

Research Paper

Mehdi Komasi, Masoud Ahmadi. Multi-objective Optimization of Stepped Spillways Using Harris Hawks Optimization Algorithm (Case study: Down Siah Bisheh Dam)Mehdi Komasi^{1*}Masoud Ahmadi²Mehdi lak³

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran, Komasi@abru.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran, Massoud.ahmadi@abru.ac.ir

³ Master student of water engineering and hydraulic structures, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran, m.lak@abru.ac.ir

[10.22125/IWE.2023.376267.1693](https://doi.org/10.22125/IWE.2023.376267.1693)

Received:

December 16, 2022

Accepted:

March 7, 2023

Available online:

December 30, 2023**Keywords:****Stepped Spillway, multi-objective optimization, Metaheuristic algorithms, energy Dissipation.****Abstract**

The spillways, which are built with the purpose of passing the excess water of the dam, include a huge part of the dam construction costs. Step spillways are an example of these massive hydraulic structures that, in addition to passing the excess water of the dams, also cause the consumption of flow energy downstream of the dams. Considering the complex hydraulics of the flow on these spillways and the presence of nonlinear limitations, their optimal design is a very difficult problem. In this study, a new framework based on Metaheuristic algorithms, including Harris's hawk Optimization (HHO), gray wolf Optimizer (GWO), invasive weeds Optimization (IWO) and water cycle Algorithm (WCA), considering the minimization of the amount of concrete used in spillway and the maximization of energy dissipation in Spillway toe were developed as objective functions to design these spillways. Algorithms' performance was first checked and validated on basic functions. Then, to achieve the objectives of the study, the spillway of the Siah Bisheh dam was selected as the study dam and the efficiency of the developed models based on the four mentioned algorithms was evaluated on it. The results showed that, in addition to improving the current spillway design in terms of construction costs and dissipation energy, the HHO-based model has good accuracy and convergence compared to other Metaheuristic algorithms. As the comparison of the design obtained from HHO with the current spillway design showed, in addition to a 35% reduction in the volume of concrete consumed, the amount of energy dissipation increased by 15%, which indicates the success of the design model developed in a multi-objective manner using HHO.

Corresponding Author: Mehdi Komasi

Address: Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran, **Email:** Komasi@abru.ac.ir
Tel: 09166624180

1. Introduction

The spillway is the most important component of a dam and the guarantor of its health, which includes about 20 to 80 percent of the total costs of dam construction (Ouhadi and Jafari Asl, 2020). More than 1/3 of damaged dams around the world were due to insufficient spillway capacity in flood conditions (Ferdowsi et al. 2019). The stepped spillway includes steps that start near the top of the spillway and continue to the downstream of the spillway (Roshangar et al. 2014). High energy dissipation is one of the most important responsibilities of this type of spillway, so that as the water passes through successive steps, a large part of the flow's kinetic energy is removed (Salmasi et al. 2018). An overview of the studies conducted in the field of stepped spillways showed that the use Metaheuristic optimization algorithms compared to other approaches such as numerical and laboratory modeling, in addition to reducing the costs required for conducting research, also leads to more stable results (Heidari et al., 2020). Also, at yet, the new algorithm of Harris's hawk Optimization (HHO) has not been used for the optimization of spillways. Therefore, in this research, the optimization of stepped spillways is done with this algorithm and the results are compared with the results of (WCA), (IWO) and (GWO) algorithms.

2. Materials and Methods

In the present study, the design of stepped spillways has been considered as a multi-objective optimization problem. For this purpose, minimization of the volume of concrete used in the spillway body and maximization of energy dissipation on it are considered as objective functions. It should be noted that the results of solving multi-objective optimization problems are presented as sets of answers on the Pareto chart Harris's hawk Optimization Algorithm

This algorithm, like other Metaheuristic algorithms, is population-based and creates initial solutions randomly. Then, at each step of the algorithm iteration, the search agents (hawks) update their position using the search operators, transition from the search step to the exploration step, and explore the best answer (Heydari et al. 2019).

3. Results

The results have shown that 222782.4 m³ of concrete have been used in the implemented design of the spillway, which has 60.1% energy dissipation. It is clear that comparing the answers obtained from the optimal multi-objective design approach with the current spillway design, in addition to reducing the effective volume of the spillway concrete, the amount of energy dissipation has also increased. In such a way that the HHO algorithm has been able to provide the lowest design cost of 143931.3 m³ of concreting volume, in addition to reducing the concreting volume by 78851 m³, it has increased the percentage by 15%. In comparing the desirability of the answers found by the algorithms, the IWA algorithm has provided favorable results compared to other algorithms, so that the average answer found in IWA has a volume equal to 240817.2 m³ with 76.37% energy dissipation, which is compared to the most expensive plan. HHO has reduced 26330.4 m³ of concreting volume with an equal amount of energy dissipation. On the other hand, the plans obtained from HHO have a different range that the employer can make a suitable decision based on the available budget. Considering that the designs resulting from multi-objective optimization have a good advantage over the current design, it is clear that the cost and energy consumption criteria are well taken into account in the current spillway design.

4. Discussion and Conclusion

The results showed that compared to other three algorithms, HHO has good convergence and dispersion in solving the complex problem of stepped spillways. By comparing one of the responses on the Pareto chart obtained from HHO with the existing Spillway design, it was found that HHO design has been able to reduce the volume of concreting by 35%, and has increased the amount of energy dissipation by 15%, which indicates the effectiveness of the presented approach is in the design of stepped spillways.

5. Six important reference

- 1) Ferdowsi, A., S. Farzin, S.F. Mousavi, and H. Karami. 2019. Hybrid Bat and Particle Swarm Algorithm for Optimization of Labyrinth Spillway Based on Half and Quarter Round Crest Shapes. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 66: 209–217
- 2) Heidari, A.A., S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, & H. Chen. 2019. Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97: 849-872.
- 3) Heidari, A.A., Chen, H., Yang, Ch., and Zhao, X. 2020. An efficient double adaptive random spare reinforced whale optimization algorithm. *Expert System with applications*, 154(15).
- 4) Ohadi, S., and J. Jafari-Asl. 2021. Multi-Objective Reliability-Based Optimization for Design of Trapezoidal Labyrinth Weirs. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 77: 1-29.
- 5) Salmasi, F. and Samadi, A. 2018. Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways. *Applied Water Science*, 8(229): 1–11. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0877-5>
- 6) Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. and Shiri, J. 2014. Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*, 508(16): 254–265, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.053>.



بهینه‌سازی چند هدفه سرریزهای پلکانی با استفاده از الگوریتم نوین شاهین هریس (مطالعه موردی: سد سیاه‌بیشه پایین)

مهدی کماسی^{۱*}، مسعود احمدی^۲، مهدی لک^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

مقاله پژوهشی

چکیده

سرریزها که با هدف عبور آب مازاد سد بر روی سدها ساخته می‌شوند، بخش مهمی از هزینه‌های احداث سد را شامل می‌شوند. سرریزهای پلکانی نمونه‌ای از این سازه‌های هیدرولیکی حجیم می‌باشند که علاوه بر عبور دادن آب اضافی سدها، موجب استهلاک انرژی جریان در پائین دست سدها نیز می‌شوند. با توجه به هیدرولیک پیچیده جریان بر روی این سرریزها و وجود محدودیت‌های غیرخطی، طراحی بهینه آن‌ها یک مسئله بسیار سخت می‌باشد. در این پژوهش یک چارچوب نوین بر اساس الگوریتم‌های فراکاوشی، شامل شاهین هریس (HHO)، گرگ خاکستری (GWO)، علف‌های هرز مهاجم (IWO) و چرخه آب (WCA) با در نظر گرفتن کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی سرریز و بیشینه‌سازی میزان استهلاک در پنجه سرریز به عنوان توابع هدف، برای طراحی این سرریزها توسعه داده شد. عملکرد الگوریتم‌ها، ابتدا بروی توابع پایه مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس، برای دستیابی به اهداف مطالعه، سرریز سد سیاه‌بیشه به عنوان سد مورد مطالعه انتخاب شده و کارایی مدل‌های توسعه داده شده بر اساس چهار الگوریتم مذکور بر روی آن ارزیابی گردید. نتایج نشان داد، مدل مبتنی بر HHO علاوه بر بهبود طرح سرریز کنونی از نظر هزینه‌های احداث و انرژی مستهلک شده، در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی نیز از دقت و همگرایی مناسبی برخوردار است. به گونه‌ای که مقایسه طرح به دست آمده از HHO با طرح اجرا شده سرریز نشان داد، علاوه بر کاهش ۳۵ درصدی حجم بتن مصرفی، میزان استهلاک انرژی ۱۵٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده موفقیت مدل طراحی توسعه داده شده به صورت چندهدفی و با استفاده از HHO می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریزهای پلکانی، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های فراکاوشی، استهلاک انرژی، سد سیاه‌بیشه

