

طراحی بهینه و بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته

احمد فردوسی^۱، سیدفرهاد موسوی^۲، سعید فرزین^{۳*}، حجت کریمی^۴، محمد احترام^۵، مهدی ولیخان انارکی^۶
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۳

چکیده

از راه کارهای مناسب برای افزایش ظرفیت آبگذری سرریز در سدها، مخصوصاً در شرایطی که افزایش دهانه سرریز امکان‌پذیر نباشد، استفاده از سرریز کنگره‌ای است. چون ساخت سرریزها بخش قابل توجهی از هزینه‌های اجرایی سدها را به خود اختصاص می‌دهد، یافتن راه‌های بهینه‌سازی این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر، از الگوریتم فراکاوشی جستجوی فاخته، جهت یافتن بهترین هندسه سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، استفاده شد. بدین منظور، حجم بتن مصرفی سرریز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. همچنین، طراحی سرریز با توجه به محدودیت‌های هیدرولیکی مختلف صورت گرفت. با انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای بهینه این الگوریتم انتخاب شد. سپس، الگوریتم جستجوی فاخته به صورت تصادفی ۱۵ مرتبه اجرا شد. مقدار ضریب تغییرات و سرعت همگرایی حاصل از اجراهای تصادفی برای الگوریتم پیشنهادی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۰۱ و ۱۰۰۰ تکرار می‌باشد. در نهایت، مقدار کمینه تابع هدف الگوریتم پیشنهادی با نمونه مورد مطالعه واقعی و همچنین با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و تکامل تفاضلی (DE) در تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار گرفت. مشخص گردید که ابعاد سرریز پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته، منجر به کاهش بتن مصرفی در ساخت سرریز به میزان ۳۸/۹ درصد نسبت به نمونه واقعی می‌شود. در مدل ارائه شده، علاوه بر کاهش حجم بتن سرریز، مقدار ظرفیت دبی عبوری سرریز نیز افزایش یافت. از سوی دیگر، کاهش حجم بتن‌ریزی در ساخت سرریز با استفاده از الگوریتم مذکور در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک (GA و DE) در حدود ۱۲٪ بیش‌تر است. کاهش چشم‌گیر (بیش از یک سوم) در حجم بتن‌ریزی سرریز پیشنهادی نسبت به نمونه واقعی، نشان‌دهنده توان‌مندی الگوریتم فراکاوشی جستجوی فاخته در حل مسایل بهینه‌سازی سرریزها و ضرورت استفاده از آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی فاخته، بهینه‌سازی، حجم بتن‌ریزی، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، عملکرد هیدرولیکی

مقدمه

از پرکاربردترین سازه‌های هیدرولیکی و مهم‌ترین بخش سدها، سرریزها می‌باشند. ظرفیت سرریزها به شدت تحت تاثیر دو عامل طول و شکل تاج است (Crookston, 2010). سرریز کنگره‌ای از جمله سازه‌های هیدرولیکی غیرخطی است که به دلیل شکل هندسی

آن، باعث افزایش ضریب دبی جریان عبوری از آن می‌گردد (ضمیری و همکاران، ۱۳۹۶). استفاده از این سرریزها، از راه‌های افزایش طول سرریز، بدون افزایش عرض دهانه ورودی آن می‌باشد (Khatsuria, 2004). این نوع سرریز که دارای شکل‌های مختلفی در پلان است، می‌تواند تا چندین برابر یک سرریز معمولی (مستقیم) افزایش طول داشته باشد.

تحقیقات صورت گرفته توسط مهندسان ارتش ایالات متحده (USACE) روی بیش از ۸۰ هزار سد، حاکی از نایمن بودن ۳۶٪ این سدها به دلایل مختلف می‌باشد که دلیل حدود ۸۰٪ آن‌ها عدم ظرفیت کافی سرریز است (Mirnaseri and Emadi, 2014). همچنین، کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ، حدود ۳۰٪ از شکست سدها را به دلیل عدم ظرفیت کافی سرریزها می‌داند. از سوی دیگر، مخارج ساخت سرریزها حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد هزینه احداث سدها را تشکیل می‌دهد (یوسفیان، ۱۳۷۵). بنابراین، نیاز به طراحی سرریزها با ظرفیت کافی، ارضای شرایط هیدرولیکی و همچنین با کم‌ترین هزینه، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
 - ۲- استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
 - ۳- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
 - ۴- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
 - ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
 - ۶- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
- * ایمیل نویسنده مسئول: (Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)

بیش از یک قرن از اختراع سرریزهای کنگره‌ای می‌گذرد. مورفی جز اولین افرادی است که به معرفی فواید سرریز کنگره‌ای در سال ۱۹۰۹ پرداخت (Murphy., 1909). اولین مطالعات هیدرولیکی روی این نوع سرریز، توسط جنتیلینی صورت گرفته است (Gentilini., 1941). طی سال‌های گذشته نیز تحقیقات بسیاری در مورد طراحی سرریزهای کنگره‌ای انجام شده است. به‌عنوان نمونه، ویلمور به آزمایش سرریزهای کنگره‌ای با شکل‌های مختلف تاج پرداخت (Willmore., 2004). کروکستون و تولیس نیز تحقیقات گسترده‌ای را بر پایه مدل‌سازی فیزیکی در مورد سرریزهای کنگره‌ای انجام دادند. آن‌ها علاوه بر مقایسه نتایج خود با محققین پیشین، نمودارهایی را برای ضریب تخلیه پیشنهاد نمودند (Crookston and Tullis., 2012., 2013).

مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی نیز به در کشور انجام شده است (حیدرپور و همکاران، ۱۳۸۵، رضایی و همکاران، ۱۳۹۴، شفاعت طلب دهقانی و همکاران ۱۳۹۵ و ضمیری و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج تحقیقات صورت گرفته تا به امروز باعث ایجاد ضریب‌های بی‌بعد مختلفی از جمله نسبت عرض سیکل، هد آب و بزرگ‌نمایی شده است که با محدود کردن ابعاد بدنه سرریز می‌توانند باعث عملکرد بهتر این سازه‌ها شوند. همچنین، شکل‌های مختلفی از جمله مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای و قوسی برای این سرریزها معرفی شده است.

در دهه‌های اخیر، مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده در طراحی اقتصادی ابعاد سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های متاهوریستیک^۱ از جمله ابزارهای مفید و توانا در حل مسایل بهینه‌سازی هستند. واژه هیوریستیک، یونانی بوده و به معنای شناختن، فهمیدن و کشف کردن است. در زبان فارسی، عبارت متاهوریستیک به صورت فراکاوشی، فراابتکاری، فراشهودی و فرامکاشفه‌ای ترجمه شده است. انواع مختلفی از این الگوریتم‌ها تاکنون معرفی شده‌اند که با توجه به روش‌های جستجوی مسئله بهینه‌سازی، عملگرهای اساسی و منبع الهام دسته‌بندی می‌شوند (شریف‌زاده و امجدی، ۱۳۹۳).

