Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics

Research Article
https://doi.org

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[1], Mehdi Azhdary Moghaddam[2]*, Jafar Jafari-Asl[3]

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.

Abstract

Introduction: Considering that dams are one of the most important water storage resources in water projects, therefore, 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 also a structure that consumes flow energy. Until now, in the studies carried out in this field, the optimization of stepped spillways has been considered as a single objective, which usually aims to optimize, minimize construction costs or maximize energy consumption in these spillways, and rarely optimize the dimensions of spillways with Taking into account the two factors of cost and energy consumption has been considered simultaneously. Therefore, in this study, for the first time, a multi-objective optimization model has been developed by benefiting from the capabilities of the improved version of the dragonfly optimization algorithm for the design of stair overflows with the aim of minimizing the volume of concrete used and increasing energy consumption.

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, 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: The spillway of Sarouq Dam, located in West Azarbaijan province, was selected as a case study in this research to evaluate the developed model. 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.

According to the main goal of this article, in this section, 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.

مقاله پذیرفته شده

مقاله پژوهشی

https://doi.org/

انجمن هیدرولیک ایران

نشریه هیدرولیک

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

احمد نوید انوری[1]، مهدی اژدری‌مقدم[2]*، جعفر جعفری‌اصل[3]

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.

چکیده: در دهه‌های اخیر، با پیشرفت علوم کامپیوتری و تکنولوژی‌های نوین، طراحی و بهره‌برداری بهینه سرریزهای پلکانی مورد توجه فراوان مهندسین 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 به‌دست 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، به‌ترتیب 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 به‌ترتیب 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 به‌صورت 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 سریزهای پلکانی بود.

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

۱- مقدمه

در شرایط موجود که تقریباً تمامی جهان با بحران خشکسالی و کمبود آب مواجه می‌باشد، حفاظت از منابع آبی باقی‌مانده و کاهش اتلاف آب و همچنین دقت در مصرف بهینه، امری لازم و ضروری در مبحث مدیریت منابع آب به شمار می‌رود (Bagheri et al. 2009). با توجه به اینکه سدها از مهمترین منابع ذخیره آب در پروژه‌های آبی می‌باشد، لذا مدیریت ساخت و بهره برداری صحیح از آن، جز مهمترین مسئولیت مدیران منابع آب محسوب می‌شود. از جمله بخش‌های مهم در ساخت هر سد، طراحی سرریز سد می‌باشد، که وظیفه تخلیه آب اضافی از مخرن سد به پایین‌دست را در مواقع بروز سیلاب بر عهده دارد (Saghi and Rajaei, 2014). تخریب یا عدم 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 از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد (Bagheri et al. 2009). در میان انواع مختلف سرریزها، سرریزهای پلکانی علاوه بر عبور دادن آب مازاد مخزن سدها، یک سازه مستهلک کننده انرژی جریان نیز می‌باشد. شکل خاص این سرریزها و عمل کردن پله‌ها به‌صورت زبری‌های بزرگ مقیاس موجب چرخش جریان بر روی پله‌ها شده و در نهایت موجب استهلاک انرژی جریان می‌گردد. علاوه بر این، سهولت در ساخت و اجرای سرریزهای پلکانی در مقایسه با سایر سرریزها از مزایای دیگر این سرریزها می‌باشد، که مورد توجه طراحان قرار گرفته است. کارآیی سرریزهای پلکانی وابسته به عواملی

