



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۱

صفحه‌های ۴۳-۳۳

DOI: 10.22059/jwim.2022.335377.947

مقاله پژوهشی:

### تحلیل المانی ظرفیت آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی

حامد تقی‌زاده<sup>۱</sup>، محمد مناف‌پور<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹۰/۲۰

#### چکیده

سرریزهای غیرخطی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که با وجود اهمیت و کاربرد بسیار زیاد آنها، تاکنون روش عمومی برای تخمین آبگذری آنها ارائه نشده است. عموماً برای دستیابی به توان آبگذری سرریزهای غیرخطی از مدل‌سازی آزمایشگاهی و یا نرم‌افزارهای عددی استفاده و روابط طراحی ارائه شده است. لازم به ذکر است که بسط روابط آبگذری از یک خانواده هندسی از سرریزهای غیرخطی به خانواده دیگر عملی نیست. استفاده از مدل‌های عددی و یا آزمایشگاهی در مراحل مقدماتی طراحی این سازه‌ها نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی است که این موضوع با توجه به تنوع بسیار بالای هندسه سرریزهای غیرخطی پررنگ‌تر است. در این پژوهش یک روش عمومی برای تخمین آبگذری سرریزهای غیرخطی ارائه شده که مبتنی بر تحلیل آبگذری سرریزهای غیرخطی با استفاده از حل هم‌زمان معادلات دیفرانسیل معمولی انرژی و آبگذری سرریز بر روی المان‌های گسسته‌سازی شده از میدان حل است. روش ارائه شده با فرضیات ساده‌کننده‌ای توانایی تخمین آبگذری سرریزهای غیرخطی را با خطای بیشینه ۱۵ درصد داشته است، که با توجه به هزینه پایین محاسباتی و توانایی تحلیل طیف گسترده‌ای از هندسه‌های پیچیده، می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار جهت ارزیابی اولیه طرح سرریزهای غیرخطی مورد توجه باشد. برای بررسی کارایی روش ارائه شده، از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی سرریز مایل، سرریز کنگره‌ای قوسی و سرریز سد ایزابلا استفاده شده است. روش پیشنهادی با همبستگی و دقت بالا، میزان آبگذری سرریزهای مذکور را تخمین زده است. خطای بیشینه مشاهده شده برای سرریز مایل ۱۲ درصد، برای سرریز کنگره‌ای قوسی ۱۵ درصد و برای سرریز سد ایزابلا نیز ۱۵ درصد بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** استغراق موضعی، تحلیل المانی، روش EDA، سرریزهای غیرخطی.

### Elementary Analysis for Discharge Capacity of Arced Labyrinth Weirs

Hamed Taghizadeh<sup>1</sup>, Mohammad Manafpour<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

Received: December 11, 2021

Accepted: March 27, 2022

#### Abstract

Nonlinear weirs are among the hydraulic structures that, despite their great importance and application, so far, no general method for estimating their discharge capacity has been accomplished. Laboratory or numerical modeling is commonly used to achieve nonlinear weir discharge capacity. It should be noted that employing the design equation from one geometric family of nonlinear weirs to another is impractical. The utilization of numerical or laboratory models in the preliminary stages of the design of these structures is a time and cost-consuming process, which is highlighted by the variety of nonlinear weir geometry. In this research, a general method for estimating the nonlinear weirs discharge capacity is presented. The proposed method analyzes nonlinear weir discharge capacity using energy and discharge equations for discretized solution fields. Furthermore, the local submergence in nonlinear weirs, which has a tangible effect on their discharge capacity, has been corrected. Results of laboratory models performed on the oblique weir, arced labyrinth weir, and Isabella dam weir have been used to evaluate the efficiency of the proposed method. The proposed method with high correlation and accuracy has estimated the discharge capacity of these weirs. The maximum error observed was 12 percent for the oblique weir, 15 percent for the arced labyrinth weir, and 15 percent for the Isabella Dam weir.

**Keywords:** EDA method, Elementary analysis, Local submergence, Nonlinear weirs.

## مقدمه

سرریزها بخش مهمی از مجموعه سازه‌ها و متعلقات یک سد بوده و اهمیت آن از دیدگاه فنی و اقتصادی قابل ملاحظه است به نحوی که تضمین ایمنی سدها (به‌طور عمده سدهای خاکی) در مواقع سیلابی از طریق تخلیه جریان مازاد بر حجم مخزن بر عهده سرریز است. هزینه ساخت سرریزها معمولاً حدود ۲۰ درصد هزینه کل یک پروژه سدسازی می‌باشد. لذا انتخاب مناسب نوع سرریز و همچنین طراحی هیدرولیکی مناسب آن می‌تواند در عملکرد درست کل طرح تأثیرگذار باشد. اصولاً تخلیه سیلاب‌های بزرگ به دو صورت افزایش طول تاج سرریز و یا افزایش بار هیدرولیکی امکان‌پذیر است. در عمل افزایش بار هیدرولیکی غالباً با دریچه‌دارکردن سرریزها صورت می‌پذیرد که افزایش دبی در واحد طول سرریز را ممکن می‌سازد. اما باید توجه داشت که ایمنی این سرریزها در شرایط اضطراری قابل اعتماد نیست. همچنین باز شدن تصادفی دریچه‌های کنترل می‌تواند سبب اتلاف حجم قابل توجهی از آب و تحمیل خسارات فراوان به پایین دست شود. از طرف دیگر افزایش ظرفیت سرریز از طریق افزایش عرض سرریز، همواره میسر نیست، چراکه شرایط توپوگرافی محل احداث سرریز می‌تواند عاملی محدودکننده در انتخاب طول تاج آن باشد. در این میان یکی از روش‌های افزایش ظرفیت آبگذری سرریزها، استفاده از سرریزهای غیرخطی است. این نوع سرریزها از طریق افزایش طول مؤثر تاج در یک عرض مشخص، دبی بیشتری را به‌ازای بار هیدرولیکی یکسان، در مقایسه با سرریزهای خطی از خود عبور می‌دهند ( Crookston, 2010). سابقه بنای این نوع سرریزها به سال ۱۹۱۰ می‌رسد، اما عمده سرریزهای کناره‌ای بعد از سال ۱۹۷۰ ساخته شدند. با شروع پژوهش‌ها و ادامه آن از سال ۱۹۶۸ که طی آن پژوهش‌گران توانستند هیدرولیک جریان

