

# Multi-Objective Optimization of Stepped Spillway in Order to Reduce Design Costs and Maximize Energy Consumption (Case Study: Sarough Reservoir Dam Spillway)

Ahmad Nawid Anwari<sup>1</sup>, Mehdi Azhdary Moghaddam<sup>2\*</sup>, Jafar Jafari-Asl<sup>3</sup>

1- MSc Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

3- Ph.D. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

\* [mazhdary@eng.usb.ac.ir](mailto:mazhdary@eng.usb.ac.ir)

Received: 19 August 2023  
Accepted: 29 September 2023  
Discussion: 21 December 2024



J. Hydraul.  
Iranian Hydraulic Association  
Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** As dams are one of the most important water storage resources in water projects, proper construction and operation management of them is one of the most important responsibilities of water resource managers. One of the important parts in the construction of any dam is the design of the dam spillway, which is responsible for discharging excess water from the reservoir to downstream in case of floods. Destruction or inefficiency of spillways causes severe damage to the dam or even causes its complete destruction, that is why the design and construction of this part of the dam is very important. Among different types of spillways, stepped spillways, in addition to passing excess water from the reservoir of dams, are a structure that consumes flow energy. Until now, studies in this field have primarily focused on the single-objective optimization of stepped spillways, which usually aims to optimize, minimize construction costs or maximize energy consumption.

Rarely have these studies simultaneously considered optimizing spillway dimensions with respect to both cost and energy consumption. In this study, a multi-objective optimization model has been developed for the first time, utilizing the enhanced version of the dragonfly optimization algorithm. The model aims to minimize the volume of concrete used while maximizing energy consumption in the design of stepped spillways.

**Methodology:** In the design of the stepped spillway, the discharge parameters ( $Q$ ) and the horizontal length of the overflow ( $L$ ) are among the most important input parameters, which are determined based on the initial studies of topography and hydrology and are considered constant during the design. According to the purpose of the present research, an optimal combination of effective parameters in the design of a stepped spillway, including slope, width and height of the spillway, water pressure on the spillway, and step height should be determined in a way that leads to the highest energy consumption and the lowest design costs with by-law restrictions should be taken into account. In the current research, the objective function, which consists of decision variables, should simultaneously provide the maximum amount of energy consumption and the minimum volume of consumed concrete,

while satisfying the constraints and hydraulic conditions of the design problem. For this purpose, the dragonfly optimization algorithm, which is one of the powerful algorithms of collective intelligence methods, and was first proposed by Mirjalili.

This algorithm is inspired by the group and social behavior of dragonflies in nature. Dragonflies usually live alone in the wild and only act in groups for hunting and migration. The basis of the dragonfly optimization algorithm to find the optimal answer is their two crowding behaviors. In this way, based on the static behavior, the members of the algorithm population are divided into smaller groups and search the problem space, then based on their dynamic behavior (exploitation phase), they determine the optimal answer with more members.

**Results and Discussion:** In the first part, the problem of optimal design of the stepped spillway of Sarouk Dam was investigated as a single-objective problem with the aim of maximizing the amount of energy consumption. The purpose of redesigning Sarouk dam spillway was to provide an optimal design for a stepped spillway instead of the existing flat spillway with the aim of maximizing energy consumption downstream of the dam. In all the optimal models provided by IDA, the consumption of water energy has increased significantly. According to the report of Hosseini, 2019, the amount of energy consumption at the foot of the existing spillway of Sarouk Dam is equal to 23.41, which the use of the stepped spillway in the present research increases it for the flow rates of 560.2, 776.9, and 422 cubic meters per second, respectively. 71.32, 65.72 and 74.74 percent.

The new and improved algorithm based on the dragonfly algorithm has been used to optimize the multi-objective overflow of Sarouk Dam by considering the amount of concrete pouring and the amount of energy consumption as objective functions. The results shown that, using the multi-objective optimization approach for the design of stair overflows leads to the presentation of different types of designs with different implementation costs and energy consumption rates. Therefore, using the multi-objective optimization approach has led to the production of many answers, which allows the employer to design the overflow according to the budget he has.

**Conclusion:** In this research, using the improvement of a new metaheuristic algorithm called the dragonfly algorithm, a single-objective model was developed with the aim of maximizing energy consumption, and another multi-objective model was developed with the objectives of minimizing the construction costs of the stair overflow. The developed models were used for the optimal design of Sarouk Dam spillway. The use of the improved Dragonfly multi-objective optimization algorithm to minimize construction costs and increase energy consumption showed that the multi-objective optimization approach can provide a set of answers that is a great help to the employer in order to achieve an economic plan based on the budget. available

**Keywords:** Steeped spillways, Multi-objective optimization, Energy dissipation, Improved Dragonfly optimization algorithm.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the  
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بهینه‌سازی چندهدفه سرریزهای پلکانی در جهت کاهش هزینه‌های طراحی و بیشینه کردن استهلاک انرژی (مطالعه موردی: سرریز سد مخزنی ساروق)

احمد نوید انوری<sup>۱</sup>، مهدی اژدری مقدم<sup>۲\*</sup>، جعفر جعفری اصل<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