در دهه‌های اخیر، مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده در طراحی اقتصادی ابعاد سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های متاهوریستیک^۱ از جمله ابزارهای مفید و توانا در حل مسایل بهینه‌سازی هستند. واژه هیوریستیک، یونانی بوده و به معنای شناختن، فهمیدن و کشف کردن است. در زبان فارسی، عبارت متاهوریستیک به صورت فراکاوشی، فراابتکاری، فراشهودی و فرامکاشفه‌ای ترجمه شده است. انواع مختلفی از این الگوریتم‌ها تاکنون معرفی شده‌اند که با توجه به روش‌های جستجوی مسئله بهینه‌سازی، عملگرهای اساسی و منبع الهام دسته‌بندی می‌شوند (شریف‌زاده و امجدی، ۱۳۹۳).

2- Genetic Algorithm (GA)

3- Honey-Bee Mating Optimisation (HBMO) algorithm

4- ANFIS

5- Differential Evolution (DE) algorithm

6- Cuckoo Search (CS) algorithm

در دهه‌های اخیر، مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده در طراحی اقتصادی ابعاد سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های متاهوریستیک^۱ از جمله ابزارهای مفید و توانا در حل مسایل بهینه‌سازی هستند. واژه هیوریستیک، یونانی بوده و به معنای شناختن، فهمیدن و کشف کردن است. در زبان فارسی، عبارت متاهوریستیک به صورت فراکاوشی، فراابتکاری، فراشهودی و فرامکاشفه‌ای ترجمه شده است. انواع مختلفی از این الگوریتم‌ها تاکنون معرفی شده‌اند که با توجه به روش‌های جستجوی مسئله بهینه‌سازی، عملگرهای اساسی و منبع الهام دسته‌بندی می‌شوند (شریف‌زاده و امجدی، ۱۳۹۳).

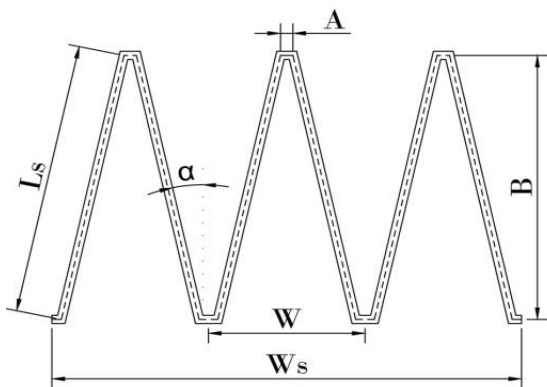
در دهه‌های اخیر، مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده در طراحی اقتصادی ابعاد سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های متاهوریستیک^۱ از جمله ابزارهای مفید و توانا در حل مسایل بهینه‌سازی هستند. واژه هیوریستیک، یونانی بوده و به معنای شناختن، فهمیدن و کشف کردن است. در زبان فارسی، عبارت متاهوریستیک به صورت فراکاوشی، فراابتکاری، فراشهودی و فرامکاشفه‌ای ترجمه شده است. انواع مختلفی از این الگوریتم‌ها تاکنون معرفی شده‌اند که با توجه به روش‌های جستجوی مسئله بهینه‌سازی، عملگرهای اساسی و منبع الهام دسته‌بندی می‌شوند (شریف‌زاده و امجدی، ۱۳۹۳).

در دهه‌های اخیر، مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده در طراحی اقتصادی ابعاد سرریزهای کنگره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های متاهوریستیک^۱ از جمله ابزارهای مفید و توانا در حل مسایل بهینه‌سازی هستند. واژه هیوریستیک، یونانی بوده و به معنای شناختن، فهمیدن و کشف کردن است. در زبان فارسی، عبارت متاهوریستیک به صورت فراکاوشی، فراابتکاری، فراشهودی و فرامکاشفه‌ای ترجمه شده است. انواع مختلفی از این الگوریتم‌ها تاکنون معرفی شده‌اند که با توجه به روش‌های جستجوی مسئله بهینه‌سازی، عملگرهای اساسی و منبع الهام دسته‌بندی می‌شوند (شریف‌زاده و امجدی، ۱۳۹۳).

1- Meta-heuristic algorithms

می‌گردد (Tullis et al., 1995; Khode et al., 2011; Crookston et al., 2012).

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



شکل ۱- نمایی از پلان سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای دارای سه سیکل

در رابطه ۱، Q دبی عبوری، C_d ضریب بدون بعد تخلیه (آبگذری)، L طول سرریز، g شتاب ثقل و H_t مجموع هد بالادست سرریز می‌باشد. مجموع هد سرریز، معمولاً در فاصله نزدیکی در سراب سرریز محاسبه می‌شود و برابر است با $h + (V^2/2g)$ که در آن h معرف هد پیزومتریک روی سرریز و v سرعت متوسط جریان است. تخمین دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای وابسته به مقدار دقیق C_d می‌باشد. به نحوی می‌توان ضریب آبگذری را تاثیر هندسه سرریز و شرایط جریان بر دبی عبوری سرریز دانست (Crookston et al., 2012). به منظور محاسبه ضریب تخلیه، از روابط ارائه شده در پژوهش کروکستون استفاده شده است. این ضریب برای زوایای مختلف و شکل تاج ربع‌دایره و با توجه به نسبت هد مجموع بالادست بر ارتفاع سرریز تعیین گردیده است (Crookston., 2010).

شکل تاج

پروفیل تاج سرریز تاثیر مستقیمی بر ضریب آبگذری و ظرفیت سرریز خواهد داشت. شکل‌های مختلفی برای تاج سرریزهای کنگره‌ای از جمله صاف، تیز، نیم‌دایره و ربع‌دایره وجود دارد. طبق اظهارات تولیس و همکاران، سرریزهای با تاج تیز و صاف دارای ضریب آبگذری کم‌تری نسبت به سرریزهای با تاج گرد (ربع دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای) هستند (Tullis et al., 1995). بنابراین از بین دو شکل تاج نیم و ربع‌دایره‌ای، شکل تاج نیم‌دایره‌ای در پژوهش حاضر استفاده شده است.