^۱ دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)، ایران. ایمیل: komasi@abru.ac.ir

^۲ استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)، ایران. ایمیل: massoud.ahmadi@abru.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)، ایران. ایمیل: m.lak@abru.ac.ir

مقدمه

سدها از مهم‌ترین زیرساخت‌های هر کشوری می‌باشند که با اهداف ذخیره آب و کنترل سیلاب‌های بالادست حوضه‌ها احداث می‌شوند. بنابراین، احداث ایمن و بهره‌برداری صحیح از این سازه‌های هیدرولیکی مهم از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. سرریز، مهم‌ترین اجزای یک سد و ضامن سلامتی آن می‌باشد که حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد هزینه‌های کل ساخت و ساز سدها را شامل می‌شود (Ouhadi and Jafari Asl, 2020).

طبق گزارشات ارائه شده توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) بیش از ۳۰ درصد سدهای خراب شده در سرتاسر جهان به دلیل ناکافی بودن ظرفیت سرریز در شرایط سیلابی بوده است (Ferdowsi et al. 2019). از این رو طراحی و اجرای بهینه و ایمن سرریزها در پروژه‌های مربوط به احداث سدها به عنوان یکی از چالش‌های مهم در پیش روی مهندسان هیدرولیک به‌شمار می‌رود. سرریزهای پلکانی، یک نمونه موثر از سرریزها می‌باشند که علاوه بر افزایش پایداری سدها با عبور سیلاب از بالادست جریان به پائین‌دست، موجب استهلاک انرژی جریان در پائین‌دست می‌شوند. این ویژگی خاص سرریزهای پلکانی، موجب حذف هزینه‌های احداث سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پائین‌دست سد می‌گردد (Sohrabi et al. 2019).

با توجه به اهمیت مسئله، در سال‌های گذشته مطالعات متعددی اعم از آزمایشگاهی و عددی به‌منظور مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی سرریزهای پلکانی صورت گرفته است. پگرام و همکاران (۱۹۹۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی اثر هندسه پله‌های سرریز بر روی میزان استهلاک انرژی در پائین‌دست سرریز پرداختند. نتایج نشان داد، کاهش شیب سرریز، موجب افزایش چشمگیر میزان استهلاک انرژی می‌گردد (Pegram et al. 1999).

اوتسو و همکاران (۲۰۰۴) در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، به بررسی خصوصیات جریان رویه‌ای در سرریزهای پلکانی با زاویه شیب کانال بین ۵/۷ تا ۵۵ درجه پرداختند. نتایج حاکی از این بود که میزان استهلاک انرژی

در پائین‌دست سرریز، تابعی از شیب کانال و نسبت ارتفاع به عمق بحرانی در جریان یکنواخت و علاوه بر موارد فوق تابعی از ارتفاع سقوط نسبی سرریز در جریان غیریکنواخت می‌باشد (Ohtsu et al. 2004).

چتیلو و جوردی (۲۰۰۴) به بررسی عددی رفتار هیدرولیکی سرریزهای پلکانی پرداختند. نتایج، بیان‌گر اهمیت تعداد پله‌های سرریز پلکانی بر روی افزایش میزان استهلاک انرژی در پائین‌دست سرریز بود. به‌گونه‌ای که با افزایش تعداد پله‌ها، انرژی باقی‌مانده در پای سرریز افزایش می‌یابد (Chetila and Jurdi, 2004). حداد و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به طراحی سرریزهای پلکانی با هدف کمینه نمودن حجم بتن مصرفی در اجرای سرریز با یافتن بهترین ترکیب متغیرهای طراحی و تاثیر گذار پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد، الگوریتم ژنتیک توانایی بسیار بالایی در بهینه‌سازی ابعاد سرریزهای پلکانی در مقایسه با روش‌های کلاسیک دارد (Haddad et al. 2005).

اژدری‌مقدم و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای با استفاده از یک مدل عددی، تاثیر دبی، شیب سرریز، نوع آرایش، تعداد پله‌ها و زبری پله‌های سرریز پلکانی را بر روی میزان انرژی باقی‌مانده در پای سرریز مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، از اطلاعات مربوط به ۱۱۲ مدل آزمایشگاهی و واقعی سرریز در محیط نرم‌افزار فلوئنت استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد، دبی و شیب سرریز نسبت به سایر پارامترها، تاثیر بیشتری بر روی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی دارند (Azhdari Moghadam et al. 2011).

شجاع و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی سرریزهای پلکانی توسعه دادند. عملکرد مدل توسعه داده شده بر روی سرریز سد ساروق مورد بررسی قرار گرفت. هدف از توسعه مدل مذکور، یافتن مقادیر بهینه تعداد، ارتفاع و شیب پله‌های سرریز پلکانی به‌گونه‌ای که منجر به حداکثر شدن مقدار استهلاک انرژی در پائین‌دست سرریز گردد. استفاده از مدل



سلماسی و ازگر (۲۰۱۴) استفاده نمودند. نتایج بررسی آنان نشان داد که الگوریتم M5 دارای دقت بیش‌تری نسبت به MLPNN است (Parsaie and Haghighi, 2019). حسنوند و همکاران (۲۰۱۹) به‌منظور انتخاب بهینه سرریز برای سد قشلاق ایران از الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی (HSA) استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که سرریز آزاد ریزشی به لحاظ هزینه و زمان ساخت، انتخاب بهتری است (Hasanvand et al. 2019). قربانی موسلو و همکاران (۲۰۱۹) از روش تبدیل فازی (FTM) جهت بهینه‌سازی ابعاد سرریز پلکانی سد جره ایران استفاده نمودند (Ghorbani and Mooselu, 2019).

جزایری و معینی (۲۰۲۰) جهت کیمنه نمودن هزینه ساخت سرریز سد تهری در هند، بررسی چهار الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل توسعه‌یافته، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جستجوی گرانشی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده نمودند. بررسی نتایج حاصله از تحقیق نشان داد با استفاده از الگوریتم‌های GA، GSA، PSO و ABC نتایج به ترتیب ۱۶/۱۶، ۱۶/۴، ۱۷/۷۳ و ۱۷/۶۳ درصد بهبود پیدا می‌کند (Jazaery and Moeini, 2020).

مطالعه دیگری که توسط سهرابی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه برای تعیین تعداد، ابعاد و شیب بهینه پله‌های سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه صورت گرفت، بیان‌گر دقت بالای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه در طراحی سرریزهای پلکانی بود (Sohrabi et al. 2020).

سلماسی و آبراهام (۲۰۲۱) به‌منظور بهینه‌سازی سرریز پلکانی سد ساروق و جهت بیشینه نمودن میزان استهلاك انرژی، از الگوریتم‌های ژنتیک استفاده نمودند. بررسی نتایج حاصله نشان داد که در طرح بهینه پیشنهادی، پله‌ها باعث افزایش میزان استهلاك انرژی می‌شوند (Salmasi and Abraham, 2021).

درخشان‌علمدارلو و اژدری‌مقدم (۱۳۹۷) با استفاده از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی و الگوریتم کرم شب‌تاب، مدلی برای طراحی بهینه سرریزهای پلکانی توسعه دادند. در این مطالعه، حداکثرسازی استهلاك انرژی به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی و تعداد، ابعاد و شیب

توسعه داده شده منجر به طراحی یک سرریز پلکانی با حجم بتن‌ریزی کم‌تر نسبت به سرریز موجود شد. همچنین میزان استهلاك انرژی بر روی طرح جدید پیشنهادی در مقایسه با سرریز موجود، به‌طور چشمگیری افزایش یافت. در پایان مطالعه نیز انجام آنالیز حساسیت جهت تعیین پارامترهای موثر بر روی استهلاك انرژی جریان صورت گرفت که مشخص شد استهلاك انرژی جریان در پای سرریز، مستقل از ارتفاع پله‌ها بوده و با افزایش شیب سرریز، کاهش می‌یابد (Shoja et al. 2012).

