

Experimental Study of Discharge Coefficient of Trapezoidal Arced Labyrinth Weirs with Different Arc Radius and Cycle Length

JAMAL FEILI¹, MOHAMMAD HEIDARNEJAD^{1*}, AMIR ABBAS KAMANBEDAST¹, ALIREZA MASJEDI¹, MAHDI ASADI LOR¹

1. Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
(Received: Dec. 10, 2019- Revised: Feb. 6, 2020- Accepted: Feb. 19, 2020)

ABSTRACT

Labyrinth weirs are structures for transferring large flows at low heads, in which the effective length of crest for a given channel width is increased. In this study trapezoidal arced labyrinth weirs with different arc radius and cycle length were investigated. Several experiments were conducted using physical models to evaluate the effect of R/w_l (ratio of arc radius to middle cycle width) and B/w_l (ratio of weir length in flow direction to middle cycle width) on weir discharge coefficient. The experiments were carried out using a 6 m long test flume with cross section of 0.6 m width and 0.6 m height. Using Buckingham method of dimensional analysis, it was found that the discharge coefficient is a function of three variables; hydraulic head, arc radius of weir and weir length ratio. In general, the results of this study showed by increasing arc radius ratio, discharge coefficient of trapezoidal arced labyrinth weir increases up to 27.3%. Besides, by decreasing the weir length ratio from 1.5 to 1, discharge coefficient increased up to 29.7%.

Keywords: Discharge Coefficient, Hydraulic Model, Trapezoidal Arced Labyrinth Weir.

بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با شعاع قوس و طول سیکل متفاوت

جمال فیلی^۱، محمد حیدر نژاد^{۱*}، امیر عباس کمان بدست^۱، علیرضا مسجدی^۱، مهدی اسدی لور^۱

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای سازه‌هایی هستند که برای انتقال جریان‌های بزرگ در هدهای کم، با افزایش طول مؤثر تاج سرریز با توجه به وسعت کانال طراحی شده‌اند. در این پژوهش سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با شعاع قوس و طول سیکل متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش‌های متعددی با استفاده از روش مدل‌سازی فیزیکی برای تعیین تأثیر 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 شد. آزمایش‌ها بر روی یک فلوم مستطیلی به طول ۶ متر، ارتفاع و عرض ۰/۶ متر انجام شد. با استفاده از آنالیز ابعادی به روش باکینگهام مشخص شد که ضریب دبی تابع سه پارامتر هد هیدرولیکی، شعاع قوس سرریز و نسبت طولی سرریز خواهد بود. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش نسبت شعاع قوس در سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای، ضریب دبی تا ۲۷/۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش نسبت طول سیکل از $B/w_1=1/5$ به $B/w_1=1$ ، ضریب دبی سرریز تا حدود ۲۹/۷ درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: سرریز کنگره‌ای، ضریب دبی، مدل هیدرولیکی، سرریز قوسی دوزنقه‌ای.

مقدمه

سرریزهای کنگره‌ای به عنوان یک گزینه اقتصادی و فنی جهت کنترل جریان در موارد مختلف از جمله سرریز سدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها ممکن است برای کنترل دبی، کاهش شیب سطح آب کانال‌ها و توزیع آب بین کانال‌های آبیاری و غیره استفاده شوند (Neveen Sad and Fattouh Ehab, 2017). استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به عنوان یک راه‌حل مؤثر و اقتصادی جهت افزایش جریان عبوری مطرح شده است. این نوع سرریزها از طریق افزایش طول تاج در یک عرض مشخص، در مقایسه با سرریزهای مستقیم دبی بیشتری را برای یک بار هیدرولیکی یکسان از خود عبور می‌دهند. مقدار جریان گذرنده از روی سرریزها در زمان پیک سیلاب در مدت‌زمان کمی عبور می‌کند لذا وجود یک سازه سرریز با ضریب آبگذری بالا ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور از سرریزهای کنگره‌ای استفاده می‌شود که مقدار جریان عبوری از آن‌ها به نسبت سرریزهای خطی بیشتر است (Falvey, 2003). سرریزهای کنگره‌ای در پلان به سه دسته مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی تقسیم می‌شوند. اکثر سرریزهای ساخته‌شده شکل مستطیلی، دوزنقه‌ای و یا مثلث متساوی‌الساقین هستند که ناشی از عملکرد بهتر و اجرای ساده‌تر آن‌ها می‌باشد (Coorkston, 2010). ضریب آبگذری در این

سرریزها به عوامل متعددی از قبیل ارتفاع آب روی سرریز، زاویه دیواره‌ها، ضخامت و شکل تاج سرریز بستگی دارد (Ghare *et al.*, 2008). سرریز پلان قوسی کنگره‌ای یک راه‌حل مقرون به صرفه برای افزایش کارایی سدهای با محدودیت‌های زیاد، (به عنوان مثال فضای محدود، تخلیه سیل بالا) می‌باشد (Ghodsian *et al.*, 2001). به جز مطالعات (Coorkston and Tullis (2012) و (Christensen (2013)، سایر تحقیقات انجام‌گرفته تنها معطوف به سرریزهای کنگره‌ای با سیکل‌های خطی یا نهایتاً با دماغه قوسی بوده است.

Khode *et al.* (2012) به منظور بهینه‌کردن و توسعه سرریزها، جریان روی سرریز دوزنقه‌ای کنگره‌ای دو سیکل را با تغییر در زاویه دیواره جانبی از ۶ تا ۳۶ درجه مطالعه نموده و با ارزیابی آزمایش‌ها در دامنه گسترده‌ای از مقادیر پارامترهای مهم به ارزیابی ویژگی‌های مختلف یک سرریز کنگره‌ای پرداختند. (Delgado *et al.*, 2015) با استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای را به وسیله نصب سازه‌های هیدرودینامیکی در قسمت دماغه‌های بالادست سرریز، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در یک فلوم آزمایشگاهی ۳۰ سانتی‌متری انجام دادند؛ طول تاج سازه‌های هیدرودینامیکی مورد استفاده در این تحقیق، متغیر و

حاصل از هر دو روش (فیزیکی و عددی) به عمل آوردند. نتایج ایشان نشان داد که نرم‌افزار (Flow-3D) می‌تواند رابطه ظرفیت آبگذری با بار هیدرولیکی سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای را که از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی به دست آمده از جمله بار هیدرولیکی در بالادست سرریز نسبت به تاج آن را به خوبی پیش‌بینی کند. علاوه بر این، منحنی‌های طراحی هیدرولیکی توسعه داده‌شده توسط (Crookston 2010) می‌توانند برای نسبت بار هیدرولیکی تا مقدار ۲ و یا حتی بیشتر نیز قابل قبول باشند.