نسبت بزرگ‌نمایی طول (L_c/W)

شکل سرریز در پلان توسط این ضریب بیان می‌شود

پیشنهادی با نمونه واقعی و سایر الگوریتم‌های معتبر مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی الگوریتم جستجوی فاخته

تاکنون روش‌های متعددی برای حل معادلات حاصل از طراحی بهینه پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل مدل‌سازی‌های سنتی ریاضی و روش‌های نسبتاً جدید هوش مصنوعی می‌باشند (Chen, 2015). با افزایش پیچیدگی مسایل بهینه‌سازی و عدم توانایی کافی روش‌های تحلیلی سنتی، ابزارهای قوی‌تری نیاز می‌باشد که در میان راه‌کارهای مسایل بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراکاوشی دارای نتایج مطلوبی هستند.

الگوریتم جستجوی فاخته (CS) یک الگوریتم فراکاوشی نسبتاً جدید است که در سال ۲۰۰۹ بر پایه شبیه‌سازی رفتار فریب‌کارانه فاخته در هنگام جای‌گذاری تخم‌های خود در لانه دیگر پرندگان ابداع گردیده است. این الگوریتم، مانند بسیاری از الگوریتم‌های دیگر، از طریق نمادهای الهام گرفته شده از طبیعت به حل مسایل بهینه‌سازی می‌پردازد. نماد فاخته در این الگوریتم، جستجوی محلی را بر عهده دارد و هر تخم فاخته، حاکی از یک راه‌حل است که داخل لانه دیگر پرندگان (پرنده میزبان) قرار می‌گیرد. به طوری که اگر این پرنده میزبان از وجود تخم‌های ناشناس باخبر شود، یا لانه را ترک می‌کند و یا تخم فاخته را کنار می‌گذارد. بر اساس این رفتار که نماد جستجوی سراسری در این الگوریتم است، جواب‌های بی‌کیفیت کنار گذاشته می‌شوند. به طور کلی، الگوریتم جستجوی فاخته دارای سه قاعده کلی می‌باشد: ۱) هر فاخته در هر مرتبه تنها یک بار تخم می‌گذارد و آن را در لانه‌ای می‌گذارد که به طور تصادفی برگزیده شده است، ۲) بهترین لانه‌ها و با کیفیت‌ترین تخم‌ها به نسل بعدی راه می‌یابند و ۳) تعداد لانه‌های میزبان موجود ثابت هستند و تخم‌های فاخته با احتمال P_a توسط پرنده میزبان شناسایی خواهند شد. الگوریتم جستجوی فاخته توانایی بیشتری نسبت به الگوریتم‌های ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی دارد (Yang and Deb., 2009; Civicioglu and Besdok., 2013; کشته‌گر و اعتدالی، ۱۳۹۵).

طراحی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای

به دلیل هندسه خاص سرریزهای کنگره‌ای، الگوی جریان آن‌ها به صورت سه‌بعدی و بسیار پیچیده می‌باشد. پارامترهای مختلفی در طراحی و عملکرد این سرریزها تاثیر گذارند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. شکل ۱، پلان سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای را نمایش می‌دهد.

دبی عبوری و ضریب تخلیه

دبی عبوری از روی سرریزهای کنگره‌ای براساس رابطه ۱ بیان

نسبت دماغه (A/W)

برای افزایش ظرفیت سرریز، این نسبت باید تا حد امکان کم‌ترین مقدار را داشته باشد. معمولاً مقدار آن باید برابر یا کوچک‌تر از ۰/۰۷۶۵ باشد (Hepler, 1992).

نسبت ضخامت دیواره (A/T_w)

نسبت عرض دماغه به ضخامت دیواره سرریز، نسبت ضخامت دیواره نامیده می‌شود و مقدار آن برای حصول بهترین نتیجه بین مقادیر ۱ و ۲ محدود می‌شود (Kardan et al., 2017).

نسبت ضخامت نسبی (P/T_w)

ضخامت دیواره سرریز به نیروهای هیدرولیکی، بار اجسام شناور و موقعیت سرریز وابسته است که از طریق تحلیل سازه‌ای محاسبه می‌گردد. کاهش مقدار این ضریب که حاصل تقسیم ارتفاع سرریز به ضخامت دیواره سرریز می‌باشد، منجر به عملکرد بهتر هیدرولیکی و سازه‌ای سرریز می‌شود. مقدار این نسبت در سرریزهای آزمایشگاهی تولیس و همکاران برابر با ۶ و در تحقیق ویلمور برابر با ۸ در نظر گرفته شده است (Tullis et al., 1995; Willmore., 2004).

متغیرهای بهینه‌سازی

در بهینه‌سازی سرریز کنگره‌ای، بعضی از متغیرها براساس تجربه و قضاوت مهندسی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. این متغیرها، علاوه بر کاهش ابعاد مسئله، تاثیر به‌سزایی در صرفه‌جویی زمان نیز خواهند داشت (Chen., 2015). این پارامترها در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر ثابت (ورودی)

پارامتر	نماد	توضیحات
شکل تاج	-	ربع دایره‌ای
تعداد سیکل‌ها در پلان	N	۱۴
ضخامت دال کف	T _s	۰/۳۰
ارتفاع قایم آزاد	F _b	۰/۶۰

در جدول ۲، متغیرهای تصمیم‌نشان داده شده‌اند که هدف از بهینه‌سازی، تغییر این پارامترها می‌باشد که باید علاوه بر ارضای قیود مختلف، کاهش تابع هدف را نیز به‌دنبال داشته باشند. تعدادی از این پارامترها، مستقل از یکدیگر و تعدادی وابسته به هم هستند.

(Khatsuria., 2004). این ضریب برابر با نسبت طول یک سیکل از سرریز به عرض همان سیکل است. معمولاً مقدار این نسبت بین ۳ و ۹/۵ محدود می‌شود (Kardan et al., 2017).

نسبت عرض به ارتفاع (W/P)

نسبتی که از تقسیم عرض یک سیکل سرریز به ارتفاع آن به‌دست می‌آید که به آن نسبت عرض سیکل نیز گفته می‌شود. طبق پیشنهاد تیلور، این مقدار برای عدم افت عملکرد سرریز باید بیش‌تر از ۲ انتخاب شود (Taylor., 1968). خود و تمبورکور، نیز توصیه نمودند که این نسبت نباید کم‌تر از ۲ برای سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای و ۲/۵ برای سرریز کنگره‌ای مثلثی برگزیده شود (Khode and Tembhurkar., 2010). تولیس و همکاران، این نسبت را حدوداً بین ۳ و ۴ پیشنهاد نمودند (Tullis et al., 1995).

نسبت هد آبی (H_i/P)

از تقسیم مجموع هد آب به ارتفاع سرریز، این نسبت تعیین می‌شود. براساس مطالعات صورت گرفته توسط تولیس و همکاران، حد بالای این نسبت برابر با ۰/۹ می‌باشد (Tullis et al., 1995). در آزمایش‌های صورت گرفته توسط کروکستون، حد بالا و پایین این نسبت به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است (Crookston., 2010).