عبوری از روی این سرریزها را بهتر بیان کرده و روش‌های طراحی را توسعه دهند، طراحان نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای به طراحی و ساخت آن‌ها توجه نمودند و به تکمیل بیش‌ازپیش اطلاعات در این زمینه کمک کردند. از این‌رو، تعداد زیادی سرریز کناره‌ای در سراسر دنیا ساخته شده است (Crookston et al., 2019). جنبه‌های مختلف سرریزهای کناره‌ای از جمله هندسه‌های مختلف (Erpicum et al., 2011; Taylor, 1968)، اثر مقیاس (Erpicum et al., 2016)، استهلاک انرژی (Lopes et al., 2006)، تأثیر اجسام شناور (Pfister et al., 2013; Crookston et al., 2015)، آب‌شستگی در پایین دست (Rajaei et al., 2020; Elnikhely et al., 2020) و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در برخی موارد سرریزهای کناره‌ای دوزنقه‌ای در پلان بر روی قوس (مانند سرریز سد ایزابلا)<sup>۱</sup> نیز مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند (Thompson et al., 2016). در ارتباط با طرح هندسی و ضریب آبگذری سرریزهای کناره‌ای مطالعات گسترده‌ای به‌وسیله مدل‌های عددی (Carrillo et al., 2020; Ghaderi et al., 2020; Shafiei et al., 2020) و هوش مصنوعی (Dutta et al., 2020; Mahmoud et al., 2021; Zounemat-Kermani et al., 2019) نیز انجام شده است. برخلاف سرریزهای خطی که فرض دوبعدی بودن جریان منجر به ارائه روابط تحلیلی از میزان آبگذری آن‌ها شده است، در سرریزهای غیرخطی جریان به‌طور کامل سه‌بعدی هست. از این‌رو پیچیدگی‌های هیدرودینامیکی جریان در مجاورت سرریزهای غیرخطی باعث شده است تا امکان دست‌یابی به یک رابطه تحلیلی، بسیار پیچیده، دشوار و عملاً غیرممکن باشد. تنوع بی‌انتها در طرح شکل سرریز در پلان نیز این مسأله را پررنگ‌تر کرده است. زیرا هر سرریز غیرخطی واکنش هیدرودینامیکی منحصر به فردی را از خود نشان داده است و امکان بسط

روش حل عمومی آبگذری سرریزهای غیرخطی و کاربرد آن در تخمین آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی (یکی از پیچیده‌ترین خانواده هندسی سرریزهای غیرخطی) است.

### مواد و روش‌ها

روش پیشنهادی EDA<sup>۲</sup> بر مبنای تحلیل آبگذری سرریزهای غیرخطی با استفاده از معادلات انرژی و آبگذری، برای المان‌های گسسته‌سازی شده از میدان حل (هندسه سرریز در پلان) استوار است. از طرفی با توجه به رفتارهای خاص رخ داده در سرریزهای غیرخطی (استغراق موضعی)<sup>۳</sup> که تأثیر ملموسی بر ظرفیت آبگذری آن‌ها دارد، نسبت به تصحیح این اثرات پرداخته شده است. در ادامه به جزئیات روش پیشنهادی پرداخته شده است.

### معادلات انرژی و آبگذری

با توجه به دیدگاه تحلیل المانی در روش ارائه شده، هندسه پلان سرریز به المان‌های کوچک تقسیم‌بندی شده و پس از استخراج مشخصات هندسی آن‌ها، معادلات مربوطه در هر المان حل می‌شوند. سرریز مایل رفتاری مشابه یک المان از سرریز غیرخطی را دارد (المانی با اندازه بزرگ). با توجه به شکل (۱) معادله انرژی کل برای مقطع ۱-۱ به صورت رابطه (۱) نوشته شده است (Swamee *et al.*, 2011):

$$H = Z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

که در این رابطه  $Z$  تراز کف بستر کانال تقرب،  $y$  عمق جریان و  $V$  سرعت متوسط جریان در مقطع ۱-۱ است. ابتدا پارامتر دبی به جای سرعت در رابطه (۱) جاگذاری و سپس از این رابطه مشتق گرفته می‌شود. ترم  $dH/dx$  براساس معادله مانینگ تعریف شده و  $dZ/dx$  شیب کف کانال می‌باشد. در نهایت با جاگذاری ترم‌های بیان شده و مرتب‌سازی، رابطه (۲) به دست آمده است (Swamee *et al.*, 2011).

یک رابطه از یک خانواده هندسی، به یک خانواده هندسی دیگر نادرست است. یکی از کمبودهای اساسی در تحلیل و طراحی سرریزهای غیرخطی استفاده مستقیم از رابطه سرریز خطی می‌باشد. این روند و نوع نگاه در تمامی مطالعات گذشته مشاهده شده است و تنها در موارد بسیار ساده‌شده‌ای مانند سرریز غیرخطی مایل روابطی با مبنای تحلیلی ارائه شده است (Kabiri-Samani, 2010). این‌که بتوان آبگذری سرریزهای غیرخطی را به صورت تحلیلی حل و بررسی کرد شاید امری بسیار دور از انتظار باشد، لذا تغییر رویکرد قبلی و نگاه متفاوت می‌تواند در طراحی و تحلیل آن‌ها راه‌گشا باشد. با وجود خلأ تحلیلی ذکر شده، پژوهش‌گران زیادی سعی در ارائه روابطی برای طراحی سرریزهای غیرخطی نموده‌اند. با بررسی سوابق مطالعاتی صورت گرفته، مشاهده شده است که پژوهش‌ها به‌طور عمده بر کارهای آزمایشگاهی متمرکز بوده‌اند. پژوهش‌گران با چشم‌پوشی از شرایط سه‌بعدی جریان فرض نموده‌اند که جریان عبوری از روی سرریز غیرخطی، از روابط اساسی سرریزهای خطی تبعیت می‌نماید. در ادامه با انجام آزمایش‌های متعدد برای هر خانواده هندسی از سرریزهای غیرخطی، رابطه‌ای برای ضریب آبگذری ارائه نموده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضعف رابطه سرریزهای خطی مورد استفاده برای سرریزهای غیرخطی، در ضریب آبگذری پنهان شده است. از این‌رو، این ضریب تنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی قابل استحصال بوده و فقط برای یک خانواده هندسی دارای ویژگی‌های مشترک قابل استفاده است و برای دستیابی به رابطه آبگذری خانواده هندسی دیگر، مطالعات آزمایشگاهی جدیدی نیاز می‌باشد. با بررسی منابع و مطالعات پیشین، مشخص شده است که تاکنون روش عمومی برای تحلیل آبگذری سرریزهای غیرخطی در پلان ارائه نشده است. لذا هدف اساسی از این پژوهش، دستیابی به یک