(Crookston et al. 2013) روشی جهت طراحی هیدرولیکی و آنالیز سرریزهای کنگره‌ای بر اساس نتایج تجربی مدل فیزیکی ارائه دادند و ضریب تخلیه را برای سرریزهای کنگره‌ای با شکل تاج ربع دایره و نیم‌دایره با زاویه‌های جانبی ۶ تا ۳۵ درجه ارائه نمودند. آن‌ها در این تحقیق همچنین رفتار *nappe* را که بر عملکرد جریان تأثیر می‌گذارد، بررسی کرده و ملاحظات طراحی هیدرولیک خاص را برای ویژگی‌های *nappe* ارائه دادند. Hay and Taylor (1970) هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی با پلان مثلثی و دوزنقه‌ای با شکل تاج لبه‌تیز را در فلوام‌های آزمایشگاهی مطالعه کردند. در این بررسی، ظرفیت آبگذری از سرریز زیگزاگی با ظرفیت آبگذری از سرریز خطی (با شکل تاج یکسان و عرض کل یکسان) را مقایسه کردند. نتیجه این مطالعه نشان داد که بازده هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی (QL/QN) در بارهای هیدرولیکی کم (h) مطلوب می‌باشد، (QN ظرفیت آبگذری سرریز زیگزاگی و QL ظرفیت آبگذری سرریز خطی).

بهترین کارکرد سرریزهای کنگره‌ای در شرایطی است که ارتفاع بار هیدرولیکی نسبتاً کوچک باشد. نتایج تجربی نشان داد که به ازای مقادیر کوچک H/P ، سرریز تقریباً به طور ایده‌آل عمل می‌کند ولی با افزایش نسبت H/P ، راندمان سرریز با نسبت QL/QN کاهش می‌یابد (در این رابطه QL دبی سرریز کنگره‌ای با طول L و QN دبی سرریز خطی با طول W در یک بار هیدرولیکی مشخص می‌باشد). این ویژگی را می‌توان به کمک هیدرولیک جریان از روی این سرریزها توضیح داد. به ازای مقادیر کم ارتفاع آب روی تاج سرریز (h) یا دبی کم جریان از روی سرریز، بار سرعت بالادست ($V^2/2g$) قابل اغماض خواهد بود. در این شرایط، تغییرات عمق آب نیز در محدوده کارکرد مؤثر سرریز (در کانال تنگ‌شدگی بالادست و یا در کانال بازشدگی پایین‌دست سرریز) کوچک و قابل اغماض است. در این صورت، ارتفاع آب یا بار هیدرولیکی روی سرریز در طول تاج یکسان بوده و تقریباً معادل ارتفاع آب در کانال ورودی بالادست سرریز خواهد بود. پیچیدگی الگوی جریان و تأثیر عوامل مختلف و نامعین بر هیدرولیک این نوع سرریزها سبب شده تا در مطالعات، طراحی و

برابر ۶، ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر بود که بر روی دماغه‌های بالادست سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای سه سیکل نصب شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که سازه‌های مورد استفاده، به عنوان یک روش هیدرودینامیکی، بر روی ضریب و نیز میزان ظرفیت آبگذری سرریز، تأثیر مثبت داشته‌اند. 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.

(Emami et al. 2018) به بررسی عددی پارامترهای هندسی مؤثر سرریز کنگره‌ای بر ضریب دبی جریان پرداختند. مقایسه نتایج نشان داد که در کلیه موارد با زاویه مختلف دماغه، ضریب دبی جریان در محدوده رضایت‌بخش برای هد مؤثر نسبی کمتر از ۰/۳ قرار داشت. ضریب دبی برای هد مؤثر نسبی بیش از ۰/۳ به دلیل برخورد تیغه جریان کاهش می‌یابد. از سوی دیگر هرچه ارتفاع سرریز بیشتر باشد، ظرفیت آبگذری بیشتر است. در نتیجه، سرریز کنگره‌ای در مقایسه با سرریز خطی عملکرد بهتری دارند. (Azimi and Hakim 2018) به بررسی هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی پرداختند، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان داد که در شرایط جریان مستغرق، سرریز کنگره‌ای مستطیلی نسبت به سرریز خطی لبه تیز دارای حساسیت بیشتری است. (Monjezi et al. 2018) به بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری جریان در سرریزهای کنگره‌ای قوسی با پلان مثلثی پرداختند و نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های ایشان نشان داد که افزایش طول مؤثر سرریز در نتیجه قوسی کردن آن، بهبود راندمان سرریزهای قوسی خطی را تا ۲۱ درصد و سرریز قوسی کنگره‌ای تا حدود ۵۷ درصد در پی داشته است.

اگر عمق جریان در پایین‌دست سرریز از ارتفاع تاج بیشتر شود، استغراق به وجود می‌آید (Villemonthe, 1947). مطالعات نشان می‌دهد که اثر استغراق سرریزهای کنگره‌ای نیز شبیه سرریزهای مستقیم می‌باشد؛ بدین ترتیب که اگر عمق آب پایین‌دست از ارتفاع تاج تجاوز نکند، تأثیری روی عملکرد سرریز نخواهد داشت و تنها در صورتی که عمق پایاب بیشتر از ارتفاع تاج شود، میزان آبگذری شروع به کاهش می‌کند. باید توجه داشت که استفاده از سرریزهای کنگره‌ای در شرایط استغراق شدید توصیه نمی‌شود (Tullis et al., 2007). مطالعات Falvey and Treille (1995) بر روی فیوزگیت‌ها نیز نتایج مشابهی در پی داشت.

