

## استفاده از رویکرد شبیه ساز-بهینه ساز سه هدفه برای طراحی بهینه سرریز ترکیبی پلکانی-کنگره ای با استفاده از الگوریتم بهینه سازی سنجاکک بهبود یافته

اسلام ذوالفقاری<sup>۱</sup>، مهدی ملازاده<sup>۲\*</sup> و جعفر جعفری اصل<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
  - ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
  - ۳- دکترای مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
- تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

### چکیده

سرریزها برای عبور دادن آب مازاد مخازن سدها در کنار آنها احداث می شوند. خرابی سدها در بسیاری از مواقع در اثر عبور آب از روی تاج، به سبب ناکافی بودن ظرفیت سرریز، اتفاق می افتد. سرریزهای کنگره ای با هندسه خاص خود توانایی افزایش دبی عبوری را نسبت به سایر سرریزها دارند. موضوع استهلاک انرژی جریان نیز امری مهم تلقی می شود. استفاده از سرریز پلکانی سبب کاهش سرعت و انرژی آب در پنجه سرریز می شود و از این رو آبشستگی و خرابی در پایین دست کاهش می یابد. در مطالعه حاضر برای اولین بار به کمک الگوریتم سنجاکک بهبود یافته چارچوبی جدید برای طراحی چندهدفه سرریز ترکیبی پلکانی و کنگره ای دوزنقه ای ارائه شده است. بدین منظور از عملکرد قدم زدن های تصادفی، به جای پرواز لوی در الگوریتم سنجاکک استفاده شده است. ابتدا عملکرد الگوریتم بهبود داده شده روی چهار مثال محک از سری ZDT بررسی شد. از مقایسه با پاسخ های الگوریتم سنجاکک، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات مشخص شد که رویکرد استفاده شده موثر بوده و سرعت همگرایی و دقت در یافتن پاسخ بهینه بهبود یافته است. پس از آن یک کد شبیه سازی هیدرولیک جریان به صورت سرریز تکی و ترکیبی توسعه داده شد. نتایج صحت سنجی حاکی از خطای کمتر از ۳٪+ درصد بود. با اتصال مدل شبیه سازی توسعه داده شده و الگوریتم بهبود داده شده، مجموعه ای از طرح روی جبهه پارتو سه بعدی ارائه شد. به کارگیری رویکرد پیشنهادی برای سرریز سد ساروق توانسته است حدوداً دبی عبوری و استهلاک انرژی را به ترتیب ۲۵ درصد و ۸۱ درصد افزایش و حجم بتن را ۹ درصد کاهش دهد.

**واژه های کلیدی:** الگوریتم سنجاکک بهبود یافته، بهینه سازی چندهدفه، سد ساروق، سرریز پلکانی، سرریز کنگره ای

### مقدمه

مرتبط با ضوابط آیین نامه ای نیز باید رعایت شود. تاکنون مطالعات زیادی در مورد بهینه سازی ابعاد سرریزها در جهت کاهش حجم مصالح مصرفی صورت گرفته است. در بین روش های بهینه سازی استفاده شده، روش های مبتنی بر الگوریتم های فراکاوشی نتایج بسیار خیره کننده ای داشته است (Ghobadi, 2014). از آن جایی که تعداد زیادی روش مبتنی بر الگوریتم های فراکاوشی تاکنون توسعه داده شده اند، معرفی موثرترین آنها اهمیت زیادی خواهد داشت.

هزینه اجرای سرریزها، بخش بزرگی از بودجه احداث سدها را شامل می شود. از این رو بهینه سازی این سازه های هیدرولیکی می تواند به طور چشمگیری در کاهش هزینه های ساخت و ساز آنها تأثیر داشته باشد. مهم ترین ویژگی سرریزها، تونلایی آنها در عبور دادن ایمن جریان مازاد بر سدها به ویژه در زمان سیلاب است. در واقع، توجه به عملکرد هیدرولیکی سرریزها امری بسیار ضروری در زمان طراحی و ساخت آنهاست. لازم است یادآوری شود که علاوه بر عملکرد هیدرولیکی سرریزها، سایر قیود

پس از چندین بار اجرای مدل و سعی و خطا، پاسخ بهینه توابع هدف حاصل شد. مقدار به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با مقدار واقعی و نتایج الگوریتم های جستجوی فاخته، ژنتیک و تکامل تفاضلی در مطالعات پیشین مقایسه گردید که استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری در طراحی ابعاد سرریز کنگره ای سد مورد نظر، کاهش ۴۰/۹۲۸ درصد در حجم بتن ریزی و افزایش ۱۰/۷۱ درصد در دبی عبوری نسبت به مقدار واقعی را در پی داشت که در مقایسه با الگوریتم های فوق الذکر عملکرد بهتری از خود نشان داد.

قهرمانی و بیات (Ghahramani & Bayat, 2016) در مطالعه ای روی سرریز پلکانی سد سیاهبیشه با هدف ارزیابی و مقایسه روش های اوتسو و چانسون در محاسبه میزان استهلاک انرژی در سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به بررسی و مقایسه تمام روابط اوتسو و چانسون به صورت مجزا در قالب الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزاری MATLAB پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که در شرایط یکسان برای هر دو روش، روابط چانسون با میزان استهلاک انرژی ۹۵ درصد نسبت به روابط اوتسو با مقدار استهلاک انرژی محاسبه شده ۸۵/۶۳ درصد دقت مناسب تری دارد. نیکپور و همکاران (Nikpour et al., 2017) با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) ابعاد هندسی سرریز پلکانی را بهینه کردند. این بهینه سازی روی سرریز پلکانی سد ساروق واقع در استان آذربایجان غربی با دبی های ۴۲۲ و ۵۶۰/۲ و ۷۷۶/۹ متر مکعب بر ثانیه اجرا گردید. مقادیر بدست آمده از الگوریتم اجتماع ذرات با مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. نتایج حاکی از آن بود که در بهینه سازی هندسی سرریز پلکانی، الگوریتم ژنتیک با میزان ۶۸/۹۶ درصد افزایش استهلاک انرژی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم اجتماع ذرات با مقدار استهلاک انرژی ۶۳/۳۲ درصد از خود نشان داده است.

فردوسی و همکاران (Ferdowsi et al., 2017) به بهینه سازی ابعاد سرریز کنگره ای دوزنقه ای با هدف کمینه سازی حجم بتن مصرفی با استفاده از الگوریتم

چانسون (Chanson, 2001) برای تعیین روابطی به منظور تشخیص نوع جریان و نیز مقدار استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی مطالعات آزمایشگاهی خود را ارائه داد. وی با مقایسه میزان انرژی اتلاف شده در این سرریز با یک شوت صاف، گزارش داد که استهلاک انرژی در سرریز پلکانی نسبت به سرریز صاف بیشتر است. سلج محمودی و بیات (Selj Mahmoudi & Bayat, 2013) به بررسی تأثیر تیغه های شکافنده آب بر هوادهی به سرریزهای کنگره ای پرداختند و در نتایج آزمایشگاهی مرتبط با سرریز کنگره ای با تاج دوزنقه ای مشاهده کردند که تحت تأثیر فشردگی بیشتر در خطوط جریان در قبال افزایش ضخامت تیغه ها، مقدار ضریب آبگذری کاهش خواهد یافت. از این رو هر چه زاویه رأس تیغه شکافنده کمتر باشد، فشردگی کمتری ایجاد می شود و ضریب آبگذری افزایش خواهد یافت. تأثیر تغییرات زاویه ها بر ضریب آبگذری، نسبت به سرریز کنگره ای با تاج مثلثی شکل کمتر است. علاوه بر این، معلوم شد که در حالت فشردگی اثر مثبتی به دلیل کاربرد تیغه های شکافنده دیده نمی شود و افزایش ضریب آبگذری به ازای کاربرد تیغه های شکافنده به طور میانگین بین ۶ تا ۷ درصد است. در حالتی که تاج سرریز کنگره ای به شکل مثلثی است، در مقایسه با سرریز دوزنقه ای، اثرهای زاویه به مراتب بیشتر است و در قبال افزایش بلندای جریان این تأثیر همچنان باقی خواهد ماند. در اینجا نیز ضریب آبگذری به دلیل افزایش ضخامت تیغه و نیز افزایش زاویه رأس آن کاهش می یابد. گودرزی و همکاران (Goudarzi et al., 2013) با بررسی ضریب آبگذری در سرریزهای کنگره ای انحنادار با شیب بالادست و پایین دست نشان دادند که ایجاد شیب در دیواره بالادست سرریز کنگره ای باعث بهبود جهت گیری جریان می شود که آن هم افزایش ضریب آبگذری را به دنبال خواهد داشت.

حسینی (Hosseini, 2018) با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری GWO به طراحی بهینه سرریز کنگره ای دوزنقه ای با توجه به شرایط هیدرولیکی مورد نظر پرداخت و با انتخاب حجم بتن مصرفی سرریز به عنوان تابع هدف،

امر تداخل خطوط جریان و افزایش مقاومت در برابر جریان و همچنین افزایش ناحیه فرآیند گردش مجدد و ایجاد جریان چرخشی بیشتر در این نوع از سرریز های پلکانی جدید است. می‌توان از این سرریزها به عنوان نسلی جدید از سرریزهای پلکانی به منظور افزایش راندمان و عملکرد هیدرولیکی آنها نام و بهره برد.

