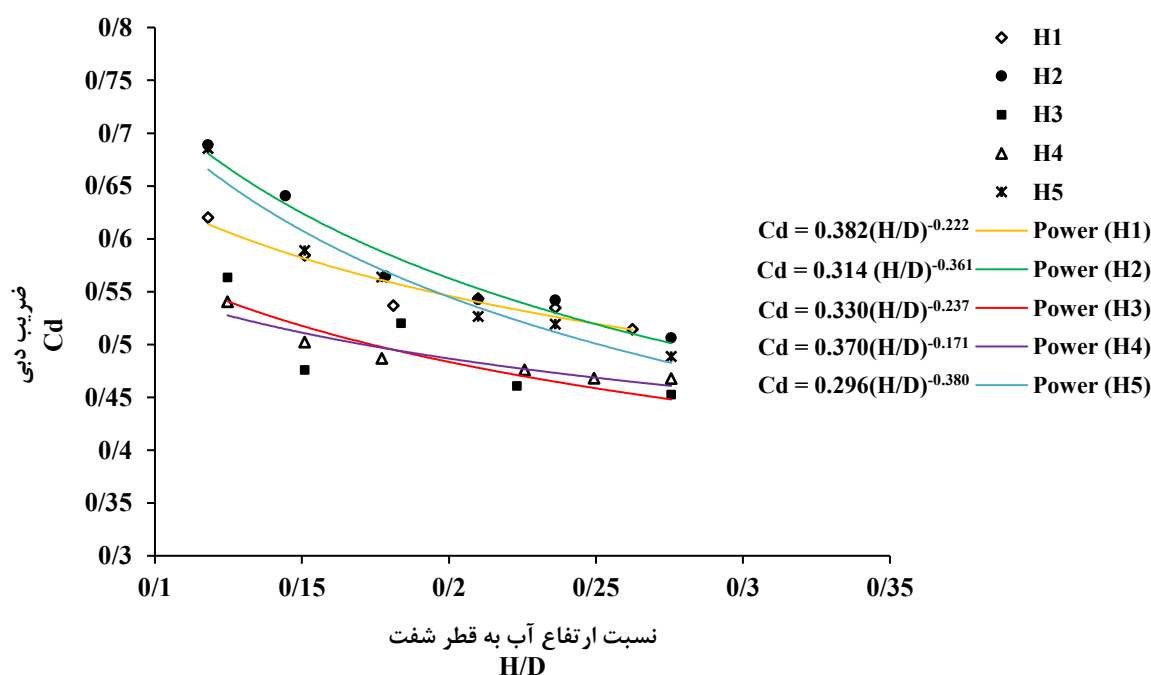
Fig. 8. Discharge coefficient variations of octagonal spillways versus H/D ratios

مدل $H2$ و $H5$ مشابه یکدیگر دیده می‌شود. به ازای H/D های ثابت مقادیر ضریب دبی مدل $H2$ از سایر مدل‌ها بیش‌تر بوده و در مقابل دو مدل $H3$ و $H4$ دارای کم‌ترین ضریب دبی می‌باشند. در مقادیر H/D بزرگتر از $0/2$ ، ضریب دبی مدل $H1$ بیشتر از مدل $H5$ شده و منطبق

در شکل ۹ نتایج تغییرات ضریب دبی نسبت به مقادیر H/D در مدل‌های شش‌ضلعی ارائه شده است. مطابق شکل با افزایش H/D مقادیر ضریب دبی روند افزایشی نشان می‌دهد، به‌طوری‌که شیب تغییرات ضریب دبی در سه مدل $H1$ و $H3$ و $H4$ مشابه هم و در دو