(Crookston and Tullis 2012) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای را برای نسبت‌های بار هیدرولیکی بالا مورد بررسی قرار دادند. ایشان آزمایش‌های مدل فیزیکی خود را بر روی یک فلوام مستطیلی و مدل عددی را نیز با استفاده از نرم‌افزار (Flow-3D) به انجام رساندند و مقایسه‌ای بین نتایج

کاربرد این گونه سرریزها در سطح وسیعی از مدل‌های فیزیکی استفاده شود. انتظار می‌رود در سرریزهای کنگره‌ای، بازدهی ظرفیت تخلیه با تغییر هندسی در طول آن تغییر یابد اما به دلیل تداخل جریان خروجی تاج سرریز، ضریب جریان در آن سرریز کمتر از سرریز خطی با طول یکسان است. شکل تاج سرریز ممکن است به صورت‌های لبه تیز، ربع دایره یا نیم‌دایره باشد. بررسی‌ها نشان داده که سرریزهای کنگره‌ای که شکل تاج آن‌ها نیم‌دایره باشد، دارای ضریب جریان حدود ۲۰ درصد بیشتر از نوع لبه تیز می‌باشند. شرایط بهینه جریان زمانی است که دیواره بالادست سرریز عمودی باشد. همچنین ساخت دیواره‌های شیب‌دار در پایین‌دست و نیز سرریزهای با تاج Ogee در سرریزهای کنگره‌ای از نظر اجرایی و ساختمانی پیچیده و مشکل می‌باشد. همچنین نیز توصیه کردند که از طرح سرریزهای کنگره‌ای در شرایط استغراق شدید اجتناب شود.

Tullis (2018) به بررسی تأثیر مقیاس بر روی سرریزهای کنگره‌ای پرداختند. آن‌ها از مدل‌هایی با ارتفاع ۷/۶ سانتی‌متر و ۹/۱۴ سانتی‌متر برای ارزیابی ظرفیت آبریزی استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که معیار اجتناب از تأثیرات اندازه مقیاس بستگی به اندازه مدل و میزان خطا، قابل اغماض می‌باشد. Lopes *et al.* (2006) به مطالعه در خصوص ضریب تخلیه دبی در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاف مقدار نسبی ضریب تخلیه کمتر از ۱۰ درصد است به جز در مقادیر کم هد هیدرولیکی بالادست (H/p) که در آن حالات اختلاف ضریب تخلیه بیشتر است. همچنین ایشان به تأثیر بیشتر شکل تاج بر ضریب تخلیه در مقادیر کوچک هد هیدرولیکی اشاره می‌نمایند و اینکه در هدهای هیدرولیکی کم، تأثیر خطای تصادفی و کشش سطحی اهمیت بیشتری دارد. به طور کلی آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سرریزهای کنگره‌ای در فرآیند اتلاف انرژی بسیار مؤثر هستند و با افزایش نسبت هد هیدرولیکی (H/p) و نسبت طولی L/W، مقدار ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. Carollo *et al.* (2012) فرمول دبی اشل بدون بعد را که توسط قدسیان و همکاران ارائه شده بود را اصلاح کردند. Idrees *et al.* (2016) به تعیین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای مرکب دوزنقه‌ای تک سیکل پرداختند. ایشان از زوایای دیواره جانبی ۶ تا ۳۵ درجه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که ضریب دبی در ابتدا افزایش می‌یابد ولی تدریجاً روند کاهشی به خود می‌گیرد. همچنین ایشان دریافتند که زاویه دیوار جانبی ۶ درجه دارای کمترین میزان ضریب دبی می‌باشد؛ درحالی که با افزایش زاویه دیوار جانبی میزان ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد. Bijankhan and Ferro (2017) 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. آن‌ها 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 گام‌به‌گام، فرمول ضریب دبی را صحت‌سنجی کردند. Bijankhan and Kouchakzadeh (2017) به تحقیقی در خصوص یافتن فرمول‌ها و روابط مناسب جهت به دست 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 مؤثر بر آن را تشریح نمودند و سپس شرایط جریان برای انواع دیگر سرریزها را نیز بررسی کردند. در نهایت روابط تعیین دبی ارائه شده و حدود کاربردی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها بیان داشتند که روابط استخراجی قابل استفاده طراحان شبکه‌های آبیاری و زهکشی جهت طراحی سرریزها می‌باشد.

هدف از پژوهش حاضر بررسی ضریب دبی سرریز در حالت پلان قوسی و افزایش طول سیکل‌های سرریز می‌باشد؛ چرا که پلان قوسی ظرفیت آبریزی بیشتری را به دنبال خواهد داشت و این در واقع هدف اصلی تحقیق را تشکیل می‌دهد که البته با توجه به مطالعات گذشته تاکنون در این خصوص بررسی جامعی انجام نشده است.

آنالیز ابعادی

معادله عمومی سرریزها به صورت رابطه (۱) توسط تولیس و همکاران برای سرریزهای کنگره‌ای بکار گرفته شد. در این معادله، (Q) دبی عبوری از سرریز، (L) طول کل تاج سرریز، (g) شتاب ثقل و (H_d) بار هیدرولیکی کل، (C_d) ضریب جریان بدون بعد است که از طریق انجام آزمایش تعیین شد (Tullis *et al.*, 1995).

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

پارامترهای مؤثر بر ضریب جریان در سرریزهای قوسی کنگره‌ای را می‌توان به صورت رابطه (۲) عنوان کرد:

(رابطه ۲)
 $C_d = f(Q, R, L, B, S_i, S_o, S, W_1, W_2, t, P, D, N, H_d, \lambda, g, \mu, \rho, \epsilon)$
 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 کل سرریز، (t) ضخامت دیواره سرریز، (P) ارتفاع سرریز در بالادست، (D) ارتفاع سرریز در پایین‌دست، (N)

مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر بر روی یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان-ایران انجام شد. در این تحقیق مدل‌های آزمایشگاهی سرریز درون یک فلوم مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس پلکسی‌گلاس بود. جریان عبوری از روی سرریز به حالت آزاد قرار داشت. مشخصات قسمت‌های مختلف فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق به صورت زیر می‌باشد (شکل ۱).

کف فلوم به صورت بستر ثابت و بدون شیب و به صورت افقی بود. جریان آب ابتدا توسط پمپ از مخزن زمینی به سمت تانک هوایی (Head Tank) هدایت و سپس از طریق مجرای لوله‌ای آب به ابتدای فلوم وارد شد. در این نقطه جریان آب توسط یک عدد شیرفلکه کنترل شد. جریان به آرامی و با دبی کم وارد کانال شده و به آرامی از روی سرریز که در بستر فلوم نصب شده بود، عبور کرد. با تغییر در میزان دبی، شرایط هیدرولیکی گذرنده از سرریز بررسی و ثبت شد و در نهایت جریان آب پس از عبور از سرریز از طریق کانال پائین‌دست وارد مخزن پمپاژ شده و دوباره به چرخه باز می‌گشت (شکل ۱).

تعداد سیکل‌ها، (H_d) بار هیدرولیکی کل جریان بر روی بالادست سرریز، (λ) فاکتور شکل مقطع تاج، (g) شتاب ثقل و ρ و σ به ترتیب لزجت دینامیکی، چگالی و کشش سطحی آب می‌باشند. برای تحلیل ابعادی، پارامترهای Q ، ρ و P به عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شدند و پارامترهای بی‌بعد به صورت رابطه (۳) به دست آمدند.