سهرابی و همکاران (Sohrabi *et al.*, 2020) با استفاده از یک مدل شبیه ساز-بهینه ساز دو هدفه مبتنی بر الگوریتم NSGA-II به منظور رسیدن به کمترین انرژی باقی مانده در پنجه سرریز و حصول کمترین حجم سرریز گزارش دادند که با افزایش ارتفاع نسبی پله‌های سرریز، مقدار انرژی باقی مانده در پنجه سرریز ابتدا افزایش و بعد از رسیدن به نقطه اوج کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت برسد. از منظر حجم و هزینه سرریز نیز با افزایش ارتفاع نسبی پله های سرریز، حجم آن به صورت تابع خطی افزایش و با افزایش زاویه سرریز حجم آن کاهش می‌یابد. نتایج بهینه سازی چند هدفه نشان داد که در طراحی فعلی سرریز سد سیاه‌بیشه بالا، هم معیار انرژی باقی مانده و هم معیار هزینه و حجم سرریز به خوبی لحاظ گردیده‌اند، به طوری که ۸۳/۷ درصد انرژی جریان عبوری از روی سرریز مستهلک می‌شود. خلیفه و همکاران (Khalifa *et al.*, 2021) در پژوهشی با استفاده از الگوریتم نوین فراکاوشی سنجاقک برآورد مناسبی از مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی ارائه کردند و نتایج حاصل از الگوریتم سنجاقکرا (DA) برای ارزیابی و میزان کاربردی بودن آن با الگوریتم های ژنتیک (GA) و الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) مقایسه کردند به طوری که برای الگوریتم DA مقادیر SSQ و RMSE به ترتیب برای رودخانه کارده به عنوان مطالعه موردی برابر با ۴/۵۱ و ۰/۷۱ به دست آمد که حاکی از عملکرد مناسب این الگوریتم در محاسبه بهینه پارامترهای ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سیلاب بود. نتایج بررسی ها نشان داد که الگوریتم DA قادر است برای هر مسئله بهینه‌سازی پیوسته در مهندسی مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی پیشینه مطالعات در زمینه سرریزهای پلکانی و کنگره‌ای نشان می‌دهد که هدف تمامی مطالعات در

جستجوی فاخته پرداختند. پارامترهای مؤثر هندسی سرریز به عنوان متغیر تصمیم لحاظ شد. نتایج به دست آمده از الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۲</sup> (CS) با الگوریتم‌های ژنتیک، تکامل تفاضلی و نمونه واقعی مقایسه شد. نتیجه بهینه سازی با الگوریتم جستجوی فاخته کاهش ۳۸/۹ درصد در حجم بتن مصرفی نسبت به مقدار واقعی در طراحی سرریز کنگره‌ای را به دنبال داشت که نشان دهنده قدرت بالای این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم دیگر در بهینه‌سازی است. کاردان و همکاران (Kardan *et al.*, 2017) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی ابعاد سرریز کنگره‌ای سد Ute آمریکا با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند و توانستند با مدل پیشنهادی خود مقدار بتن مصرفی سرریز را نسبت به وضع موجود ۲۱/۴۷ درصد کاهش دهند. رضاپور طبری و هاشم‌پور (Rezapour Tabari & Hashempour, 2018) با ترکیب الگوریتم‌های فراکاوشی اجتماع ذرات و گرگ خاکستری به طراحی ابعاد سرریز کنگره‌ای سد Ute پرداختند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش ۶۴ درصد در هزینه‌های ساخت سرریز نسبت به مدل موجود بود. مشخص گردید که شکل مطلوب این سرریزها مثلی است، زیرا عملکرد هیدرولیکی بهتری نسبت به فرم دوزنقه‌ای از خود نشان می‌دهد.

قادری و عباسی (Ghaderi and Abbasi 2019) هیدرولیک جریان عبوری از سرریز پلکانی تحت تاثیر تغییر و اصلاح شکل هندسی پله‌ها به شکل کنگره‌هایی دوزنقه‌ای، مثلی و مستطیلی را به کمک مدل Flow-3D بررسی کردند. نتایج نشان داد که ایجاد تداخل تیغه‌های جریان در اثر عبور آب از روی شکل کنگره‌ای پله ها نکته قوت این نوع از سرریزهای پلکانی-کنگره ای است. شکل کنگره‌ای دوزنقه‌ای عملکرد بهتری برای دستیابی به بیشترین میزان استهلاك انرژی از خود نشان داد. در شرایط جریان یکسان، سرریز پلکانی-کنگره ای مستطیلی، مثلی و دوزنقه‌ای به ترتیب به میزان ۶۲/۴، ۲۱/۱۲ و ۷۶/۲۳ درصد در کاهش سرعت جریان و ۶/۵، ۱/۱۳ و ۱۷ درصد در استهلاك انرژی بیشتر نسبت به سرریز پلکانی متعارف مؤثر بودند. علت این

<sup>2</sup> Cuckoo Search

پژوهش حاضر از نرم افزار متلب به منظور پیاده سازی طرح پیشنهادی استفاده شده است.

### منطقه مورد مطالعه

در مطالعه حاضر، باز طراحی سرریز سد خاکی سنگریزه‌ای ساروق مطالعه شده است. این سد در استان آذربایجان غربی، شهرستان تکاب و روی رودخانه قره‌قیه قرار گرفته و برای تأمین آب شرب و مصرف صنعتی شهرستان تکاب و آبیاری حدود ۵۵۰۰ هکتار زمین کشاورزی پایین دست احداث شده است. هدف مطالعه حاضر بازطراحی سرریز صاف سد ساروق به صورت ترکیبی از سرریزهای کنگره‌ای و پلکانی است. برای این منظور، توابع هدف به صورت افزایش مقدار استهلاک انرژی، افزایش ظرفیت عبوری و کاهش هزینه‌های ساخت و ساز آن در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به یک طرح ایمن و بهینه سرریز، ضروری است تمامی شرایط هیدرولوژیکی و محدودیت‌های توپولوژیکی آن در نظر گرفته شود. مشخصات کلی سد ساروق و سیستم تخلیه سیلاب آن در جدول ۱ ارائه شده است (Shoja, 2018).

سرریزهای پلکانی ارائه طرحی قابل قبول برای استهلاک انرژی و در سرریزهای کنگره‌ای رسیدن به یک سرریز با بیشترین مقدار آبگذری بوده است. مشخص است که بررسی‌ها و آزمایش‌ها به طور کامل موفق بوده و توانسته‌اند روابط گوناگونی برای استهلاک انرژی و ضریب آبگذری ارائه کنند. اما هدف از این مطالعه، ترکیب سرریزهای پلکانی با سرریزهای کنگره‌ای و بهینه‌سازی به منظور افزایش ضریب آبگذری و استهلاک انرژی به طور همزمان است برای این منظور از رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه بهره برده شده است.

### مواد و روش‌ها

در این بخش بر اساس مبانی و تئوری مربوط به سرریزهای زیگزاکی و پلکانی، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید بهبود داده شد و برای طراحی یک سرریز ترکیبی ارائه شده است به گونه‌ای که پس از پیاده‌سازی جزئیات و فرمول‌بندی مسئله، شامل مشخص کردن توابع هدف، متغیرهای تصمیم و قیود، نحوه بهبود و ارتقاء عملکرد الگوریتم تشریح و بررسی شد. در

جدول ۱- مشخصات سد ساروق (Shoja, 2018)

Table 1- Specifications of Sarouk Dam (Shoja, 2018)

تراز تاج سد از سطح دریا (m)	عرض تاج سد (m)	عرض کل دهانه سرریز (m)	عرض خالص دهانه سرریز (m)	بار آبی طراحی سرریز (m)	طول افقی سرریز (m)	پیک سیلاب خروجی ۱۰۰۰۰ ساله (m <sup>3</sup> /s)	شیب سرریز (درجه)	نوع سرریز (Spillway type)
Elevation of dam crest from sea level (m)	Width of dam crest (m)	Total width of spillway span (m)	Net width of spillway span (m)	Design head of spillway (m)	Horizontal length of spillway (m)	Outflow peak of 10000-year flood (m <sup>3</sup> /s)	Slope of spillway (Degree)	
1844.5	10	26	21	5.60	222	560.20	6.09	لوجی مستقیم

تجربیات مهندسی و نتایج آزمایشگاهی توسط محققان تعیین می‌شود. پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده در این تحقیق عبارت‌اند از تعداد سیکل در پلان N (تعداد W ها، به عنوان مثال مساوی ۳ در شکل ۱)، ضخامت دال کف سرریز T<sub>s</sub> و ارتفاع قائم آزاد F<sub>b</sub> (فاصله قائم بین تراز آب تا تراز حداکثر دیواره سرریز). گروه دوم، متغیرهای تصمیم هستند که تاثیر مستقیم بر تابع هدف دارند و توسط

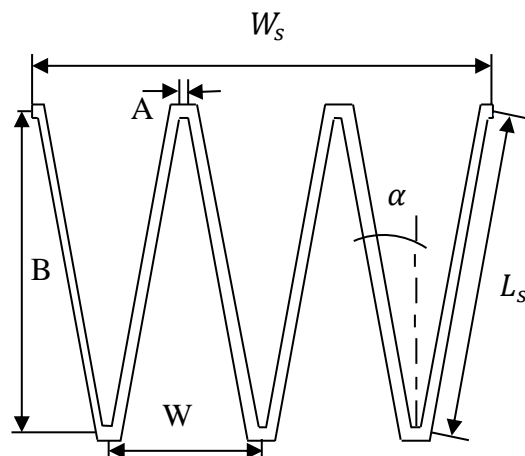
### بهینه‌سازی سرریزهای کنگره‌ای

شکل ۱ شماتیک پلان یک سرریز کنگره‌ای را نشان می‌دهد. پارامترهای موثر در طراحی بهینه سرریزهای کنگره‌ای به سه دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول پارامترهایی هستند که در فرآیند طراحی به طور ثابت در نظر گرفته می‌شوند. عموماً، مقادیر این متغیرها بر اساس

استفاده از رویکرد شبیه ساز-بهینه ساز سه هدفه برای طراحی بهینه سرریز ترکیبی پلکانی-کنگره‌ای...

هستند که محدودیت‌هایی را برای شرایط هیدرولیکی و تابع هدف ایجاد می‌کنند. مقادیر محدودیت‌های مذکور بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های صورت گرفته توسط محققان تعیین می‌شود. جدول ۳ قیدهای ضروری در بحث طراحی این نوع سرریزها را ارائه می‌دهد.