از مدل H4 بوده (۲۵ درصد بیشتر) ولی فاصله این اضلاع تا شفت در مدل H5 کمتر است (۵۰ درصد کمتر). در مدل H5 با وجود زاویه کمتر راس کنگره و زاویه اتصال کنگره‌ها نسبت به مدل H4 (۱۴/۳ درصد کمتر)، عملکرد بهتر مدل H5 نشان دهنده موثر بودن طول اضلاع مستقیم و نزدیکی آنها به شفت نسبت به زاویه است. مشاهده می‌شود که اختلاف عملکرد هیدرولیکی دو مدل H5 و H2 در حدود ۳ درصد است اما درصد کاهش مساحت مدل H5 (۳۸/۳ درصد) در مقایسه با مدل H2 (۲۰ درصد) قابل توجه است و مدل H5 جهت مقایسه عملکرد با سایر مدل‌های مورد بررسی در نظر گرفته شد.

بر مقادیر مدل H2 شده است. در سه مدل H1 و H2 و H3 با شکل هندسی مشابه (با طول اضلاع برابر ۱۰ سانتی متر و زوایای داخلی مختلف)، مدل H2 نسبت به دو مدل دیگر دارای ضریب دبی بالاتری است. این مدل دارای زوایای داخلی (شامل ۱۴۰ و ۱۱۰ درجه) است و مقدار درصد کاهش مساحت آن نسبت به مدل نیلوفری برابر ۱۰/۶ است (جدول ۲). در دو مدل H4 و H5 با شکل هندسی مشابه، مدل H5 دارای ضریب دبی بیشتری است، درحالی‌که در دو مدل درصد کاهش مساحت نسبت به مدل نیلوفری نزدیک به هم است (۳۴/۶ و ۳۸/۳ درصد). در دو مدل H4 و H5 موقعیت اتصال کنگره‌ها به شفت تقریباً با هم برابر است، از طرفی طول اضلاع بزرگتر در مدل H5 بیشتر



شکل ۹- تغییرات ضریب دبی سرریزهای شش‌ضلعی نسبت به مقادیر H/D

Fig. 9. Discharge coefficient variations of hexagonal spillways versus H/D ratios

نشان می‌دهد به‌طوری‌که ایشان با مطالعه تاثیر تعداد وجه‌های سرریز گلبرگی به این نتیجه رسیدند که با کاهش تعداد گلبرگ‌ها (تعداد کنگره)، ضریب دبی افزایش نشان می‌دهد و (Bagheri et al. (2010) سرریز گلبرگی سه‌وجهی (سه کنگره) و (Mojdemi & Kabiri- Samani (2016) سرریز گلبرگی متقارن دووجهی (دو کنگره) را به- عنوان بهترین مدل معرفی کردند. همچنین Rouzegar et al. (2019) با بررسی ضریب تخلیه سرریزهای هشت، شانزده و سی و دوضلعی به نتیجه مشابه با تحقیق حاضر رسیدند که هر چه تعداد اضلاع (تعداد کنگره‌ها) کاهش یابد، ضریب دبی افزایش می‌یابد. درخصوص درصد کاهش مساحت سرریزها مشاهده می‌شود، باوجود اینکه عملکرد هیدرولیکی سرریز مربعی نسبت به سرریز شش‌ضلعی H5 در حدود ۶/۵ درصد بهتر است اما درصد کاهش مساحت مدل H5