\*jbazargan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۷، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ و وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** در دهه‌های اخیر، با پیشرفت علوم کامپیوتری و تکنولوژی‌های نوین، طراحی و بهره‌برداری بهینه سرریزهای پلکانی مورد توجه فراوان مهندسين و طراحان هیدرولیک قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات با هدف افزایش میزان استهلاک انرژی بر روی این سرریزها صورت گرفته است. در این سرریزها، پله‌ها نقش مؤثری در کاهش انرژی جریان دارند. در مقاله حاضر، به منظور دستیابی به یک مدل استوار در طراحی چند منظوره سرریزهای پلکانی با در نظر گرفتن هزینه‌های ساخت و ساز و استهلاک انرژی، یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی تحت عنوان، الگوریتم سنجاقک بهبود داده شده است. سپس از مدل توسعه داده شده برای طراحی سرریز سد ساروق استفاده شد. بررسی نتایج به دست آمده از طرح بهینه سرریز در فاز اول تحقیق، حاکی از افزایش میزان استهلاک انرژی به ازای دبی‌های ۴۲۲، ۵۶۰/۲ و ۷۷۶/۹ مترمکعب بر ثانیه، به ترتیب برابر ۸۱، ۵۹ و ۷۳ درصد در مقایسه با طرح موجود بود. همچنین میزان افزایش حجم طرح سرریز نیز به ازای افزایش استهلاک انرژی برای دبی‌های مذکور به ترتیب در حدود ۲۴، ۳۵ و ۳۸ درصد بوده است. در فاز دوم مطالعه نیز استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه، منجر به ارائه مجموعه‌ای از طرح‌های بهینه سرریز به صورت نمودار پارتو نمودار پارتو گردید. مقایسه عملکرد الگوریتم سنجاقک بهبود داده شده با نسخه اصلی آن و الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه و اجتماع ذرات چند هدفه، حاکی از دقت و سرعت بالای الگوریتم پیشنهادی در طراحی سرریزهای پلکانی بود.

**کلیدواژگان:** سرریزهای پلکانی، بهینه‌سازی چندهدفه، استهلاک انرژی، الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک.

## ۱- مقدمه

مدیران منبع‌های آب به شمار می‌آید. از جمله بخش‌های مهم در ساخت هر سد، طراحی سرریز سد می‌باشد، که وظیفه تخلیه آب اضافی از مخزن سد به پایین‌دست را در هنگام رخداد و بروز سیلاب بر عهده دارد (Saghi and Rajaei, 2014). تخریب یا نداشتن کارایی مناسب سرریزها موجب آسیب دیدگی شدید سد و یا حتی باعث تخریب کامل آن می‌شود، به همین علت است که طراحی و ساخت این بخش از سد دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد (Bagheri et al. 2009). در میان انواع مختلف

در شرایط موجود که نزدیک به همه ی کشورهای جهان با بحران خشکسالی و کمبود آب روبرو می‌باشد، حفاظت از منبع‌های آبی باقی‌مانده و کاهش هدرروی آب و همچنین دقت در مصرف بهینه، امری لازم و ضروری در مبحث مدیریت منبع‌های آب به شمار می‌رود (Bagheri et al., 2009). با توجه به اینکه سدها از مهم ترین منبع‌های ذخیره آب در پروژه‌های آبی می‌باشد، لذا مدیریت ساخت و بهره‌برداری بهینه از آن‌ها، جز مهم ترین مسئولیت

الگوریتم HBMO با ۳۳٪ کاهش هزینه‌های مربوط به اجرا، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و مدل واقعی اجرا شده داشته است (Bozorg Haddad et al., 2010). Parsai and Haghyabi (2019) در بررسی‌های خود با عنوان ارزیابی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از محاسبه‌های تکاملی، به ارزیابی دو روش الگوریتم درختی (Model Tree) و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه<sup>۳</sup> (MLP) برای پیش‌بینی میزان استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی پرداختند. نتایج نشان داد هر دو روش به خوبی توانسته‌اند میزان استهلاک انرژی را برآورده کنند، اما روش Model Tree از دقت بیشتری نسبت به روش MLP برخوردار بود (Parsaie and Haghiabi, 2019). Soori and Mojtahedi (2015) در بررسی‌های خود با استفاده از نظام نتیجه‌گیری فازی به بررسی تأثیر فراسنجه‌های هندسی سرریزهای پلکانی بر روی استهلاک انرژی پرداختند. نتایج نشان داد مقدار برآوردی انرژی توسط مدل نظام نتیجه‌گیری فازی از همخوانی خوبی با مقدار برآورد شده توسط مدل عددی و ثبت شده در آزمایشگاه برخوردار است (Soori and Mojtahedi, 2015). Ghahramani and Bayat (2016) در بررسی‌های خود به طراحی بهینه مقطع سرریزهای پلکانی پرداختند. در این بررسی‌ها از الگوریتم اجتماع ذرات<sup>۴</sup> (PSO) برای تعیین ابعاد سرریز سد سیاه‌بیشه با هدف بیشینه‌سازی استهلاک انرژی استفاده کردند. نتایج نشان داد به ازای دبی ثابت و مستقل از طول پله، با افزایش ارتفاع پله، استهلاک انرژی کاهش یافته و در دبی ثابت و مستقل از ارتفاع پله، با افزایش طول پله استهلاک انرژی افزایش می‌یابد (Ghahramani and Bayat, 2016). Nikpour et al. (2017) در بررسی‌های خود با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)، به بهینه‌سازی ابعاد هندسی سرریز پلکانی سد ساروق پرداختند. در این بررسی‌ها، نتایج گویای برتری الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم GA برای بهینه‌سازی هندسی سرریزهای پلکانی بود (Nikpour et al. 2017).