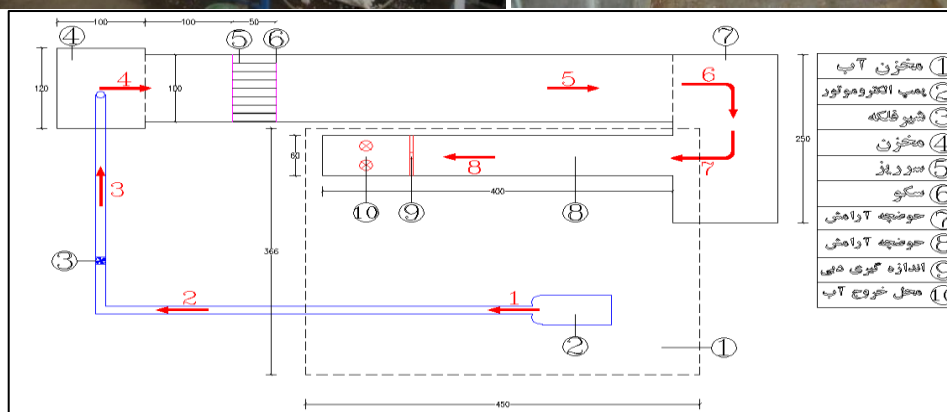
(رابطه ۳)

$$C_d = f(B/P, t/P, D/P, R/p, W/P, N, \lambda, H_d/P, S, V/(g \cdot H_d)^{1/2}, \rho V H_d / \mu, W_1/P, W_2/P, H_d V^2 / \sigma)$$

با توجه به این‌که در تحقیق حاضر (P) ، (W_2/P) ، (W_1/P) ،

(W) ، (N) ، (S) ، (t) ، (D) و (λ) ثابت بودند، حذف شدند. همچنین با توجه به آشفته‌بودن جریان و این‌که عمق جریان به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شده بود، از اثر عدد بی‌بعد رینولدز $(\rho V H_d / \mu)$ و عدد وبر $(H_d V^2 / \sigma)$ چشم‌پوشی شد. لازم به ذکر است که تأثیر شتاب ثقل $(V/(g \cdot H_d)^{1/2})$ که بیان‌کننده عدد فرود است، در پارامتر بی‌بعد (H_d/P) در نظر گرفته شد. با ترکیب طول سیکل سرریز (B/P) و عرض سیکل میانی (w_1/P) ، پارامتر بی‌بعد و متغیر (B/w_1) و همچنین با ترکیب نسبت شعاع قوس (R/P) و عرض دماغه سیکل‌های کناری (W_1/P) ، پارامتر بی‌بعد (R/w_1) حاصل شد. بدین ترتیب رابطه (۴) به شکل زیر است:

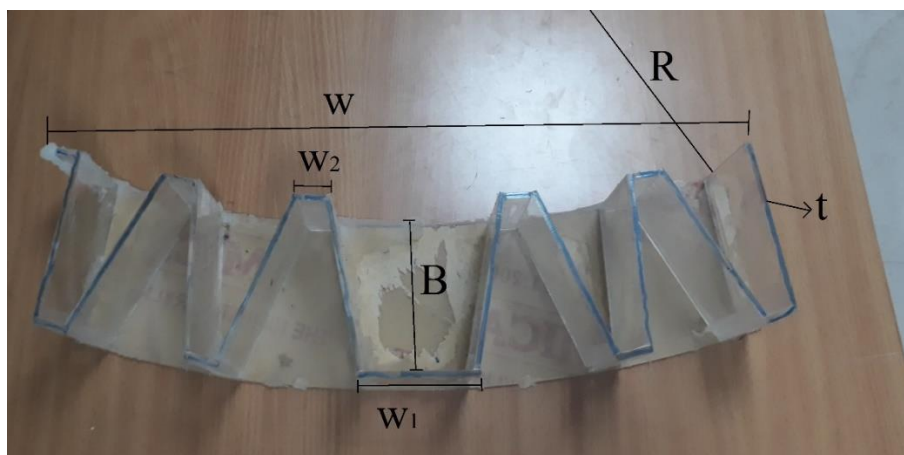
$$C_d = F(H_d/P, R/w_1, B/w_1) \quad (\text{رابطه ۴})$$



شکل ۱- سرریز و فلوم آزمایشگاهی در تحقیق حاضر

می‌دهند.
جدول (۱) مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای قوسی کنگره‌ای را نشان می‌دهد.

در این تحقیق با ساخت مدل آزمایشگاهی، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای تحت تأثیر شعاع قوس و نسبت طولی متفاوت در دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۲) و (۳) سرریز مورد مطالعه در این تحقیق را نشان



شکل ۲- سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با پارامترهای مربوطه



شکل ۳- نمایی از سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای قوسی کنگره‌ای

تعداد آزمایش	B/w_1	R/w_1	N	t (mm)	P(cm)	W(cm)	مدل
۱۰	-	-	-	۵	۱۰	۶۰	۱
۱۰	۱	۵	۵	۵	۱۰	۶۰	۲
۱۰	۱	۱۰	۵	۵	۱۰	۶۰	۳
۱۰	۱	۱۵	۵	۵	۱۰	۶۰	۴
۱۰	۱/۲۵	۵	۵	۵	۱۰	۶۰	۵
۱۰	۱/۲۵	۱۰	۵	۵	۱۰	۶۰	۶
۱۰	۱/۲۵	۱۵	۵	۵	۱۰	۶۰	۷
۱۰	۱/۵	۵	۵	۵	۱۰	۶۰	۸
۱۰	۱/۵	۱۰	۵	۵	۱۰	۶۰	۹
۱۰	۱/۵	۱۵	۵	۵	۱۰	۶۰	۱۰

طول سیکل سرریز در جهت جریان، و w_1 عرض دماغه سیکل میانی و N تعداد سیکل در سرریز می‌باشد.