الگوریتم بهینه‌ساز تعیین می‌شوند. برخی از این پارامترها مستقل و برخی دیگر نیز وابسته به یکدیگرند. جدول ۲ متغیرهای تصمیم یا پارامترهای طراحی در بحث سرریزهای کنگره‌ای را نشان می‌دهد. گروه سوم از پارامترهای موثر در طراحی سرریزهای کنگره‌ای، قیدها



شکل ۱- شماتیک یک سرریز کنگره‌ای

Figure 1- Schematic of a labyrinth spillway (Hosseini, 2018)

جدول ۲- متغیرهای تصمیم اتخاذ شده برای طراحی سرریز کنگره‌ای

Table 2- Decision variables adopted for the design of labyrinth spillways (Hosseini, 2018)

عرض کل سرریز	عرض یک سیکل	طول کل سرریز	طول یک سیکل	طول یک دیواره	عرض داخلی رأس سرریز (مرکز)	زاویه دیواره	طول سرریز	مجموع هد بالادست	ضخامت سرریز	ارتفاع تاج سرریز
Total width of spillway	Width of one cycle	Total length of spillway	Length of one cycle	Length of one wall	Inner width of spillway crest (center)	Wall angle	Spillway length	Upstream total head	Spillway thickness	Height of spillway crest
$W_s$	$W$	$L$	$L_c$	$L_s$	$A$	$\alpha$	$B$	$H_t$	$T_w$	$P$
$N \times W$	$2 \times [L_s \times \sin \alpha + A]$	$N \times L_c$	$2 \times (L_s + A)$	$B / \cos \alpha$	$T_w$	$6^\circ - 35^\circ$	-	$h + v^2 / 2g$	$P/8$	$1.0H_t$

جدول ۳- قیدهای مسئله طراحی بهینه سرریز کنگره‌ای

Table 3- Constraints for the problem of optimal design of labyrinth spillway (Ferdowsi et al., 2017; Hosseini, 2018)

قید Constraints	توصیف Description
$Q_{optimal} \geq Q_{design}$	دبی Discharge
$3 \leq L_c/W \leq 9.5$	نسبت بزرگنمایی طول Length scale ratio
$2 \leq W/P \leq 4$	نسبت ظاهر عمودی Vertical appearance ratio
$0.05 \leq H_t/P \leq 0.90$	نسبت هد آبی Head ratio
$A/W \leq 0.0765$	نسبت راس Apex ratio
$1 \leq A/T_w \leq 2$	نسبت ضخامت دیواره Wall thickness ratio
$6 \leq P/T_w \leq 8$	نسبت ضخامت نسبی Relative thickness ratio

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H_t^{3/2} \quad (5)$$

در اینجا  $C_d$  ضریب دبی،  $H_t$  هد کل بالادست،  $L$  طول مؤثر سرریز و  $g$  شتاب ثقل است (Hosseini, 2018).

### بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی

همانند سرریزهای کنگره‌ای، فرآیند طراحی سرریزهای پلکانی نیز متأثر از پارامترهای ثابت، متغیر تصمیم، قیود و تابع هدف است. برای طراحی این نوع سرریزها، دبی عبوری از سرریز ( $Q$ ) و طول کلی سرریز ( $L$ ) به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته می‌شوند. لازم است گفته شود با توجه به هدف تحقیق حاضر، دبی عبوری از روی سرریز در فرآیند طراحی سرریز کنگره‌ای تعیین شده است و به عنوان دبی عبوری از روی سرریز پلکانی در نظر گرفته می‌شود. هدف از بهینه‌سازی ابعاد هندسی سرریز پلکانی، یافتن بهترین مقادیر برای رسیدن به بیشترین استهلاک انرژی جریان است. معمولاً پارامترهای شیب ( $\alpha$ )، عرض ( $W$ )، ارتفاع شوت سرریز ( $H_{chute}$ )، بار آبی روی سرریز ( $H_d$ ) و ارتفاع پله ( $h$ ) به عنوان متغیرهای تصمیم در طراحی این سرریزها در نظر گرفته می‌شوند. محدوده مجاز متغیرهای تصمیم، از مطالعات اولیه و نقشه‌های طراحی و ساختگاه سرریز به‌دست می‌آید (Ferdowsi et al., 2017; Ghahramani & Bayat, 2016).

تابع هدف بهینه‌سازی در طراحی سرریزهای کنگره‌ای، حداقل کردن حجم بتن مصرفی است که به کاهش هزینه ساخت منجر می‌شود. در این زمینه، تابع هدف برحسب متغیرهای تصمیم بیان می‌شود که در واقع کمینه کردن بتن مصرفی را بیان می‌کند. در یک الگوریتم بهینه‌سازی سعی می‌شود که با یافتن بهترین مقادیر ابعاد بدنه سرریز، با لحاظ کردن محدودیت‌های هیدرولیکی، کمترین مقدار حجم بتن‌ریزی ارائه شود. در تحقیق حاضر، تابع هدف استفاده شده برای طراحی بهینه سرریز کنگره‌ای به صورت زیر است (Ferdowsi et al., 2017; Hosseini, 2018):

$$V_t = V_w + V_e + V_s \quad (1)$$

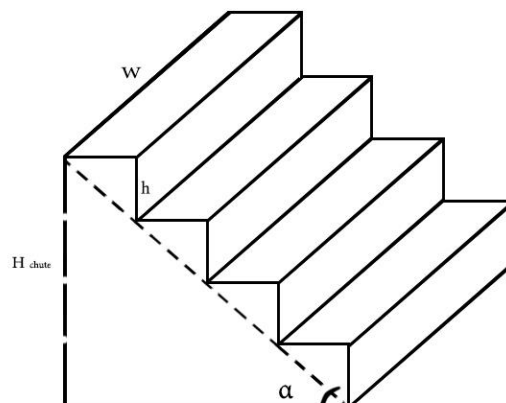
$$V_w = N \times P \times L_c \times T_w \quad (2)$$

$$V_e = 2(P + H_t + F_b)(B + H_t)T_w \quad (3)$$

$$V_s = (B + 2H_t) \times W_s \times T_s \quad (4)$$

که در آن  $V_t$  حجم بدنه،  $V_w$  حجم دیواره‌ها،  $V_e$  حجم دیواره‌های انتهایی،  $V_s$  حجم دال سرریز،  $T_s$  ضخامت دال کف و  $B$  طول سرریز موازی جریان و  $H_t$  مجموع هد بالادست است. در رابطه‌های (۳) و (۴) فرض شده است که به ترتیب دیواره‌ها از هر طرف به اندازه  $B + H_t$  و دال کف سرریز به اندازه  $2H_t$  در مخزن پیشروی دارند. مقدار دبی سرریزهای کنگره‌ای نیز از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

استفاده از رویکرد شبیه ساز-بهینه‌ساز سه هدفه برای طراحی بهینه سرریز ترکیبی پلکانی-کنگره‌ای...



شکل ۲- شماتیک سرریز پلکانی و متغیرهای تصمیم

Figure 2- Schematic of stepped spillway and decision variables. (Shoja, 2018)

آن، بار آبی و ضریب دبی نیز تغییر می‌کنند. برای داشتن ترکیب مناسب از متغیرها، باید رابطه (۹) برقرار باشد:

$$Q - C_d \times W \times (H_d)^{1.5} \leq 0 \quad (9)$$

فضای موجود برای احداث سرریز نیز می‌تواند از قیدهای مسئله باشد. بنابراین طول افقی سرریز نمی‌تواند از یک مقدار مشخص بیشتر باشد و با توجه به اینکه این پارامتر با شیب و ارتفاع سرریز رابطه مستقیم دارد، می‌توان از طریق رابطه (۱۰) این پارامترها را در طراحی سرریزهای پلکانی کنترل کرد:

$$H_{chute} - L \tan(\alpha) \leq 0 \quad (10)$$

تابع هدف که متشکل از متغیرهای تصمیم است، باید علاوه بر ارضای قیود و شرایط هیدرولیکی حاکم، حداکثر میزان استهلاک نسبی انرژی را ارائه دهد:

$$\frac{\Delta E}{E_{max}} = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5 y_c} \quad (11)$$

در اینجا،  $H_{dam}$  ارتفاع کل سرریز،  $y_c$  عمق بحرانی،  $E_{res}$  انرژی باقی‌مانده است. حجم بتن‌ریزی در ساخت سرریزهای پلکانی به صورت رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$V_t = B \times h \sum_{i=1}^N (L - l_i) \quad (12)$$

که  $L$  طول سرریز،  $h$  ارتفاع سرریز،  $l_i$  طول کف هر پله و  $N$  تعداد پله‌هاست.

هدف از طراحی سرریزهای پلکانی تعیین ترکیب هندسی از پارامترهایی مانند شیب، ارتفاع سرریز، ارتفاع پله و عرض سرریز است به گونه‌ای که میزان استهلاک انرژی در پنجه سرریز حداکثر شود. قیودی نیز برای بخش سرریز پلکانی در تحقیق حاضر در نظر گرفته شده‌اند که معرفی می‌شوند. طراحی سرریزهای پلکانی با این فرض است که رژیم جریان روی آن از نوع غیرریزشی است. از این رو برای برقراری این شرط باید رابطه (۶) حاکم باشد:

$$0.25 \leq \left(\frac{h}{y_c}\right) \leq \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad (6)$$

که عبارت  $\left(\frac{h}{y_c}\right)_s$  از رابطه (۷) برای شیب سرریز در حدود  $5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$  تعیین می‌شود:

$$\left(\frac{h}{y_c}\right)_s = \frac{7}{6} (\tan \theta)^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

طبق اطلاعات به دست آمده از مطالعات قبلی، در سرریزهای پلکانی دبی در واحد عرض باید مطابق رابطه (۸) از ۳۰ متر مربع بر ثانیه کمتر باشد (Shoja, 2018):

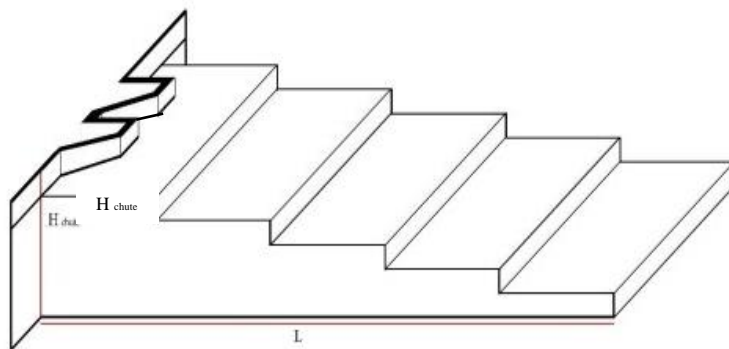
$$\frac{Q}{W} \leq 30 \quad (8)$$

شکل کلی معادله دبی عبوری از روی سرریزها به صورت  $Q = C_d W H_d^{3/2}$  است که  $C_d$  معرف ضریب تخلیه دبی و  $H_d$  بار آبی روی سرریز است. با توجه به اینکه عرض سرریز از قیدهای مسئله است، با ایجاد تغییر روی