سلماسی و اروناقی (۲۰۱۳) در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، به بررسی اثر تغییرات شیب پله‌های سرریز و عدد رینولدز جریان بر روی میزان استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی پرداختند. نتایج نشان داد میزان استهلاك انرژی در پائین‌دست سرریز با کاهش شیب پله‌ها، افزایش و با کاهش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد (Salmasi and Arvanghi, 2013).

سوری و مجتهدی (۲۰۱۵)؛ طبری و توکلی (۲۰۱۶) برای مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی سرریزهای پلکانی از نرم‌افزار عددی Flow-3D بهره بردند. نتایج هر دو مطالعه حاکی از این بود که با افزایش میزان دبی، میزان انرژی باقی‌مانده در پای سرریز کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که با افزایش تعداد پله‌ها و شیب معکوس هر پله، میزان استهلاك انرژی افزایش می‌یابد (Sori and Mojtahedi, 2015; Tabari and Tavakoli, 2016).

موسلو و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای طراحی چندمنظوره سرریزهای پلکانی پرداختند. در این مطالعه از توانمندی الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه در ارتباط با مدل عددی Flow-3D بهره برده شد. نتایج حاکی از کارایی بالای مدل در بهینه‌سازی همزمان حجم بتن مصرفی در اجرای سرریز و افزایش میزان استهلاك انرژی در پای سرریز بود (Mooselu et al. 2019). پارسایی و حقیقی (۲۰۱۹) به‌منظور برآورد میزان استهلاك انرژی بر روی سرریزهای پلکانی، از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (MLPNN) و الگوریتم M5 و از داده‌های ارائه شده توسط



به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که نتایج حاصل از حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، به‌صورت مجموعه‌ای از پاسخ‌ها بر روی نمودار پارتو ارائه می‌شود. در این بخش، جزئیات فرمول‌بندی طراحی چند هدفه سرریزهای پلکانی شامل توابع هدف، متغیرهای تصمیم، قیود و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی HHO تشریح شده است.

هیدرولیک سرریزهای پلکانی

نوع جریان ایجاد شده بر روی سرریزهای پلکانی وابسته به ارتفاع پله‌ها، زاویه کانال، دبی جریان، عرض، ارتفاع کل سد و شکل تاج سرریز می‌باشد. در حالت کلی، نوع جریان ایجاد شده بر روی سرریزهای پلکانی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود (Shoja et al. 2012):

- ۱- **رویه‌ای:** در این حالت، جریان به‌صورت متغیر تدریجی برقرار بوده انتهای پله‌ها از طریق یک بستر کاذب آب به یکدیگر وصل می‌شوند. عامل اصلی استهلاک انرژی در این شرایط، ایجاد گردابی در زیر بسترهای کاذب می‌باشد.
- ۲- **ریزشی:** در این حالت، جریان از فواره‌های متوالی تشکیل می‌شود که معمولاً در سرریزهای با دبی کم و ارتفاع پله‌های بزرگ ایجاد می‌شود. عامل اصلی استهلاک انرژی در این نوع از جریان، تشکیل پرش‌های هیدرولیکی کامل یا ناقص می‌باشد.
- ۳- **انتقالی:** در این نوع جریان نیز یک شرایط بینابینی میان جریان ریزشی و رویه‌ای برقرار است که درصد قابل توجهی هوا با آن مخلوط شده و و سبب پدید آمدن یک حالت ناپایدار می‌گردد.

عموماً، طراحی سرریزهای پلکانی تحت شرایط جریان رویه‌ای صورت می‌گیرد. لذا در این تحقیق نیز با در نظر گرفتن جریان حاکم بر روی سرریز به‌صورت رویه‌ای، به بهینه‌سازی سرریز پلکانی پرداخته می‌شود. جریان رویه‌ای، ممکن است به دو صورت شبه‌یکنواخت و غیریکنواخت بر

پله‌ها به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شد. همچنین انجام آنالیز حساسیت برای مشخص نمودن پارامترهای تاثیرگذار بر روی استهلاک انرژی نشان داد، افزایش دبی جریان منجر به کاهش استهلاک انرژی در پائین‌دست سرریز می‌شود (درخشان‌علمدارلو و ازدری‌مقدم، ۱۳۹۷).

بررسی اجمالی مطالعات انجام شده در زمینه بررسی رفتار هیدرولیکی و طراحی سرریزهای پلکانی نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در مقایسه با سایر رویکردها نظیر مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی، علاوه بر کاهش هزینه‌های مورد نیاز جهت انجام پژوهش، موجب دستیابی به نتایج استوارتر نیز می‌گردد. علاوه بر این، در چند سال اخیر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی متعددی برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده‌اند. الگوریتم شاهین هریس یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی جدید می‌باشد که توسط حیدری و همکاران (۲۰۲۰) ارائه شد و به سرعت به‌عنوان یک بهینه‌سازی موثر برای حل مسائل پیچیده مهندسی مورد توجه قرار گرفت. از این رو هدف از مطالعه حاضر، توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس الگوریتم چندهدفه^۱ HHO برای طراحی سرریزهای پلکانی می‌باشد. بررسی تحقیقات نشان می‌دهد تاکنون از HHO برای بهینه‌سازی سرریزها استفاده نشده است. همچنین عملکرد این الگوریتم، با الگوریتم‌های قدرتمند چرخه آب (WCA^۲)، الگوریتم علف‌های هرز (IWO^۳) و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO^۴) مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر، طراحی سرریزهای پلکانی به‌صورت یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور، کمینه‌نمودن حجم بتن مصرفی بدنه سرریز و بیشینه‌نمودن میزان استهلاک انرژی بر روی آن

² Water Cycle Algorithm

³ Invasive Weed Algorithm

⁴ Grey Wolf Optimizer

¹ Harris Hawks Optimization



بستر کاذب باشد یا خیر دو نوع پروفیل A و B تشکیل می‌گردد. پروفیل نوع A برای مقادیر کوچک نسبت $\frac{h}{y_c}$ ایجاد می‌گردد و با افزایش آن، پروفیل سطح آب تا حدی موازی قسمت افقی پله‌ها می‌گردد که به آن پروفیل نوع B می‌گویند. بر این اساس می‌توان مقدار انرژی باقی‌مانده جریان E_{res} در پائین‌دست سرریز را از روابط ۳ و ۴ محاسبه نمود (Ohtsu et al. 2004):

پروفیل نوع A

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_U = \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{1/3} \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{-2/3} \quad (3)$$

پروفیل نوع B

$$\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_U = \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{1/3} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{-2/3} \quad (4)$$

که f معرف ضریب اصطکاک سرریز می‌باشد که تابعی از θ و نسبت ارتفاع نسبی پله‌ها $\frac{h}{y_c}$ می‌باشد و از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$0.1 \leq \frac{h}{y_c} \leq 0.5 \quad \text{اگر}$$

$$f = f_{max} - A \left(0.5 - \frac{h}{y_c}\right)^2 \quad (5)$$

$$0.5 \leq \frac{h}{y_c} \leq \left(\frac{h}{y_c}\right)_s \quad \text{اگر}$$

$$f = f_{max} \quad (6)$$

که f_{max} حداکثر ضریب اصطکاک و A ضریبی است که از روابط ۷ تا ۱۰ محاسبه می‌شود (Ohtsu et al. 2004):

$$5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ \quad \text{اگر}$$

$$A = -1.7 \times 10^3 \theta^2 + 6.4 \times 10^2 \theta - 1.5 \times 10^{-1} \quad (7)$$

$$f_{max} = -4.2 \times 10^{-4} \theta^2 + 1.6 \times 10^{-2} \theta + 3.2 \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad \text{اگر}$$

سرریز حاکم گردد که با توجه به نوع آن، مقدار استهلاک انرژی در پنجه سرریز محاسبه می‌گردد (Shoja et al. 2012).