در جدول فوق W عرض کل سرریز (عرض فلوم)، R شعاع قوس سرریز، P ارتفاع سرریز در بالادست، t ضخامت سرریز، B

نتایج و بحث

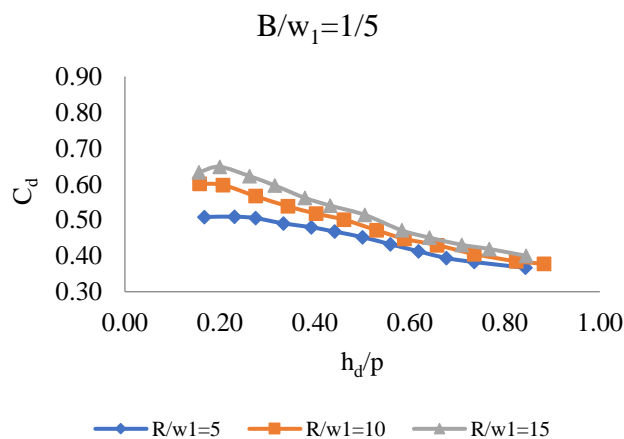
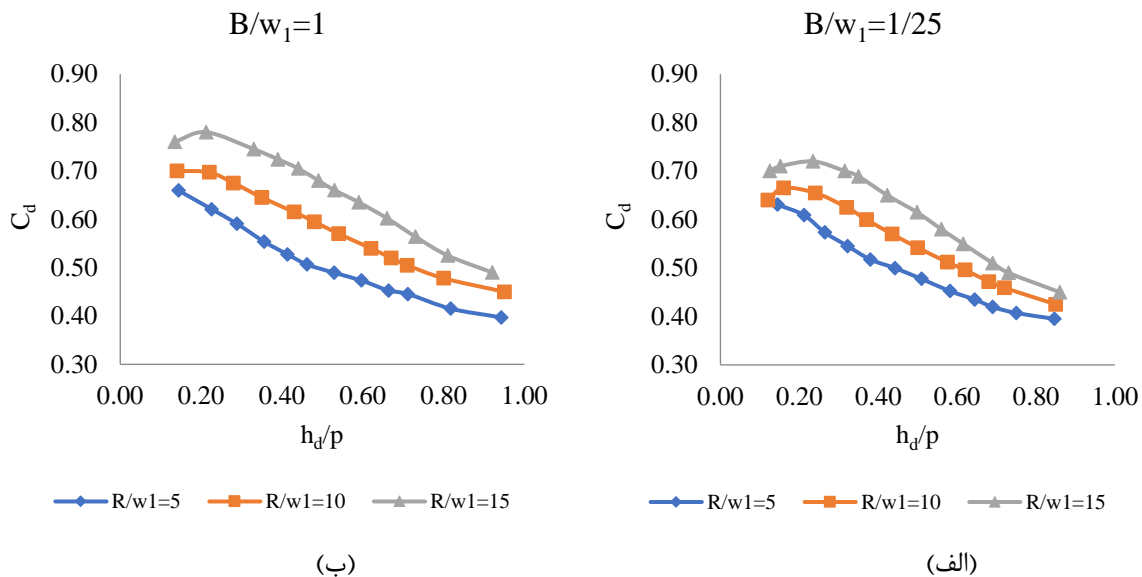
نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با نسبت شعاع قوس متفاوت و نسبت طول سیکل‌های مختلف ارائه شده است. در ادامه به بررسی هر کدام از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

تأثیر نسبت شعاع قوس به ضریب دبی سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با طول سیکل متفاوت

در این تحقیق تأثیر تغییر نسبت شعاع قوس سرریز به عرض سیکل میانی (R/w_1) در سرریز کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای بر ضریب دبی سرریز بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت شعاع قوس (R/w_1)، ضریب دبی در سرریز افزایش یافت. همچنین با افزایش هد هیدرولیکی روی سرریز، ضریب دبی سرریز کاهش یافت. شکل (۴) تغییرات ضریب دبی سرریز تحت

تأثیر نسبت شعاع قوس سرریز را در نسبت‌های طولی مختلف سیکل (B/w_1) نشان می‌دهد.

شکل (۴-الف) نشان می‌دهد در نسبت طولی $B/w_1=1$ (طول سیکل سرریز به عرض سیکل میانی)، با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w_1=15$ حدود $25/6$ درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w_1=5$ دارد. به بیان دیگر نتایج نشان داد که اگر شعاع قوس سرریز ۳ برابر شود، ضریب دبی حدود $25/6$ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی شعاع قوس (از نسبت شعاع قوس ۵ تا نسبت شعاع قوس ۱۰)، ضریب دبی $12/3$ درصد افزایش یافت. به طور کلی با افزایش هد هیدرولیکی ضریب دبی سرریزها در نسبت طولی $B/w_1=1$ بین ۳۵ تا ۴۰ درصد کاهش یافت.



(ج)

شکل ۴- تأثیر نسبت شعاع قوس بر ضریب دبی سرریز در نسبت‌های طولی سیکل متفاوت

با افزایش نسبت بار هیدرولیکی، اختلاف ضریب دبی سرریزها کمتر شده و از نسبت h_d/p بزرگتر از $0/8$ ، ضریب دبی سرریزها تفاوت معنی‌داری باهم ندارند. به طور کلی با افزایش هد هیدرولیکی، ضریب دبی سرریزها در نسبت طولی $B/w_1=1$ بین ۲۸ تا ۳۸ درصد کاهش یافت. به عبارت دیگر شکل (۴) نشان می‌دهد که در بارهای هیدرولیکی پایین به دلیل وجود هوادهی مناسب، عدم تشکیل استغراق و یا موج ایستاده، کاهش افت انرژی و عملکرد بهتر سرریز، ضریب دبی سرریز روند افزایشی داشته و در مقابل با افزایش بار هیدرولیکی، به دلیل گسترش ابعاد استغراق موضعی در طول تاج سرریز، افزایش افت انرژی، کاهش پارامترهای مؤثر هوادهی و در نهایت رسیدن به مرحله خفگی، ضریب دبی سرریز کاهش می‌یابد.