نظیر ارتفاع و عرض پله‌ها، دبی عبوری، شیب کلی سرریز، زبری سطح و زاویه پله‌های سرریز می‌باشد. در نتیجه با تغییر هر یک از پارامترهای مذکور میزان استهلاک انرژی بر روی سرریز و نیز حجم بتن مصرفی سرریز تغییر می‌کند. لذا تعیین مناسب مقادیر پارامترهای مؤثر، به‌گونه‌ای که منجر به کاهش هزینه‌های احداث و افزایش استهلاک انرژی بر روی این سرریزها گردد، طرح یک مسئله بهینه‌سازی در طراحی آن‌ها ضروری می‌باشد. با توجه به اهمیت روزافزون سرریزهای پلکانی، تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه طراحی بهینه این نوع سرریزها انجام گرفته است. در چند سال اخیر، روش‌های نوین بهینه‌سازی تحت عنوان الگوریتم‌های فراکاووشی به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و توانایی بالا در یافتن طرحهای قابل اطمینان، در حل مسائل طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های مهندسی بسیار موفق عمل کرده‌اند. در میان مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از روش‌های فراکاوشی جهت طراحی بهینه سرریزهای پلکانی (Shoja, 2009; Jazayeri and Moine, 2016). می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود. Bozorg Haddad et al. 2010 طی یک مطالعه جامع به طراحی بهینه سرریزهای پلکانی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل[1] (HBMO) در راستای طراحی ایمن با کمترین هزینه اجرایی پرداختند. نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم HBMO و الگوریتم ژنتیک[2] (GA) و طرح اجرا شده سرریز مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از الگوریتم HBMO با ۳۳ ٪ کاهش هزینه‌های مربوط به اجرا، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و مدل واقعی اجرا شده داشته است (BozorgHaddad et al., 2010). Parsai and Haghyabi, 2019، در مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از محاسبات تکاملی، به ارزیابی دو روش الگوریتم درختی (Model Tree) و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه[3] (MLP) برای پیش‌بینی میزان استهلاک انرژی بر روی سرریزهای پلکانی پرداختند. نتایج نشان داد هر دو روش به خوبی توانسته‌اند میزان استهلاک انرژی را تخمین بزنند، اما روش Model Tree از دقت بیشتری نسبت به روشMLP برخوردار بود (Parsaie and Haghiabi, 2019). Soori and Mojtahedi, 2015، در مطالعه‌ای با استفاده از سیستم استنتاج فازی به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سرریزهای پلکانی بر روی استهلاک انرژی پرداختند. نتایج نشان داد مقادیر تخمینی انرژی توسط مدل سیستم استنتاج فازی از تطابق خوبی با مقادیر تخمین زده شده توسط مدل عددی و ثبت شده در آزمایشگاه برخوردار است (Soori and Mojtahedi, 2015). Ghahramani and Bayat, 2016، در مطالعه‌ای به طراحی بهینه مقطع سرریزهای پلکانی پرداختند. در این مطالعه از الگوریتم اجتماع ذرات[4] (PSO) برای تعیین ابعاد سرریز سد سیاه بیشه با هدف بیشینه نمودن استهلاک انرژی استفاده نمودند. 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 مطالعه‌ای با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) ، به بهینه‌سازی ابعاد هندسی سرریز پلکانی سد ساروق پرداختند. در این مطالعه، نتایج حاکی از برتری الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم GA برای بهینه‌سازی هندسی سرریزهای پلکانی بود (Nikpour et al., 2017).

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 دبی‌عبوری و حجم بتن‌ریزی ارائه شد.

Jafari-Asl et al. (2021) در مطالعه‌ای از ترکیب روش‌های محاسبات نرم و هوش مصنوعی، برای طراحی بهینه و مبتنی بر قابلیت اطمینان سریزها استفاده کردند. بررسی نتایج استفاده از رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان در طراحی سرریزها بیانگر دستیابی به یک طرح استوار در مقابل عدم‌قطعیت‌ها بود.

Salmasi, F. & Abraham, J. (2022) در تحقیقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بازطراحی سرریز ساروق جهت افزایش استهلاک انرژی جریان پرداختند. طرح ارائه شده با الگوریتم GA منجر به استهلاک انرژی در حدود ۷۳ درصد بر روی سرریز شد.

---

[1] Honey-bee mating optimization (HBMO)
[2] Genetic algorithm (GA)
[3] Multilayer perceptron (MLP)
[4] Particle swarm optimization (PSO)

Zolfeghari et al. (2023) در مطالعه‌ای 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 نمود. بررسی نتایج به‌دست آمده از تحقیق بیانگر افزایش ظرفیت دبی عبوری و استهلاک انرژی در مقایسه با طرح موجود بود.