### ترکیب سرریز کنگره‌ای و پلکانی

یکی از راه‌های حفظ و ایمنی سد در مواقع سیلابی، استفاده از سرریز با ظرفیت آبگذری بالاست. از آنجا که در سرریزهای کنگره‌ای با افزایش طول سرریز در یک عرض

مشخص، ضریب آبگذری افزایش می‌یابد، این سرریزها می‌توانند باعث بهبود عملکرد دیگر سرریزها شوند (Hosseini, 2018). شکل ۳، شماتیک یک سرریز ترکیبی پلکانی و کنگره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شماتیک سرریز ترکیبی کنگره‌ای- پلکانی

Figure 3- Schematic of combined labyrinth-stepped spillway (Hosseini, 2018)

در این حالت، متغیرهای تصمیم، قیدها و توابع هدف دو سرریز با هم ترکیب و به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه بررسی می‌شود. توابع هدف مسئله طراحی سرریز ترکیبی به صورت رابطه (۱۳) است:

Objective functions:

$$\min(f_1) = V_t + V_b \quad (13)$$

$$\max(f_2) = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5 y_c}$$

$$Q_{optimal} \max(f_3) =$$

قیدهای مسئله بهینه سازی نیز به صورت زیر است:

$$h - y_c \times \left(\frac{h}{y_c}\right) \leq 0 \quad (14)$$

$$3 \leq L_c/W \leq 9.5 \quad (15)$$

$$2 \leq W/P \leq 4 \quad (16)$$

$$0.05 \leq H_t/P \leq 0.90 \quad (17)$$

$$A/W \leq 0.0765 \quad (18)$$

$$1 \leq A/T_w \leq 2 \quad (19)$$

$$6 \leq P/T_w \leq 8 \quad (20)$$

$$Q - 30 \times W \leq 0 \quad (21)$$

$$0.25 \times y_c - h \leq 0 \quad (22)$$

$$H_{chute} - L \tan(\alpha) \leq 0 \quad (23)$$

متغیرهای تصمیم نیز شامل مجموع متغیرهای طراحی دو سرریز است که عبارت‌اند از ارتفاع سرریز کنگره‌ای ( $P$ )، ضخامت سرریز کنگره‌ای ( $T_w$ )، هد بالادست ( $H_t$ )، طول سرریز کنگره‌ای ( $B$ )، زاویه دیواره سرریز کنگره‌ای ( $\alpha$ )، عرض داخلی رأس سرریز کنگره‌ای ( $A$ )، شیب سرریز پلکانی ( $\theta$ )، عرض سرریز پلکانی ( $W$ )، ارتفاع پله ( $h$ ) و ارتفاع شوت ( $H_{chute}$ ).

### الگوریتم بهینه‌سازی سنجاچک بهبود یافته

از الگوریتم سنجاچک<sup>۱</sup> (DA) تاکنون به عنوان ابزار بهینه‌سازی مناسبی استفاده شده است. با این حال مکانیزم ساده آن، احتمال گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی در مسائل پیچیده را افزایش می‌دهد. به همین دلیل ارتباطی مناسب میان فازهای جستجو و بهره‌برداری در این الگوریتم ضروری خواهد بود (Xia et al., 2019). در این مطالعه، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم سنجاچک در مرحله جستجو و بهره‌برداری از یک ضریب دینامیکی، که در هر تکرار الگوریتم طبق رابطه (۲۴) محاسبه شده و در رابطه (۲۵) در موقعیت سنجاچک‌ها در هر تکرار ضرب

<sup>1</sup> Dragonfly Algorithm



$$\mu_i^j = \begin{cases} 1 & \text{if } f_i^j < f_{\min}^j \\ \frac{f_{\max}^j - f_i^j}{f_{\max}^j - f_{\min}^j} & \text{if } f_{\min}^j \leq f_i^j \leq f_{\max}^j \\ 0 & \text{if } f_i^j > f_{\max}^j \end{cases} \quad (31)$$

$$\mu_i(\text{Normalized}) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{obj}}} \mu_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_{\text{obj}}} \mu_{ij}} \quad (32)$$

M تعداد راه‌حل‌های موجود روی پرتو،  $N_{\text{obj}}$  تعداد توابع هدف،  $f_{\min}^j$  و  $f_{\max}^j$  مقادیر حداقل و حداکثر تابع هدف  $f_i^j$  است. در این روش بهترین راه‌حل، بیشترین  $\mu_i$  را داراست.

### ارزیابی عملکرد الگوریتم روی توابع محک

اولین و مهم‌ترین کار برای استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی، تنظیم بهینه پارامترهای ثابت آنهاست. از این رو در مرحله اول پس از آزمایش‌های گوناگون روی توابع محک با استفاده از هر الگوریتم، بهترین مقادیر پارامترهای ثابت آنها به دست آمد (جدول ۴). لازم است یادآوری شود که الگوریتم سنجاقک پارامتر ثابت تنظیمی ندارد، این پارامتر یکی از مزایای این الگوریتم است. برای صحت‌سنجی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه سنجاقک بهبودیافته<sup>۱</sup> (IDA)، از چهار تابع محک ریاضی بهره گرفته شد که در بسیاری از مقالات برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. این توابع به ZDT معروف‌اند که از مجموع مثال‌های غیرخطی و مقید بهینه‌سازی به‌شمار می‌روند (Jafari Asl, 2022). پس از تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌های مورد استفاده، چهار مثال محک با هر یک از الگوریتم‌های چندهدفه سنجاقک<sup>۲</sup> (MODA)، ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۳</sup> (NSGA-II)، چندهدفه ازدحام ذرات<sup>۴</sup> (MOPSO) و چندهدفه سنجاقک بهبود یافته<sup>۵</sup> (MOIDA) تا ۲۰ مرتبه با تعداد جمعیت اولیه ۵۰ و حداکثر تعداد دفعات تکرار برابر ۱۰۰ حل گردید.

می‌شود، استفاده می‌شود. علاوه بر این در هر تکرار یک عدد بر حسب تئوری قدم‌زدن تصادفی برون تولید و برای به‌روز رسانی موقعیت سنجاقک‌ها استفاده می‌شود.

$$x_{t+1} = x_t + \Delta x_{t+1} \quad (24)$$

$$x_{t+1} = x_t \times m + \Delta x_{t+1} \quad (25)$$

$$x_{t+1} = x_t + h(d) \times \text{rand}(d) \times P_g \quad (26)$$

که در رابطه‌های بالا مقادیر بعضی پارامترها از رابطه‌های زیر بدست می‌آید:

$$h = \sqrt{\frac{T}{N}} \quad (27)$$

$$N = 100 \times T \quad (28)$$

$$P_g = \frac{1}{h\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{d - \text{agents}}{2h^2}\right) \quad (29)$$

در اینجا، T برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. N نیز میزان تغییرات سنجاقک در مسیر حرکت را نشان می‌دهد. پارامتر دینامیکی m از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود:

$$m = e^{-\left(\frac{t}{\text{Max Iteration}}\right)^2} \quad (30)$$

Max Iteration تعداد حداکثر تکرار و t شمارنده تکرار فعلی و بعدهای بردار موقعیت الگوریتم است.

### روش تصمیم‌گیری فازی

روش‌های گوناگونی برای انتخاب پاسخ بهینه از مجموع پاسخ‌های موجود روی پارتو ارائه شده است. در این مطالعه نیز برای بررسی‌های بیشتر در زمینه تأثیر ترکیب سریز کنگره‌ای و پلکانی بر انرژی مستهلک شده و دبی عبوری از روش تصمیم‌گیری فازی استفاده و پاسخ بهینه‌ای انتخاب می‌شود که تعامل مناسبی بین هر سه هدف برقرار کرده است. روابط ریاضی روش تصمیم‌گیری فازی به‌صورت زیر بیان می‌شود (Jafari Asl, 2022).