سرریزها، سرریزهای پلکانی افزون بر عبور دادن آب مازاد مخزن سدها، یک سازه مستهلک کننده انرژی جریان نیز می‌باشد. شکل خاص این سرریزها و عمل کردن پله‌ها به صورت زبری‌های بزرگ مقیاس موجب چرخش جریان بر روی پله‌ها شده و در نهایت موجب استهلاک انرژی جریان می‌شود. افزون بر این، سهولت در ساخت و اجرای سرریزهای پلکانی در مقایسه با دیگر سرریزها از برتری‌های دیگر این سرریزها می‌باشد، که مورد توجه طراحان قرار گرفته است. کارآیی سرریزهای پلکانی وابسته به عامل‌های مانند ارتفاع و عرض پله‌ها، دبی عبوری، شیب کلی سرریز، زبری سطح و زاویه پله‌های سرریز می‌باشد. در نتیجه با تغییر هر یک از فراسنجه‌های یاد شده میزان استهلاک انرژی بر روی سرریز و نیز حجم بتن مصرفی سرریز تغییر می‌کند. لذا تعیین مناسب تعداد فراسنجه‌های مؤثر، به گونه‌ای که منجر به کاهش هزینه‌های احداث و افزایش استهلاک انرژی بر روی این سرریزها شود، طرح یک مسئله بهینه‌سازی در طراحی آنها ضروری می‌باشد. با توجه به اهمیت روزافزون سرریزهای پلکانی، تاکنون تحقیقات پرشماری در زمینه طراحی بهینه این نوع سرریزها انجام گرفته است. در چند سال اخیر، روش‌های نوین بهینه‌سازی با عنوان الگوریتم‌های فراکاوشی به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و توانایی بالا در یافتن طرح‌های قابل اطمینان، در حل مسئله‌های طراحی و بهره‌برداری نظام‌های مهندسی بسیار موفق عمل کرده‌اند. در میان بررسی‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از روش‌های فراکاوشی برای طراحی بهینه سرریزهای پلکانی (Shoja, 2009; Jazayeri and Moine, 2016). می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Bozorg Haddad et al. (2010)، طی یک بررسی جامع به طراحی بهینه سرریزهای پلکانی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل<sup>۱</sup> (HBMO) در راستای طراحی ایمن با کمترین هزینه اجرایی پرداختند. نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم HBMO و الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) و طرح اجرا شده سرریز مقایسه شد. نتایج نشان داد استفاده از

3. Multilayer perceptron (MLP)  
4. Particle swarm optimization (PSO)

1. Honey-bee mating optimization (HBMO)  
2. Genetic algorithm (GA)

انرژی در این سرریزها بوده است و به ندرت به بهینه‌سازی ابعاد سرریزها با لحاظ نمودن دو فاکتور هزینه و استهلاک انرژی به صورت همزمان پرداخته شده است. لذا در این بررسی برای اولین بار یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با بهره‌مندی از توانایی‌های نسخه بهبود داده شده الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک برای طراحی سرریزهای پلکانی با هدف کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی و افزایش استهلاک انرژی توسعه داده شده است.

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- مدل بهینه‌سازی سرریز پلکانی

در طراحی سرریز پلکانی، فراسنجه‌های دبی (Q) و طول افقی سرریز (L) جز مهم‌ترین فراسنجه‌های ورودی می‌باشند که بر اساس بررسی‌های اولیه توپوگرافی و هیدرولوژی تعیین شده و در طول طراحی ثابت در نظر گرفته می‌شوند (Hosseini, 2019). با توجه به هدف پژوهش حاضر، باید ترکیبی بهینه از فراسنجه‌های مؤثر در طراحی سرریز پلکانی شامل شیب، عرض، ارتفاع شوت سرریز، بار آبی روی سرریز و ارتفاع پله به گونه‌ای مشخص گردد که منجر به بیشترین استهلاک انرژی و کمترین هزینه‌های طراحی با لحاظ نمودن محدودیت‌های آئین‌نامه‌ای شود. قابل یادآوری است که در رابطه با تعیین محدوده‌ی متغیرهای طراحی، از فراسنجه‌های اولیه و نقشه‌های طراحی و ساختگاه سرریز استفاده می‌گردد (Sorensen, 1985). فراسنجه‌های مؤثر در طراحی سرریزهای پلکانی شامل شیب سرریز (a)، عرض سرریز (w)، ارتفاع پله‌ها (h)، ارتفاع شوت (H<sub>dam</sub>) و بار آبی روی سرریز (H<sub>d</sub>) می‌باشند. فراسنجه‌های یاد شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

در پژوهش حاضر، تابع هدف که متشکل از متغیرهای تصمیم است، بایستی در ضمن ارضای قیدها و شرایط هیدرولیکی مسأله طراحی، حداکثر میزان استهلاک انرژی و حداقل حجم بتن مصرفی را به طور همزمان ارائه دهد. شکل کلی مسئله بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی با توابع هدف حداکثر سازی استهلاک انرژی جریان در پنجه

(Ohadi and Jafari-Asl (2020) به توسعه یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک چندهدفه و روش قابلیت اطمینان مونت کارلو، یک چارچوب جدید برای طراحی سرریزها پیشنهاد دادند. نتایج تحقیق در قالب یک نمودار تعامل بین ظرفیت دبی عبوری و حجم بتن ریزی ارائه شد.

(Jafari-Asl et al. (2021) در بررسی‌های خود از ترکیب روش‌های محاسبه‌های نرم و هوش مصنوعی، برای طراحی بهینه و مبتنی بر قابلیت اطمینان سرریزها استفاده کردند. نتایج استفاده از این رویکرد بیانگر دستیابی به یک طرح استوار در مقابل نداشتن قطعیت‌ها بود.

(Salmasi and Abraham (2022) در پژوهشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بازطراحی سرریز ساروق برای افزایش استهلاک انرژی جریان پرداختند. طرح ارائه شده با الگوریتم GA منجر به استهلاک انرژی در حدود ۷۳ درصد بر روی سرریز شد.

(Zolfeghari et al. (2023) در بررسی‌های خود با استفاده از ترکیب سرریزهای کنگره‌ای و پلکانی، یک رویکرد جدید برای افزایش دبی عبوری از روی سرریز ساروق با در نظر گرفتن استهلاک انرژی جریان ارائه کردند. بررسی نتایج به دست آمده از پژوهش بیانگر افزایش ظرفیت دبی عبوری و استهلاک انرژی در مقایسه با طرح موجود بود.

طبق بررسی‌های انجام شده، در چند سال اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در طراحی و بهره‌برداری سرریزها، سبب شده است که بتوان در مرحله طراحی تأثیر چندین عامل مهم را لحاظ نمود. از این رو، توسعه و معرفی مدل‌های جدید و دقیق که بتوانند طرحی برای اجرای سرریزهای پلکانی ارائه دهند، که علاوه بر کاهش هزینه‌های اجرایی موجب افزایش مقدار استهلاک انرژی گردند، از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد که منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری این سازه‌های حساس و مهم می‌شود.