طبق مطالعات صورت گرفته، در چند سال اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در طراحی و بهره‌برداری از سازه‌ها، 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 مطالعات انجام گرفته در این زمینه، بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی به‌صورت تک هدفه مورد توجه قرار گرفته که معمولاً هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن هزینه‌های ساخت و یا بیشینه کردن استهلاک انرژی در این سرریزها بوده است و به ندرت به بهینه‌سازی ابعاد سرریزها با لحاظ نمودن دو فاکتور هزینه و استهلاک انرژی به‌صورت همزمان پرداخته شده است. لذا در این مطالعه 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، پارامترهای دبی (Q) و طول افقی سرریز (L) جز مهمترین پارامترهای ورودی می‌باشند که بر اساس مطالعات 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 پارامترهای 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. لازم به ذکر است که در رابطه با تعیین محدوده‌ی متغییرهای طراحی، از مطالعات اولیه و نقشه‌های طراحی و ساختگاه سرریز استفاده می گردد (Sorensen, 1985). پارامترهای مؤثر در طراحی سرریزهای پلکانی شامل شیب سرریز (α)، عرض سرریز (W)، ارتفاع پله‌ها (h)، ارتفاع شوت (H_{dam}) و بار آبی روی سرریز (H_d) می‌باشند. پارامترهای مذکور، در شکل (۱) نشان داده شده است.

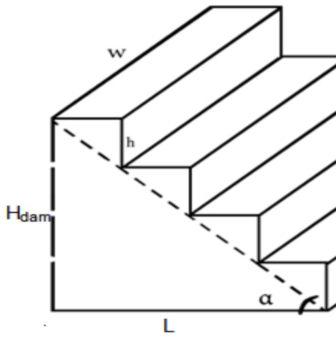

Fig. 1 A schematic a steeped spillway (Hosseini, 2019)

شکل ۱ شماتیک یک سرریز پلکانی

در پژوهش حاضر، تابع هدف که متشکل از متغیرهای تصمیم است، بایستی در ضمن ارضای قیود 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 سرریز و کمینه سازی هزینه‌های ساخت و ساز سرریزها را تحت قیود موجود می‌توان به زبان ریاضی به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\text{Obj func: } max(f_1) = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5\, y_c} \quad min(f_2) = W \times h \sum_{i=1}^{N} (L - l_i) \tag{1}$$

Subject *to:*

$$\begin{aligned} & h - y_c \times \left(\frac{h}{y_c}\right) \le 0 \\ & 0.25 \times y_c - h \le 0 \\ & Q - 30 \times W \le 0 \\ & Q - C_d \times W \times (H_d)^{1.5} \le 0 \\ & H_{dam} - L - tan\,(\alpha) \le 0 \end{aligned} \tag{2}$$

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

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک (DA[1])

الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک از الگوریتم‌های قدرتمند روش‌های هوش جمعی به‌شمار می‌آید، که اولین بار توسط میرجلیلی پیشنهاد شد (Mirjalili, 2016). این الگوریتم الهام گرفته شده از رفتار گروهی و اجتماعی حشره سنجاقک در طبیعت است. سنجاقک‌ها معمولاً به‌صورت تنها در طبیعت زندگی می‌کنند و صرفاً برای شکار و کوچ به‌صورت گروهی عمل می‌کنند. اساس الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک برای یافتن پاسخ بهینه، دو رفتار ازدحامی آن‌ها است. به اینصورت که بر اساس رفتار استاتیکی، اعضای جمعیت الگوریتم به دسته‌های کوچکتر تقسیم شده و به جستجوی فضای مسئله می‌پردازند، سپس بر اساس رفتار دینامیکی‌شان (فاز بهره‌برداری) با اعضای بیشتری پاسخ بهینه را مشخص می‌کنند (Mirjalili, 2016).

همانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، الگوریتم سنجاقک نیز موقعیت اعضای جمعیت را برای کاوش بهتر فضای جستجو و دستیابی به پاسخ مطلوب در هر تکرار به‌روز می‌نماید. در DA پنج پارامتر اصلی وجود دارد که به‌طور اساسی بر روی موقعیت جدید سنجاقک‌ها تأثیر می‌گذارند. این پارامترها عبارتند از جدایی (S_i)، انتظام (A_i)، انسجام (C_i)، قابلیت جذب (F_i) و دوری از دشمن (E_i) که به‌صورت روابط زیر محاسبه می‌شوند.

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

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

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

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

$$\boldsymbol{E_i = X — X} \quad (7)$$

که X بیانگر متغیرهای تصمیم تعیین شد در تکرار کنونی الگوریتم سنجاقک، X_j و V_j به‌ترتیب موقعیت و سرعت jامین سنجاقک نزدیک می‌باشند. N تعداد کل سنجاقک‌های نزدیک، X^{+} و X^{-} به‌ترتیب موقعیت منبع غذایی و دشمن می‌باشند.