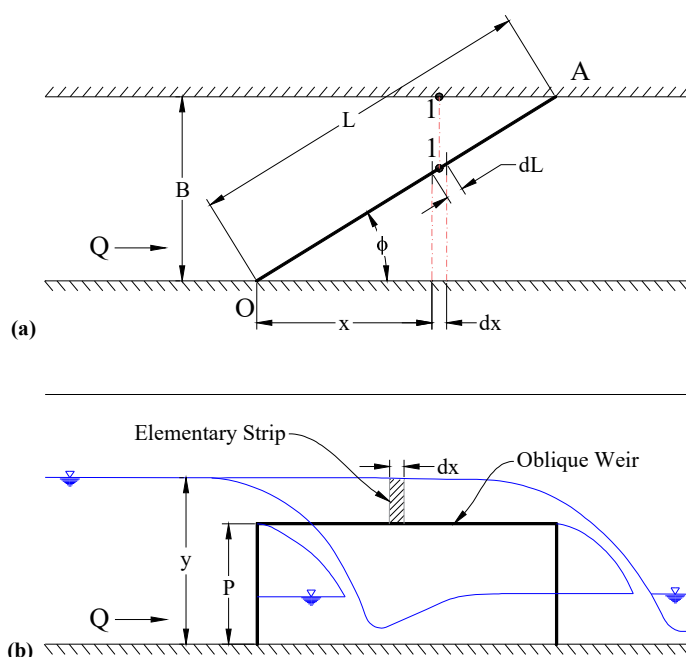


Figure 1. Geometric and hydraulic characteristics of Oblique weirs: a) Plan, b) Profile

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - \frac{n^2 Q^2 (B - x \tan \phi + 2y)^{4/3}}{(y(B - x \tan \phi))^{10/3}} - \frac{Q}{g(B - x \tan \phi)^2 y^2} \left( \frac{Q \tan \phi}{B - x \tan \phi} - \frac{dQ}{dx} \right)}{1 - \frac{Q^2}{g(B - x \tan \phi)^2 y^3}} \quad (2)$$

$$C_{el} = K_0 \left[ \left( \frac{K_1}{K_2 + \eta_w} \right)^{10} + \left( \frac{\eta_w}{\eta_w + 1} \right)^{K_3} \right]^{-0.1} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $K_0$ ،  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  در رابطه (۴)،  $\eta_w = (H_0 - P)/P$ ، اعداد مثبت نامعین هستند که به ثابت‌های سرریز معروف بوده و به صورت آزمایشگاهی استخراج شده‌اند (Swamee et al., 2011). معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه اول ۲ و ۳ برای هر المان، با توجه به شرایط مرزی و مشخصات هندسی و هیدرولیکی تعریف شده، پس از گسسته‌سازی با استفاده از یکی از روش‌های متعارف محاسبات عددی حل می‌شوند.

#### استخراج موضعی

در بخش‌هایی از سرریز که هندسه پلان به شکل ناگهانی

در رابطه (۲)،  $S_0$  شیب کف کانال تقریب،  $n$  ضریب زبری کانال تقریب،  $B$  عرض کانال تقریب و  $\phi$  زاویه سرریز مایل است. با توجه به شکل (۱)، المانی از سرریز ( $dL$ )، روی محور  $OA$  در فاصله  $x$  در نظر گرفته شده است. تغییرات دبی بر روی این المان براساس معادله آبگذری سرریزها به صورت رابطه (۳) نشان داده شده است (Swamee et al., 2011).

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{2}{3} C_{el} \sqrt{2g} (y - P)^{3/2} \sec \phi \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $C_{el}$  ضریب آبگذری المانی از سرریز مایل است که تابعی از  $H_0/P$  (ارتفاع سرریز و  $H_0$  بار آبی روی تاج سرریز است) و  $\phi$  زاویه المان بوده و براساس رابطه (۴) بیان شده است (Swamee et al., 2011).

تداخل لایه‌های ریزشی جریان از معادلات حرکت پرتابی آزاد جریان از روی تاج سرریز استفاده شده است. برای دستیابی روش عمومی تحلیل آبگذری سرریزهای غیرخطی براساس مبانی بیان‌شده، تمام مراحل ذکرشده با استفاده از زبان برنامه‌نویسی متلب<sup>۴</sup> کد نویسی و اجرا شده است.

## نتایج و بحث

### سرریز مایل

سرریز مایل<sup>۵</sup> ساده‌ترین نوع از هندسه سرریزهای غیرخطی در پلان هست که به‌عنوان شکل پایه سرریزهای غیرخطی مطرح است. *Borghei et al.* (2003) مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای را بر روی سرریزهای مایل لبه تیز انجام داده‌اند. مدل‌های موردبررسی برای زوایای  $۲۶/۳۰^{\circ}$  تا  $۶۰/۹^{\circ}$  و محدوده  $H_0/P < 0.2$  مطابق شکل (۱) انجام شده است.