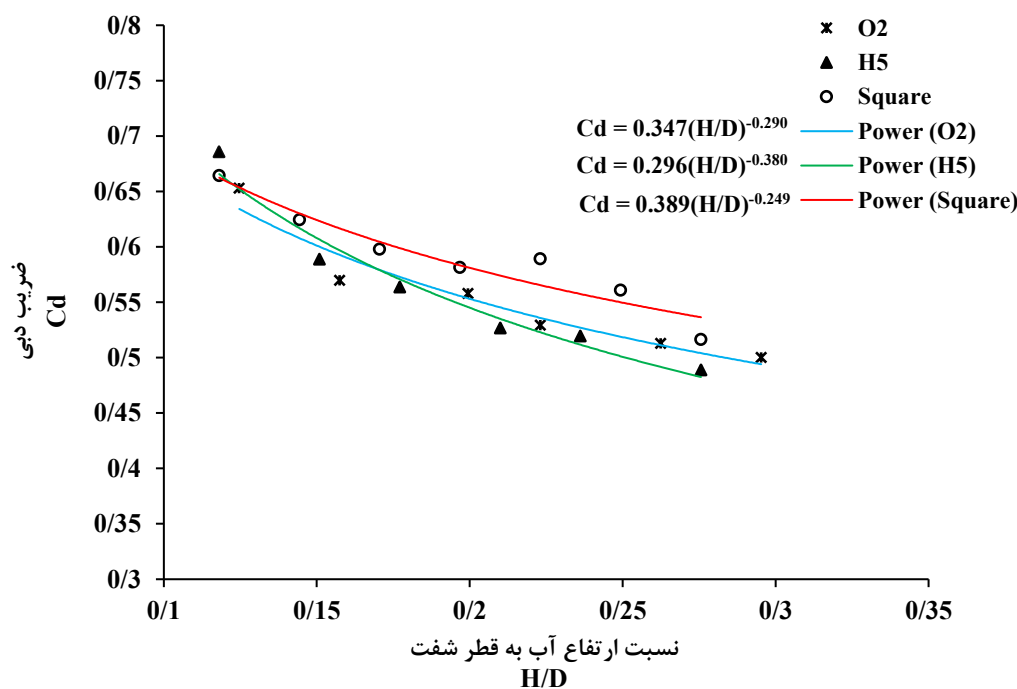
در شکل ۱۰ نتایج تغییرات ضریب دبی نسبت به مقادیر H/D در سرریزهای هشت‌ضلعی، شش‌ضلعی و مربعی (اثر تعداد اضلاع چندوجهی در مدل‌ها با بهترین عملکرد هیدرولیکی و هندسی) ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰ و نتایج جدول ۲، با افزایش مقدار H/D، روند تغییرات C_d در هر سه مدل به‌صورت کاهشی با شیب تقریباً مشابه است. نتایج نشان می‌دهد سرریز مربعی دارای بیشترین C_d بوده و مقدار ضریب دبی آن نسبت به مدل نیلوفری در حدود ۵ درصد افزایش یافته است.

در مجموع می‌توان گفت در بازه شرایط هیدرولیکی مورد استفاده در این تحقیق، با کاهش تعداد اضلاع سرریز (یا تعداد کنگره‌ها)، ضریب دبی افزایش یافته و سرریز مربعی (چهارضلعی) دارای ضریب دبی بیشتری است. نتایج این بخش از تحقیق با یافته‌های Bagheri et al. (2010) و (Mojdemi & Kabiri-Samani (2016) همخوانی خوبی

و گلبرگی بوده (با اختلاف حدود ۴/۷ درصد)، ولی با رسیدن H/D به مقدار ۰/۳ ضریب دبی هر سه سرریز به یکدیگر نزدیک شده است به طوری که اختلاف عملکرد هیدرولیکی دو سرریز گلبرگی و مربعی در حدود ۱/۵ درصد است. از طرفی در سرریز گلبرگی ضمن افزایش ضریب دبی نسبت به مدل نیلوفری (۳/۵)، درصد کاهش مساحت آن نسبت به مدل مربعی در حدود ۱۵ درصد بیشتر است.