در الگوریتم DA برای به روز رسانی پاسخ‌های پیدا شده در هر مرحله و مدل‌سازی رفتار آن‌ها در فضای جستجو، از رابطه (۸) استفاده می‌کند:

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

که t بیانگر تکرار کنونی الگوریتم و ΔX بردار گام است و برای مدلسازی امتداد حرکت سنجاقک‌ها در فضای جستجو استفاده می‌شود که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

که w ضریب اینرسی، پارامترهای s، a، c، f و e ضرایب وزنی هر کدام از رفتارهای پنجگانه جدایی، انتظام، انسجام، قابلیت جذب و قابلیت فرار از دست دشمن می‌باشند. علاوه بر این، ضرایب وزنی مذکور نقش بسیار مهمی در همگرایی DA و ایجاد یک تعادل مناسب بین فازهای جستجو و بهره‌برداری ایجاد می‌کنند.

لازم به ذکر است که، جستجوی دقیق فضای حل توسط الگوریتم سنجاقک وابستگی زیادی به موقعیت سنجاقک‌های همسایه دارد. در حقیقت، منبع غذایی و دشمن از بین پاسخ‌های یافت شده در مرحله جستجو تعیین می‌شود. در صورتیکه جستجو منجر به دستیابی به پاسخ مناسب نگردد، موقعیت جدید سنجاقک‌ها از طریق یک گردش تصادفی به روز می‌شود (Mirjalili, 2016).

با توجه به اینکه در اغلب مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، توابع هدف در تعارض با یکدیگر می‌باشند، هدف دستیابی به یک پاسخ استوار است که بتواند تمامی اهداف را در سطح قابل قبولی برآورده نماید برای این منظور، می‌توان از مفهوم غلبگی و فاصله ازدحامی به عنوان یک راه‌حل مطلوب جهت دستیابی به جبهه پرتو استفاده کرد(Pan et al., 2021). برای تبدیل الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک به یک بهینه‌ساز چندهدفه نیز از دو مفهوم غلبگی و فاصله ازدحامی استفاده شده است.

۲-۳- بهبود الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک (IDA[2])

الگوریتم سنجاقک تاکنون برای بهینه‌سازی مسائل مختلفی در دنیای واقعی مورد استفاده قرار گرفته است (Jafari-Asl et al., 2021b). این الگوریتم بهینه‌ساز به دلیل داشتن یک مکانیزم ساده، ممکن است در حل برخی از مسائل پیچیده در بهینه‌های محلی گیرافتاده و پاسخ بهینه را پیدا نکند. لذا، ایجاد یک توازن مناسب بین فازهای جستجو و بهره‌برداری آن ضروری می‌باشد. همانگونه که پیش‌تر گفته شد، در تحقیق حاضر از نسخه بهبود داده شده این الگوریتم در مرحله جستجو و بهره‌برداری شده است. برای این منظور،

[1] Dragonfly Algorithm

[2] Improved Dragonfly Algorithm

در هر تکرار الگوریتم موقعیت جدید سنجاقک‌ها از طریق رابطه (۱۰) بروز رسانی می‌شود.

$$x_{t+1} = x_t + 0.01 \times rand() \times C_g \tag{10}$$

که P_g عبارت است از:

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

که N تعداد سنجاقک‌ها، d بیانگر تعداد متغیرهای تصمیم و m یک رابطه دینامیکی که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

که T تعداد حداکثر تکرار الگوریتم می‌باشد.
لازم به ذکر است در این مطالعه، از کدهای موجود برای الگوریتم سنجاقک که در مرجع اصلی موجود است، استفاده شده و تنها بخش بهبود داده شده آن به‌همراه توابع هدف و قیود در نرم افزار متلب نوشته شده و به کدهای اصلی اضافه گردیده است.