تاکنون در بررسی‌های انجام شده در این زمینه، بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی به صورت تک هدفه مورد توجه قرار گرفته که معمولاً هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن هزینه‌های ساخت و یا بیشینه کردن استهلاک

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی سنجاک (DA<sup>1</sup>)

الگوریتم بهینه‌سازی سنجاک از الگوریتم‌های توانمند روش‌های هوش جمعی به‌شمار می‌آید، که نخستین بار توسط میرجلیلی پیشنهاد شد (Mirjalili, 2016). این الگوریتم الهام گرفته شده از رفتار گروهی و اجتماعی حشره سنجاک در طبیعت است. سنجاک‌ها به طور معمول به‌صورت تنها در طبیعت زندگی می‌کنند و تنها برای شکار و کوچ به‌صورت گروهی عمل می‌کنند. مبنای الگوریتم بهینه‌سازی سنجاک برای یافتن پاسخ بهینه، دو رفتار ازدحامی آن‌هاست. به این صورت که بر مبنای رفتار ایستایی، اعضای جمعیت الگوریتم به دسته‌های کوچکتر تقسیم شده و به جستجوی فضای مسئله می‌پردازند، سپس بر مبنای رفتار پویایی شان (فاز بهره‌برداری) با اعضای بیشتری پاسخ بهینه را مشخص می‌کنند (Mirjalili, 2016).

همانند دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی، الگوریتم سنجاک نیز موقعیت اعضای جمعیت را برای کاوش بهتر فضای جستجو و دستیابی به پاسخ مطلوب در هر تکرار به‌روز می‌کند. در DA پنج فراسنجه اصلی وجود دارد که به‌طور اساسی بر روی موقعیت جدید سنجاک‌ها تأثیر می‌گذارند. این فراسنجه‌ها عبارت‌اند از جدایی ( $S_i$ )، انتظام ( $A_i$ )، انسجام ( $C_i$ )، قابلیت جذب ( $F_i$ ) و دوری از دشمن ( $E_i$ ) که به صورت رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند.

$$S_i = -\sum_{j=1}^N X - X_j \quad (3)$$

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (4)$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (5)$$

$$F_i = X^+ - X \quad (6)$$

$$E_i = X - X^- \quad (7)$$

که  $X$  بیانگر متغیرهای تصمیم تعیین شد در تکرار کنونی الگوریتم سنجاک،  $X_j$  و  $V_j$  به‌ترتیب موقعیت و سرعت زامین سنجاک نزدیک می‌باشند.  $N$  شمار کل سنجاک‌های نزدیک،  $X^+$  و  $X^-$  به‌ترتیب موقعیت منبع غذایی و دشمن می‌باشند.

سرریز و کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت و ساز سرریزها را تحت قیدهای موجود می‌توان به زبان ریاضی به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\text{Obj func: } \max(f_1) = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5 y_c} \quad (1)$$

$$\min(f_2) = W \times h \sum_{i=1}^N (L - l_i)$$

Subject to:

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

$$0.25 \times y_c - h \leq 0$$

$$Q - 30 \times W \leq 0 \quad (2)$$

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

$$H_{dam} - L - \tan(\alpha) \leq 0$$

که  $E_{res}$  بیانگر مقدار انرژی باقی‌مانده جریان در پایین‌دست سرریز و  $y_c$  عمق بحرانی جریان می‌باشد.  $l_i$  نمایانگر طول پله  $i$ ام،  $L$  طول کل سرریز و  $N$  شمار پله‌های سرریز می‌باشد.  $C_d$  نیز ضریب تخلیه دبی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ متغیرهای تصمیم مسئله طراحی سد پلکانی

Table 1 Decision variables of the stepped dam design question.

پارامتر	نماد
شیب سرریز (درصد)	$\alpha$
عرض سرریز (متر)	$W$
ارتفاع پله‌ها (متر)	$h$
ارتفاع شوت (متر)	$H_{dam}$
بار آبی روی سرریز (متر)	$H_d$

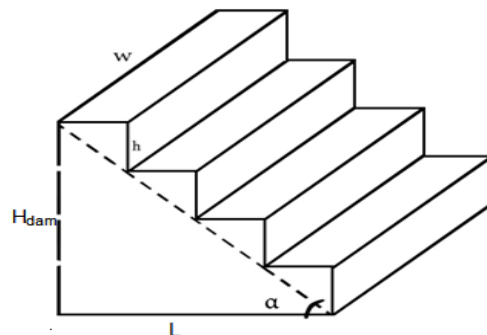


Fig. 1 A schematic a steeped spillway (Hosseini, 2019)

شکل ۱ شماتیک یک سرریز پلکانی

1. Dragonfly algorithm (DA)

مختلفی در دنیای واقعی استفاده شده است (Jafari-Asl et al., 2021). این الگوریتم بهینه ساز به دلیل داشتن یک سازوکار ساده، ممکن است در حل برخی از مسئله های پیچیده در بهینه های محلی گیرافتاده و پاسخ بهینه را پیدا نکند. لذا، ایجاد یک توازن مناسب بین فازهای جستجو و بهره برداری آن ضروری می باشد. همان گونه که پیشتر گفته شد، در این تحقیق از نسخه بهبود داده شده این الگوریتم در مرحله جستجو و بهره برداری شده است. برای این منظور، در هر تکرار الگوریتم موقعیت جدید سنجاقک ها از طریق رابطه (۱۰) بر روز رسانی می شود.

$$x_{t+1} = x_t + 0.01 \times \text{rand}() \times p_g \quad (10)$$

که  $P_g$  عبارت است از:

$$P_g = \frac{1}{m\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{(\ln(d)-N)^2}{m^2}\right) \quad (11)$$

که  $N$  شمار سنجاقک ها،  $d$  بیانگر شمار متغیر های تصمیم و  $m$  یک رابطه پویایی که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$m = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^2} \quad (12)$$