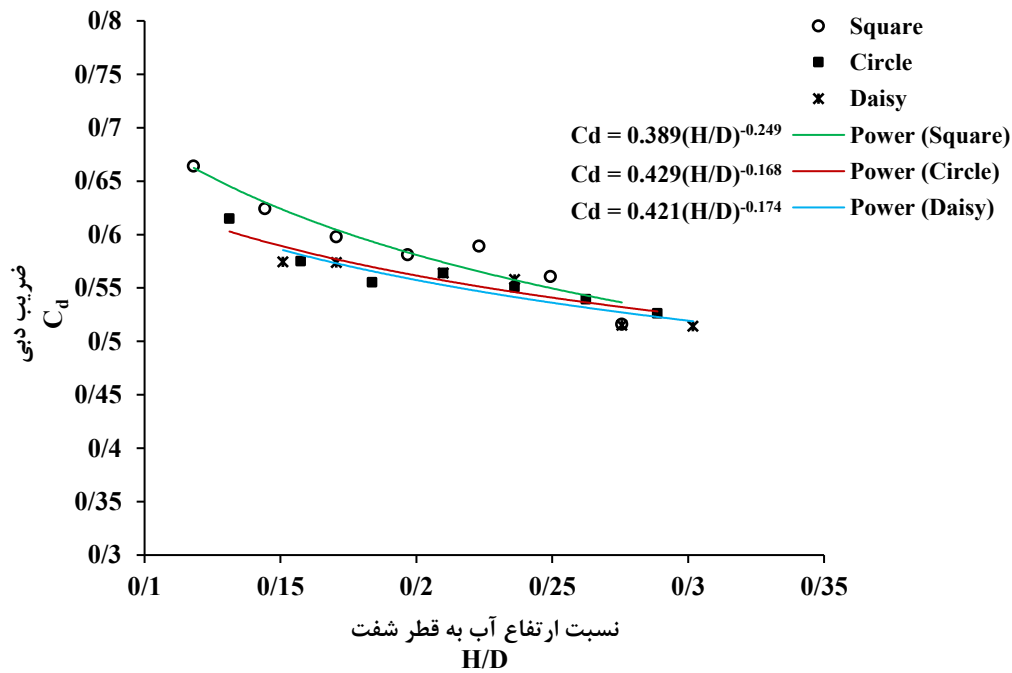
نسبت به سرریز مربعی در حدود ۱۷ بیشتر است و این موضوع می تواند در انتخاب بهترین مدل سرریز مورد بحث قرار گیرد.

در شکل ۱۱، نتایج ضریب دبی سرریز مربعی در مقایسه با سرریز نیلوفری و گلبرگی شکل به ازای مقادیر مختلف H/D ارائه شده است. مشاهده می شود که سرریز نیلوفری (دایره ای) و گلبرگی شکل دارای مقادیر ضریب دبی تقریباً مشابهی هستند. از طرفی مقادیر ضریب دبی سرریز مربعی خصوصاً در مقادیر کمتر H/D بیشتر از دو سرریز نیلوفری



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات ضریب دبی نسبت به مقادیر H/D در بهترین سرریزهای هشت ضلعی، شش ضلعی و سرریز مربعی

Fig. 10. Comparison of discharge coefficient variations with H/D ratios for the best octagonal, hexagonal, and square spillways



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات ضریب دبی نسبت به مقادیر H/D سرریز مربعی با سرریز نیلوفری و گلبرگی شکل

Fig. 11. Comparison of discharge coefficient variations with H/D ratios for square spillway with Daisy and Morning Glory (Circle) spillway

جدول ۲- درصد تغییرات مساحت و متوسط درصد تغییرات ضریب دبی مدل های مورد بررسی نسبت به مدل نیلوفری

Table 2. Percentage of area changes and average percentage of discharge coefficient changes of the studied models compared to the Morning Glory (Circle) spillway