نوع جریان یکنواخت و غیریکنواخت در شرایط رویه‌ای بر اساس ارتفاع سقوط نسبی $\left(\frac{H_e}{y_c}\right)$ طبق رابطه شماره ۱ مشخص می‌گردد.

$$\frac{H_e}{y_c} = (-1.21 \times 10^{-5} \theta^3 + 1.6 \times 10^{-3} \theta^2 - 7.13 \times 10^{-2} \theta + 1.3) \quad (1)$$

$$10^{-2} \theta + 1.3)^{-1} \left\{ 5.7 + 6.7 \exp\left(-6.5 \frac{h}{y_c}\right) \right\}$$

که θ شیب کانال سرریز، y_c عمق بحرانی جریان، h ارتفاع پله و H_e بار آبی روی سرریز می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده توسط اهوتسو و همکاران (۲۰۰۴):

اگر $\frac{H_e}{y_c} \geq \frac{H_{dam}}{y_c}$ ، جریان از نوع شبه‌یکنواخت و اگر

$\frac{H_e}{y_c} \leq \frac{H_{dam}}{y_c} \leq 0.5$ ، جریان از نوع غیر یکنواخت می‌باشد.

در روابط اشاره شده، H_{dam} بیان‌گر ارتفاع سرریز است. پس از تعیین نوع جریان، می‌توان میزان استهلاک انرژی را طبق رابطه ۲ محاسبه نمود:

• حالت غیر یکنواخت:

$$\frac{E_{res}}{y_c} = 1.5 + \left[\left(\frac{E_{res}}{y_c}\right)_U - 1.5 \right] \left[1 - \left(1 - \frac{H_{dam}}{H_e}\right)^m \right] \quad (2)$$

که $m = -\frac{\theta}{25} + 4$ و θ بر حسب درجه می‌باشد.

• حالت شبه‌یکنواخت:

در شرایط شبه‌یکنواخت جریان رویه‌ای، وضعیت جریان

بر اساس تغییرات شیب و پارامتر بدون بعد $\frac{h}{y_c}$ تغییر

می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در شیب کانال سرریز

$19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ ، پروفیل سطح آب ارتفاع نسبی پله $\frac{h}{y_c}$

مستقل بوده و سطح آب تقریباً موازی با بستر کاذب می‌باشد که این حالت پروفیل نوع A نامیده می‌شود.

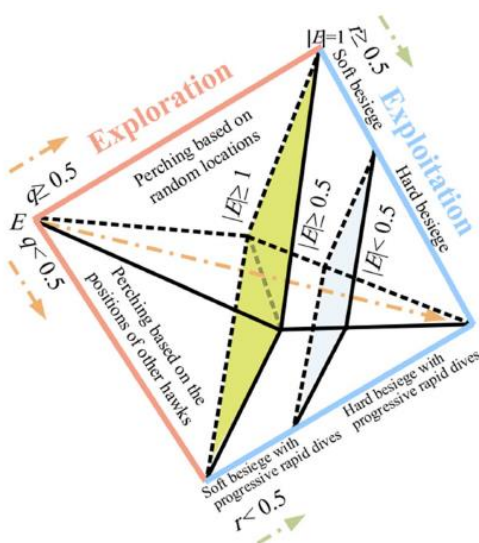
در حالت شیب کانال سرریز در محدوده

$5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$ بسته به این که پروفیل سطح آب به موازات



الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO)

الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO) توسط حیدری و همکاران (۲۰۱۹) با تقلید از رفتار شاهین هریس در تعقیب و شکار خرگوش در طبیعت برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده است. این الگوریتم نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی مبتنی بر جمعیت بوده و راه‌حل‌های اولیه را ابتدا به صورت تصادفی ایجاد می‌کند. سپس در هر مرحله از تکرار الگوریتم، عوامل جستجو (شاهین‌ها) موقعیت خود را با استفاده از عملگرهای جستجو، انتقال از مرحله جستجو به مرحله اکتشاف و اکتشاف بهترین پاسخ به روزرسانی می‌کنند. شکل ۱ به صورت کلی، مراحل اصلی الگوریتم HHO را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مراحل کلی بهینه‌سازی در HHO (Heidari et al. 2019)

پس از تولید پاسخ‌های اولیه به صورت تصادفی توسط HHO، فازهای اصلی الگوریتم اجرا می‌شود. اولین فاز اکتشاف می‌باشد که هدف این مرحله، تعیین دقیق انتظار، جستجو و کشف طعمه مورد نظر می‌باشد. فاز اکتشاف با استفاده از رابطه ۱۶ به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود (Heidari et al. 2019):

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 |X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3 (LB + r_4 (UB - LB)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

$$A = 0.452 \quad (9)$$

$$f_{max} = 2.32 \times 10^{-5} \theta^2 + 2.75 \times 10^{-3} \theta + 2.31 \times 10^{-1} \quad (10)$$

طراحی سرریزهای پلکانی

در تحقیق حاضر، مسئله طراحی سرریزهای پلکانی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف کمینه‌سازی حجم بتن مصرفی و بیشینه‌سازی میزان استهلاک انرژی به صورت روابط ۱۱ تا ۱۵ فرموله شده است.

Objective functions:

$$\max(f_1) = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5 y_c} \quad (11)$$

$$\min(f_2) = \nabla_t$$

Subject to:

$$0.25 \leq \left(\frac{h}{y_c} \right) \leq \left(\frac{h}{y_c} \right)_s \quad (12)$$

$$Q \leq Q_d$$

که:

$$\nabla_t = B \times h \sum_{i=1}^N (L - l_i) \quad (13)$$

$$Q = C \times W \times H_t \left(\frac{2}{3} \right) \quad (14)$$

$$\left(\frac{h}{y_c} \right)_s = \frac{7}{6} (\tan \theta)^{\frac{1}{6}} \quad (15)$$

که در روابط فوق، ∇_t حجم بتن سرریز، B عرض سرریز، L طول سرریز، h ارتفاع سرریز، l_i طول کف هر پله و N تعداد پله‌ها می‌باشند. همچنین، C ضریب تخلیه و H_t بار آبی روی سرریز می‌باشد.

لازم به ذکر است که متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی، شیب کانال سرریز (θ) ، عرض سرریز (B) ، ارتفاع پله (h) ، ارتفاع سرریز (H_{dam}) و بار آبی H_t می‌باشد.



$$X(t+1) = \Delta X(t) - E |JX_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (19)$$

$$\Delta X(t) = X_{rabbit}(t) - X(t) \quad (20)$$

که ΔX اختلاف میان بردار موقعیت طعمه و مکان فعلی شاهین است. $J = 2(1 - r_5)$ قدرت پرش خرگوش را در تکرارهای الگوریتم نشان می‌دهد و r_5 یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک است (Heidari et al. 2019).

اگر وضعیت محاصره سخت و $r \geq 0.5$ حاکم باشد، نشان‌دهنده این است که طعمه به شدت خسته شده و انرژی فرار کمی دارد که موجب می‌شود شاهین به سختی خرگوش را محاصره کرده و سرانجام آن را شکار کند. در این شرایط موقعیت جدید شاهین‌ها با استفاده از رابطه ۲۱ به‌روزرسانی می‌شود:

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E |\Delta X(t)| \quad (21)$$

این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که مراحل تکرارهای الگوریتم، به حداکثر مقدار تعریف شده آن برسد.

با توجه به این که هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی عملکرد HHO در طراحی چند هدفه سرریزهای پلکانی می‌باشد، الگوریتم تک هدفه HHO با استفاده از دو عملگر رتبه‌بندی غیرمغلوب و فاصله ازدحامی به یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل گردیده است. در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برخی از پاسخ‌های یافته شده، بر سایر پاسخ‌ها غلبه دارند. در واقع، در برخی از پاسخ‌ها تمامی تابع هدفها مطلوب‌تر از مقادیر همان توابع هدف برای دیگر راه‌حل‌ها می‌باشد. اما در مقابل ممکن است تنها برخی از مقادیر تابع هدف برای یک پاسخ، مطلوب‌تر از مقادیر همان تابع هدف برای پاسخ دیگر باشند و این شرایط برای تمامی توابع هدف وجود نداشته باشد. بنابراین می‌توان گفت که پاسخ X_1 بر پاسخ X_2 غالب است، و تنها اگر پاسخ X_1 در هیچ تابع هدفی، مقادیری بدتر از پاسخ X_2 نداشته باشد و حداقل در یک تابع هدف مطلوب‌تر از پاسخ X_2 باشد. در حقیقت، این تعریف مفهوم غلبه پارتو می‌باشد که به‌صورت رابطه ۲۲ بیان می‌شود (Jangir and Jangr, 2017):