در پژوهش حاضر برای بررسی کارایی روش ارائه‌شده، روش EDA برای تمامی اطلاعات آزمایشگاهی بیان‌شده تهیه و تحلیل‌شده است. در شکل (۲) نتایج خروجی روش EDA برای بار آبی ۵cm روی تاج سرریز مایل نشان داده شده است. قابل پیش‌بینی بوده است که نواحی تداخل در پایین‌دست دیوار جانبی جناح راست اتفاق بیفتد که این موضوع در روش EDA به‌خوبی نمایش داده شده است. در شکل (۳) نمودارهای دبی در مقابل بار آبی برای سرریزهای مایل ارائه شده است. روش EDA عملکرد مناسبی در برآورد میزان آبگذری سرریز مایل داشته است. یکی از منابع اصلی خطا مربوط است به میزان بار آبی روی تاج سرریز، که در مدل‌های آزمایشگاهی بدون لحاظ بار سرعت ارائه‌شده، لذا روش EDA برآورد کم‌تری از میزان آبگذری نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی داشته است. همبستگی مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و روش EDA با خطای نسبی حداکثر ۱۲

تغییر می‌کند، جت جریان پرتابی از روی سرریز باهم تداخل پیدا کرده و آن بخش از سرریز دچار استغراق موضعی می‌شود. این ناحیه به‌اصطلاح ناحیه تداخل و یا استغراق موضعی نامیده شده است (Taylor, 1968). ناحیه تداخل در محل اتصال تاج سرریز به دیواره‌های جانبی سرریز نیز ممکن است تشکیل شود. این موضوع به‌ویژه در بارهای آبی بالا باعث کاهش ظرفیت آبگذری سرریز می‌شود (Taylor, 1968). استغراق موضعی باعث کاهش آبگذری المان‌های متأثر شده و برای اعمال اثر این پدیده بر آبگذری المان‌های متأثر، از روابط و مطالعات صورت‌گرفته در خصوص تأثیر استغراق سرریزها بر آبگذری آن‌ها استفاده شده است. در حالت کلی رابطه بین آبگذری سرریز در حالت آزاد ( $Q_f$ ) و مستغرق ( $Q_s$ )، تحت شرایط مشابه هیدرولیکی و هندسی به‌صورت رابطه (۵) قابل بیان است (Azimi et al., 2014).

$$Q_s = \psi Q_f \quad (5)$$

در این رابطه  $\psi$ ، فاکتور کاهش هست. این فاکتور به‌وسیله بار آبی روی تاج سرریز ( $H_0$ ) و عمق استغراق روی تاج سرریز ( $t$ ) قابل بیان است. براساس نتایج آزمایشگاهی، رابطه (۶) به‌عنوان رابطه عمومی برای فاکتور کاهش به‌دست آمده است (Azimi et al., 2014).

$$\psi = \left[ 1 - \left( \frac{t}{H_0} \right)^{m-n} \right] \quad (6)$$

در این رابطه  $m$  و  $n$  تابعی از شکل تاج سرریز هست. به‌عنوان نمونه برای سرریز لبه تیز  $m=5$  و  $n=0.75$  هست (Azimi et al., 2014). با توجه به رابطه (۵)، می‌توان اثر کاهش آبگذری را برای المان‌های متأثر، به‌وسیله فاکتور کاهش اعمال کرد. اما باید قبل از تصحیح ظرفیت آبگذری هر المان، نواحی تداخل و تعداد المان‌های متأثر شناسایی شوند. برای شناسایی ناحیه

عرض ثابت کانال تخلیه در پی دارد. ضمن آن‌که این امر در داخل مخزن می‌تواند بهبود جهت‌گیری سرریز نسبت به جریان ورودی و افزایش ضریب آبگذری را در پی داشته باشد. باوجود ساخت سرریز سد آوون<sup>۶</sup> در استرالیا (۱۹۷۱) و ویدرفورد<sup>۷</sup> در آمریکا (۱۹۹۲) به صورت قوسی کنگره‌ای و علی‌رغم مزایای این سرریزها نسبت به طرح خطی آن، اکثر پژوهش‌های انجام‌گرفته معطوف به سرریزهای کنگره‌ای با سیکل‌های خطی بود.

درصد مشاهده شده است. از طرفی در سرریز مایل با زاویه دیواره‌های کمتر (مانند زاویه ۲۶/۳ درجه)، نواحی آشفته‌گی در بار آبی بالا گسترده‌تر و پیچیده‌تر شده است. از این رو، خطای رخ داده در زوایای بزرگ‌تر و بار آبی بالاتر، بیش‌تر ایجاد شده است.

### سرریز کنگره‌ای قوسی

قوسی‌کردن سرریز، افزایش طول تاج سرریز را به‌ازای

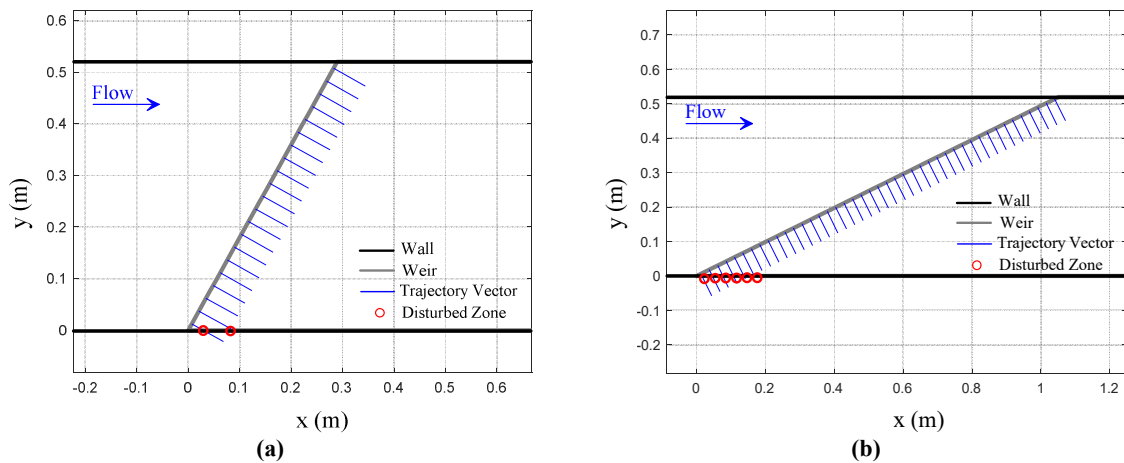


Figure 2. Results of the EDA for oblique weirs in  $H_0=5$  cm: a)  $\phi = 60.9^\circ$ , b)  $\phi = 26.3^\circ$