زاویه دیواره (α)

عملکرد سرریز، عمدتاً به‌وسیله زاویه دیواره سرریز نسبت به جهت جریان تعیین می‌گردد (Taylor, 1968). این زاویه برای سرریز کنگره‌ای مستطیلی، صفر درجه و برای سرریز کنگره‌ای مستطیلی بیش‌ترین مقدار است. برای تعیین این زاویه در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Crookston., 2010; Hager et al., 2015):

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{W - 2A}{L_c - 2A} \right) \quad (2)$$

تعداد سیکل (N)

یکی دیگر از پارامترهای مهم سرریز کنگره‌ای که در طرح کلی و هزینه آن تاثیر خواهد گذاشت، تعداد سیکل‌های آن خواهد بود. براساس نتایج آزمایش‌های ویلمور و تیلور، تعداد سیکل‌ها تاثیری بر ضریب تخلیه نخواهد داشت که این مورد طراحی را آسان‌تر خواهد نمود (Taylor., 1968; Waldron., 1994). هرچند، اگر تعداد سیکل‌ها بسیار کم و یا زیاد باشد، نه تنها طرحی اقتصادی نخواهیم داشت، بلکه به عملکرد هیدرولیکی موردنظر نیز دست نخواهیم یافت.

دیواره‌های انتهایی) و V_s (حجم دال کف) طبق روابط ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب محاسبه می‌گردد (Falvey., 2003).

$$V_t = V_w + V_e + V_s \quad (10)$$

$$V_w = N \times L_c \times P \times T_w \quad (11)$$

$$V_e = 2 \times (P + H_t + F_b) \times (B + H_t) \times T_w \quad (12)$$

$$V_s = (B + 2H_t) \times W_s \times T_s \quad (13)$$

سرریز مورد مطالعه

سرریز کنگره‌ای در پژوهش حاضر متعلق به سد خاکی Ute در نزدیکی Logan، در New Mexico، ایالات متحده آمریکا می‌باشد. این سد با ارتفاع ۳۶/۸۸ متر در سال ۱۹۶۲ روی رودخانه Canadian احداث گردیده است. نخستین سرریز این سد به صورت ریزشی آزاد طراحی شده بود که برای افزایش ظرفیت مخزن نیاز به نصب دریچه داشت. با توجه به هزینه بالای نصب دریچه، در نهایت گزینه استفاده از سرریز کنگره‌ای به عنوان اقتصادی‌ترین راه کار برگزیده شد (Houston., 1982). در شکل ۲، این سرریز نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمای سرریز سد Ute

نتایج و بحث

الگوریتم‌های فراکاوشی دارای پارامترهای تصادفی هستند که هر کدام اثرهایی بر جواب بهینه خواهند گذاشت. از این رو، یافتن مناسب‌ترین مقدار آن‌ها برای رسیدن به بهینه‌ترین جواب بسیار ضروری است. به این مجموعه عملیات در بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت گفته می‌شود. در تحلیل حساسیت الگوریتم جستجوی فاخته، مقادیر ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ برای پارامتر P_a و مقادیر ۱۵، ۲۰ و ۲۵ برای یافتن بهترین تعداد لانه‌های پرند میزبان (یا اندازه جمعیت) با تعداد تکرارهای مختلف بررسی شده‌اند. بهترین مقادیر برای این پارامترها در جدول ۳ مشاهده می‌گردد. بهترین مقدار پارامتر P_a برابر با ۰/۱۵ شده است. در مورد تعداد لانه‌های پرند میزبان نیز کم‌ترین مقدار تابع

جدول ۲- متغیرهای تصمیم

توضیحات	نماد	پارامتر
$P \sim 1.0H_t$	P	ارتفاع سرریز (تاج)
$T_w \sim P/8$	T_w	ضخامت سرریز
$h + (v^2/2g)$	H_t	مجموع هد بالادست
-	B	طول سرریز (موازی جریان)
$\sim 6^\circ - 35^\circ$	α	زاویه دیواره
$A \sim T_w$	A	عرض دماغه (مرکز)
$B/\cos\alpha$	L_s	طول یک دیواره
$2 \times (L_s + A)$	L_c	طول یک سیکل
$N \times L_c$	L	طول کل سرریز
$2 \times [L_s \times \sin \alpha + A]$	W	عرض یک سیکل
$\sim N \times W$	W_s	عرض کل سرریز (عمود بر)

محدودیت‌های طراحی

این قیود که حاصل تجارب مهندسی، مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی، سرریزهای احداث شده قبلی و ضوابط و آیین‌نامه‌ها می‌باشند با ایجاد محدودیت‌هایی برای ابعاد و شرایط هیدرولیکی، باعث بهبود وضعیت و اطمینان از عملکرد سرریزها خواهند شد. این قیود در روابط ۳ تا ۹ بیان گردیده‌اند.

$$Q_{optimal} \geq Q_{design} \quad (3)$$

$$3 \leq L_c / W \leq 9.5 \quad (4)$$

$$2 \leq W / P \leq 4 \quad (5)$$

$$0.05 \leq H_t / P \leq 0.90 \quad (6)$$

$$A / W \leq 0.0765 \quad (7)$$

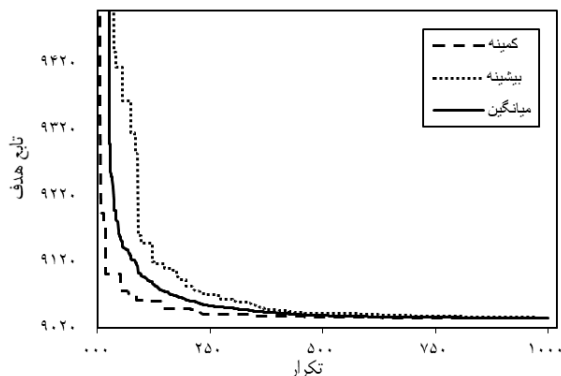
$$1 \leq A / T_w \leq 2 \quad (8)$$

$$6 \leq P / T_w \leq 8 \quad (9)$$

تابع هدف در بهینه‌سازی حجم بتن سرریز

هدف از این تابع می‌تواند کمینه یا بیشینه‌سازی تعدادی از پارامترها باشد. به عنوان نمونه، اگر هدف، کاهش هزینه یا وزن یک سازه باشد، کمینه‌سازی، مطلوب مسئله است. از طرف دیگر، اگر مقصود ایمنی و قابلیت اعتماد آن باشد، بیشینه‌سازی هدف دل‌خواه خواهد بود (Chen., 2015). هندسه هر سازه‌ای مشخص‌کننده حجم مصالح مصرفی و به‌طور مستقیم هزینه‌های ساخت آن است. از همین رو، با بهینه‌یابی ابعاد بدنه سرریز می‌توان به کم‌ترین مقدار حجم بتن‌ریزی دست یافت. حجم کلی بدنه سرریز کنگره‌ای (V_T) از رابطه ۱۰ و از سه قسمت V_w (حجم دیواره‌های سرریز)، V_e (حجم

مرتبه تکرار همگرا می‌شود.