که  $T$  شمار بیشترین تکرار الگوریتم می باشد. لازم به یادآوری است در این بررسی، از کدهای موجود برای الگوریتم سنجاقک که در مرجع اصلی موجود است، استفاده شده و تنها بخش بهبود داده شده آن به همراه تابع های هدف و قید ها در نرم افزار متلب نوشته شده و کدهای اصلی اضافه گردیده است.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

سرریز سد ساروق واقع در استان آذربایجان غربی، به عنوان بررسی موردی در این تحقیق، برای ارزیابی مدل توسعه داده شده انتخاب شد. سد ساروق واقع در استان آذربایجان غربی، شهرستان تکاب و بر روی رودخانه قره قیه به منظور تأمین آب آشامیدنی و مصرف صنعتی شهرستان و نیز آبیاری ۵۵۰۰ هکتار اراضی کشاورزی پایین دست سد احداث شده است. سد یاد شده دارای یک سرریز اوجی می باشد (Hosseini, 2019). همان گونه که بیان شده، هدف از این پژوهش بازطراحی سرریز صاف سد

در الگوریتم DA برای به روز رسانی پاسخ های پیدا شده در هر مرحله و مدل سازی رفتار آن ها در فضای جستجو، از رابطه (۸) استفاده می کند:

$$x_{t+1} = x_t + \Delta x_{t+1} \quad (8)$$

که  $t$  بیانگر تکرار کنونی الگوریتم و  $\Delta X$  بردار گام است و برای مدلسازی امتداد حرکت سنجاقک ها در فضای جستجو استفاده می شود که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w \Delta X_t \quad (9)$$

که  $w$  ضریب اینرسی، فراسنجه های  $s, a, c, f$  و  $e$  ضریب های وزنی هر کدام از رفتارهای پنجگانه جدایی، انتظام، انسجام، قابلیت جذب و قابلیت فرار از دست دشمن می باشند. افزون بر این، ضریب های وزنی یاد شده نقش بسیار مهمی در همگرایی DA و ایجاد یک تعادل مناسب بین فازهای جستجو و بهره برداری ایجاد می کنند. لازم به یادآوری است که، جستجوی دقیق فضای حل توسط الگوریتم سنجاقک وابستگی زیادی به موقعیت سنجاقک های همسایه دارد. در حقیقت، منبع غذایی و دشمن از بین پاسخ های یافت شده در مرحله جستجو تعیین می شود. در صورتی که جستجو منجر به دستیابی به پاسخ مناسب نشود، موقعیت جدید سنجاقک ها از طریق یک گردش تصادفی به روز می شود (Mirjalili, 2016).

با توجه به اینکه در اغلب مسئله های بهینه سازی چندهدفه، تابع های هدف در تعارض با یکدیگر می باشند، هدف دستیابی به یک پاسخ استوار است که بتواند همه ی هدف ها را در سطح قابل قبولی برآورده کند، برای این منظور، می توان از مفهوم غلبگی پارتو و فاصله ازدحامی به عنوان یک راه حل مطلوب برای دستیابی به جبهه پرتو استفاده کرد (Pan et al., 2021). برای تبدیل الگوریتم بهینه سازی سنجاقک به یک بهینه ساز چندهدفه نیز از دو مفهوم غلبگی و فاصله ازدحامی استفاده شده است.

### ۳-۲- بهبود الگوریتم بهینه سازی سنجاقک

(IDA)

الگوریتم سنجاقک تاکنون برای بهینه سازی مسئله های

جدول ۲ حدود بالا و پائین متغیرهای تصمیم.

Table 2 Upper and lower of decision variables.

Parameter	Lower	Upper
$\alpha$	10/33	17/63
$W$	20/00	26/00
$h$	0/20	3/00
$H_{dam}$	24/00	26/00
$H_d$	4/00	5/80

بهبود یافته به ازای بهترین پاسخ از بین ۱۰ اجرا برای هر سه دبی در شکل (۳) ارائه شده است. همان گونه که از شکل (۳) مشخص است، الگوریتم سنجاچک بهبود داده شده در تکرارهای ۴۰۰، ۷۹۹ و ۳۹۸ به ترتیب برای دبی‌های ۵۶۰/۲، ۷۷۶/۹ و ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه همگرا شده است.

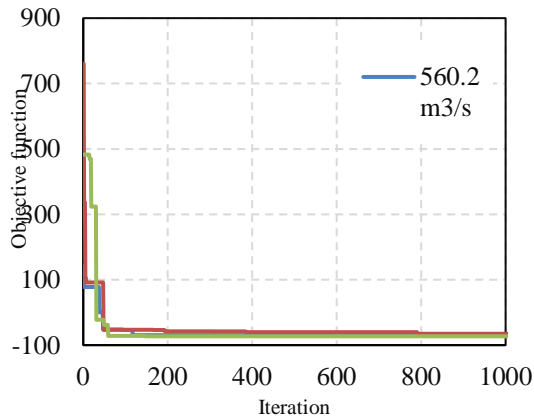


Fig. 3 Convergence curves of algorithm.

شکل ۳ نمودارهای همگرایی الگوریتم.

مقدارهای بهینه به دست آمده از مدل سازی سرریز با دبی‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ جزئیات طراحی

Table 3 Details of design.

Variables	Current Design	Optimal Design		
		560/2	776/9	422
A	10.66	10.33	10.33	10.33
W	26	26	26	24.38
H	-	1.91	2.68	1.94
$H_{dam}$	27.8	28.66	28.66	27.04
$H_d$	5.6	4.63	5.78	4.00
L	-	10.48	14.73	10.64
N	-	14.00	10.00	13.00
Energy dis(%)	41.23	71.32	65.72	74.74

که I و N به ترتیب بیانگر طول و شمار پله‌ها می باشند.

ساروق به صورت یک سرریز پلکانی در جهت افزایش مقدار استهلاک انرژی و کاهش هزینه‌های ساخت و ساز آن می‌باشد. برای دستیابی به یک طرح ایمن و بهینه سرریز، ضروری است که همه ی شرایط هیدرولوژیکی و محدودیت‌های مربوط به موضع شناسی (توپولوژی) آن در نظر گرفته شود. شکل (۲)، نمای سد ساروق را نشان می‌دهد.