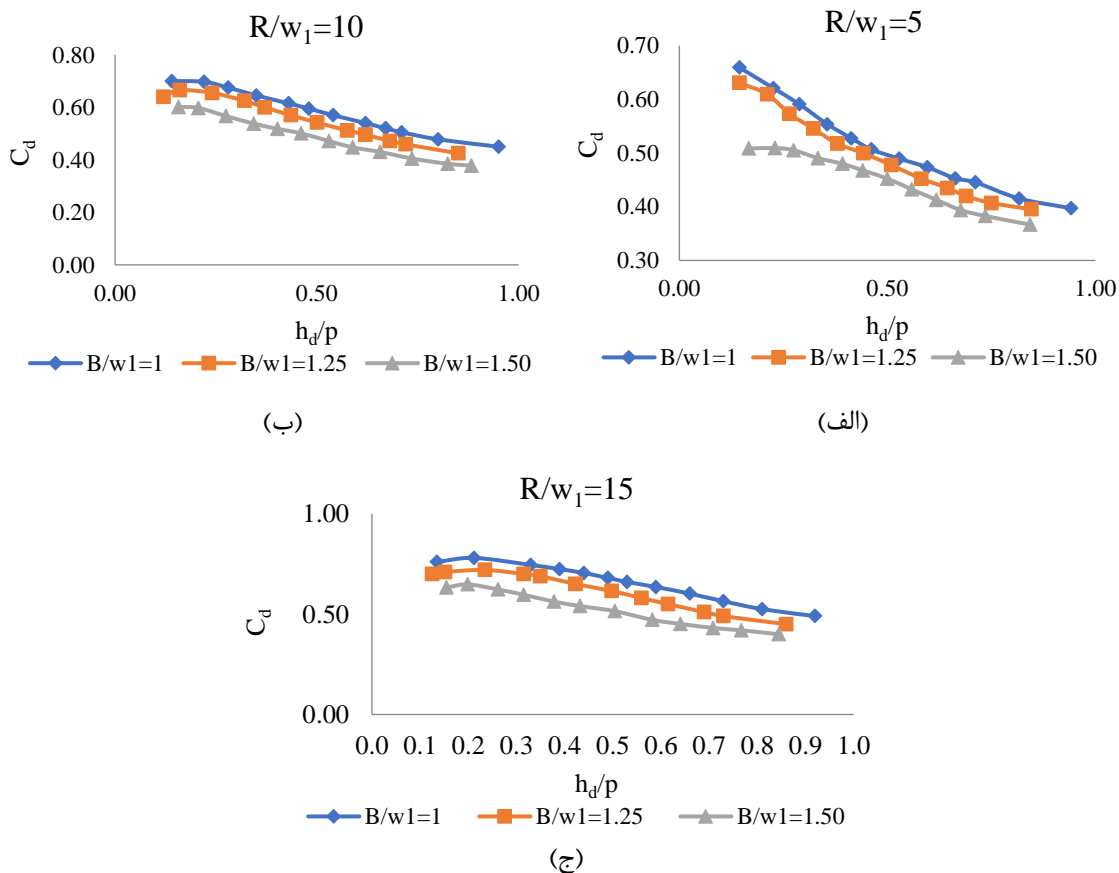
تأثیر نسبت طولی سیکل سرریز بر ضریب دبی سرریز در نسبت-

های مختلف شعاع قوس سرریز

با توجه به نتایج به دست آمده از شکل‌ها مشخص شد با تغییر در نسبت طولی سرریز (طول سیکل در جهت جریان نسبت به عرض دماغه سیکل میانی) ضریب دبی جریان تحت تأثیر آن تغییر خواهد نمود به طوری که با افزایش نسبت طولی سیکل سرریز ضریب دبی جریان کاهش یافت.

شکل (۴-ب) نشان داد که در نسبت طولی $B/w_1=1/25$ نیز با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی افزایش یافت؛ به گونه‌ای که سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w_1=15$ حدود $18/2$ درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w_1=5$ دارد. همچنین نتایج این شکل نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بار هیدرولیکی، اختلاف ضریب دبی سرریزها کمتر شده و از نسبت h_d/p بزرگتر از $0/8$ ، ضریب دبی سرریزها تفاوت معنی‌داری باهم ندارند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب دبی سرریز در نسبت طولی $B/w_1=1/25$ بین ۳۶ تا ۳۸ درصد کاهش یافت.

شکل (۴-ج) نشان می‌دهد که در نسبت طولی $B/w_1=1/5$ نیز با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w_1=15$ حدود $27/3$ درصد ضریب دبی بیشتری نسبت به سرریز با نسبت شعاع قوس $R/w_1=5$ دارد. به بیان دیگر نتایج نشان داد که اگر شعاع قوس سرریز ۳ برابر شود، ضریب دبی حدود $27/3$ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی شعاع قوس (از نسبت شعاع قوس ۵ تا نسبت شعاع قوس ۱۰)، ضریب دبی $17/4$ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج این شکل نشان می‌دهد که

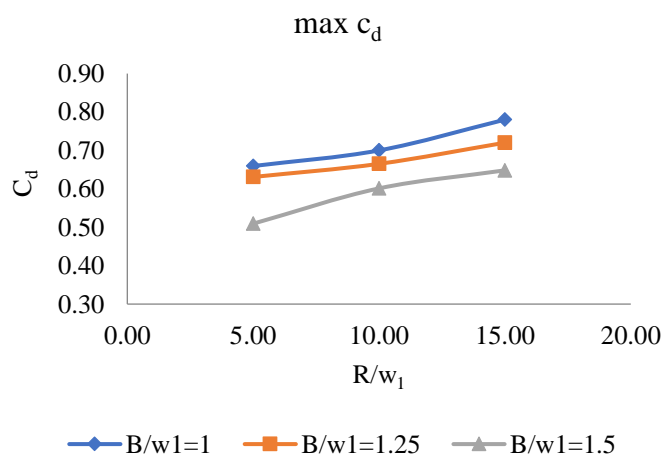


شکل ۵- تأثیر نسبت طولی سیکل سرریز بر ضریب دبی در نسبت شعاع قوس متفاوت

۳۷ درصد کاهش یافت. همچنین شکل (۵-ج) نشان داد که در نسبت شعاع قوس $R/w_1 = 15$ نیز با افزایش نسبت طولی سیکل‌های سرریز، ضریب دبی کاهش یافت. این شکل نشان داد ضریب دبی سرریز در نسبت طولی $B/w_1 = 1$ حدود $8/3$ درصد از ضریب دبی با نسبت طولی $B/w_1 = 1/25$ و $20/4$ درصد از ضریب دبی با نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ بیشتر است. همچنین ضریب دبی در سرریز با نسبت طولی $B/w_1 = 1/25$ حدود $11/1$ درصد از سرریز با نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ بیشتر است. با توجه به شکل، مقدار ضریب دبی سرریزها با افزایش هد هیدرولیکی بین ۳۷ تا ۳۸ درصد کاهش یافت. شکل (۶) روند تغییرات ضریب حداکثر دبی سرریز نسبت به شعاع قوس (R/w_1) در نسبت‌های طولی مختلف را نشان می‌دهد.

برخی مشخصات و ویژگی‌های تحقیقات انجام شده توسط محققین پیشین و تحقیق حاضر در جدول (۲) و شکل (۷) ارائه شده است.