که X_{rabbit} بیانگر موقعیت طعمه (خرگوش)، t نشان‌دهنده هر تکرار الگوریتم، X_m موقعیت میانگین شاهین‌ها، X_{rand} موقعیت تصادفی انتخاب شده شاهین‌ها، r_1, r_2, r_3 و q اعداد تصادفی تولید شده در هر مرحله در بازه صفر و یک می‌باشد. UB و LB به ترتیب حد بالا و پائین متغیرهای تصمیم می‌باشد. لازم به ذکر است که موقعیت میانگین شاهین‌ها به‌صورت رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (17)$$

که X_i موقعیت شاهین‌ها و N تعداد آن‌ها می‌باشد. پس از فاز جستجو، مرحله استخراج می‌باشد. در این مرحله، انرژی خرگوش مدل‌سازی می‌شود. بر این اساس که در هر تکرار، طعمه به دلیل فرار کردن مقداری از انرژی خودش را از دست می‌دهد، برای این منظور از رابطه ۱۸ برای مدل‌سازی انرژی خرگوش استفاده می‌شود (Heidari et al. 2019):

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (18)$$

که E_0 انرژی اولیه عددی در بازه -1 و 1 که به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، T حداکثر تکرار الگوریتم و E انرژی طعمه می‌باشد. شاهین‌ها سعی می‌کنند با تشدید روند محاصره، خرگوش خسته شده را به سادگی شکار کنند. برای مدل‌سازی این فرآیند، از پارامتر E به‌عنوان معیار مشخص‌کننده محاصره نرم و سخت استفاده می‌شود. فاز بعدی الگوریتم، مرحله بهره‌برداری می‌باشد، در این مرحله بسته به انرژی باقیمانده خرگوش، شاهین‌ها ممکن است یک محاصره نرم و یا سخت برای آن در نظر بگیرند. اگر $|E| < 0.5$ محاصره نرم و اگر $|E| \geq 0.5$ محاصره سخت رخ می‌دهد.

در محاصره نرم اگر $r \geq 0.5$ باشد، طعمه هنوز انرژی کافی را دارد و سعی می‌کند با پرش‌های گمراه‌کننده فرار کند. شاهین‌ها آن را محاصره نموده و سعی می‌کنند با خسته‌تر کردن خرگوش آن را با یک حرکت غافلگیرانه شکار کنند. این مدل‌سازی به‌صورت روابط ۱۹ و ۲۰ بیان می‌شود:



معیارهای مقایسه

در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس برازندگی جواب‌های به دست آمده برای تابع هدف صورت می‌گیرد، اما در الگوریتم‌های چندهدفه، با توجه به این‌که با دسته‌ای از پاسخ‌ها روبرو هستیم، استفاده از برازندگی تابع هدف به‌عنوان معیار مقایسه منطقی نمی‌باشد. از این رو، برای ارزیابی کارایی و سنجش عملکرد الگوریتم‌ها، از معیارهایی نظیر معیار فاصله (رابطه ۲۶) و معیار پراکندگی (رابطه ۲۷) استفاده می‌شود که در این مطالعه نیز از آن‌ها بهره برده شده است (Parmakumar et al. 2020).

$$d_i = \text{Min}_j \left(\sum_k^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)| \right) \quad (25)$$

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

که $f_k^i(x)$ نشان‌دهنده هدف k ام نقطه z ام و M : تعداد اهداف می‌باشد. اندیس z ، شمارنده نقاط مجموعه به‌دست آمده می‌باشد که فاصله آن‌ها از نقطه z ام همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب d_i برابر است با حداقل فاصله بین نقطه z ام و سایر نقاط. سپس با استفاده از رابطه معیار S که در واقع فاصله است، به‌صورت رابطه ۲۶ محاسبه می‌گردد (Parmakumar et al. 2020):

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^P (\bar{d} - d_i)^2} \quad (26)$$

که در رابطه بالا P تعداد اعضای مجموعه به‌دست آمده (جبهه نامغلوب)، \bar{d} میانگین فواصلی که با استفاده از رابطه ۲۵ محاسبه شده است، می‌باشد. هرچه انحراف معیار فواصل، کم‌تر باشد؛ توزیع جواب به‌دست آمده، مناسب‌تر می‌باشد.

مقدار پراکندگی پاسخ‌های موجود بر روی نمودار پارتو، با استفاده از رابطه ۲۷ محاسبه می‌شود (Parmakumar et al. 2020):

$$GD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (27)$$

$$\alpha < \beta \Leftrightarrow f_i(\alpha) \leq f_i(\beta) \quad (22)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \wedge \exists i : f_i(\alpha) \leq f_i(\beta)$$

بر این اساس، می‌توان اظهار نمود که پاسخ‌هایی که بر سایر پاسخ‌ها غالب هستند، پاسخ‌های مناسبی برای مسئله می‌باشند.

پس از به‌دست آمدن جبهه پارتو توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، رتبه بندی پاسخ‌های مغلوب صورت می‌گیرد. به این‌صورت که بر تمامی پاسخ‌ها بر اساس تعداد افرادی که بر آن غالب هستند رتبه اختصاص داده می‌شود. بدین ترتیب افرادی که توسط هیچ‌کدام از افراد دیگر مغلوب نشده‌اند در جبهه‌ی اول قرار می‌گیرند، سپس جمعیت جبهه اول کنار گذاشته می‌شود و برازندگی سایر افراد بررسی می‌شود و به همین ترتیب جبهه‌های دوم الی آخر تشکیل می‌شود. عملکرد دیگری که برای تبدیل الگوریتم HHO به یک الگوریتم چندهدفه استفاده شده است، فاصله ازدحامی می‌باشد. این فاصله در واقع فاصله افراد قرار گرفته در یک جبهه نسبت به هم را نشان می‌دهد. پس از مرتب سازی جمعیت، به افرادی که دارای بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف فاصله ازدحامی بی‌نهایت اختصاص داده می‌شود و برای سایر افراد به‌صورت رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود (Jangir and Jangir, 2017):

$$cd_k(x) = \frac{|Z_k^{i+1} - Z_k^{i-1}|}{Z_k^{max} - Z_k^{min}} \quad (23)$$

که Z_k^{i+1} و Z_k^{i-1} مقادیر همسایه‌های فرد x برای تابع هدف k ام می‌باشد. به همین ترتیب این روند برای سایر توابع هدف نیز انجام می‌شود. در نهایت فاصله ازدحامی برای هر فرد با استفاده از رابطه ۲۴ به‌دست می‌آید:

$$cd_k(x) = \sum_{k=1}^m cd_k(x) \quad (24)$$

که $cd_k(x)$ فاصله ازدحامی برای هر فرد می‌باشد.



ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه استفاده می‌شود، استفاده شد. این توابع که با نام ZDT شناخته می‌شوند، از مجموعه مثال‌های غیرخطی و مقید بهینه‌سازی به‌شمار می‌روند (Lee et al. 2022). جزئیات بیش‌تر در رابطه با توابع پایه مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

که در آن GD فاصله نسلی، d_i برابر است با حداقل فاصله بین نقطه i ام و سایر نقاط است و n تعداد نقاط در جبهه می‌باشد.

صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه HHO، از چهار تابع پایه ریاضی که در اغلب مقالات برای

جدول (۱): جزئیات توابع پایه ZDT (Lee et al. 2022)

محدودیت‌ها	تعریف ریاضی تابع	نام تابع
$n = 30$ $0 \leq x_i \leq 1$ $i = 1, 2, \dots, 30$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1}{g(x)}} \right]$ $g(x) = 1 + \frac{9}{n-1} \sum_{i=2}^n x_i$	ZDT1
$n = 30$ $0 \leq x_i \leq 1$ $i = 1, 2, \dots, 30$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x) \left[1 - \left(\sqrt{\frac{f_1}{g(x)}} \right)^2 \right]$ $g(x) = 1 + \frac{9}{n-1} \sum_{i=2}^n x_i$	ZDT2
$n = 30$ $0 \leq x_i \leq 1$ $i = 1, 2, \dots, 30$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1}{g(x)}} - \frac{f_1}{g(x)} \sin(10\pi f_1) \right]$ $g(x) = 1 + \frac{9}{n-1} \sum_{i=2}^n x_i$	ZDT3/
$n = 30$ $0 \leq x_i \leq 1$ $i = 1, 2, \dots, 30$	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1}{g(x)}} \right]$ $g(x) = x_1^2 - 10 \times \cos(4\pi f_1)$	ZDT4

همگرایی و کاهش زمان محاسباتی آن‌ها شد. در این مقاله از پارامترهای تنظیمی پیشنهاد شده برای الگوریتم‌ها در مقاله مرجع طبق جدول ۲ استفاده شده است.