۳- منطقه مورد مطالعه

سرریز سد ساروق واقع در استان آذربایجان غربی، به‌عنوان مطالعه موردی در تحقیق حاضر، برای ارزیابی مدل توسعه داده شده انتخاب شد. سد ساروق واقع در استان آذربایجان غربی، شهرستان تکاب و بر روی رودخانه قره‌قیه به منظور تأمین آب شرب و مصرف صنعتی شهرستان و نیز آبیاری ۵۵۰۰ هکتار اراضی کشاورزی پایین دست سد احداث شده است. سد مذکور دارای یک سرریز اوجی می‌باشد (Hosseini, 2019). همانگونه که ذکر گردید، هدف از این مطالعه بازطراحی سرریز صاف سد ساروق به‌صورت 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 تمامی شرایط هیدرولوژیکی و محدودیت‌های مربوط به توپولوژی آن در نظر گرفته شد. شکل (۲) نمای سد ساروق را نشان می‌دهد.
سرریز مذکور دارای طول افقی ۲۳۲ متر، عرض خالص و عرض کل دهانه به ترتیب برابر ۲۱ و ۲۶ متر می‌باشد. همچنین دوره بازگشت سیلاب طراحی سرریز برابر ۱۰۰۰۰ ساله است که پیک آن برابر ۵۶۰/۲ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. پیک سیلاب ۱۰۰۰ ساله و خروجی حداکثر محتمل نیز به ترتیب برابر ۴۲۲ و ۷۶۶/۹ مترمکعب بر ثانیه است.

Fig. 2 Sarogh Dam (Salmasi, F. & Abraham, J. (2022)).
شکل ۲ سد ساروق.

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 مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور با در نظر گرفتن دبی‌های طراحی به ترتیب برابر ۵۶۰/۲، ۷۷۶/۹ و ۴۲۲ مترمکعب بر ثانیه، طول افقی مشخصه ۲۳۰ متر و محدوده مجاز متغیرهای تصمیم مطابق با جدول (۱)، بهینه‌سازی انجام شد.

جدول ۱ حدود بالا و پائین متغیرهای تصمیم.
Table 1 Upper and lower of decision variables.

Parameter	Lower	Upper
α	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

پس از انجام بهینه‌سازی برای ۱۰ مرتبه با شرایط مذکور، نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک بهبود یافته به ازای بهترین پاسخ از بین ۱۰ اجرا برای هر سه دبی در شکل (۳) ارائه شده است. همانگونه که از شکل (۳) مشخص است، الگوریتم سنجاقک 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.

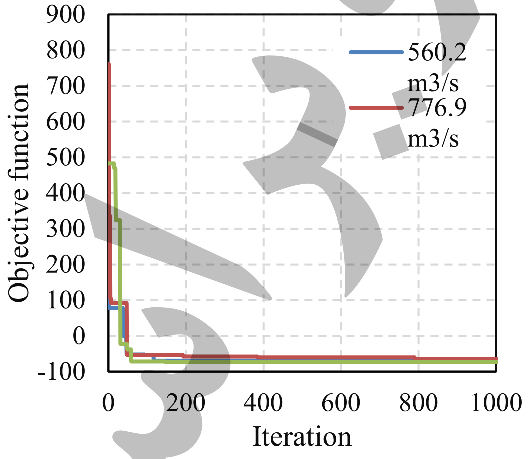

Fig. 3 Convergence curves of algorithm.

شکل ۳ نمودارهای همگرایی الگوریتم.

مقادیر بهینه به‌دست آمده از مدل‌سازی 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
α	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 l و N به ترتیب بیانگر طول و تعداد پله ها می‌باشند.

همانگونه که ذکر شد، هدف از طراحی مجدد سرریز سد ساروق، ارائه یک طرح بهینه برای یک سرریز پلکانی به جای سرریز صاف موجود با هدف بیشینه نمودن استهلاک انرژی در پائین دست سد بود. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، در تمامی مدل‌های بهینه ارائه شده توسط IDA میزان استهلاک انرژی آب به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. طبق گزارش Hosseini, 2019، میزان استهلاک انرژی در پای سرریز موجود سد ساروق برابر ۴۱/۲۳ می‌باشد که استفاده از سرریز پلکانی در تحقیق حاضر 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 گردید.

در ادامه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج مطالعات پیشین بر روی سد ساروق که با هدف طراحی سرریز پلکانی صورت گرفته است، مقایسه شد (Shoja, 2009; Nikpour et al., 2018؛ Hosseini., 2019) در جدول (۴) نتایج مطالعات گذشته به همراه تحقیق حاضر آورده شده است. همانطور 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 سنجاقک بهبود داده شده داشته است. پس از آن الگوریتم‌های گرگ خاکستری و سنجاقک 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.

لازم به ذکر است که دلیل نزدیکی پاسخ‌های دو الگوریتم گرگ خاکستری و سنجاقک به دلیل شباهت 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.

جدول ۳ مقایسه طراحی‌ها.