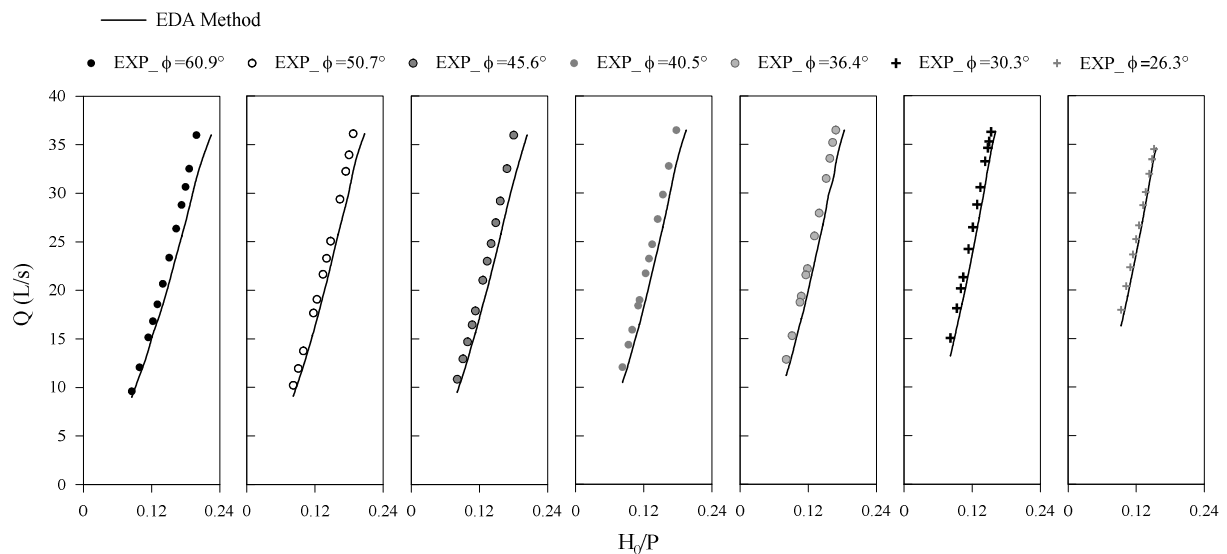


Figure 3. Q vs.  $H_0/P$  for EDA method and oblique weirs laboratory results

به‌طور عمده برآورد کم‌تری از میزان آبگذری سرریزهای بررسی شده نسبت به نتایج نظیر آزمایشگاهی داشته است. روش EDA روند تغییرات نمودارهای آبگذری را نیز به‌خوبی تخمین زده است. البته در مواردی برای داده‌های آزمایشگاهی نیز نامنظمی‌هایی مشاهده شده که با توجه به پیچیدگی‌های جریان در این‌گونه سرریزها دور از انتظار نیست. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش EDA باوجود پیچیدگی‌های فراوان سرریزهای کنگره‌ای قوسی، دارای عملکرد بسیار مطلوبی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که کلیه خروجی‌های به‌دست‌آمده از روش EDA در محدوده خطای ۱۵ درصد بوده است.

#### سرریز سد ایزابلا

یکی از کارکردهای بسیار مهم سرریزهای غیرخطی در توانبخشی سدهای موجود است. کاربرد اصلی سرریزهای غیرخطی در طرح‌های توانبخشی سدها به‌طورعمده به‌منظور افزایش ظرفیت تخلیه سرریز (به‌دلیل تغییرات هیدرولوژیکی و مقدار سیلاب طراحی) و یا افزایش تراز نرمال سد در نتیجه افزایش حجم مخزن بوده است (Thompson et al., 2016). تاکنون چندین پروژه در سطح دنیا برای توانبخشی سدها به‌وسیله سرریزهای غیرخطی به‌اجرا درآمده است که از آن جمله می‌توان به توانبخشی سدهای ایزابلا، یوتا، ریچارد، دریاچه لیسر و ... اشاره کرد (Thompson et al., 2016). یکی از این پروژه‌های بسیار مهم با این دیدگاه، طرح توانبخشی سد ایزابلا بوده است. مخزن سد دریاچه ایزابلا بر روی رودخانه کرن در کالیفرنیا واقع شده است. این پروژه در ۶۷ کیلومتری شمال‌شرقی شهر بیکرزفیلد و یک مایلی بالادست دریاچه ایزابلا قرار دارد. سد ایزابلا از دو سد خاکی تشکیل شده؛ یک سد اصلی که رودخانه کرن را مسدود می‌کند و یک سد کمکی که بر روی دره چشمه‌های آب گرم واقع شده است.

Christensen (2012) در مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با توان آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی انجام داده است. ایشان به بررسی پارامترهای مختلف سرریزهای کنگره‌ای قوسی همانند تعداد سیکل‌های، زاویه مرکزی قوس، زوایای دیواره‌های کناری پرداخته است. در شکل (۴) پارامترهای هندسی سرریزهای کنگره‌ای قوسی و در جدول (۱) مشخصات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شده در این پژوهش ارائه شده است (Christensen, 2012).

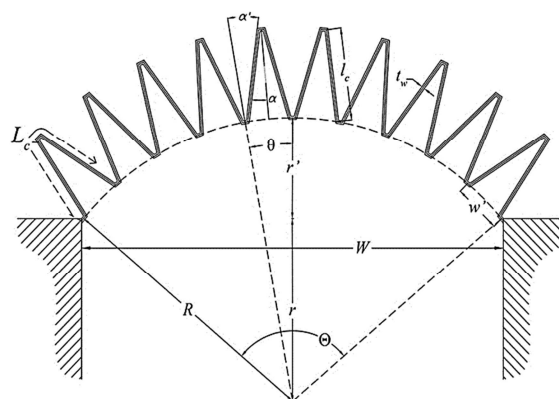
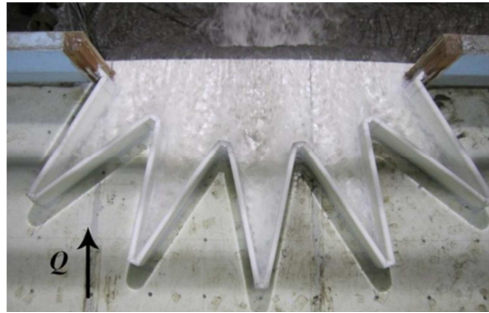