<sup>4</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimization

<sup>5</sup> Multi-Objective Improved Dragonfly Algorithm

<sup>1</sup> Improved Dragonfly Algorithm

<sup>2</sup> Multi-Objective Dragonfly Algorithm

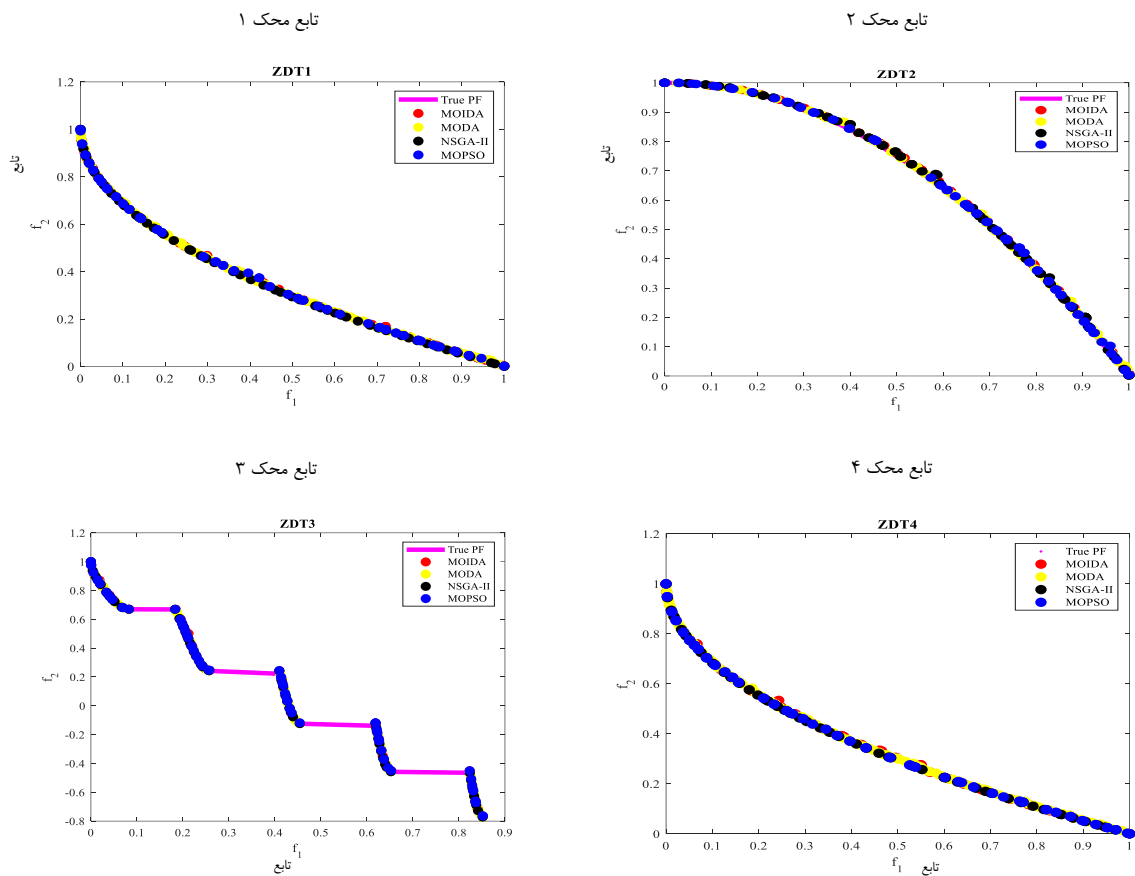
<sup>3</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

جدول ۴ - مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی الگوریتمها

**Table 4- The optimal values of the adjustment parameters of the algorithms**

اندازه	پارامتر	الگوریتم
Magnitude	Parameter	Algorithm
0.6	Inertia coefficient ضریب اینرسی	PSO
1.6	Constant coefficients ( $c_1 = c_2$ ) ضرایب ثابت	
0.5	Mutation rate مقدار جهش	GA
0.6	Crossover rate نرخ تقاطع	

شکل (۴) نمودارهای پارتو به دست آمده برای توابع محک با استفاده از این الگوریتمها را نشان می دهد.



شکل ۴- نمودارهای پارتو برای مثال محک با الگوریتمهای متنوع  
 Figure 4- Pareto charts for benchmark example, with various algorithms

استفاده از رویکرد شبیه ساز-بهینه‌ساز سه هدفه برای طراحی بهینه‌ساز ترکیبی پلکانی-کنگره‌ای...

مشخص است استفاده از رویکرد پیشنهادی برای بهبود DA سبب شده است تا این الگوریتم هم از نظر پراکندگی و هم از منظر همگرایی پاسخ‌ها روی نمودار تطابق خوبی با جواب‌های واقعی برای مثال‌های مورد بررسی داشته باشد. برای نشان دادن بهتر عملکرد IDA، در جدول (۵) مقادیر معیارهای ارزیابی، گزارش شده است.

**جدول ۵- نتایج اجرای الگوریتم‌ها برای حل مسائل محک**

**Table 5- The results of algorithms to solve benchmark problems**

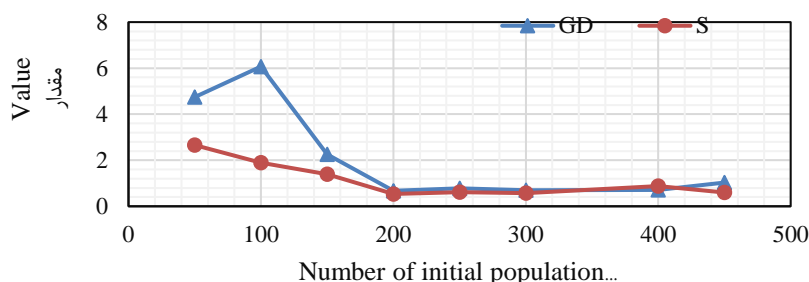
S		GD		تابع
انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	
Standard deviation	Average	Standard deviation	Average	Function
<b>ZDT1</b>				
0.00061	0.0079	0.00021	0.00021	IDA
0.016	0.038	0.0030	0.036	DA
0.025	0.031	0.0048	0.021	MOPSO
0.0039	0.012	0.0026	0.0071	NSGA-II
<b>ZDT2</b>				
0.00057	0.0076	0.00016	0.00021	IDA
0.020	0.049	0.0035	0.069	DA
0.059	0.033	0.0056	0.022	MOPSO
0.021	0.026	0.0067	0.013	NSGA-II
<b>ZDT3</b>				
0.00045	0.0046	0.000051	0.0076	IDA
0.012	0.036	0.0011	0.015	DA
0.017	0.027	0.0019	0.015	MOPSO
0.0018	0.0073	0.0016	0.0084	NSGA-II
<b>ZDT4</b>				
0.0005	0.0069	0.000023	0.00013	IDA
0.018	0.051	0.0071	0.17	DA
0.25	0.34	0.038	0.061	MOPSO
0.18	0.23	0.0059	0.0044	NSGA-II

مسئله به دلیل داشتن تعداد زیادی قید غیرخطی، برای همگرایی مناسب و رسیدن به پاسخ‌های صحیح، الگوریتم پیشنهادی با تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ و حداکثر تکرار ۵۰۰ به کار گرفته شد. لازم است یادآوری شود برای تعیین مقادیر بهینه تعداد جمعیت اولیه و حداکثر تکرار الگوریتم، از رویکرد سعی و خطا براساس پارامترهای فاصله (S) و مقدار پراکندگی پاسخ‌ها (GD) روی نمودار پارتو استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، ابتدا مقادیر تعداد جمعیت اولیه از ۵۰ تا ۴۵۰ به فاصله ۵۰ جمعیت تغییر کرده، پس از آن مقادیر پارامترهای GD و S محاسبه شده است. همان‌طور که مشخص است در تعداد جمعیت اولیه برابر ۲۰۰، هر دو معیار کمترین مقدار خود را دارند. لذا عدد ۲۰۰ به عنوان عدد بهینه تعداد جمعیت اولیه الگوریتم انتخاب شد.

بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که نسخه بهبود یافته الگوریتم سنجاقک توانایی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه را به خوبی دارد، به گونه‌ای که در مثال‌های مورد بررسی نتایج مطلوب‌تری نسبت به سه الگوریتم دیگر ارائه داده است. می‌توان دقت الگوریتم‌ها را بر اساس عملکردشان بدین صورت رتبه‌بندی کرد: ۱- الگوریتم چندهدفه بهبود داده شده سنجاقک ۲- الگوریتم ژنتیک چندهدفه ۳- الگوریتم‌های چندهدفه سنجاقک ۴- ازدحام ذرات.

### نتایج و بحث

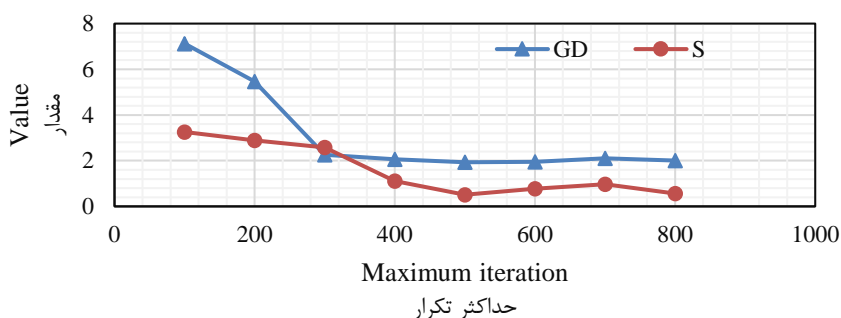
پس از صحت‌سنجی الگوریتم بهبود یافته سنجاقک روی توابع محک و ارزیابی عملکرد آن در حل مسائل چندهدفه، از این الگوریتم برای طراحی یک سرریز ترکیبی روی سد معرفی شده استفاده شد. با توجه به پیچیدگی



شکل ۵- آنالیز حساسیت برای تنظیم تعداد جمعیت اولیه الگوریتم

Figure 5- Sensitivity analysis for adjusting the initial population number of the algorithm

همین فرآیند نیز برای تعیین حداکثر تعداد تکرار الگوریتم استفاده شد. بهینه ترین حالت الگوریتم با تعداد جمعیت ۵۰۰ حاصل شد زیرا هر دو پارامتر آماری دارای کمترین مقدار خود بودند (شکل ۶).



شکل ۶- آنالیز حساسیت برای تنظیم تعداد حداکثر تکرار الگوریتم

Figure 6- Sensitivity analysis for setting the maximum number of iterations of the algorithm

طراحی ارائه توسط فردوسی و همکاران (Ferdowsi *et al.*, 2017) مدل شبیه سازی اجرا گردید. مقادیر پارامترهای اصلی مانند دبی، حجم سرریز، ضریب آبگذری و غیره محاسبه شده با کد توسعه داده شده، با مقادیر قبلی مقایسه شد. جدول (۶) مقایسه خروجی حاصل از شبیه سازی سرریز سد Ute با استفاده از کد توسعه داده شده و مقادیر به دست آمده از تحقیق فردوسی و همکاران (Ferdowsi *et al.*, 2017) را نشان می دهد.