Fig. 2 Sarogh Dam (Salmasi & Abraham, 2022).

شکل ۲ سد ساروق (Salmasi & Abraham, 2022).

سرریز یاد شده دارای طول افقی ۲۳۲ متر، عرض خالص و عرض کل دهانه به ترتیب برابر ۲۱ و ۲۶ متر می باشد. همچنین دوره بازگشت سیلاب طراحی سرریز برابر ۱۰۰۰۰ ساله است که اوج (پیک) آن برابر ۵۶۰/۲ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. اوج سیلاب ۱۰۰۰ ساله و خروجی بیشینه محتمل نیز به ترتیب برابر ۴۲۲ و ۷۷۶/۹ مترمکعب بر ثانیه است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- بهینه‌سازی تک هدفه

در این بخش مسئله طراحی بهینه سرریز پلکانی سد ساروق به صورت یک مسئله تک هدفه با هدف بیشینه سازی میزان استهلاک انرژی بررسی می شود. برای این منظور با در نظر گرفتن دبی‌های طراحی به ترتیب برابر ۴۲۲ و ۷۷۶/۹ و ۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه، طول افقی مشخصه ۲۳۰ متر و محدوده مجاز متغیرهای تصمیم برابر با جدول (۲)، بهینه‌سازی انجام شد.

پس از انجام بهینه‌سازی برای ۱۰ مرتبه با شرایط یاد شده، نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی سنجاچک

الگوریتم گرگ خاکستری و سنجاکک به دلیل همانندی ساختاری این دو الگوریتم به هم می‌باشد که هر دو یک الگوریتم مبتنی بر سرعت و از خانواده هوش جمعی در بین الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشند.

#### ۴-۲- بهینه‌سازی چندهدفه

با توجه به هدف اصلی این پژوهش، در این بخش، از الگوریتم جدید بهبود داده شده بر مبنای الگوریتم سنجاکک برای بهینه‌سازی چندهدفه‌ی سرریز سد ساروق با لحاظ کردن حجم بتن‌ریزی و مقدار استهلاک انرژی به عنوان تابع های هدف استفاده شده است. در این بخش نیز پس از ۳۰ بار اجرای الگوریتم با شمار جمعیت ۵۰ و بیشترین شمار تکرار برابر ۱۰۰۰، جبهه بهینه به دست آمده برای یک مورد از اجراهای بالا در شکل (۴) ارائه شده است. نکته قابل توجه پراکندگی خوب پاسخ‌های یافت شده بر روی نمودار پارتو می‌باشد. شکل (۴) که نمودار پارتو به ازای دبی ۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد، دارای محدوده پاسخ برای تابع هدف حجم بتن مصرفی در ساخت سرریز برابر ۹۸۴۱۹/۲ تا ۱۳۰۶۹۱ متر مکعب و برای تابع هدف استهلاک انرژی برابر ۶۴/۰۹ تا ۷۰/۴۰ درصد می‌باشد.

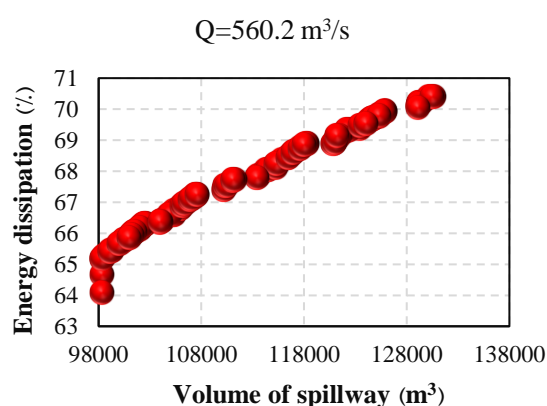


Fig. 4 Optimal pareto front.

شکل ۴ جبهه پارتو بهینه.

با توجه به اینکه همه ی پاسخ‌های حاصل شده بر روی نمودار پارتو، پاسخ بهینه می‌باشند، لذا برای مقایسه آن‌ها با یکدیگر، تنها پاسخ‌های مربوط به بیشترین، کمترین و

همانگونه که بیان شد، هدف از طراحی دوباره سرریز سد ساروق، ارائه یک طرح بهینه برای یک سرریز پلکانی به جای سرریز صاف موجود با هدف پیشینه کردن استهلاک انرژی در پائین دست سد بود. همان طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در همه‌ی مدل‌های بهینه ارائه شده توسط IDA میزان استهلاک انرژی آب به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. برابر گزارش Hosseini, 2019، میزان استهلاک انرژی در پای سرریز موجود سد ساروق برابر ۴۱/۲۳ می‌باشد که استفاده از سرریز پلکانی در این تحقیق موجب افزایش آن به ازای دبی‌های ۵۶۰/۲، ۷۷۶/۹ و ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه، به ترتیب برابر ۷۱/۳۲، ۶۵/۷۲ و ۷۴/۷۴ درصد شد.

در ادامه نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج بررسی‌های پیشین بر روی سد ساروق که با هدف طراحی سرریز پلکانی صورت گرفته است، مقایسه شد (Shoja, 2009; Nikpour et al., 2018; Hosseini., 2019). جدول (۴) نتایج بررسی‌های گذشته به همراه این تحقیق آورده شده است. همان طور که مشخص است، از بین الگوریتم‌های استفاده شده برای حل مسئله سرریز پلکانی بر روی سد ساروق، الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری نسبت به سه الگوریتم دیگر شامل الگوریتم ازدحام ذرات، گرگ خاکستری و سنجاکک بهبود داده شده داشته است. پس از آن الگوریتم‌های گرگ خاکستری و سنجاکک بهبود داده شده عملکرد مناسبی ارائه داده و در نهایت الگوریتم ازدحام ذرات توانسته است به نتایج مطلوبی در استهلاک انرژی جریان در پای سرریز پلکانی نسبت به سرریز صاف برسد.

جدول ۴ مقایسه طراحی‌ها.

Table 4 Comparison of designs.