شکل ۳- نمودار همگرایی تابع هدف

نتایج طرح پیشنهادی حاصل از الگوریتم فراکاوشی جستجوی فاخته به همراه مشخصات نمونه مورد مطالعه (Houston., 1982; Kardan et al., 2017) در جدول ۵ ذکر گردیده است. باتوجه به اهمیت ظرفیت دبی عبوری از روی سرریز، مشاهده می‌شود که در این الگوریتم نه تنها از این ظرفیت کاسته نشده است، بلکه وضعیت آن بهبود نیز یافته است. به طوری که، این طرح کاملاً جواب‌گویی شرایط هیدرولیکی سرریز اصلی می‌باشد. این الگوریتم سرعت قابل قبولی نیز در محاسبات دارد. با توجه به این که تابع هدف در این پژوهش، کاهش حجم بتن سرریز است، مشاهده می‌گردد که با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته، مقدار حجم بتن‌ریزی از ۱۴۷۸۹/۳۹۱ مترمکعب در سرریز مورد مطالعه به ۹۰۳۴/۹۰۱ مترمکعب در سرریز پیشنهادی کاهش پیدا کرده است. این مقدار حاکی از کاهش ۳۸/۹۱ درصدی می‌باشد.

با مقایسه مقدار پارامترهای الگوریتم جستجوی فاخته در جدول ۵، مشخص می‌گردد که این سرریز دارای حدود ۱۲٪ ارتفاع، ۵٪ ضخامت، ۱۲٪ عرض، ۴۴٪ طول دماغه و ۳۳٪ طول دیواره کم‌تر نسبت به سرریز مورد مطالعه می‌باشد که با توجه به طول زیاد این سرریز، تاثیر به‌سزایی در حجم بتن دارند. همچنین، تعدادی از پارامترها در سرریز پیشنهادی افزایش یافته‌اند. این پارامترها، شامل هد بالادست، زاویه دیواره، ضریب آبگذری و در نهایت دبی عبوری سرریز می‌باشند.

در محاسبه حجم بتن کل سرریز، حجم دیواره‌ها با مشارکت حدوداً ۶۰٪ حجم کل در پژوهش حاضر، بخش مهمی را به خود اختصاص داده که طبق رابطه ۱۱ به تعداد سیکل، طول یک سیکل، ارتفاع سرریز و ضخامت دیواره بستگی دارد. طبق رابطه ۱۰، حجم بتن کل سرریز از سه قسمت تشکیل شده است. همان طوری که اشاره گردید، حجم دیواره‌های زیگزاگی سرریز بیش‌ترین تاثیر را در حجم کل دارد. این حجم از مقدار ۹۹۷۲/۹۱۶ به مقدار ۵۵۷۴/۹۰۰

هدف مربوط به تعداد ۲۰ لانه است. همچنین، الگوریتم جستجوی فاخته در ۱۰۰۰ مرتبه تکرار به همگرایی رسیده و با افزایش تعداد تکرارها، تغییری در روند کاهش تابع هدف مشاهده نمی‌شود.

جدول ۳- پارامترهای استفاده شده در الگوریتم جستجوی فاخته

پارامتر	نماد	مقدار
احتمال شناسایی تخم فاخته	P_a	۰/۱۵
تعداد لانه‌های پرند میزبان	N	۲۰
حداکثر تعداد تکرار	MaxIt	۱۰۰۰

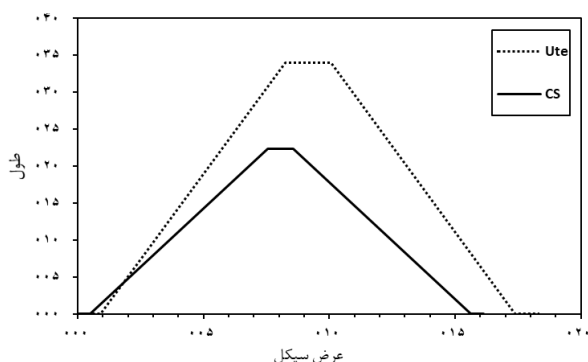
در جدول ۴، نتایج حاصل از ۱۵ اجرای تصادفی با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته نشان داده شده است. مقدار ضریب تغییرات حاصل از اجراهای تصادفی برای الگوریتم جستجوی فاخته ۰/۰۰۰۰۱ می‌باشد. مقدار بدترین و بهترین جواب به ترتیب برابر با ۹۰۳۴/۹۰۱ و ۹۰۳۵/۱۷۴ است. بنابراین، اختلاف کم‌ترین و بیش‌ترین جواب‌ها کم‌تر از ۰/۵ مترمکعب است که نسبت به حجم کل (۹۰۳۴ مترمکعب) بسیار ناچیز است.

جدول ۴- نتایج ۱۵ مرتبه اجرای تصادفی

تعداد اجرا	تابع هدف
۱	۹۰۳۵/۱۷۴
۲	۹۰۳۴/۹۰۶
۳	۹۰۳۴/۹۹۶
۴	۹۰۳۴/۹۶۷
۵	۹۰۳۵/۰۶۳
۶	۹۰۳۵/۰۱۲
۷	۹۰۳۴/۹۰۱
۸	۹۰۳۴/۹۳۷
۹	۹۰۳۴/۹۷۰
۱۰	۹۰۳۴/۹۱۲
۱۱	۹۰۳۴/۹۳۴
۱۲	۹۰۳۵/۱۳۸
۱۳	۹۰۳۴/۹۴۴
۱۴	۹۰۳۵/۱۲۸
۱۵	۹۰۳۴/۹۳۴
بهترین جواب	۹۰۳۴/۹۰۱
میانگین جواب‌ها	۹۰۳۴/۹۹۴
بدترین جواب	۹۰۳۵/۱۷۴
ضریب تغییرات	۰/۰۰۰۰۱

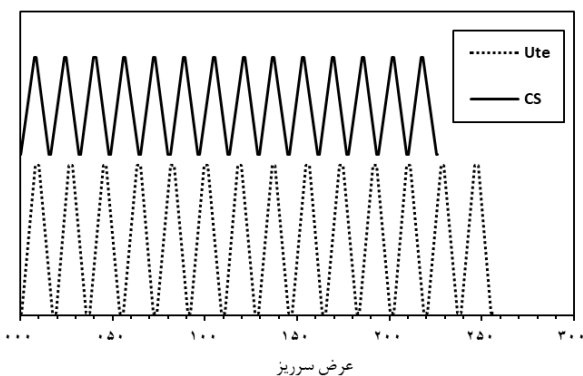
در شکل ۳، نمودار همگرایی تابع هدف (هزینه) برای مدل سرریز پیشنهادی توسط الگوریتم جستجوی فاخته ترسیم گردیده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، الگوریتم فاخته در ۱۰۰۰

عرض دماغه، طول سرریز (موازی جریان)، طول یک دیواره و عرض تک سیکل بین دو سرریز مشاهده می‌شود.