مسئله مورد بررسی شامل دو بخش کنگره ای و پلکانی بوده است از این رو برای ترکیب دو سرریز مذکور نیاز به مدل سازی همزمان سرریز کنگره ای و پلکانی بود. شبیه سازی هیدرولیک جریان برای هر دو سرریز در نرم افزار متلب، توسعه داده شد. پیش از ترکیب کدهای توسعه داده شده برای شبیه سازی هیدرولیک سرریز ترکیبی، کدهای نوشته شده برای هر یک از سرریزها بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقالات موجود صحت سنجی شد. این کار به این صورت اجرا شد که با استفاده از متغیرهای

جدول ۶- نتایج دقت کد توسعه داده شده برای سرریز کنگره‌ای

Table 6- The results related to accuracy of the developed code for labyrinth spillway

اختلاف (%) difference (%)	مطالعه حاضر Current study	Ferdowsi et al. (2017)	مقدار موجود Available value	پارامتر Parameter
	14	14	14	N
-	16.13	16.13	18.29	W
0.0001	225.82	225.86	256.06	W <sub>s</sub>
0.06	15129	16145	16143.55	Q
0.05	0.38	0.40	0.38	C <sub>d</sub>
-	23.47	23.47	34.77	L <sub>s</sub>
-	48.95	48.95	73.16	L <sub>c</sub>
-	685.41	685.42	1024.52	L
0.003	5572.8	5574.90	9979.91	V <sub>w</sub>
0.003	954.75	955.06	1315.87	V <sub>e</sub>
-	2504.5	2504.93	3500.59	V <sub>s</sub>
0.003	9032.1	9034.91	14789.39	V <sub>t(tab)</sub>

استفاده از رویکرد معرفی شده، میزان استهلاک انرژی در پنجه سرریز را به مقدار ۴۳ درصد افزایش دهند. مشابه با مرحله قبلی، متغیرهای طراحی به دست آمده در تحقیق ایشان به کد توسعه داده شده معرفی گردیده و مقادیر پارامترهای مهم سرریز محاسبه گردید. جدول (۷) مقایسه خروجی حاصل از شبیه‌سازی سرریز سد ساروق را با استفاده از کد توسعه داده شده و مقادیر به دست آمده از مطالعه سلماسی و آبراهام (Salmasi & Abraham, 2022) نشان می‌دهد. مقادیر متغیرهای انتخاب شده به عنوان پارامتر ورودی برابر است با: ۱- ارتفاع سرریز: ۲۶ متر ۲- عرض سرریز: ۲۶ متر ۳- ارتفاع پله: ۲/۷۲ متر ۴- بارآبی: ۴/۶۳ متر ۵- تعداد پله: ۹ عدد ۶- دبی طراحی: ۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه ۷- طول سرریز: ۲۳۰ متر.

همانطور که از جدول (۶) مشخص است، مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای توسعه داده شده، تطابق بسیار خوبی با مدل فردوسی و همکاران (Ferdowsi et al., 2017) دارد، به گونه‌ای که مقدار حداکثر خطا مربوط به دبی و ضریب آبگذری به ترتیب برابر ۰/۰۶ و ۰/۰۵ درصد است. میزان لندک خطای به وجود آمده می‌تواند به دلیل نحوه محاسبه ضریب آبگذری باشد که به طور مستقیم بر دبی عبوری از روی سرریز تاثیر می‌گذارد. پس از صحت‌سنجی کد مربوط به سرریز کنگره‌ای، کد شبیه‌ساز هیدرولیک سرریز پلکانی نیز بر اساس مطالعات سلماسی و آبراهام (Salmasi & Abraham, 2022) صحت‌سنجی شد. این محققان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، به بازطراحی سرریز سد ساروق پرداختند و توانستند با

جدول ۷- نتایج کد شبیه‌ساز سرریز پلکانی

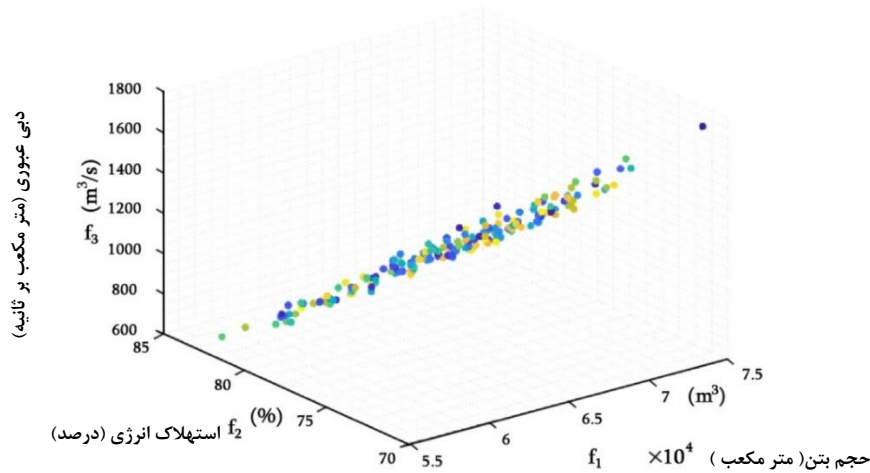
Table 7- The results of the stepped spillway simulator code

اختلاف (%) difference (%)	مطالعه حاضر Current study	Salmasi and Abraham (2022)	پارامتر Parameter
0.02	2.89	2.82	ارتفاع دیواره جانبی (متر) Side wall height (m)
0.027	1.71	1.84	عمق آب در پایین دست سرریز (متر) Water depth at tailwater (m)
0.01	11.59	11.71	سرعت در پنجه سرریز (متر بر ثانیه) Velocity at the spillway toe (m/s)
0.01	2.79	2.76	عدد فرود در پای سرریز Froude number at the spillway toe
0.007	37.96	37.99	طول حوضچه آرامش (متر) Stilling basin length (m)
0.01	6.24	6.33	ارتفاع دیواره‌های حوضچه آرامش (متر) Height of Stilling basin walls (m)
0.00	73.96	73.97	درصد استهلاک انرژی در پای سرریز Energy dissipation percentage at the spillway toe $\left(\frac{\Delta E}{E_{total}} \times 100\right)$

تمامی توابع هدف بهترین مقدار خود را داشته باشند. در مسائل چندهدفه، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به جای یک پاسخ بهینه وجود دارد که به صورت جبهه پارتو ظاهر می‌شوند. در شکل (۷) نتایج حاصل از مدل‌سازی سرریز ترکیبی سد ساروق با سه تابع هدف نامتوازن شامل، کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی، بیشینه‌سازی انرژی مستهلک شده در پای سرریز و دبی عبوری از روی آن با استفاده از یک الگوریتم بهبود یافته ارائه شده است. طول کلی سرریز برابر ۲۳۰ متر و دبی طراحی برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله برابر ۵۶۰/۲ متر مکعب در نظر گرفته شدند. اجرای الگوریتم بهینه‌سازی بهبود داده شده سنجاک با ۲۰۰ جمعیت اولیه و ۵۰۰ تکرار، منجر به ارائه ۲۰۰ پاسخ بهینه روی نمودار پارتو گردیده است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مقادیر پاسخ‌های به دست آمده برای طراحی سرریز ترکیبی روی سد ساروق در محدوده‌های متفاوت قرار دارد. در این شکل،  $f_1$  بیانگر تابع هدف اول یا کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی،  $f_2$  بیانگر تابع هدف دوم یا بیشینه‌سازی میزان استهلاک انرژی و  $f_3$  معرف بیشینه‌سازی دبی عبوری از روی سرریز یا تابع هدف سوم است.

مطابق با نتایج مربوط به صحت‌سنجی سرریز پلکانی، مشخص است که شبیه‌ساز توسعه داده شده در مطالعه حاضر، دقت بالایی دارد، به‌گونه‌ای که در تمامی پارامترهای محاسبه شده، میزان خطا کمتر از ۰/۳ درصد است. پس از ارزیابی دقت و صحت‌سنجی کدهای توسعه داده شده برای مدل‌سازی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای و پلکانی، هر دو شبیه‌ساز با یکدیگر تلفیق شدند و برای مدل‌سازی عملکرد یک سرریز ترکیبی به کار گرفته شد. در اینجا سرریز صاف سد ساروق به عنوان سرریز مورد مطالعه انتخاب شده است. دلیل انتخاب آن وجود اطلاعات کافی برای شبیه‌سازی و وجود نتایج مطالعه‌ای دیگر روی آن است.

هدف از مطالعه حاضر توسعه یک مدل استوار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سنجاک بهبود داده شده برای طراحی چند هدفه این سرریز با لحاظ کردن هزینه‌های ساخت و ساز در قالب حجم بتن‌ریزی، درصد استهلاک انرژی در پنجه سرریز و دبی عبوری از روی سرریز به عنوان توابع هدف است. برای این منظور از توابع هدف، قیود و متغیرهای تصمیم (طراحی) معرفی شده استفاده شدند. در بهینه‌سازی چند هدفه، دستیابی به یک توازن بهینه بین چندین هدف مد نظر خواهد بود که می‌تواند حتی با هم در تضاد باشند و نمی‌توان به پاسخی رسید که به ازای آن



شکل ۷- نمودار پارتو به دست آمده برای سرریز ساروق  
Figure 7- Pareto chart obtained for Sarouk spillway

در بهینه‌سازی چند هدفه، تمامی پاسخ‌های موجود روی جبهه پارتو به عنوان پاسخ بهینه تلقی می‌شوند و هیچ یک از پاسخ‌ها بر پاسخ دیگری عملاً برتری ندارد. بلکه با توجه به شرایط پروژه و بودجه در دسترس و انتظارات کارفرما نسبت به عملکرد سازه، طرح مناسب انتخاب و پیاده‌سازی می‌شود. پس از اجرای محاسبات مربوط به روش تصمیم‌گیری فازی، پاسخی از بین مجموع پاسخ‌های موجود با مقادیر توابع هدف حجم بتن‌ریزی: ۵۹۷۹۵/۵۴ متر مکعب، انرژی مستهلک شده: ۷۵/۱۸ درصد، میزان دبی عبوری: ۱۲۵۵/۱۹ مترمکعب بر ثانیه به عنوان پاسخ مطلوب انتخاب شد که توازن مناسبی بین هدف‌های مورد بررسی دارد. علاوه بر این، با توجه به اینکه عمدتاً در واقعیت، هزینه‌های اقتصادی بیشترین تاثیر را بر سرعت احداث پروژه می‌گذارند، طرح با بیشترین و کمترین هزینه طراحی بر اساس مقدار بتن مصرفی به عنوان دو پاسخ دیگر به‌منظور بررسی انتخاب شدند. جزئیات مربوط به طرح‌های با بیشترین (A)، مناسب‌ترین (B) و کمترین (C) هزینه‌های طراحی در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از پاسخ‌های منتخب پارامترهای طراحی قبل‌قبولی ارائه کرده است. اولین ستون جدول متعلق به راه حل A یا به عبارتی طرحی با بیشترین هزینه اجرایی به دست آمده از الگوریتم روی سرریز رابطه عکس دارد.