نام مدل Model name	مساحت سطح داخلی سرریز (cm ²) Internal surface area of the spillway	درصد تغییرات مساحت نسبت به مدل نیلوفری	متوسط درصد تغییرات ضریب دبی نسبت به مدل نیلوفری
		Percentage of area changes compared to the Morning Glory model	Average percentage of changes in discharge coefficient compared to Morning Glory model
O1	۲۵۵	-۱۰/۱	-۱۶/۸
O2	۲۶۳/۵	-۷	-۰/۶
O3	۲۶۸	-۵/۵	-۱/۱
O(S)1	۱۷۹/۵	-۳۶/۷	-۱۱
O(S)2	۱۲۷/۵	-۵۵	-۱۰/۵
H1	۲۳۲/۵	-۱۸	-۲/۵
H2	۲۵۳/۵	-۱۰/۶	+۱/۶
H3	۲۶۱/۸	-۷/۶	-۱۵/۵
H4	۱۸۵/۵	-۳۴/۶	-۱۴/۹
H5	۱۷۵	-۳۸/۳	-۱/۵
Daisy	۱۸۱/۹	-۳۶/۱	+۳/۵
Square	۲۲۵/۰	-۲۱/۰	+۵/۰
Morning Glory (Circle)	۲۸۴/۹	---	---

۴- نتیجه گیری نهایی

در این تحقیق، تأثیر تعداد اضلاع سرریزهای قائم با مقطع ورودی چندضلعی بر روی ضریب دبی جریان، با استفاده از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ۵ مدل سرریز شش ضلعی و ۵ مدل سرریز هشت ضلعی (شامل ۲ مدل ستاره‌ای) ساخته شد و عملکرد آنها با سرریزهای مربعی، گلبهرگی و نیلوفری (با طول تاج یکسان) مقایسه گردید.

نتایج نشان داد که منحنی دبی-اشل در تمام مدل‌ها روند افزایشی با شیب تقریباً مشابه دارد، هرچند در مدل هشت ضلعی $O(S)2$ ، شیب منحنی نسبت به سایرین تندتر بود. در میان مدل‌های شش ضلعی، دو مدل $H3$ و $H4$ با منحنی‌های تقریباً منطبق، بالاترین تراز دبی-اشل را نشان دادند. به طور کلی، با افزایش ارتفاع آب روی تاج، ضریب دبی در همه مدل‌ها کاهش یافت. برای هر سری داده، روابط توانی به عنوان بهترین برازش انتخاب شدند.

در مدل‌های هشت ضلعی، مدل‌های ستاره‌ای $O(S)1$ و $O(S)2$ به دلیل زوایای داخلی کوچک کنگره‌ها، عملکرد ضعیفی داشتند و تداخل جریان ریزشی به‌ویژه در دبی‌های بالا در آنها محسوس بود. در این گروه، مدل $O2$ (با زوایای داخلی 120° و 150° درجه و طول ضلع $7/5$ سانتی‌متر) بهترین عملکرد را دارا بود؛ به گونه‌ای که کاهش مساحت آن نسبت به مدل نیلوفری حدود ۷ درصد بود.

در مدل‌های شش ضلعی، مدل $H5$ (با زوایای داخلی 120° و 150° درجه و طول اضلاع $15/1$ و $7/4$ سانتی‌متر) در نسبت‌های H/D ثابت، بیشترین ضریب دبی را نشان داد. این مدل با کاهش مساحت $38/3$ درصدی نسبت به مدل نیلوفری از نظر صرفه‌جویی در فضای داخلی عملکرد قابل توجهی داشت.

مقایسه نتایج سرریزهای هشت ضلعی و شش ضلعی و مربعی نشان داد که با کاهش تعداد کنگره‌ها، ضریب دبی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که سرریز مربعی نسبت به بهترین مدل‌های هشت ضلعی و شش ضلعی، ضریب دبی بالاتری داشت. لازم به ذکر است که در مدل مربعی، کاهش مساحت داخلی نسبت به مدل نیلوفری برابر ۲۱ درصد است. به طور کلی، می‌توان گفت که با افزایش تعداد سیکل‌های سرریز، میزان ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد که این موضوع را می‌توان به دلیل افزایش تداخل لایه‌های جریان در نتیجه نزدیکی دیواره‌های سرریز به یکدیگر نسبت داد.