Figure 4. General Geometric Characteristic of Arched labyrinth weirs (Christensen, 2012)

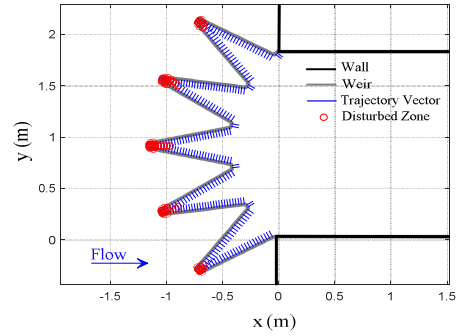
Table 1. Specifications of laboratory models reviewed by Christensen (Christensen, 2012)

Model	$\alpha^0$	$\theta^0$	P(cm)	$L_{c-cycle}$ (cm)	$L_{c-cycle}/W$	w/P	N
1	12	20	20.32	161.163	3.951	2.08	5
2	20	30	20.32	102.64	2.516	2.008	5
3	20	10	20.32	102.64	2.516	2.008	10

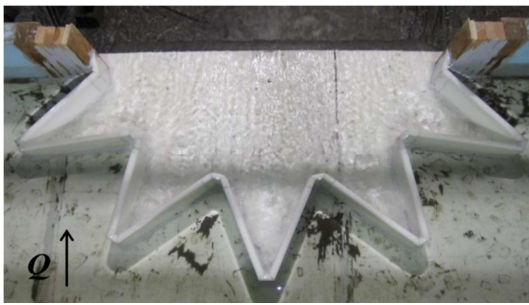
هندسه سرریزهای کنگره‌ای قوسی برای به‌کارگرفتن در روش EDA تهیه و سپس براساس نتایج آزمایشگاهی موجود تحلیل شده است. در شکل (۵) تصاویر مدل‌های آزمایشگاهی و نمونه‌ای از نتایج خروجی روش EDA ارائه شده است. پس از انجام تحلیل سرریزهای کنگره‌ای قوسی بیان‌شده براساس تمامی داده‌های آزمایشگاهی در دسترس، نمودارهای دبی جریان در مقابل بار هیدرولیکی رو تاج سرریز در شکل (۶) ارائه شده است. روش EDA،



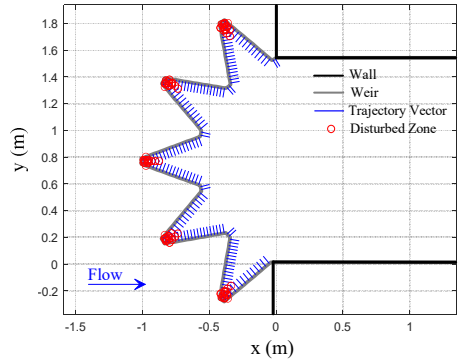
(a)



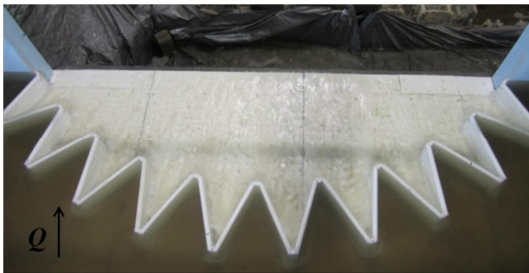
(b)



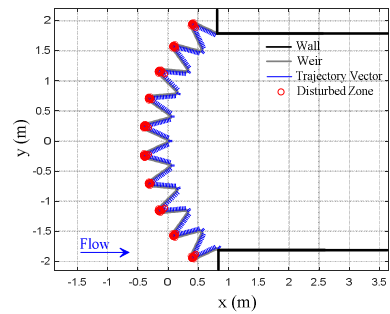
(c)



(d)

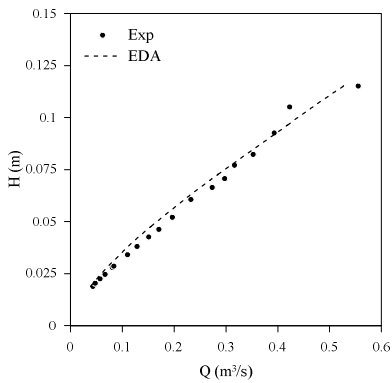


(e)

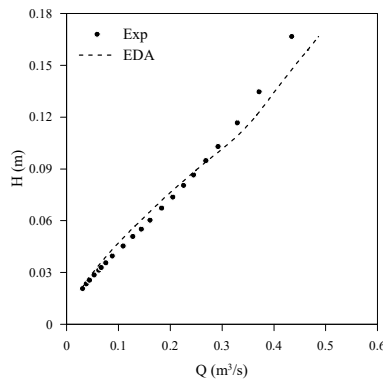


(f)

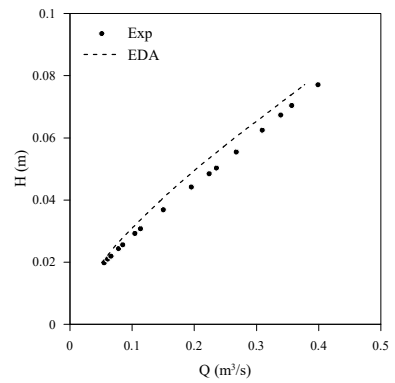
Figure 5. Laboratory model and results of EDA method for  $H_0 = 5$  cm: a) Model 1 Experimental, b) Model 1 EDA, c) Model 2 Experimental, d) Model 2 EDA, e) Model 3 Experimental, f) Model 3 EDA



(a)



(b)



(c)

Figure 6. Q vs.  $H_0 / P$  for EDA method and laboratory results: a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3



است. نتایج به دست آمده از مدل عددی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است و اطلاعات ارزشمندی را در اختیار طراحان قرار داد (Thompson et al., 2016). با توجه به حجم بالای محاسباتی، مدل عددی برای سه دبی تدوین و شبیه‌سازی شده است. در شکل (۷) تصویری از مدل آزمایشگاهی سرریز سد ایزابلا ارائه شده است.