بهینه‌سازی سنجاقک بهبود داده شده، دومین ستون مربوط به پارامترهای طراحی پاسخ مطلوب انتخاب شده از طریق روش تصمیم‌گیری فازی یا راه حل B و سومین ستون جدول متعلق به جواب‌های طرح C با کمترین حجم بتن‌ریزی است. دیده می‌شود که در هر سه طرح پیشنهادی، تمامی متغیرهای طراحی بر اساس قیود و محدودیت‌های طراحی به‌دست آمده‌اند. مهم‌ترین دلیل طراحی سرریز ترکیبی کنگره‌ای-پلکانی، افزایش دبی عبوری و افزایش استهلاک انرژی در پنجه سرریز است. همان‌طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود، دبی عبوری از روی سرریز نسبت به دبی اولیه طراحی (۵۶۰/۲ متر مکعب بر ثانیه) در طرح‌های A و B در حدود ۱۲۰ درصد، و در طرح C به میزان ۲۵ درصد افزایش یافته است. از دیدگاه تابع هدف دوم (استهلاک انرژی)، می‌توان گفت که در طرح‌های A و B که دبی عبوری بیش از دو برابر دبی طراحی افزایش یافته است، میزان استهلاک انرژی به ترتیب در حدود ۷۶ و ۷۵ درصد است. در طرح C که دبی عبوری افزایش چشم‌گیری نداشته است (۲۵ درصد)، استهلاک انرژی در حدود ۸۱ درصد حاصل شده است که نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. از این رو می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که استهلاک انرژی با دبی عبوری از روی سرریز رابطه عکس دارد.

جدول ۸- مقادیر پارامترهای سرریز به ازای طرح های مختلف

Table 8- Values of spillway parameters for different designs

Selected answers پاسخ های منتخب			پارامتر طراحی
C	B	A	Design parameter
4.63	5.57	5.61	ارتفاع سرریز کنگره ای (متر) labyrinth spillway height (m)
0.68	0.77	0.79	ضخامت سرریز کنگره ای (متر) The thickness of the labyrinth spillway (m)
2.82	4.29	4.18	مجموع هد بالادست (متر) Total upstream head (m)
19.28	19.76	19.95	طول سرریز کنگره ای (متر) The length of the labyrinth spillway (m)
16.23	16.84	17.32	زاویه دیواره سرریز کنگره ای (درجه) The wall angle of the labyrinth spillway (degree)
0.72	0.84	0.87	عرض داخلی رأس سرریز کنگره ای (متر) The inner width of the labyrinth spillway apex (m)
0.60	0.55	0.56	ضریب تخلیه سرریز کنگره ای The discharge coefficient of labyrinth spillway
2	2	2	تعداد سیکل های سرریز کنگره ای The number of cycles in the labyrinth spillway
10.59	10.78	10.57	شیب سرریز پلکانی (درصد) The slope of the stepped spillway (percentage)
20.17	21.38	24.02	عرض سرریز پلکانی (متر) The width of the stepped spillway (m)
1.34	1.54	1.60	ارتفاع پله ها (متر) The height of the steps (m)
23.06	23.76	24.87	ارتفاع شوت سرریز پلکانی (متر) The height of the chute in the stepped spillway (m)
17	15	16	تعداد پله The number of steps
7.17	8.08	8.59	طول پله (متر) The length of each step (m)
699.16	1255.19	1236.4	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) The flow rate (m <sup>3</sup> /s)
81.71	75.18	76.55	میزان استهلاك انرژی (درصد) The percentage of energy dissipation (percentage)
693.55	996.26	1024.8	حجم سرریز کنگره ای (مترمکعب) The volume of the labyrinth spillway (m <sup>3</sup> )
54625.2	58799	73544.1	حجم سرریز پلکانی (مترمکعب) The volume of the stepped spillway (m <sup>3</sup> )
55318.87	59795.54	74568.92	حجم کل سرریز (مترمکعب) The total volume of the spillway (m <sup>3</sup> )



استفاده از رویکرد شبیه ساز-بهینه ساز سه هدفه برای طراحی بهینه سرریز ترکیبی پلکانی-کنگره‌ای...

هم‌جهت) در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه این است که افزایش در میزان یک تابع هدف موجب کاهش تابع هدف دیگر می‌شود. از این‌روست که در بهینه‌سازی سرریز ترکیبی سد ساروق با افزایش استهلاك انرژی، میزان دبی عبوری از روی سرریز و حجم بتن مصرفی آن کاهش می‌یابد. جدول ۹ مقایسه‌ای برای پارامترهای سرریز صاف موجود ساروق، طرح پیشنهادی سلماسی و آبراهام (Salmasi & Abraham, 2022) و طرح شماره C این پژوهش را نشان می‌دهد.

هزینه ساخت و نگهداری سرریزها همواره بخش زیادی (در حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد) از هزینه‌های مربوط به احداث سد را به خود اختصاص می‌دهد (Fatahi & Sinaii, 2019)، از این رو اقتصادی‌بودن طرح از مهم‌ترین اولویت‌های انتخاب هر طرح کارآمد است. در رابطه با سه طرح بررسی شده می‌توان گفت که از طرح A تا رسیدن به طرح C طرح‌های گوناگونی وجود دارد که هیچ یک بر دیگری برتری ندارد و با توجه به صلاح دید طراح انتخاب می‌شود. نکته مهم در طرح‌های نامغلوب (توابع هدف غیر

جدول ۹- مقایسه طرح‌های سرریز سد ساروق

Table 9- Comparison of Sarouk Dam spillway designs

طرح‌های موجود Available designs			
طرح C Design C	Salmasi and Abraham (2022)	طرح موجود Current design	پارامتر طراحی Design parameter
10.59	11.27	10.66	شیب سرریز (درصد) Spillway slope (percentage)
20.17	25.9	26.00	عرض سرریز پلکانی (متر) Width of stepped spillway(m)
1.34	1.81	-	ارتفاع پله‌ها (متر) Height of steps(m)
23.06	28.58	27.8	ارتفاع شوت سرریز پلکانی (متر) Height of chute in stepped spillway(m)
17	14	-	تعداد پله Number of steps
7.17	15.54	-	طول پله (متر) Length of each step (m)
699.16	560.20	560.20	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) Flow rate (m <sup>3</sup> /s)
81.71	73.97	41.23	استهلاك نسبی انرژی (درصد) Relative energy dissipation (percentage) $(\frac{\Delta E}{E_{total}} \times 100)$
693.55	-	-	حجم سرریز کنگره‌ای (مترمکعب) Volume of labyrinth spillway (m <sup>3</sup> )
54625.2	59314.32	-	حجم سرریز پلکانی (مترمکعب) Volume of stepped spillway (m <sup>3</sup> )
55318.87	59314.32	-	حجم کل سرریز (مترمکعب) Total volume of spillway (m <sup>3</sup> )

نتیجه را می‌توان افزایش شیب سرریز از ۱۰/۶۶ به ۱۱/۲۷، کاهش عرض سرریز در حدود ۰/۱ متر و افزایش ارتفاع شوت سرریز از ۲۷/۸ به ۲۸/۵۸ متر نام برد. علاوه براین، طرح سرریز پلکانی ارائه شده توسط مرجع مزبور با دبی طراحی ۵۶۰/۲ متر مکعب بر ثانیه، میزان استهلاك انرژی

جدول (۹) بیانگر موفقیت مدل توسعه داده شده توسط سلماسی و آبراهام (Salmasi & Abraham, 2022) در افزایش استهلاك انرژی در پنجه سرریز نسبت به طرح موجود است که توانسته است میزان استهلاك انرژی را در حدود ۳۰ درصد افزایش دهد. پارامترهای موثر بر این

و حل شد. در این راستا، الگوریتم سنجاقک به دلیل سادگی مکانیزم آن به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی به کار گرفته شد. با استفاده از رویکرد قدم‌زدن‌های تصادفی در فاز بهره‌برداری و جستجو، نوآوری و بهبود موردنظر صورت گرفت.

۲- طرح A دارای حجم بتن‌ریزی، استهلاک انرژی و دبی عبوری به ترتیب برابر  $74568/92$  مترمکعب،  $76/55$  درصد و  $1236/39$  متر مکعب بر ثانیه، طرح B با حجم بتن مصرفی برابر  $59795/54$  متر مکعب،  $75/18$  درصد استهلاک انرژی و  $1255/19$  مترمکعب بر ثانیه دبی آگذری و طرح C بر اساس کمترین حجم بتن مصرفی برابر  $55318/87$  مترمکعب، بیشترین میزان استهلاک انرژی برابر  $81/71$  درصد و کمترین مقدار دبی آگذری در بین سه طرح منتخب یعنی برابر  $699/17$  متر مکعب بر ثانیه هستند. هریک از این طرح‌ها براساس نیاز کارفرما انتخاب می‌شود و قابل استفاده است.

۳- از نظر اقتصادی، تمامی طرح‌های پیشنهادی با توجه به شرایط پروژه و نیاز کارفرما گزینه‌های مناسبی برای جایگزین سرریز واقعی هستند و هزینه‌های اجرایی را کاهش می‌دهند.

۴- مقایسه نتایج حاصل از طرح C با طرح موجود سرریز سد ساروق حاکی از افزایش تقریباً ۴۶ درصد در استهلاک انرژی است. مقایسه طرح C با طرح سرریز پلکانی ارائه شده توسط محققان پیشین نشان داد که با حجم بتن ریزی تقریباً مشابه، استفاده از رویکرد چند هدفی در مقایسه با رویکرد بهینه‌سازی تک هدفه علاوه بر افزایش استهلاک انرژی جریان، به افزایش دبی عبوری از روی سرریز می‌انجامد. این مورد می‌تواند روش جایگزین مناسب برای طراحی و احداث سرریزها باشد.

با توجه به نتایج مطلوب رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، مدل آزمایشگاهی سرریز بهینه‌شده و طرح ارائه شده در این پژوهش ساخته و دیگر خصوصیات هیدرولیکی جریان روی آن ارزیابی شود.