در بخش نتایج تکمیلی، مشاهده شد که ضریب دبی سرریزهای مربعی و گلبهرگی تقریباً نزدیک به هم است؛ هرچند که درصد کاهش مساحت در سرریز گلبهرگی نسبت به مدل مربعی حدود ۱۵ درصد بیشتر است. در مجموع، سرریزهای مربعی، گلبهرگی و شش ضلعی $H5$ با عملکرد هیدرولیکی تقریباً مشابه و کاهش مساحت قابل توجه (بین ۲۱ تا ۳۸ درصد) نسبت به مدل نیلوفری، گزینه‌های مناسبی برای جایگزینی با این سرریز محسوب می‌شوند. بدیهی است که انتخاب نهایی یکی از این سه گزینه، با در نظر گرفتن سایر شرایط فنی طرح

سد از جمله محدودیت‌های مکانی، توپوگرافی و ملاحظات اجرایی، امکان پذیر خواهد بود.

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود تأثیر طول‌های مختلف سرریز بر روی ضریب دبی مطالعه شود. همچنین شبیه سازی عددی سرریزهای مورد بررسی برای شناخت بهتر هیدرولیک جریان عبوری از سرریزها پیشنهاد می‌شود.

منابع

- Aghvami, M, Abbaspour, A, Farsadizadeh, D, Salmasi, F 2025. Numerical Simulation of Flow Characteristics in Vertical and Inclined Rectangular Drops Using RNG k- ϵ . Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (3):37-49. doi.org/10.22034/hws.2025.67753.1028
- Anwar HO, Waller JA, and Amphlet MB, 1978. Similarity of free-vortex at horizontal intake. Journal of Hydraulic Research, 16(2), 95-105, [doi:10.1080/00221687809499623](https://doi.org/10.1080/00221687809499623).
- Arham Namazi FS, and Mozaffari J, 2023. Laboratory investigation of the performance of triangular and semi-circular homologous labyrinth weirs. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 23, 83-97, [doi:10.22092/idser.2023.362473.1547](https://doi.org/10.22092/idser.2023.362473.1547) (In Persian with English Abstract).
- Aydin MC, and Ulu AE, 2023. Numerical investigation of labyrinth-shaft spillway. Applied Water Science, 13(4), 89, [doi:10.1007/s13201-023-01896-4](https://doi.org/10.1007/s13201-023-01896-4).
- 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.
- Bahrebar AR, Heidarnejad M, Masjedi AR, and Bordbar A, 2021. Numerical and experimental study of the combination of labyrinth weir with orifice and its effect on discharge coefficient. Journal of Water and Soil Science, 25(2), 91-105, [doi:10.47176/jwss.25.2.38095](https://doi.org/10.47176/jwss.25.2.38095) (In Persian with English Abstract).
- Coleman HW, Wei CY, and Lindell JE, 2004. Hydraulic design of spillway. McGrawHill, New York.
- Djillali K, Abderrezak B, Petrovic GA, and Sourenvna 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. [doi:10.2166/ws.2020.366](https://doi.org/10.2166/ws.2020.366).
- Feili J, Heidarnejad M, Kamanbedast AA, Masjedi AR, and Asadi Lor M, 2020. Experimental study of discharge coefficient of trapezoidal arced labyrinth weirs with different arc radius and cycle length. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(5), 1115-1126, [doi:10.22059/ijswr.2020.293163.668411](https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.293163.668411) (In