برای دستیابی به پاسخ‌های مطلوب در استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی، یافتن مقادیر بهینه پارامترهای ثابت این الگوریتم‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌گونه‌ای که می‌توان با تنظیم بهینه این پارامترها، موجب افزایش سرعت



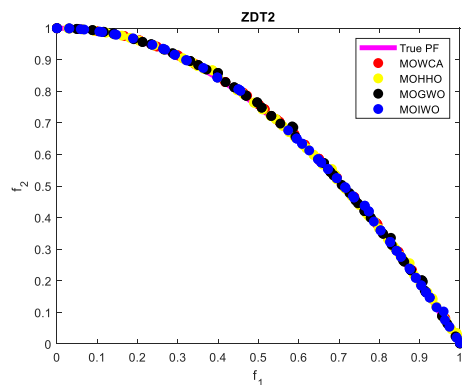
جدول (۲): پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌های استفاده شده

الگوریتم	پارامتر	مقدار
IWO	σ_{init}	۰/۵
	σ_{final}	۲-۱۰
	S_{max}	۵
	S_{min}	۰
WCA	شاخص نوسان غیرخطی	۲
	d_{max}	۱۶-۱۰
GWO	N_{SR}	۴
	A	[۱ و ۰]
HHO	$E0$	[۱ و -۱]
	Beta	۱/۵

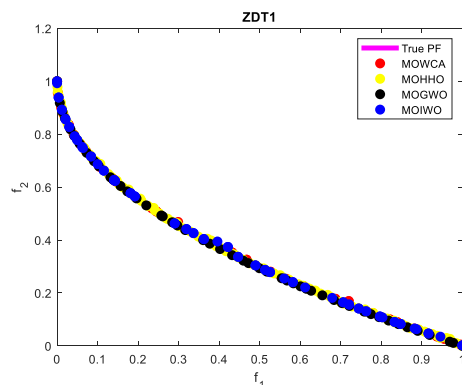
واقعی توابع پایه و همچنین پاسخ‌های ارائه شده توسط سایر الگوریتم‌ها دارد. همچنین برای اظهار نظر دقیق‌تر در رابطه عملکرد الگوریتم HHO، مقادیر معیارهای ارزیابی، محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان اظهار نمود که الگوریتم HHO توانایی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه را به خوبی دارد. به گونه‌ای که حتی در تمامی موارد، نتایج مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم‌های IWO، GWO و WCA ارائه داده است.

پس از تنظیم پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌ها بر اساس مقادیر پیشنهادی در مقالات مرجع، توابع هدف پایه با استفاده از چهار الگوریتم چندهدفه HHO، WCA، GWO و IWO به تعداد ۳۰ مرتبه با تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ و حداکثر تعداد دفعات تکرار برابر ۲۰۰۰ حل گردید.

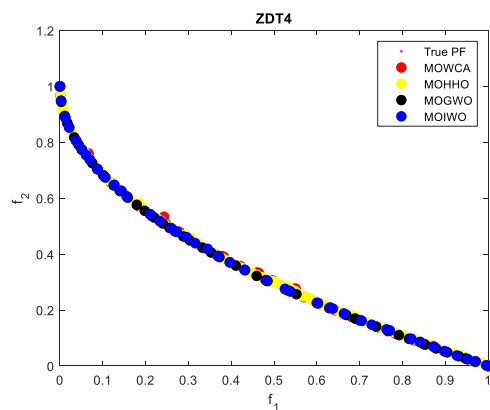
شکل ۲ نمودارهای پارتو به ازای چهار الگوریتم استفاده شده را در حل هر چهار مسئله پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، الگوریتم HHO از نظر پراکندگی و همگرایی پاسخ‌ها بر روی نمودار، تطابق خوبی با پاسخ‌های



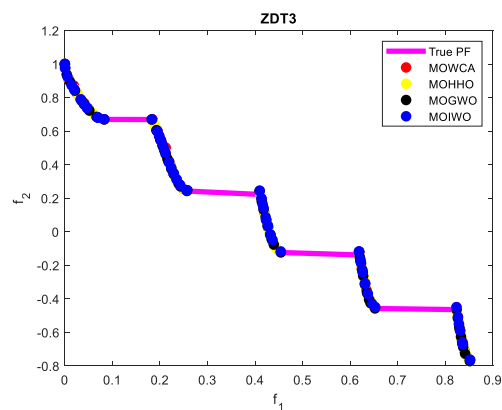
ZDT2 (ب)



ZDT1 (الف)



ZDT4 (د)



ZDT3 (ج)

شکل (۲): نتایج حل مسائل پایه به صورت نمودار پارتو؛ الف) ZDT1 (ب) ZDT2 (ج) ZDT3 و (د) ZDT4



جدول (۳): نتایج مربوط به اجرای الگوریتم‌ها برای حل مسائل پایه

S		GD		
انحراف از معیار	میانگین	انحراف از معیار	میانگین	
				ZDT1
۰/۰۰۰۶۳۹۳	۰/۰۰۸۰۵۲	۰/۰۰۰۲۳۴۸۵	۰/۰۰۰۲۳۹۶	HHO
۰/۰۱۷۸۲۸	۰/۰۳۹۲۸۴	۰/۰۰۳۱۳۸۴	۰/۰۳۸۹۳۲	GWO
۰/۰۲۶۹۰۸	۰/۰۳۲۱۴۴	۰/۰۰۴۹۰۲۱	۰/۰۲۳۱۲۲	IWC
۰/۰۰۴۱۹۰۳	۰/۰۱۳۳۰۳	۰/۰۰۲۷۵۹۲	۰/۰۰۷۳۹۸	WCA
				ZDT2
۰/۰۰۰۵۹۲۵	۰/۰۰۷۸۳۲۶	۰/۰۰۰۱۸۴۴۴	۰/۰۰۰۲۳۲۶	HHO
۰/۰۲۱۰۲۲	۰/۰۵۰۳۶۸	۰/۰۰۳۷۰۳۴	۰/۰۷۰۶۸۹	GWO
۰/۰۶۱۶۸۴	۰/۰۳۵۱۸۸	۰/۰۰۵۸۷۲۴	۰/۰۲۳۲۰۹	IWC
۰/۰۲۳۵۶۵	۰/۰۲۷۳۸۳	۰/۰۰۶۹۳۱۵	۰/۰۱۵۵۱۳	WCA
				ZDT3
۰/۰۰۰۴۶۰۹۰	۰/۰۰۴۷۹۹۶	۰/۰۰۰۰۵۴۱۲	۰/۰۰۷۷۰۳۸	HHO
۰/۰۱۲۵۹۰	۰/۰۳۰۱۶۶	۰/۰۰۱۰۱۲۱	۰/۰۱۶۶۱۲	GWO
۰/۰۱۸۳۰۸۰	۰/۰۲۵۲۸۱	۰/۰۰۱۸۹۵۰	۰/۰۱۶۰۰	IWC
۰/۰۰۱۹۸۲۰	۰/۰۰۷۰۱۷۴	۰/۰۰۱۵۷۹۵	۰/۰۰۸۶۶۵۹	WCA
				ZDT4
۰/۰۰۰۵۱۰۲۳	۰/۰۰۶۷۹۳۱	۰/۰۰۰۰۲۲۲۷۳	۰/۰۰۰۱۴۵۹۳	HHO
۰/۰۱۶۵۱۹	۰/۰۵۶۷۴۱	۰/۰۰۷۳۳۱۶	۰/۱۸۱۸۳	GWO
۰/۲۶۳۹۰	۰/۳۳۰۸۴	۰/۰۳۷۸۳۳	۰/۰۶۰۹۵۷	IWC
۰/۱۶۰۱۸	۰/۲۲۶۰۳	۰/۰۰۶۲۵۴۰	۰/۰۰۴۰۳۸۱	WCA

بیش‌پائین به‌عنوان سد مورد مطالعات انتخاب شده است که از نوع سنگریزه‌ای با روکش بتنی و دارای سرریز پلکانی آزاد می‌باشد. ارتفاع این سد ۱۰۲ متر و طول تاج آن ۳۳۲ متر می‌باشد و سرریز آن با عرض ۳۰ متر برای دبی طراحی ۸۶۰ متر مکعب بر ثانیه طراحی شده است.