Algorithm	Mean	Energy dissipation		
		560/2	776/9	422
GA	73.26	73.97	68.96	76.78
PSO	69.14	69.42	63.32	74.69
GWO	70.59	71.32	65.71	74.74
IDA	70.59	71.32	65.72	74.74

لازم به یادآوری است که دلیل نزدیکی پاسخ‌های دو

مربوط به معیارهای ارزیابی در ادامه آورده شده است:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{d} - d_i)^2} \quad (13)$$

$$d_i = \text{Min}_j \left( \sum_k^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)| \right)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, N - 1$$

که  $f_k^i(x)$  نشان‌دهنده هدف  $k$ ام نقطه  $i$ ام و  $M$  شمار هدف‌ها می‌باشد. نمایه  $j$ ، شماره نقطه‌های مجموعه به‌دست آمده می‌باشد که فاصله آن‌ها از نقطه  $i$ ام همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب  $d_i$  برابر است با کمترین فاصله بین نقطه  $i$ ام و سایر نقاط.  $P$  بیانگر شمار اعضای مجموعه به‌دست آمده (جبهه نامغلوب) و  $\bar{d}$  میانگین  $d_i$ ها می‌باشد. هرچه انحراف معیار فاصله‌ها، کم‌تر باشد، توزیع پاسخ‌های به‌دست آمده مناسب‌تر می‌باشد.

مقدار پراکندگی پاسخ‌های موجود بر روی نمودار پارتو، با استفاده از معیار فاصله نسبی برابر رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (14)$$

برای مقایسه عادلانه و دستیابی به نتایج استوار، هر کدام از الگوریتم‌ها ۳۰ مرتبه با شمار جمعیت ۵۰ و حداکثر تکرار ۱۰۰۰ اجرا شد. نتایج به دست آمده از ۳۰ اجرای مدل در جدول (۶) بر مبنای فراسنجه‌های آماری  $S$  و  $GD$  ارائه شده است.

#### جدول ۶ فراسنجه‌های آماری.

Table 6 Statistical parameters.

	Algorithm	Mean	Max	Min	SD
GD	IDA	۰.۰۹۷	۰.۱۱۱	۰.۰۸۷	۰.۰۱
	DA	۰/۲۲۴	۰.۳۰۱	۰.۱۴۲	۰.۰۱۸
	NSGA-II	۰.۱۴۶	۰.۲۵۶	۰.۱۱۳	۰.۰۱۵
	MOPSO	۰/۱۰۲	۰.۱۴۴	۰.۰۹۰۵	۰.۰۱
S	IDA	۰/۰۵۵	۰/۰۹۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷
	DA	۰/۲۴۵	۰/۲۹۹	۰/۰۰۵	۰/۰۱۸۵
	NSGA-II	۰/۱۳۷	۰/۱۶۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۰۹
	MOPSO	۰/۰۵۶	۰/۱۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۹۲
	IDA	۰/۰۵۵	۰/۰۹۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷

پاسخ میانه انتخاب شده و در جدول (۵) اطلاعات مربوط به آن‌ها شامل مقدار متغیرهای تصمیم و تابع‌های هدف ارائه شده است.

#### جدول ۵ جزئیات طراحی.

Table 5 Details of design.

Variables	Optimal Design		
	Max	Opt	Min
$\alpha$	10.35	10.35	10.43
W	24.59	23.08	20.00
H	2.75	2.91	2.86
$H_{\text{dam}}$	25.99	24.80	24.32
$H_d$	4.80	5.02	5.53
Volume ( $m^3$ )	130691.04	115362.60	98419.22
Energy dis(%)	70.40	68.12	64.09

همان‌گونه که از جدول بالا مشخص است، عرض سرریز و ارتفاع تندآب بیشترین تأثیر بر روی افزایش حجم سرریز داشته‌اند. مشخص است که با افزایش حدود ۳۵٪ در حجم سرریز، می‌توان در حدود ۹٪ میزان استهلاک انرژی جریان بر روی سرریز را افزایش داد.

به طور کلی، استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی سرریزهای پلکانی منجر به ارائه انواع طرح‌ها با هزینه‌های اجرایی و میزان استهلاک انرژی متفاوتی می‌شود. از این رو استفاده از رویکرد بهینه‌سازی سازی چند هدفه منجر به تولید پاسخ‌های زیاد شده که سبب می‌شود کارفرما بتواند برابر با بودجه‌ای که در دست دارد برای طراحی سرریز اقدام کند.

#### ۴-۳- مقایسه عملکرد IDA با دیگر الگوریتم‌ها

در این بخش از تحقیق، یک مقایسه مختصر برای نشان دادن مطلوب بودن پاسخ‌های ارائه شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی سنجاچک بهبود داده شده (IDA) با الگوریتم چندهدفه سنجاچک (MODA)، الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) و الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه (MOPSO) صورت گرفته است. بدین منظور از معیارهای ارزیابی شامل معیار فاصله ( $S$ ) و معیار فاصله نسبی ( $GD$ ) برای ارزیابی کارایی و سنجش عملکرد الگوریتم‌های چند هدفه یادشده بهره گرفته شده است. رابطه‌های ریاضی

استهلاک انرژی بر روی سرریز سد ساروق در مقایسه با سرریز موجود نشان داد، استهلاک انرژی در حالت طراحی پیشنهادی به ازای دبی‌های ۵۶۰/۲، ۷۷۶/۹ و ۴۲۲ متر مکعب بر ثانیه به طور میانگین برابر ۵۰٪ درصد افزایش یافت.

- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه سنجاقک بهبود داده شده برای کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت و ساز و افزایش استهلاک انرژی نشان داد، رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را ارائه دهد که کمک شایانی به کارفرما در جهت دستیابی به یک طرح اقتصادی بر مبنای بودجه در دسترس قرار دهد.

- مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از ۳۰ اجرای الگوریتم پیشنهادی با نسخه اصلی آن و همچنین با دو الگوریتم توانمند NSGA-II و MOPSO بیانگر برتری الگوریتم پیشنهادی بر مبنای معیارهای پراکندگی و فاصله بود. لازم به یادآوری است در این تحقیق از رویکرد بهینه‌سازی قطعی برای طراحی سرریز پلکانی استفاده شده است. با توجه به تاثیر عدم قطعیت‌ها بر روی عملکرد سازه‌های مهندسی، پیشنهاد و تاکید می‌شود در بررسی‌های بعدی از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای طراحی سرریز پلکانی سد ساروق استفاده شده و نتایج به دست آمده از آن با رویکرد پیشنهادی در این پژوهش از منظر ایمنی سرریز بررسی شود. همچنین ضرورت دارد در بررسی‌های آتی، برای دستیابی به نتایج بیشتر در مورد عملکرد سرریز‌های پلکانی، از نرم افزارهای شبیه‌سازی عددی در موازات الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شود.

## ۶- منابع

- Bagheri, H. (2009). Modeling and optimization of stepped spillway, Master thesis, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. (In Persian)
- BozorgHaddad, O., Mirmomeni, M. & Miguel A.M. (2010). Optimal Design of Stepped Spillways using the HBMO Algorithm, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(1), 81-94. (In Persian)
- Dong, H., Sun, J., Li, T., Ding, R. & Sun, X. (2020). A multi objective algorithm for multi-label filter feature selection problem. *Applied*

بنابر جدول (۶) مشخص است که الگوریتم‌های IDA و MOPSO به ترتیب با کمترین میانگین برای فراسنجه GD توانسته‌اند برتری خود را نسبت به دو الگوریتم دیگر اثبات کنند. سپس الگوریتم NSGA-II با میانگین ۰.۱۴۶ و در نهایت الگوریتم DA با میانگین ۰.۲۲۴ پس از همه الگوریتم‌ها در رتبه آخر قرار می‌گیرد. معیار GD میزان همگرایی الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد. همچنین بنابر جدول (۶) مشخص است که الگوریتم‌های IDA و MOPSO نسبت به NSGA-II و DA عملکرد بهتری بر مبنای فراسنجه S در طراحی چند هدفه سرریز‌های پلکانی داشته‌اند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی مهندسی منبع‌های آب در زمینه طراحی سازه‌های هیدرولیکی خصوصاً سرریز سدها، که همواره بخش قابل توجهی از هزینه‌های اجرایی سد را به خود اختصاص می‌دهد، به‌طور گسترده مورد توجه محققان قرار گرفته است. در چند دهه اخیر بررسی‌های زیادی بر روی سرریز پلکانی بخاطر ویژگی‌های آن مانند کاهش انرژی جریان در پایین دست انجام شده است. در این تحقیق با استفاده از بهبود یک الگوریتم فراکاوشی نوین با عنوان الگوریتم سنجاقک مدلی به‌صورت تک هدفه با هدف بهینه‌سازی استهلاک انرژی و مدلی دیگر به‌صورت چند هدفه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت و ساز سرریز پلکانی توسعه داده شد. مدل‌های توسعه داده شده برای طراحی بهینه سرریز سد ساروق استفاده شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت‌اند از:

- بهبود الگوریتم سنجاقک با استفاده از رویکرد پیشنهادی به جای پرواز لوی در حل مسئله‌های بنچمارک ریاضی نشان داد، که عملکرد الگوریتم پیشنهادی به طور قابل توجهی بهبود داده شد. به گونه‌ای که منجر به دستیابی به نتایج بهتر با تکرار کمتر و سرعت همگرایی بالا شد.
- استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی

Evolutionary Computing, Applied Water Science, Vol.144, No.9.

Saghi, H., and Rajaei, N. (2014). Principles of hydraulic design and implementation of dams, Publisher of Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. (In Persian)

Salmasi, F., and Abraham, J. (2022). Genetic algorithms for optimizing stepped spillways to maximize energy dissipation. *Water Supply*, 22(2), 1255-1274.

Shoja, F. (2009). Shape optimization of stepped spillway using genetic algorithm, Master thesis, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Persian)

*Intelligence*, 50, 3748-3774.

Ghahramani, B. & Bayat, B. (2017). Shape optimization of Siahbische Dam's stepped spillway using particle swarm optimization, 16<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. (In Persian)

Hosseini, A. (2019). Multi-objective optimization of labyrinths spillway with energy dissipation structure, Master thesis, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. (In Persian)

Jafari-Asl, J., Azizyan, G., Monfared, S.A.H., Rashki, M. & Andrade-Campos, A.G. (2021a). An enhanced binary dragonfly algorithm based on a V-shaped transfer function for optimization of pump scheduling program in water supply systems (case study of Iran). *Engineering Failure Analysis*, 123, 105323, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105323>.

Jafari-Asl, J., Seghier, M.E.A.B., Ohadi, S. & van Gelder, P. (2021b). Efficient method using Whale Optimization Algorithm for reliability-based design optimization of labyrinth spillway. *Applied Soft Computing*, 101, 107036, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107036>.

Jazaeri, P. & Moeini, R. (2016). Using the artificial bee colony in designing of stepped spillway, 15<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Imam Khomeini International University, Ghazvin, Iran. (In Persian)

Khalifeh, S., Khodashenas, S. & Esmaili, K. (2021). Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood-Routing Model Using The new dragonfly algorithm. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(2.1), 3-10. (In Persian)

Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, 27(4), 1053-1073.

Nikpour, M., Shoja, B. & Vejand., P. (2018). Shape optimization of stepped spillways using particle swarm optimization, 11<sup>th</sup> International Conference of River Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (In Persian)

Ohadi, S., & Jafari-Asl, J. (2021). Multi-objective reliability-based optimization for design of trapezoidal labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 77, 101787.

Pan, L., Xu, W., Li, L., He, C., & Cheng, R. (2021). Adaptive simulated binary crossover for rotated multi-objective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 60, 100759.

Parsaie, A., Haghiabi, A.H. (2019). Evaluation of Energy Dissipation on Stepped Spillway using