شکل ۴- مقایسه شکل تک سیکل سرریز Ute و بهینه‌سازی شده

در شکل ۵، فرم کلی سرریز مورد مطالعه و بهینه‌سازی شده در پلان نمایش داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌گردد، هر دو سرریز ۱۴ سیکل دارند، ولی طرح سرریز پیشنهادی دارای طول کمتر و در نهایت حجم کم‌تری می‌باشد.



شکل ۵- مقایسه شکل کلی سرریز Ute و سرریز بهینه‌سازی شده

از آن‌جایی که سرریز بتنی سد Ute یکی از بزرگ‌ترین سرریزهای کنگره‌ای احداث شده تاکنون می‌باشد، در پژوهش‌های پیشین، بارها مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. همان‌طوری که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲) ابعاد این سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای را با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی نمودند. این محققان، حجم بتن سرریز را تا میزان ۱۳/۳۴ درصد نسبت به نمونه مورد مطالعه کاهش دادند. حسینی و همکاران، در مطالعه‌ای، این سرریز را به‌صورت کنگره‌ای مثلثی با ۱۲ سیکل و با استفاده از الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و ژنتیک بهینه‌سازی نمودند که حجم مدل بهینه آن‌ها به

مترمکعب کاهش پیدا نموده که این مقدار به اندازه ۴۴٪ نسبت به دیواره‌های سرریز واقعی کاهش داشته است. حجم دیواره‌های انتهایی، ۲۴٪ کاهش و حجم دال کف سرریز نیز حدود ۳۹٪ کاهش پیدا کرده است.

نسبت دماغه (A/W)، جهت افزایش ظرفیت سرریز، باید به مقدار کوچک‌تر یا مساوی $0/0765$ محدود شود که با توجه به جدول ۵، در طراحی سرریز مورد مطالعه (Ute) رعایت نشده است. اما در مدل پیشنهادی، در محدوده تعیین شده قرار دارد. قید دیگری که مقدار آن در سرریز مورد مطالعه بیش از مقدار پیشنهادی توسط محققان است، ضخامت نسبی (P/T_w) می‌باشد که عملکرد سازه‌ای سرریز به آن بستگی دارد که در سرریز پیشنهادی رعایت شده است.

جدول ۵- مشخصات سرریز مورد مطالعه و بهینه‌سازی شده

پارامتر	Ute	CS
N	۱۴/۰۰۰	۱۴/۰۰۰
P	۹/۱۴۰	۸/۰۶۶
T_w	۱/۰۶۵	۱/۰۰۸
H_t	۵/۷۹۰	۷/۲۹۲
B	۳۳/۹۹۰	۲۲/۳۸۵
α	۱۲/۱۶۲	۱۷/۴۹۸
A	۱/۸۲۰	۱/۰۰۸
W	۱۸/۲۹۰	۱۶/۱۳۳
W_s	۲۵۶/۰۶۰	۲۲۵/۸۶۱
Q	۱۶۱۴۳/۵۵۳	۱۶۱۴۵/۰۰۰
C_d	-/۳۸۳	-/۴۰۵
L_s	۳۴/۷۷۰	۲۳/۴۷۱
L_c	۷۳/۱۸۱	۴۸/۹۵۹
L	۱۰۲۴/۵۲۹	۶۸۵/۴۲۸
W/P	۲/۰۰۱	۲/۰۰۰
L_c/W	۴/۰۰۱	۳/۰۳۵
H_t/P	-/۶۳۴	-/۹۰۴
A/W	-/۰۹۹	-/۰۶۲
A/T_w	۱/۷۰۹	۱/۰۰۰
P/T_w	۸/۵۸۲	۸/۰۰۰
V_w	۹۹۷۲/۹۱۶	۵۵۷۴/۹۰۰
V_e	۱۳۱۵/۸۷۹	۹۵۵/۰۶۵
V_s	۳۵۰/۵۹۶	۲۵۰۴/۹۳۶
V_T	۱۴۷۸۹/۳۹۱	۹۰۳۴/۹۰۱
اختلاف (%)	-	۳۸/۹۱

در شکل ۴، مقایسه‌ای بین یک سیکل از سرریز کنگره‌ای واقعی (Ute) و سرریز پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته (CS) صورت گرفته است. در این شکل، اختلاف زاویه دیواره سرریز،

انتهایی و حجم دال کف تشکیل شده است. بدین منظور، با انجام تحلیل حساسیت، مقدار پارامترهای موثر الگوریتم جستجوی فاخته مشخص گردید. مقدار پارامتر P_a برابر با ۰/۱۵ و تعداد لانه‌های پرند میزبان، ۲۰ لانه تعیین گردید. همچنین این الگوریتم پس از ۱۰۰۰ مرتبه تکرار به همگرایی رسید. مقدار ضریب تغییرات برای ۱۵ مرتبه اجرای تصادفی الگوریتم جستجوی فاخته برابر با مقدار ۰/۰۰۰۰۱ شده است.

مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱. الگوریتم فراکاوشی جستجوی فاخته دارای همگرایی و سرعت مطلوبی در حل مسایل بهینه‌سازی می‌باشد.
۲. حجم کلی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای حدود ۳۹٪، حجم دیواره‌های زیگزاگی ۴۴٪، حجم دیواره‌های انتهایی، ۲۴٪ کاهش و حجم دال کف سرریز نیز حدود ۳۹٪ نسبت به سرریز مورد مطالعه واقعی کاهش نموده است که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای الگوریتم جستجوی فاخته می‌باشد.
۳. از آنجایی که بهینه‌سازی با توجه به در نظر گرفتن قیود مختلف هیدرولیکی و سازه‌ای صورت گرفته و با عنایت به این که ایمنی و پایداری سرریزها به ظرفیت عبوری دبی بستگی دارد، این موارد کاملاً رعایت شده است و علاوه بر آن، ظرفیت آبگذری سرریز از مقدار ۱۶۱۴۳/۵۵۳ در سرریز واقعی به مقدار ۱۶۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه افزایش پیدا نموده است.
۴. از نظر اقتصادی، طرح پیشنهادی جایگزین مناسبی برای سرریز واقعی بوده و می‌تواند علاوه بر این که مستقیماً هزینه بتن‌ریزی را به مقدار زیادی کاهش دهد (بیش از یک سوم)، بر هزینه‌های ناشی از قالب‌بندی و آرماتوربندی اثرگذار خواهد بود.
۵. با بهینه‌سازی و کاهش مصرف مصالح در اجرای سازه‌ها از جمله سرریزها، مخارج دیگری که صرف استخراج، تولید، حمل، نگهداری و حتی تخریب و بازیافت مصالح می‌شود نیز کاهش پیدا می‌کنند. این موارد در کاهش آثار زیست‌محیطی نیز تأثیرگذار خواهند بود که پیشنهاد می‌شود این موارد دقیقاً مورد بررسی قرار گیرند.