نتایج و بحث

مطابق با مرحله صحت‌سنجی الگوریتم‌ها در حل مسائل تابع چند هدفه، پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌ها برابر جدول ۲ تنظیم شد. سپس برای دستیابی به نتایج استوار، هر کدام از الگوریتم‌ها ۳۰ مرتبه با تعداد جمعیت ۱۰۰ و حداکثر تکرار

پس از ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی چندهدفه HHO برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، از توانایی این الگوریتم برای بهینه‌سازی حجم اجرایی سرریزهای پلکانی و انرژی مستهلک شده در پائین‌دست این سرریزها مورد استفاده قرار گرفت.

برای این منظور، سرریز سد سیاه بیشه به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. سد سیاه بیشه در فاصله ۱۲۵ کیلومتری شمال تهران بر روی رودخانه چالوس با هدف ذخیره آب سیلاب بالادست و تامین نیازهای پائین‌دست حوضه احداث شده است. لازم به ذکر است که در مسیر این رودخانه، دو سد با عنوان سیاه‌بیشه وجود دارد که اختلاف ارتفاع آن‌ها نسبت به هم برابر ۵۰۰ متر می‌باشد. در این تحقیق، سد سیاه



پارامتر S در طراحی چند هدفه سرریزهای پلکانی داشته‌اند. در شکل ۳ پاسخ بهینه بهترین جبهه پارتو برای هر چهار الگوریتم ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است پاسخ‌های مربوط به پارتو IWO برای تابع هدف اول و دوم به ترتیب در بازه‌های $۳۱۹۲۶۷/۳ - ۱۷۶۸۹۸/۴$ مترمکعب؛ $۳۳۱۱۷۶/۸ - ۳۵/۵۴ - ۷۲/۷۹$ ، برای پارتو WCA در بازه‌های $۱۹۹۳۶۱/۴$ مترمکعب؛ $۴۵/۳۷ - ۶۴/۹۹$ ، برای GWO در بازه‌های $۲۰۹۶۸۳/۸ - ۲۹۵۲۲۷$ مترمکعب؛ $۶۳/۳۵ - ۷۰/۷۰$ و برای HHO در بازه‌های $۲۶۷۱۴۷/۶ - ۱۴۳۹۳۱/۳$ مترمکعب؛ $۱/۸۷ - ۶۹/۷۶$ قرار دارند.

شایان ذکر است که تمامی پاسخ‌های ارائه شده بر روی جبهه پارتو، راه‌حل مناسب و مطلوبی جهت طراحی سرریزهای پلکانی محسوب می‌شوند، و عملاً هیچ‌کدام از پاسخ‌ها، بر پاسخ دیگری ارجحیت ندارند. از این رو، انتخاب پاسخ مناسب از روی نمودار پارتو، فقط با توجه به شرایط حاکم بر پروژه صورت می‌گیرد، به‌گونه‌ای که کارفرما بر اساس میزان بودجه در دسترس برای احداث سرریز میزان استهلاک انرژی طرح را مشخص نموده و طرح نهایی را انتخاب می‌نماید. بر این اساس می‌توان گفت الگوریتم بهینه‌سازی HHO عملکرد قابل قبولی در حل مسئله بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی داشته است چرا که همگرایی و تعداد پاسخ‌های بیشتری ارائه داده است. ولی با این حال پاسخ‌های ارائه شده توسط تمامی الگوریتم‌ها قابل قبول می‌باشد، چرا که توانسته‌اند این مسئله غیرخطی و پیچیده بهینه‌سازی را حل نمایند.

۱۰۰۰ اجرا شد. نتایج حاصل از ۳۰ اجرای مدل در جداول ۴ و ۵ براساس پارامترهای آماری GD و S ارائه شده است.

جدول (۴): نتایج کلی بهترین الگوریتم از نظر معیار GD

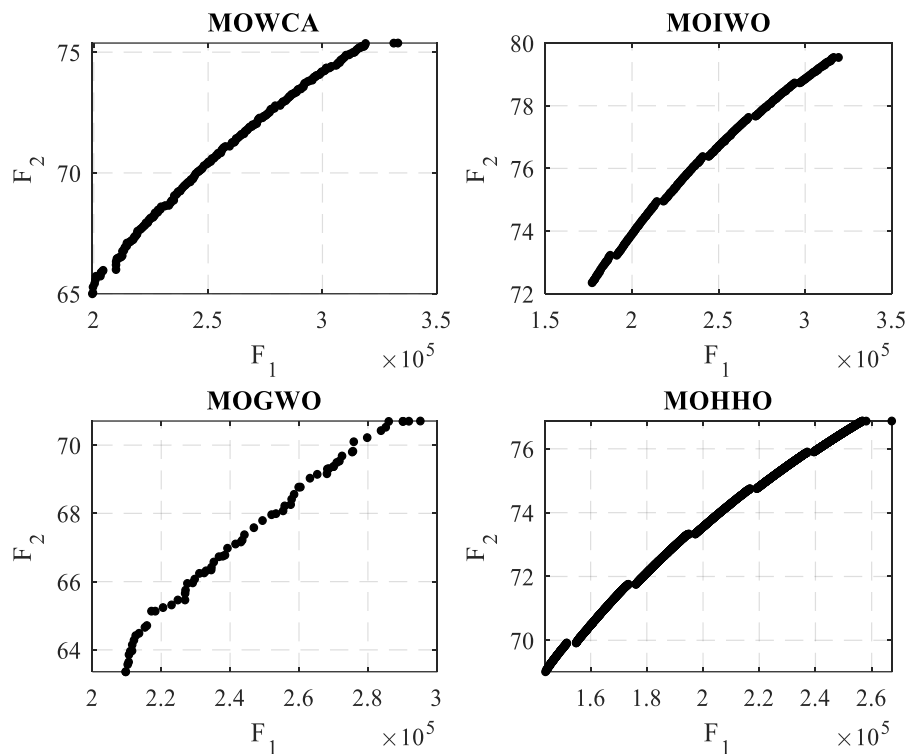
انحراف از معیار	کم‌ترین	بیش‌ترین	میان	میانگین	الگوریتم
۰/۰۱	۰/۰۸۷	۰/۱۱۱	۰/۱۰۱	۰/۰۹۷	HHO
۰/۰۱۸	۰/۱۴۲	۰/۳۰۱	۰/۲۱۴	۰/۲۲۴	GWO
۰/۰۱۵	۰/۱۱۳	۰/۲۵۶	۰/۱۲۵	۰/۱۴۶	WCA
۰/۰۱۰	۰/۰۹۰۵	۰/۱۴۴	۰/۱۱۰	۰/۱۰۲	IWO

طبق جدول ۴ مشخص است که الگوریتم‌های HHO و IWO به ترتیب با کم‌ترین میانگین برای پارامتر GD توانسته‌اند برتری خود را نسبت به دو الگوریتم دیگر اثبات کنند. سپس الگوریتم WCA با میانگین ۰/۱۴۶ و در نهایت الگوریتم GWO با میانگین ۰/۲۲۴ پس از همه الگوریتم‌ها در رتبه آخر قرار می‌گیرد. معیار GD میزان همگرایی الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد و همان‌طور که از نمودار پارتو HHO مشخص است، همگرایی بسیار مناسبی بین پاسخ‌های یافت شده دارد.

جدول (۵): نتایج کلی بهترین الگوریتم از نظر معیار S

انحراف از معیار	کم‌ترین	بیش‌ترین	میان	میانگین	الگوریتم
۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۹۹	۰/۰۶۹	۰/۰۵۵	HHO
۰/۰۱۸۵	۰/۰۰۵	۰/۲۹۹	۰/۱۱۵	۰/۲۴۵	GWO
۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۲۱	۰/۱۶۲	۰/۰۰۹	۰/۱۳۷	WCA
۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۱۱	۰/۱۱۲	۰/۰۰۶۵	۰/۰۵۶	IWO

طبق جدول ۵ نیز مشخص است که الگوریتم‌های HHO و IWO نسبت به GWO و WCA عملکرد بهتری براساس



شکل (۳): نمودار پارتو بین توابع هدف با استفاده از WCA، IWO، HHO و GWO

همچنین طرح‌های با بیش‌ترین و کم‌ترین هزینه طراحی در پارتو به‌دست آمده توسط HHO و GWO به ترتیب دارای حجم بتن‌ریزی $267147/6$ مترمکعب با میزان استهلاک انرژی $76/87\%$ ؛ $143931/3$ مترمکعب با میزان استهلاک انرژی $69/01\%$ برای HHO و 295227 مترمکعب با میزان استهلاک انرژی $70/70\%$ ؛ $209683/8$ مترمکعب با میزان استهلاک انرژی $63/35\%$ برای GWO می‌باشد.