- Shemshi R, and Kabiri-Samani A, 2017. Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets. *Journal of Hydraulic Research*, 55(2), 248-258, [doi: 10.1080/ 00221686.2016.1238015](https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1238015).
- Talebi S, Mahtabi G, karbasi M, and Akbari M, 2024. Experimental study of hydraulic properties of flow over vertical shaft spillway with different shape of inlet. *Water and Soil Science*, 34(2), 1-15, [doi:10.22034/ws.2023.54488.2508](https://doi.org/10.22034/ws.2023.54488.2508) (In Persian with English Abstract).
- Tayler G, 1968. The performance of labyrinth weirs. PhD. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
- Toroujeni JM, Dehghani AA, Emadi AR, and Masoudian M, 2021. Experimental study of discharge coefficient at the dentate trapezoidal labyrinth weir. *Journal of Water and Soil Science*, 25(3), 209-224, [doi:10.47176/jwss. 25.3.41781](https://doi.org/10.47176/jwss.25.3.41781) (In Persian with English Abstract).
- Tullis JP, Amanian N, and Waldron D, 1995. Design of labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 121(3), 247-255, [doi: 10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121 :3\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247)).
- USBR, 1987. Design of small dams .3rd Edition, U.S. Bureau of Reclamation, USA.
- Persian with English Abstract).
- Hay N, and Taylor G, 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 96(11), 2337-2357, [doi:10.1061/JYCEAJ.0002766](https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002766).
- Jain AK, Raju KG, and Garde RJ, 1978. Vortex formation at vertical pipe intakes. *Journal of Hydraulic Division ASCE*, 104, 1429-1445, [doi:10.1061/JYCEAJ.0005087](https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005087). 51 108.
- Lashkar-Ara B, and Sheikhi Y, 2017. Introduce of CPK spillway and study of its discharge coefficient under free flow regime. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), 209-221, [doi:10.22055/jise.2017.13180](https://doi.org/10.22055/jise.2017.13180) (In Persian with English Abstract).
- Mahmoud AH, Dardeer M, Ananil AE, and Zayed M, 2025. Hydraulic evaluation of morning glory spillways with semi-elliptical notches. *Civil Engineering and Architecture* 13(3): 1875-1884, [doi: 10.13189/cea.2025.130331](https://doi.org/10.13189/cea.2025.130331).
- Mojdemi MJ, and Kabiri-Samani AR, 2016. Effect of daisy-shape inlet on free flow over shaft spillways. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 16(5), 191-202 (In Persian with English Abstract).
- Namdar Vandaei S, Abbaspour A, Hosseinzadeh Dalir A, and Salmasi F, 2025. Numerical investigating the effect of trapezoidal sharp-crested sideweir geometric parameters on discharge coefficient. *Hydraulics and Water Science*, 34(4), 75-88, [doi: 10.22034/hws.2024.18796](https://doi.org/10.22034/hws.2024.18796) (In Persian with English Abstract).
- Nasiri S, Kabiri-Samani A, Asghari K, and Bagheri S, 2021. Numerical modeling of flow field around the shaft spillways using piano-key inlet. *Journal of Hydraulics*, 11(1), 53-63, [doi:10.30482/jhyd.2016.41487](https://doi.org/10.30482/jhyd.2016.41487) (In Persian with English Abstract).
- Radmanesh S, Bazaee A, and Aghamajidi R. 2022. Calculating the overflow coefficient of stepped and non-stepped morning glory spillway and investigating its behavior using antivortex blades. *Civil and Project Journal*, 4(2), 51-64, doi.org/10.22034/cpj.2022.04.02.1139.
- Rouzegar J, Kamanbedast AA, Masjedi A, Heidarnejad M, and Bordbar A, 2019. The study of inlet section on flow hydraulics in zigzag-morning glory spillways with physical modelling. *Journal of Water and Soil Science*, 23(3), 1-13, [doi.org/10.47176/jwss.23.3. 114514](https://doi.org/10.47176/jwss.23.3.114514) (In Persian with English Abstract).
- Sadeghian J, Yari A, and Norouzi H, 2023. Investigating the efficiency of trapezoidal labyrinth weirs with equal and unequal indentation lengths. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 67-76, [doi:10.22091/cer. 2023.9038.1455](https://doi.org/10.22091/cer.2023.9038.1455) (In Persian with English Abstract).