Table 3 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

۴-۲- بهینه‌سازی چند هدفه

با توجه به هدف اصلی مقاله حاضر، در این بخش، از الگوریتم جدید بهبود داده شده بر اساس الگوریتم سنجاقک برای بهینه‌سازی چندهدفه‌ی سرریز سد ساروق با لحاظ نمودن حجم بتن‌ریزی و مقدار استهلاک انرژی به عنوان توابع هدف استفاده شده است. در این بخش نیز پس از ۳۰ بار اجرای الگوریتم با تعداد جمعیت ۵۰ و حداکثر تعداد تکرار برابر ۱۰۰۰، جبهه بهینه به‌دست آمده برای یک مورد از اجراهای فوق 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.

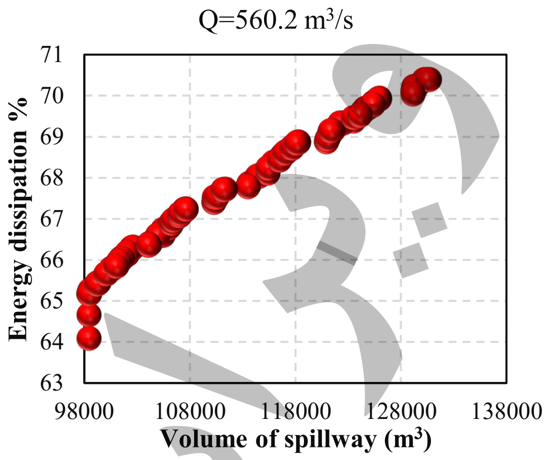

Fig. 4 Optimal Pareto front.

شکل ۴ جبهه پارتو بهینه.

با توجه به اینکه تمامی پاسخ‌های حاصل شده بر روی نمودار پارتو، پاسخ بهینه می‌باشند، لذا برای مقایسه آن‌ها با یکدیگر، تنها پاسخ‌های مربوط به بیشترین، کمترین و پاسخ میانه انتخاب شده و در جدول (۴) اطلاعات مربوط به آن‌ها شامل مقادیر متغیرهای تصمیم و توابع هدف ارائه شده است.

جدول ۴ جزئیات طراحی.

Table 4 Details of design.

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

همانگونه که از جدول فوق مشخص است، عرض سرریز و ارتفاع شوت 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.

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

۴-۳- بهینه‌سازی چند هدفه

در این بخش از تحقیق حاضر، یک مقایسه مختصر برای نشان دادن مطلوبیت پاسخ‌های ارائه شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک بهبود داده شده (IDA) با الگوریتم چندهدفه سنجاقک (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 کارآیی و سنجش عملکرد الگوریتم‌های چند هدفه مذکور بهره گرفته شده است. روابط ریاضی مربوط به معیارهای ارزیابی در ادامه آورده شده است:

$$S=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{P}\left(\bar{d}-d_i\right)^2}$$
$$\boldsymbol{d_i}=\boldsymbol{Min_j}\left(\sum_{k}^{M}\left|\boldsymbol{f_k^i(x)}-\boldsymbol{f_k^j(x)}\right|\right) \qquad (13)$$
$$i=1,2,\ldots,N\ \ j=1,2,\ldots,N-1$$

که $\boldsymbol{f_k^i(x)}$ نشان‌دهنده هدف kام نقطه iام و M تعداد اهداف می‌باشد. اندیس j شمارنده نقاط مجموعه به‌دست آمده می‌باشد که فاصله آن‌ها از نقطه iام همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب di برابر است با حداقل فاصله بین نقطه iام و سایر نقاط. P بیانگر تعداد اعضای مجموعه به‌دست آمده (جبهه نامغلوب) و $\boldsymbol{\bar{d}}$ میانگین diها می‌باشد. هرچه انحراف معیار فواصل، کم‌تر باشد، توزیع جواب به‌دست آمده مناسب‌تر می‌باشد.

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

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

برای مقایسه عادلانه و دستیابی به نتایج استوار، هر کدام از الگوریتم‌ها ۳۰ مرتبه با تعداد جمعیت ۵۰ و حداکثر تکرار ۱۰۰۰ اجرا شد. نتایج حاصل از ۳۰ اجرای مدل در جدول (۵) براساس پارامترهای آماری GD و S ارائه شده است.

طبق جدول (۵) مشخص است که الگوریتم‌های IDA و MOPSO به ترتیب با کم‌ترین میانگین برای پارامتر 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 همه‌الگوریتم‌ها

جدول ۵ پارامترهای آماری.