در پنجه سرریز را  $73/97$  درصد برآورد کرده است. این در حالی است که استفاده از روش پیشنهادی در مطالعه حاضر برای سرریز سد ساروق، توانسته است دبی عبوری و استهلاک انرژی را به ترتیب برابر  $699/16$  مترمکعب بر ثانیه و  $81/71$  درصد ارائه دهد. از این‌رو، سرریز ترکیبی پیشنهادی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه توسط الگوریتم سنجاقک بهبود داده شده توانسته است عملکرد بسیار خوبی در استهلاک انرژی و کارایی هیدرولیکی سرریز نسبت به سرریز موجود و نیز طرح سلماسی و آبراهام (Salmasi & Abraham, 2022) از خود نشان دهد که به صورت تک هدفی طراحی شده است. در بحث حجم بتن مصرفی سرریز مشاهده می‌شود که سرریز پلکانی طراحی شده توسط سلماسی و آبراهام (Salmasi & Abraham, 2022) تنها با هدف افزایش استهلاک انرژی، حجمی به میزان  $59314/32$  متر مکعب را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که در سرریز ترکیبی پیشنهادی مطالعه حاضر، علاوه بر افزایش دبی عبوری و استهلاک انرژی، میزان حجم بتن مصرفی نیز به  $55318/87$  مترمکعب کاهش یافته است. قابل توجه است که از این مقدار،  $693/55$  مترمکعب آن برای سرریز کنگره‌ای بوده است.

### نتیجه‌گیری

از بین پاسخ‌های موجود با توجه به اولویت هزینه، طرح‌های دارای کمترین هزینه اجرایی (گزینه C) و بیشترین هزینه اجرایی (گزینه A) بر اساس حجم بتن ریزی سرریز انتخاب شدند. با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی یک طرح مطلوب (گزینه B) انتخاب شد که توازن مناسبی بین سه هدف دارد. نتایج به شرح زیر بیان می‌شود:

۱- در تحقیق حاضر با هدف ارائه چارچوبی مناسب برای طراحی سرریزها، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از بهبودبخشی عملکرد الگوریتم فراکاوشی بررسی

## مراجع

- Chanson, H. (2001). Experimental Investigations of Air Entrainment in Transition and Skimming Flows Down a Stepped Chute. Research report No CE 158, The University of Queensland, Australia, <https://doi.org/10.1139/101-084>
- Fatahi, M. E. & Sinaii, A. (2019). Numerical simulation and geometric optimization of the stepped spillway of Jareh dam by multi-objective genetic algorithm. *Irrigation and drainage engineering researches*, 21(81), 83-100 (in Persian). <https://doi.org/10.22092/IDSER.2021.352524.1445>
- Ferdowsi, A., Mousavi, S., Farzin, S., Karmi, H., Tasbeh, M. & Valikhani, M. (2017). Optimal Design and Hydraulic Performance Improvement of Labyrinth Spillway using Cuckoo Search Algorithm. *Iranian Irrigation and Drainage Journal*, 12(5), 1086-1097 (in persian).
- Ghaderi, A., & Abbasi, S. (2019). Numerical investigation of labyrinth stepped spillways' performance on energy dissipation of skimming flow. *Journal of Hydraulics*, 14(3), 1-16. doi: 10.30482/jhyd.2019.135883.1303
- Ghahramani, B. & Bayat, B. (2016). Geometric optimization of the stepped spillway of the Siah Bisheh Lower Dam to maximize energy consumption using the PSO particle group optimization algorithm. Proceedings of the 16th Iran Hydraulic Conference, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.
- Ghobadi, R. (2014). Laboratory investigation of the hydraulic effect of the crest slope of wide edge gabion spillways. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz (in persian).
- Goudarzi, M., Qudsian, M. & Mehraïn, M. (2013). Investigation of curved labyrinth spillway with upstream and downstream slope, Proceedings of the International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development, Tabriz, Iran (in persian).
- Hosseini, A. (2018). Multi-objective optimization of trapezoidal labyrinth spillway with stepped energy absorber using gray wolf evolutionary algorithm. M.Sc. Thesis, University of Sistan and Baluchistan (in persian).
- Jafari Asl, J. (2022). Energy and leakage assessment in water distribution systems with reliability-based optimization approach. Ph.D. Thesis, University of Sistan and Baluchistan (in persian).
- Kardan, N., Hassanzadeh, Y. & Bonab, B.S. (2017). Shape Optimization of Trapezoidal Labyrinth Weirs Using Genetic Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1219-1229. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2355-4>
- Khalifeh, S., Khodashenas, S.R., & Esmaili, K. (2021). parameter estimation of the nonlinear muskingum flood-routing model using the new dragonfly algorithm. *Sharif: Civil Engineering*, 37-2(2/1), 3-10.
- Nikpour, M. R., Shoja Talatapeh, B. & Verjavand, P. (2017). Optimization of the geometry of stepped spillway using PSO set algorithm. Proceedings of the 11th International Seminar on River Engineering, Bahman, Shahid Chamran University, Ahvaz (in persian).
- Rezapour Tabari, M. M. & Hashempour, M. (2018). Development of GWO-DSO & PSO-DSO Hybrid Models to Redesign the Optimal Dimensions of Labyrinth Spillway. *Soft Computing*, 5(16), 48-63. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3292-9>
- Salmasi, F. & Abraham, J. (2022). Genetic algorithms for optimizing stepped spillways to maximize energy dissipation. *Water Supply*, 22(2), 1255-1274. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.353>
- Selj Mahmoudi, H. & Bayat H. A., (2013). Study of the effect of water splitting blades on the aeration of a congressional overflow. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran (in persian).
- Shoja, F. (2018). Geometric optimization of stair overflows using genetic algorithm. M.Sc. Thesis, Tabriz University (in persian).
- Sohrabi, Z., Sarvarian, J., & Mamizadeh, J. (2020). Development a two-objective simulation-optimization model for optimal design of geometric dimensions and slope of the stepped spillway of upstream siah-bisheh dam using NSGA-II. *Iranian journal of soil and water research*, 51(2), 469-478.
- Xia, F., Liu, J., Nie, H., Fu, Y., Wan, L. & Kong, X. (2019). Random walks: A review of algorithms and applications. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 4(2), 95-107. <https://doi.org/10.1145/3570906>.



## **Using the Three-Objective Simulator-Optimizer Approach for the Optimal Design of the Combined Stepped-Labyrinth Spillway using the Improved Dragonfly Optimization Algorithm**

**Eslam Zolfaghari, Mahdi Mollazadeh, jafar jafari-asl**

\* Corresponding Author: Civil Engineers department, faculty of engineering, university of Birjand, Birjand, Iran.

**Received:** 12 May 2023, **Accepted:** 14 August 2023, **Email:** mollazadeh.mahdi@birjand.ac.ir

<http://doi.org/10.22092/IDSER.2023.361992.1541>

### **Abstract**

#### **Introduction:**

The cost of implementing spillways includes a large part of the dam construction budget. Optimizing these structures can significantly reduce the cost of building dams. So far, many studies have been done on optimizing the dimensions of spillways in order to reduce the amount of materials used. Among the used optimization methods, the methods based on meta-heuristic algorithms have had stunning results. The review of the studies conducted in the field of stepped and labyrinth spillways shows that the goals of all studies in stepped spillways have been to provide an acceptable plan for energy dissipation and in labyrinth spillways to reach a largest amount of water passing. The purpose of this study is to combine stepped spillways with labyrinth spillways and optimization in order to increase the water passage coefficient and energy Dissipation at the same time. For this purpose, the multi-objective optimization approach has been used.

#### **Methods:**

In this study, the redesign of the spillway of the Sarouk rockfill dam located in West Azarbaijan province has been studied. In case of labyrinth-stepped spillway, the decision variables, constraints and objective functions of the two spillways are combined and analyzed as a multi-objective optimization problem. In this study, a dynamic coefficient is used to improve the performance of the dragonfly algorithm in the search and exploitation stage. After determining the optimal values of the regulatory parameters of the MODA, NSGA-II, MOPSO and MOIDA algorithms, four benchmark examples were solved with each of them 20 times with an initial population of 50 and a maximum number of iterations equal to 100.

#### **Results:**

After validating the improved dragonfly algorithm on benchmark functions and evaluating its performance in solving multi-objective problems, this algorithm was used to design a combined spillway on the introduced dam. In multi-objective problems, there is a set of optimal solutions rather than a single optimal solution, which appear as a Pareto front. The implementation of the improved dragonfly algorithm with 200 initial population and 500 repetitions has resulted in providing 200 optimal answers on the Pareto chart. After performing the calculations related to the fuzzy decision-making method, a design with the values of the objective functions of concreting volume: 59795.54 cubic meters, dissipated energy: 75.18%, flow rate: 1255.19 cubic meters per second was selected as the optimal answer. In addition, the design with the highest and lowest cost of concrete consumption was selected as two other answers. Plans A and B have increased the flow rate passing over the overflow by about 120% and plan C by 25%, compared to the initial design flow rate. The amount of energy dissipation of plans A and B is about 76% and 75%, respectively. In plan C, where the flow rate has not increased significantly (25%), energy dissipation has reached about 81%, which is more than the other two cases.

**Conclusions:**

Among the available answers, according to the priority of the cost, the plans with the lowest implementation cost (C) and the highest implementation cost (A) based on the volume of concrete were selected. Also, by using the fuzzy decision-making approach, an optimal plan (B) that has a suitable balance between the three objectives was selected. Based on the results, it was found that each of the plans A, B and C can be used based on the needs of the employer. From the economic point of view, according to the project conditions and the needs of the employer, all the proposed plans are suitable options for replacing the actual spillway and reduce the implementation costs. Also, the comparison of plan C with the stepped spillway plan presented by previous researchers showed that with almost the same volume of concrete, using a multi-objective approach in comparison with a single-objective optimization approach, in addition to increasing flow energy consumption, also led to an increase in flow through the spillway.

**Keywords:** Improved dragonfly algorithm, Multi-objective optimization, Sarouk dam, Stepped spillway, Labyrinth spillway