منابع

- اژدری مقدم، م.، امانیان، ن.ا و جعفری ندوشن، ا. ۱۳۸۸. بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای مثلثی با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Hyrum در ایالت یوتای آمریکا). مدل‌سازی در مهندسی. ۱۹:۷-۵۷-۶۸.
- اژدری مقدم، م و جعفری ندوشن، ا. ۱۳۹۲. بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم

ترتیب منجر به کاهش ۱۹/۳ و ۱۶/۶ درصدی گردیده است (Hosseini et al., 2016). همچنین، کاردان و همکاران، حجم بتن بدنه این سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک به میزان ۲۶/۴۸ درصد، یعنی از ۹۹۷۲/۳۵۳ به ۷۳۳۱/۸۴۵، کاهش دادند. تعداد سیکل‌های مختلفی برای یافتن بهترین تعداد سیکل مورد بررسی قرار گرفت. تعداد سیکل مدل‌ها از تعداد ۹ تا ۱۴ بود که بهینه‌ترین مقدار (حدوداً ۲۷ درصدی) مربوط به مدل دارای ۱۴ سیکل بوده است (Kardan et al., 2017) که در پژوهش حاضر نیز از این تعداد سیکل که برابر با سرریز مورد مطالعه نیز می‌باشد، استفاده شده است. در مطالعه صورت گرفته توسط کاردان و همکاران، مقدار دبی عبوری از روی سرریز پیشنهادی (دارای ۱۴ سیکل) از مقدار ۱۶۱۸۱/۸۸۰ به ۱۵۵۶۹/۹۶۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش نموده است. این مقدار کاهش در همه مدل‌های پیشنهادی وجود دارد که بیش‌ترین اختلاف آن مربوط به مدل دارای ۹ سیکل است که مقدار ظرفیت عبوری سرریز از ۱۶۱۸۱/۸۸۰ از سرریز مورد مطالعه به ۱۵۵۵۹/۲۶۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش نموده است (Kardan et al., 2017). در صورتی که در تحقیق حاضر، نه تنها از این مقدار کاسته نشده است، بلکه وضعیت آن بهبود نیز یافته و از مقدار ۱۶۱۴۳/۵۵۳ به مقدار ۱۶۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه افزایش پیدا کرده است.

جدول ۶- مقایسه الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و جستجوی فاخته

پژوهش	نوع سرریز	تعداد سیکل	الگوریتم	حجم اولیه	حجم مدل بهینه
اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۱۳۹۲)	کنگره‌ای دوزنقه‌ای	۸/۵	ژنتیک	-	-
حسینی و همکاران (۲۰۱۶)	کنگره‌ای مثلثی	۱۲	ژنتیک	۳۴۳۱۰	۲۸۶۱۵
حسینی و همکاران (۲۰۱۶)	کنگره‌ای مثلثی	۱۲	تکامل تفاضلی	۳۴۳۱۰	۲۷۶۹۱
کاردان و همکاران (۲۰۱۷)	کنگره‌ای دوزنقه‌ای	۱۴	ژنتیک	۹۹۷۲/۳۵۳	۷۳۳۱/۸۴۵
پژوهش حاضر	کنگره‌ای دوزنقه‌ای	۱۴	جستجوی فاخته	۱۴۷۸۹/۳۹۱	۹۰۳۴/۹۰۱

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، برای نخستین بار از الگوریتم فراکاوشی جستجوی فاخته به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های توانمند، برای بهینه‌سازی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای بهره گرفته شد. حجم بتن سرریز سد Ute به عنوان تابع هدف مسئله انتخاب گردید. این حجم از سه قسمت مختلف سرریز شامل حجم دیواره‌ها، حجم دیواره‌های