Table 5 Statistical parameters.

	Algorithm	Mean	Max	Min	SD
GD	IDA	0.097	0.11	0.087	0.01
	DA	0.224	0.301	0.142	0.018
	NSGA-II	0.146	0.256	0.113	0.015
	MOPSO	0.102	0.144	0.090	0.010
S	IDA	0.055	0.099	0.001	0.007
	DA	0.245	0.299	0.005	0.018
	NSGA-II	0.137	0.162	0.002	0.0109
	MOPSO	0.056	0.112	0.001	0.009
	IDA	0.055	0.099	0.001	0.007

در رتبه آخر قرار می‌گیرد. معیار GD میزان همگرایی الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد. همچنین طبق جدول (۸) مشخص است که الگوریتم‌های IDA و MOPSO نسبت به NSGA-II و DA عملکرد بهتری براساس پارامتر S در طراحی چند هدفه سرریزهای پلکانی داشته‌اند.

۶- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی برای حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی منابع 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 محققین قرار گرفته است. در چند دهه اخیر مطالعات زیادی بر روی سرریز پلکانی بخاطر خصوصیات آن نظیر کاهش انرژی جریان در پایین دست انجام شده است. در تحقیق حاضر با استفاده از بهبود یک الگوریتم فراکاوشی نوین تحت عنوان الگوریتم سنجاقک مدلی به‌صورت تک هدفه با هدف بیشنه‌سازی استهلاک انرژی و مدلی دیگر به‌صورت چند هدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت و ساز سرریز پلکانی توسعه داده شد. مدل‌های توسعه داده شده برای طراحی بهینه سرریز سد ساروق مورد استفاده قرار گرفت. مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش عبارتند از:

- بهبود الگوریتم سنجاقک با استفاده از رویکرد پیشنهادی به جای پرواز لِوِی در حل مسائل 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 بیشینه‌سازی 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 کمینه سازی هزینه‌های ساخت و ساز و افزایش استهلاک انرژی نشان داد، رویکرد بهینه سازی چند هدفه می‌تواند مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را ارائه دهد که کمک شایانی به کارفرما در جهت دستیابی به یک طرح اقتصادی بر اساس بودجه در دسترس می‌نماید.
- مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از ۳۰ اجرای الگوریتم پیشنهادی با نسخه اصلی آن و همچنین با دو الگوریتم قدرتمند NSGA-II و MOPSO بیانگر برتری الگوریتم پیشنهادی بر اساس معیارهای پراکندگی و فاصله بود.

لازم به ذکر است در مطالعه حاضر از رویکرد بهینه‌سازی قطعی برای طراحی سرریز پلکانی استفاده شده است. با توجه به تاثیر عدم قطعیت‌ها بر روی عملکرد سازه‌های مهندسی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای طراحی سرریز پلکانی سد ساروق استفاده شده و نتایج حاصل از آن با رویکرد پیشنهادی در این مطالعه از منظر ایمنی سرریز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، برای دستیابی به نتایج بیشتر در مورد عملکرد سرریزهای پلکانی، از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز عددی به موازات الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شود.

۷- 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,Vol.27, No.1, pp.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 Intelligence, 50, 3748-3774.

Ghahramani, B., Bayat, B. (2017). Shape optimization of Siahbishe Dam's stepped spillway using particle swarm optimization, 16th conference of Hydraulic, Shahrekord university, Shahrekord, Iran. (In Persian)

Hosseini, A. (2019). Multi-objective optimization of

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 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)

Sorensen,R.M. (1985). Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.111, No.12, pp.1461-1472

Sori, N., Mojtahedi, A. (2015). Investigation of Effects of the Geometry on Rate of Energy Dissipation of the Flow over the Stepped Spillway using Fuzzy Inference Systems. Journal of Civil and Environmental Engineering, 45.3(80), 25-39.

Zolfaghari, E., Mollazadeh, M., & jafari-asl, J. (2023). Using the three-objective simulator-optimizer approach for the optimal design of the combined stepped-labyrinth spillway using the improved dragonfly optimization algorithm. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 23(89), 98-118.

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.

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.

Jazaeri, P, and Moeini, R. (2016). Using the artificial bee colony in designing of stepped spillway, 11th conference of Hydraulic, 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, 11th international conference of river engineering, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran. (In Persian)

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

ویرایش نشده