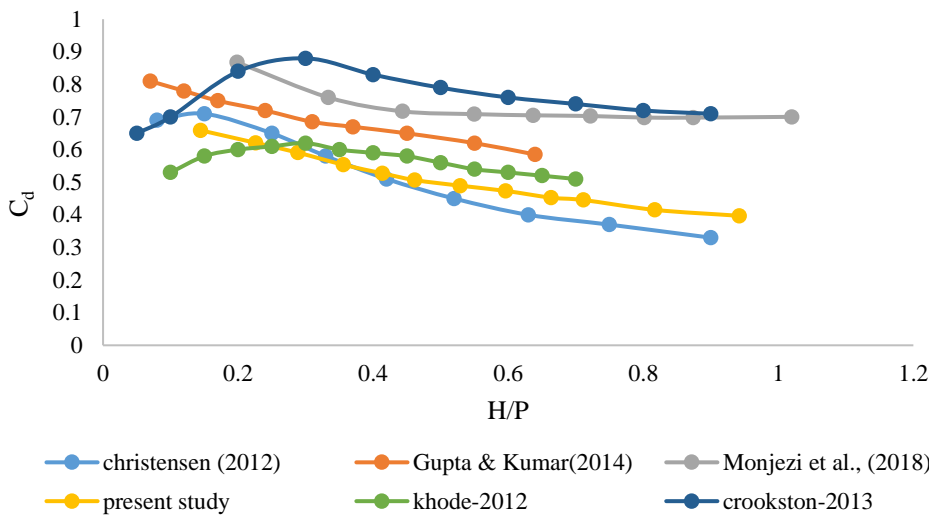
شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت طولی سیکل‌های سرریز، ضریب دبی در تمامی نسبت‌های شعاع قوس کاهش می‌یابد؛ به طوری که در نسبت شعاع قوس $R/w_1 = 5$ ، ضریب دبی سرریز در نسبت طولی $B/w_1 = 1$ حدود $29/7$ درصد از ضریب دبی با نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ بیشتر است. همچنین ضریب دبی در سرریز با نسبت طولی $B/w_1 = 1/25$ حدود $24/1$ درصد از سرریز با نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ بیشتر است. با توجه به شکل، مقدار ضریب دبی سرریزها با افزایش هد هیدرولیکی بین ۲۸ تا ۴۰ درصد کاهش یافت. شکل (۵-ب) نیز نشان داد که در نسبت شعاع قوس $R/w_1 = 10$ نیز با افزایش نسبت طولی سیکل‌های سرریز، ضریب دبی کاهش یافت؛ به طوری که ضریب دبی سرریز در نسبت طولی $B/w_1 = 1$ حدود $16/4$ درصد از ضریب دبی با نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ بیشتر است. همچنین ضریب دبی در سرریز با نسبت طولی $B/w_1 = 1/25$ حدود $6/5$ درصد از سرریز با نسبت طولی $B/w_1 = 1/5$ بیشتر است. با توجه به شکل، مقدار ضریب دبی سرریزها با افزایش هد هیدرولیکی بین ۳۵ تا



شکل ۶- روند تغییرات ضریب حداکثر دبی سرریز نسبت به شعاع قوس (R/w_1) در نسبت‌های طولی مختلف

جدول ۲- مقایسه ضریب دبی سرریز کنگره‌ای محققان مختلف

ضریب دبی	دبی جریان (l/s)	محدوده H_0/p	تعداد سیکل	نوع سرریز کنگره‌ای	محقق
0.58-0.82	2-10	0.03-0.1	1	مستطیلی	Gupta & Kumar (2014)
0.7-0.87	2-20	0.19-1.02	4	قوسی مثلثی	Monjezi <i>et al.</i> , (2018)
0.32-0.72	88-433	0.1-0.9	5,7,10	قوسی دوزنقه‌ای	Christensen (2013)
0.4-0.66	5-50	0.14-0.95	5	قوسی دوزنقه‌ای	Present study
0.4-1	2.03-19.26	0.05-0.6	1	مثلثی	Bijankhan and Kouchakzadeh (2017)
0.27-0.73	3-22	0.1-0.7	2	دوزنقه‌ای	Khode <i>et al.</i> (2012)
0.2-0.81	1500	0.05-0.9	9	دوزنقه‌ای	Crookston <i>et al.</i> (2013)



شکل ۷- نمودار مقایسه نتایج این تحقیق با محققین دیگر

$$NRMSE = \frac{RMSE}{C_{obs}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (C_{obs,i} - \bar{C}_{obs}) \cdot (C_{model,i} - \bar{C}_{model})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{obs,i} - \bar{C}_{obs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{model,i} - \bar{C}_{model})^2}} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در روابط بالا $C_{obs,i}$ ضرایب تخلیه مشاهده شده، $C_{model,i}$ ضریب تخلیه تخمین زده شده و n تعداد آزمایش‌های انجام شده می‌باشد.

الگوی شماره (۱) که به صورت رابطه (۸) ارائه شده است؛ با توجه به اینکه بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر $NRMSE$ و $RMSE$ را به خود اختصاص داده و بهترین برازش را با داده‌ها و شکل‌های این تحقیق دارد، به عنوان رابطه بهینه برای تعیین ضریب دبی در تحقیق حاضر ارائه شد:

$Cd = 0.684 \text{ hd/P} + 0.151(W_2/W_1) + 0.119 B/W_1 - 0.299$
 نتایج ارائه شده در جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که ضرایب همبستگی به یکدیگر نزدیک می‌باشند که نشان از واقعی بودن ضرایب رگرسیون بوده است؛ ضمن آنکه ارائه صرفاً یک رابطه توسط نرم‌افزار به عنوان نتیجه تحلیل آماری نشان از همبستگی نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی دارد.

مقایسه نتایج پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که از لحاظ روند تغییرات Cd نسبت به H/P ، نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش Gupta and Kuma (2014) مطابقت دارد و از نظر مقدار ضریب دبی نیز با نتایج Christensen (2013) نزدیک است.