- Crookston, B.M. and Tullis, B.P. 2012. Labyrinth weirs: Nappe interference and local submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138.8: 757-765.
- 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.
- Falvey, H.T. 2003. Hydraulic design of labyrinth weirs. ASCE Press. Reston, Virginia, USA. 84-86.
- Gandomi, A.H., Yang, X.S. and Alavi, A.H. 2011. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems. *Engineering with computers*. 29.1: 17-35.
- Gentilini, B. 1941. Stramazzi con cresta a panta obliqua e a zig-zag (Weirs with oblique and zig-zag crests). *L' Energia Elettrica* 18.10: 653-664 (in Italian).
- Haddad, O.B., Sharifi, F. and Naderi, M. 2005. Optimum design of stepped spillways using genetic algorithm. In *Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conference on Evolutionary Computing*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- Haddad, O.B., Mirmomeni, M. and Mariño, M.A. 2010. Optimal design of stepped spillways using the HBMO algorithm. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 27.1: 81-94.
- Hager, W.H., Pfister, M. and Tullis, B.P. 2015. Labyrinth weirs: Developments until 1985. In *E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress*. IAHR.
- Hepler, T. 1992. *Innovative Spillway Designs*.
- Hosseini, K., Nodoushan, E.J., Barati, R. and Shahheydari, H. 2016. Optimal design of labyrinth spillways using meta-heuristic algorithms. *KSCSE Journal of Civil Engineering*. 20.1: 468-477.
- Houston, K.L. 1982. Hydraulic model study of Ute Dam labyrinth spillway. Report GR-82-7 August 1982. 47 p, 30 Fig, 2 Tab, 4 Ref, 1 Append.
- Kanagaraj, G., Ponnambalam, S.G. and Jawahar, N. 2013. A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability-redundancy allocation problems. *Computers and Industrial Engineering*. 66.4: 1115-1124.
- Kardan, N., Hassanzadeh, Y. and Bonab, B.S. 2017. Shape optimization of trapezoidal labyrinth weirs using genetic algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 42.3: 1219-1229.
- Khatsuria, R.M. 2004. *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. CRC Press.
- Khode, B.V. and Tembhurkar, A.R. 2010. Evaluation and analysis of crest coefficient for labyrinth weir. *World Applied Sciences Journal*. 11.7: 835-839.
- Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D. and ژنتیک (مطالعه موردی سد Ute در ایالات متحده آمریکا). مهندسی عمران فردوسی. ۲۰۲۴: ۱۳۸-۱۲۹.
- رضایی، م.، عمادی، ع. و آفاجانی مازندرانی، ق. ۱۳۹۴. مطالعه آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مستطیلی. آب و خاک. ۶: ۲۹: ۱۴۳۸-۱۴۴۶.
- شریف‌زاده، ح. و امجدی، ن. ۱۳۹۳. مروری بر الگوریتم‌های فراکاوشی در بهینه‌سازی، مدل‌سازی در مهندسی. ۳۸.۱۲: ۳۷-۴۳.
- ضمیری، ا.، فرزین، س. و کرمی، ح. ۱۳۹۶. مطالعه عددی عوامل موثر بر عملکرد هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای. آبیاری و زهکشی ایران. ۵: ۱۱: ۸۶۵-۸۷۵.
- شفاعت طلب دهقانی، ح.، اسمعیلی ورکی، م. و اشرف‌زاده، ا. ۱۳۹۵. مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه و تراز کف کانال بالادست بر ضریب دبی جریان در سرریز پلان کنگره‌ای - دوزنقه‌ای. هیدرولیک. ۲: ۱۱: ۶۱-۷۶.
- کشته‌گرب و اعتدالی، ص. ۱۳۹۵. مدل‌های ریاضی جدید مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون برای تنظیم پارامترهای TMD، مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها. ۴: ۶: ۵۹-۷۹.
- حیدرپور، م.، موسوی، س.ف. و روشنی زرمهری، ع. ۱۳۸۵. بررسی سرریزهای چندوجهی با پلان مستطیلی و U شکل. علوم آب و خاک. ۳: ۱۰: ۱-۱۲.
- یوسفیان، ح. ۱۳۷۵. طراحی هیدرولیکی سرریزهای متقاری بر اساس مدل‌های فیزیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Abrishamchi, A., Afshar, A. and Kerachian, R. 2003. Spillway capacity optimization under hydrologic uncertainties and flood routing. *Iranian Journal of Science and Technology*. 27.B1: 111-121.
- Afshar, A. and Mariño, M.A. 1990. Optimizing spillway capacity with uncertainty in flood estimator. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 116.1: 71-84.
- Ahmed, J. and Salam, Z. 2014. A maximum power point tracking (MPPT) for PV system using cuckoo search with partial shading capability. *Applied Energy* 119: 118-130.
- Chen, S.H. 2015. *Hydraulic structures*. Springer.
- Civicioglu, P. and Besdok, E. 2013. A conceptual comparison of the Cuckoo-search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms. *Artificial Intelligence Review*. 39.4: 315-346.
- Crookston, B.M. 2010. *Labyrinth weirs*. Ph.D. dissertation, Utah State University., Logan, Utah.

- labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121.3: 247-255.
- Waldron, D.R. 1994. Design of labyrinth weirs. MSc. Thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Willmore, C.M. 2004. Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. MSc. Thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Yang, X.S and Deb, S. 2009. Cuckoo search via Lévy flights. *IEEE World Congress on InNature and Biologically Inspired Computing*. 210-214.
- Yang, X.S and Deb, S. 2010. Engineering optimisation by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation* 1.4: 330-343.
- Yang, X.S and Deb, S. 2013. Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Comput Oper Res* 40.6: 1616-1624.
- Ingle, R.N. 2011. Determination of crest coefficient for flow over trapezoidal labyrinth weir. *World Applied Sciences Journal*. 12.3: 324-329.
- Ming, B., Chang, J.X., Huang, Q., Wang, Y.M and Huang, S.Z. 2015. Optimal operation of multi-reservoir system based-on cuckoo search algorithm. *Water Resources Management*. 29.15: 5671-5687.
- Mirnasari, M and Emadi, A. 2014. Hydraulic performance of combined flow labyrinth weir-gate. *Advance in Agriculture and Biology*. 2.2: 54-60.
- Murphy, D.W. 1909. A reinforced-concrete spillway with concentrated crest length. *Engineering News*. 62.11: 278-279.
- Resendiz-Carrillo, D and Lave, L.B. 1987. Optimizing spillway capacity with an estimated distribution of floods. *Water Resources Research*. 23.11: 2043-2049.
- Taylor, G. 1968. The performance of labyrinth weirs, Ph.D. dissertation, University of Nottingham.
- Tullis, J.P., Amanian, N and Waldron, D. 1995. Design of

Optimal Design and Hydraulic Performance Improvement of Labyrinth Spillway using Cuckoo Search Algorithm

A. Ferdowsi¹, S.F. Mousavi², S. Farzin^{3*}, H. Karami⁴, M. Ehteram⁵, M. Valikhan Anaraki⁶

Received: Mar.22, 2018

Accepted: July.04, 2018

Abstract

One of the appropriate procedures to increase discharge capacity of spillway in dams, particularly when increase of overflow width is not possible, is using labyrinth spillways. Due to the fact that a considerable portion of costs of dams is allocated for construction of spillways, the search for methods to optimize these structures becomes important. In the present research, the Cuckoo Search (CS) algorithm has been used to find the best geometry of the trapezoidal labyrinth spillway. For this purpose, concrete volume of the spillway was considered as objective function. Also, the spillway design considered different hydraulic constraints. Optimal parameters of this algorithm were selected by performing sensitivity analysis. Then, CS was run randomly for 15 iterations. The coefficient of variation and convergence speed obtained from random runs for the proposed algorithm were equal to 0.00001 and 1000 iterations, respectively. Finally, minimum value of the objective function of the proposed algorithm was compared to the results obtained from spillway design and the results of Genetic Algorithm (GA) and Differential Evolution (DE) proposed in the previous studies. It was found that the proposed spillway dimensions using CS resulted to 38.91% less concrete with respect to the real prototype. In the proposed model, other than reduction of the spillway concrete volume, the overflow discharge of the spillway was increased. On the other side, concrete volume reduction obtained by CS was 12% less than classic optimization algorithms (GA and DE). Considerable decrease (more than 1/3) in the volume of concrete in the proposed spillway indicates high ability of CS in solving the problems of optimizing spillways and the necessity of using it.

Keywords: Concrete volume, Cuckoo search algorithm, Optimization, Hydraulic performance, Trapezoidal labyrinth spillways

1- M.Sc. Student of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3,4- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

5- Ph.D. Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

6- M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

(*-Corresponding Author Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)