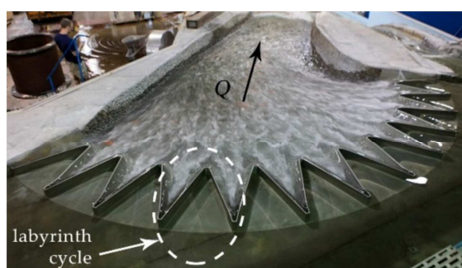


Figure 7. Laboratory model of Isabella Dam emergency spillway (Thompson et al., 2016)

با توجه به این که نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی سرریز سد ایزابلا در دسترس بوده است، به عنوان یکی از نمونه‌های جدی برای روش‌های ارائه شده مطرح می‌باشد. سرریز کنگره‌ای قوسی سد ایزابلا برای روش EDA تهیه و تحلیل شده است. در شکل (۸) نتایج خروجی روش EDA برای بار آبی ۱m و ۳m ارائه شده است. همان گونه که مشخص هست، نواحی آشفتگی در دماغه سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای شکل گرفته و با افزایش بار آبی این نواحی نیز گسترده شده است.

این دو سد با یک ویژگی توپوگرافی طبیعی که گسل شهرستان کرن در آن واقع شده است، از هم جدا شده‌اند. با توجه عمر بالای سد و تغییرات شرایط هیدرولوژیکی و ایمنی بدنه سد، طرح توانبخشی این سد در بخش‌های مختلف ارائه شده است (Thompson et al., 2016). یکی از بخش‌های اصلی در طرح توانبخشی سد ایزابلا، افزایش حجم مخزن و افزایش توان آبگذری سرریز تا سیلاب PMF<sup>۱</sup> بوده است. با توجه به این که سرریز موجود آبگذری بسیار کم‌تری نسبت به سیلاب PMF داشته، گزینه‌های مختلفی بررسی و در نهایت سرریز کنگره‌ای قوسی به عنوان گزینه برتر شناسایی شده است (Thompson et al., 2016). طول کل تاج سرریز منتخب ۹۵۹/۸۱m، ارتفاع سرریز ۸/۵۳m، زاویه بازوهای کناری سرریز ۱۰ درجه، زاویه مرکزی قوس ۱۲۰ درجه و در ۱۲ سیکل است. برای بررسی‌های بیشتر و تدقیق مدل پیشنهادی، سلسله آزمایش‌هایی در آزمایشگاه تحقیقات آب یوتا<sup>۲</sup> در مقیاس ۱ به ۴۵ انجام شده است. مدل آزمایشگاهی سرریز سد ایزابلا یکی از بزرگ‌ترین مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده برای پروژه‌های مهندسی هیدرولیک در دنیا می‌باشد. هم‌چنین برای اطمینان از عملکرد سرریز پیشنهادی و به دست آوردن اطلاعات هیدرولیکی بیشتر (مانند توزیع سرعت و ...)، مرکز مهندسی ناحیه پورتلند<sup>۱</sup> از مدل عددی سه‌بعدی Star-CCM+ برای شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز پیشنهادی استفاده کرده

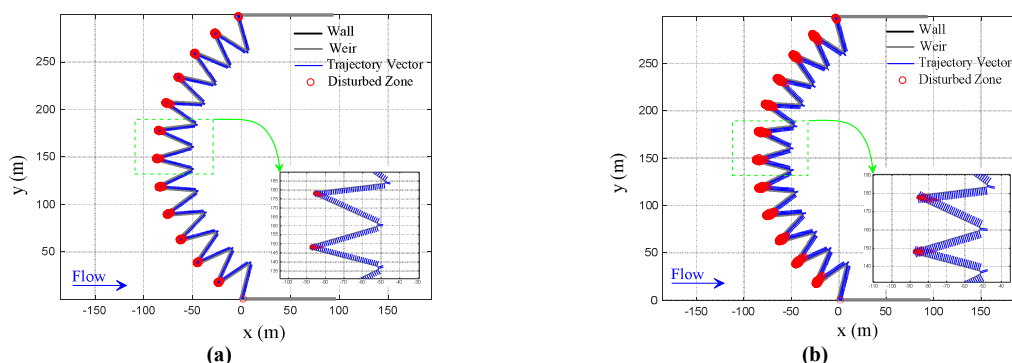


Figure 8. EDA method Results for Isabella dam spillway: a)  $H_0=1$  m, b)  $H_0=3$  m

به‌وسیله روش EDA شناسایی و آثار کاهش‌ی آن بر روی توان آبگذری مشهود بوده است.

- روش EDA با دقت مناسب و حداکثر خطای ۱۵ درصد، تخمین قابل‌قبولی از توان آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی داشته است.

- برای بررسی عملکرد روش EDA در سرریزهای غیرخطی با هندسه پیچیده، سرریز سد ایزابلا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی در برآورد توان آبگذری سرریز مذکور بوده است.

- روش ارائه‌شده توانایی تحلیل انواع مختلفی از خانواده‌های هندسی سرریزهای غیرخطی را داراست.

- روش EDA قابلیت استفاده برای هر مقیاسی را دارد. از این‌رو، از این روش در مقیاس واقعی سرریزهای طرح‌شده می‌توان استفاده کرد.

- با توجه به سرعت و دقت بالای روش EDA، امکان بررسی طیف گسترده‌ای از ایده‌ها و اشکال هندسی سرریزهای غیرخطی در این روش فراهم است. لذا این روش در فاز اولیه و یا شناخت به‌عنوان یک ابزار توانمند می‌تواند به مهندسان و طراحان سازه‌های هیدرولیکی کمک نماید.