تعیین رابطه ضریب دبی

با هدف سهولت استفاده از نتایج این تحقیق، برای تعیین رابطه ضریب دبی از نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS استفاده شد؛ در این راستا صرفاً یک مدل آماری از مشاهدات آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار ارائه شده است که دلیل آن بالابودن ضریب رگرسیونی و نیز خطی بودن نتایج می‌باشد. جداول (۳) و (۴) نتایج حاصل از بررسی آماری توسط نرم افزار SPSS را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی الگوی ارائه شده و ارائه بهینه‌ترین الگو (الگوی شماره ۱)، پارامترهای $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 محاسبه شد. مقادیر $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{obs,i} - C_{model,i})^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

جدول ۳- الگوی ارائه شده

شماره الگو	الگو
۱	$Cd = 0.684 \text{ hd/P} + 0.151(W_2/W_1) + 0.119 B/W_1 - 0.299$
۲	$Cd = 0.692 \text{ hd/P} + 0.143(W_2/W_1) + 0.127 B/W_1 - 0.247$
۳	$Cd = 0.731 \text{ hd/P} + 0.121 (W_2/W_1) + 0.098 B/W_1 - 0.531$
۴	$Cd = 0.745 \text{ hd/P} + 0.109 (W_2/W_1) + 0.95 B/W_1 - 0.499$

جدول ۴- ویژگی‌های آماری الگوهای ارائه شده

شماره الگو	R ²	RMSE	NRMSE
۱	۰/۸۷۹	۰/۰۵۴۴	۰/۰۹۷۷
۲	۰/۸۸۱	۰/۰۵۴۱	۰/۰۹۶۹
۳	۰/۹۱۷	۰/۰۵۱	۰/۰۹۲۱
۴	۰/۹۴۲	۰/۰۴۷	۰/۰۸۵

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای قوسی دوزنقه‌ای با شعاع قوس و طول سیکل متفاوت انجام شد. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت شعاع قوس سرریز، ضریب دبی جریان (Cd) افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است مقدار این افزایش تحت تأثیر نسبت‌های طولی مختلف سرریز بین ۶/۸ تا ۲۷/۳ درصد مشاهده شد. همچنین با کاهش نسبت طولی سرریز ضریب دبی افزایش یافت. که مقدار این افزایش در نسبت‌های شعاع قوس مختلف سرریز

بین ۴/۵ تا ۲۹/۷ درصد به ثبت رسید. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش بار هیدرولیکی به دلیل گسترش استغراق موضعی، ضریب دبی جریان در تمامی سرریزها از ۲۸ تا ۴۰ درصد کاهش یافت.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از سازمان آب و برق خوزستان-ایران به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی نمایند.

REFERENCES

- Idrees, A.K., Riyadh Al-Ameri and Subrat Da, (2016). "Determination of discharge coefficient for flow over one cycle compound trapezoidal plan form labyrinth weir." *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 7(4), 3314-328.
- Azimi A and Hakim, S.S. (2018), *Hydraulics of flow over rectangular labyrinth weirs*, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018.
- Bijankhan, M., and Ferro, V. (2017). "Dimensional analysis and stage-discharge relationship for weirs: A review." *Journal of Agricultural Engineering*, 48(1), 1-11.
- Bijankhan, M., and Kouchakzadeh, S. (2017). "Unified discharge coefficient formula for free and submerged triangular labyrinth weirs." *Flow Measurement and Instrumentation*, 57, 46-56.
- Carollo, F. G., Ferro, V., and Pampalano, V. (2012). "Experimental Investigation of the Outflow Process over a Triangular Labyrinth-Weir." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 73-79.
- Christensen, N.A. (2013) *Flow Characteristics of Arced Labyrinth Weirs*. MSc thesis, Utah State University, Logan, Utah
- 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.
- Crookston, B. M., Asce, A. M., Tullis, B. P., and Asce, M. (2013). "Labyrinth Weirs : Nappe Interference and Local Submergence." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(8), 757-765.
- Crookston, B.M. (2010). *Labyrinth weirs*. PhD thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. (2012). *Arced labyrinth weirs*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138 (6), 555-562.
- Delgado, F.G.A., Paulina, M.A., and Camino, S.F.J. (2015). *Discharge Coefficients Spillways Labyrinth Implementing Hydrodynamic Devices in the upstream side*, In: *Proceedings of 36th IAHR World Congress*. Hague, Netherlands, pp. 1-7.
- Emami S, H. Arvanaghi, and J. Parsa, (2018). *Numerical Investigation of Geometric Parameters Effect of the Labyrinth Weir on the Discharge Coefficient*, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 6-1 (2018) 01-09.
- Falvey, H. and Treille, P. (1995) *Hydraulics and design of fusegates*. *Journal of Hydraulic Engineering. (ASCE)*, 121(7), 512-518.
- Falvey, H. T. (2003) *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. ASCE press, USA.
- Ghare, A.D. Mhaisalkar, V.A. and Porey, P.D. (2008) *An Approach to Optimal Design of Trapezoidal Labyrinth Weirs*. *World Applied Sciences Journal*, 3 (6), 934-938.
- Ghodisian, D. Amanian, N. and Marashi, S.A. (2001) *Discharge Coefficient of Semicircular Labyrinth Weirs*. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Tehran, Iran, 13 (49), 76-83.
- Gupta, K.K., Kumar, S. and Z. Ahmad, 2014, *An approach to analyze the flow characteristics of sharp-crested triangular planform contracted weirs*. *World applied sciences journal*. 32(7): 1311-1317.
- Hay, N. and Taylor, G. (1970) *Performance and design of labyrinth weirs*. *Journal of Hydraulic Engineering. (ASCE)*, 96(11), 2337-2357.

- Khode, B. V., Tembhurkar, A. R., Porey, P. D., and Ingle, R. N. (2012). "Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(6), 548–552.
- Lopes, R., Matos, J., and Melo, J. F. (2006). "Discharge capacity and residual energy of labyrinth weirs." International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, J. Matos and H. Chanson (Eds), Report CH61/06, Div.of Civil Eng., 47–56.
- Monjezi, R. Heidarnejad, M. Masjedi, A.R. Purmohammadi, M.H. and 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. DOI: 10.1016 / j. flowmeasinst. 2018.10.011.
- Neveen, Y.S. and Fattouh Ehab, M. (2017) Hydraulic characteristics of flow over weirs with circular openings. *Ain Shams Engineering Journal*, 8, 515–522.
- Tullis, B. P. (2018). "Size-Scale Effects of Labyrinth Weir Hydraulics." 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 15–18.
- Tullis, B.P. Young, J. and Chandler, M. (2007) Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering. (ASCE)*, 133(3), 248-254.
- Tullis, J.P., Amanian, N. and Waldron, D. (1995). Design of Labyrinth Weir Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, (ASCE)*, 121(3): 247-255.
- Villemonete, J.R. (1947) Submerged weir discharge studies. *Engineering News. Record*, 139(26), 54–57.