### پی‌نوشت‌ها

1. Isabella Dam spillway
2. Elementary Discharge Analysis (EDA)
3. Local Submergence
4. MATLAB
5. Oblique Weirs
6. Avon
7. Weatherford
8. Probable Maximum Flood
9. Utah Water Research Laboratory
10. Portland District Corps of Engineers

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

در شکل (۹) منحنی آبگذری سرریز سد ایزابلا برای نتایج مدل آزمایشگاهی، مدل عددی و روش EDA نشان داده شده است. روش EDA تخمین بسیار مناسبی از توان آبگذری سرریز سد ایزابلا در تمامی بارهای آبی داشته است. در حالت کلی، روش EDA تخمین کم‌تری از میزان آبگذری سرریز سد ایزابلا داشته که از دلایل این موضوع نبود اطلاعات بار سرعت، به‌عنوان بخشی از بار هیدرولیکی کل روی تاج سرریز در مدل‌های آزمایشگاهی بوده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، روش EDA با حداکثر خطای ۱۵ درصد، برآورد قابل‌قبولی از آبگذری سرریز کنگره‌ای قوسی سد ایزابلا داشته‌اند. لازم به ذکر است که انجام مطالعات آزمایشگاهی این سرریز زمان و هزینه بسیار زیادی را صرف کرده است.

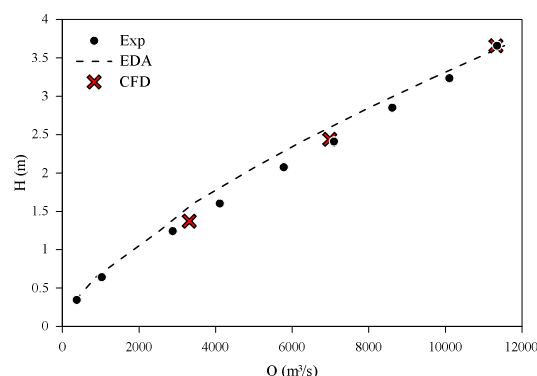


Figure 9. Isabella dam spillway Rating curve in laboratory model, numerical model and EDA method

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش عمومی برای تحلیل آبگذری سرریزهای غیرخطی ارائه شد. روش ارائه‌شده برای سرریز مایل، کنگره‌ای قوسی و سرریز سد ایزابلا به‌کار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

- روش EDA با حداکثر خطای ۱۲ درصد تخمین مناسبی از آبگذری سرریزهای مایل داشته است. نواحی استغراق موضعی در مجاورت دیواره‌های سرریز مایل

## منابع

1. Azimi, A. H., Rajaratnam, N., & Zhu, D. Z. (2014). Submerged flows over rectangular weirs of finite crest length. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 140(5), 06014001.
2. Borghei, S. M., Vatannia, Z., Ghodsian, M., & Jalili, M. R. (2003, June). Oblique rectangular sharp-crested weir. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering* (Vol. 156, No. 2, pp. 185-191). Thomas Telford Ltd.
3. Carrillo, J. M., Matos, J., & Lopes, R. (2020). Numerical modeling of free and submerged labyrinth weir flow for a large sidewall angle. *Environmental Fluid Mechanics*, 20(2), 357-374.
4. Christensen, N. A (2012). *Flow characteristics of arced labyrinth weirs*. MSc dissertation, Utah State University, Utah, USA, 106 pp.
5. Crookston, B. M (2010). *Labyrinth weirs*. PhD dissertation, Utah State University, Utah, USA, 222 pp.
6. Crookston, B. M., Erpicum, S., Tullis, B. P., & Laugier, F. (2019). Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures, advancements, and future research needs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(12), 02519004.
7. Crookston, B. M., Mortensen, D., Stanard, T., Tullis, B. P., & Vasquez, V. (2015, April). Debris and maintenance of labyrinth spillways. In *Proceedings of the 35th Annual USSD Conference, Louisville, KY, USA* (pp. 13-17).
8. Dutta, D., Mandal, A., & Afzal, M. S. (2020). Discharge performance of plan view of multi-cycle W-form and circular arc labyrinth weir using machine learning. *Flow Measurement and Instrumentation*, 73, 101740.
9. Elnikhely, E. A., & Fathy, I. (2020). Prediction of scour downstream of triangular labyrinth weirs. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 1037-1047.
10. Erpicum, S., Laugier, F., Boillat, J. L., Piroton, M., Reverchon, B., & Schleiss, A. J. (Eds.). (2011). *Labyrinth and piano key weirs*. CRC Press.
11. Erpicum, S., Tullis, B. P., Lodomez, M., Archambeau, P., Dewals, B. J., & Piroton, M. (2016). Scale effects in physical piano key weirs models. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692-698.
12. Ghaderi, A., Dasineh, M., Abbasi, S., & Abraham, J. (2020). Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. *Applied Water Science*, 10(1), 1-12.
13. Kabiri-Samani, A. (2010). Analytical Approach for Flow over an Oblique Weir. *Scientia Iranica*, 17(2).
14. Lopes, R., Matos, J., & Melo, J. (2006, December). Discharge capacity and residual energy of labyrinth weirs. In *Proc. of the Int. Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures (IJREWHIS '06)*(pp. 47-55).
15. Mahmoud, A., Yuan, X., Kheimi, M., & Yuan, Y. (2021). Interpolation accuracy of hybrid soft computing techniques in estimating discharge capacity of triangular labyrinth weir. *IEEE Access*, 9, 6769-6785.
16. Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., & Schleiss, A. J. (2013). Debris-blocking sensitivity of piano key weirs under reservoir-type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), 1134-1141.
17. Rajaei, A., Esmaeili Varaki, M., & Shafei Sabet, B. (2020). Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26(4), 457-467.
18. Shafei, S., Najarchi, M., & Shabanlou, S. (2020). A novel approach using CFD and neuro-fuzzy-firefly algorithm in predicting labyrinth weir discharge coefficient. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1), 1-19.
19. Swamee, P. K., Ojha, C. S. P., & Mansoor, T. (2011). Discharge characteristics of skew weirs. *Journal of hydraulic research*, 49(6), 818-820.
20. Taylor G (1968). *The performance of labyrinth weirs*. PhD dissertation, University of Nottingham, Nottingham, UK, 410 pp.
21. Thompson EA, Cox NC, Ebner L, Tullis B (2016). *The hydraulic design of an arced labyrinth weir at Isabella Dam*. website: <https://digitalcommons.usu.edu/ishs/2016/Session2/1/>
22. Zounemat-Kermani, M., Kermani, S. G., Kiyanejad, M., & Kisi, O. (2019). Evaluating the application of data-driven intelligent methods to estimate discharge over triangular arced labyrinth weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101573.