از بین پاسخ‌های موجود بر روی هر نمودار پارتو، طرحی که تعامل مناسبی بین دو هدف حجم بتن‌ریزی و استهلاک انرژی دارد، به‌عنوان پاسخ میانه انتخاب شده است. مقادیر متوسط حجم بتن‌ریزی و استهلاک انرژی در راه‌حل‌های ارائه شده توسط چهار الگوریتم مورد بررسی به ترتیب برابر است با $240817/17$ مترمکعب و $76/3\%$ درصد برای الگوریتم IWO؛ $252846/49$ مترمکعب و $70/64\%$ درصد برای الگوریتم WCA؛ $244156/3$ مترمکعب و $67/37\%$ برای الگوریتم

برای بررسی و اظهار نظر بیش‌تر در مورد عملکرد الگوریتم‌ها در طراحی سرریزها با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه، راه‌حل‌های به‌دست آمده از هر الگوریتم شامل طرح‌های دارای کم‌ترین، بیش‌ترین و متوسط‌ترین هزینه طراحی انتخاب شده و مقادیر متغیرهای مربوط به هر طرح در جدول ۶ گزارش شده است.

همان‌گونه که مشخص است، پرهزینه‌ترین پاسخ به‌دست آمده از IWO دارای $319267/30$ مترمکعب حجم بتن‌ریزی با $79/54\%$ درصد استهلاک انرژی می‌باشد. همچنین کم‌ترین هزینه طراحی در این الگوریتم برابر $176898/40$ مترمکعب حجم بتن‌ریزی با $72/35\%$ درصد استهلاک انرژی است. طرح‌های با بیش‌ترین و کم‌ترین هزینه طراحی به‌دست آمده توسط الگوریتم WCA به ترتیب برابر $331176/40$ و $199639/20$ مترمکعب با $75/37\%$ و $64/99\%$ استهلاک انرژی می‌باشد.



که الگوریتم HHO توانسته است با ارائه کمترین هزینه طراحی برابر ۱۴۳۹۳۱/۳ مترمکعب حجم بتن ریزی علاوه بر کاهش حجم بتن ریزی به مقدار ۷۸۸۵۱ متر مکعب، موجب افزایش ۱۵٪ درصد گردیده است.

GWO؛ ۱۹۲۵۵۳/۲ مترمکعب و ۷۳/۱۷٪ برای الگوریتم HHO

لازم به ذکر است که در طرح اجرا شده موجود سرریز ۲۲۲۷۸۲/۴ مترمکعب بتن به کار رفته است که دارای ۶۰/۱ درصد استهلاک انرژی می‌باشد. مشخص است که در مقایسه پاسخ‌های به‌دست آمده از رویکرد طراحی بهینه چند هدفه با طرح حاضر سرریز، علاوه بر کاهش حجم اجرایی بتن سرریز میزان استهلاک انرژی نیز افزایش پیدا کرده است. به‌گونه‌ای

جدول (۶): جزئیات طراحی با الگوریتم‌های مذکور

پارامتر	HHO			GWO			WCA			IWO		
	کم‌تر	میان	حداکثر	کم‌تر	میان	حداکثر	کم‌تر	میان	حداکثر	کم‌تر	میان	حداکثر
شیب سرریز (%)	۶/۰۱	۷/۶۹	۹/۸۶	۲۳/۰۱	۲۱/۲۶	۲۱/۲۲	۱۷/۵۴	۱۶/۷۱	۱۶/۶۵	۵/۹۵	۷/۷۹	۹/۸۶
عرض سرریز (m)	۳۱/۲۸	۳۱/۲۸	۳۱/۲۸	۳۳/۵۱	۳۳/۵۱	۳۳/۵۱	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۹/۲۰	۳۸/۵۷	۳۸/۵۷	۳۸/۵۷
ارتفاع پله‌ها (m)	۲/۸۳	۲/۹۵	۲/۸۵	۲/۸	۲/۷۲	۲/۸۲	۲/۸۷	۲/۹۲	۲/۷۳	۲/۸۲	۲/۹۹	۲/۷۶
ارتفاع شوت (m)	۲۴/۰۶	۳۱/۰۵	۳۹/۹۹	۲۹/۴	۳۳/۹۲	۳۹/۵۵	۲۴/۴۵	۳۰/۶۹	۳۸/۲۱	۲۴	۳۱/۴۹	۴۰
بار آبی روی سرریز (m)	۵/۴۶	۵/۴۶	۵/۴۶	۵/۲۱	۵/۲۱	۵/۲۱	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۶۹	۴/۷۴	۴/۷۴	۴/۷۴
انرژی مستهلک شده (%)	۶۹/۰۱	۷۳/۱۷	۷۶/۸۷	۶۳/۳۵	۶۷/۳۷	۷۰/۷۰	۶۴/۹۹	۷۰/۶۴	۷۵/۳۷	۷۲/۳۵	۷۶/۳۷	۷۹/۵۴
حجم ساخت سرریز (m ³)	۱۴۳۹۳۱/۳	۱۹۲۵۵۳/۲	۲۶۷۱۴۷/۶	۲۰۹۶۸۳/۸	۲۴۴۱۵۶/۳	۲۹۵۲۲۷	۱۹۹۳۶۱/۴	۲۵۲۸۴۶/۵	۳۳۱۱۷۶/۸	۱۷۶۸۹۸/۴	۲۴۰۸۱۷/۲	۳۱۹۲۶۷/۳

حاضر سرریز نیز معیارهای هزینه و استهلاک انرژی به خوبی لحاظ شده است.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از یک الگوریتم فراکوشی نوین تحت عنوان HHO برای طراحی سرریزهای پلکانی توسعه داده شد. برای این منظور، بیشینه‌نمودن میزان استهلاک انرژی در پائین دست سرریز در فاز طراحی علاوه بر کمینه‌نمودن حجم بتن ریزی به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شد. ابتدا، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی HHO در حل مسائل

در مقایسه مطلوبیت پاسخ‌های پیدا شده توسط الگوریتم‌ها، الگوریتم IWA نتایج مطلوبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها ارائه داده است، به‌گونه‌ای که پاسخ متوسط یافت شده در IWA دارای حجم برابر ۲۴۰۸۱۷/۲ مترمکعب با ۷۶/۳۷٪ استهلاک انرژی می‌باشد که در مقایسه با پرهزینه‌ترین طرح HHO، موجب کاهش ۲۶۳۳۰/۴ متر مکعب حجم بتن ریزی با یک مقدار استهلاک انرژی مساوی شده است. در مقابل طرح‌های به‌دست آمده از HHO دارای بازه متفاوتی می‌باشد که کارفرما می‌تواند تصمیم مناسبی بر اساس بودجه در دسترس اتخاذ نماید. با توجه به اینکه طرح‌های حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه مطلوبیت مناسبی نسبت به طرح حاضر دارند، ولی مشخص است که در طرح

نمودار پارتو به دست آمده از HHO با طرح موجود سرریز، مشخص شد طرح HHO توانسته است علاوه بر کاهش حجم بتن ریزی به مقدار ۷۸۸۵۱ مترمکعب (۳۵٪)، میزان استهلاک انرژی را ۱۵٪ افزایش داده است که نشان دهنده کارایی رویکرد ارائه شده در طراحی سرریزهای پلکانی می باشد. پیشنهاد می شود در مطالعات آتی از مدل توسعه داده شده در این مطالعه بر اساس HHO در ارتباط با روش مونت کارلو، یک مدل ترکیبی استوار برای طراحی سرریزهای پلکانی با در نظر گرفتن تاثیر عدم قطعیتها توسعه داده شود.

چند هدفه با استفاده از سری توابع پایه ZDT مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج حل مسائل پایه توسط الگوریتم HHO پیشنهادی نشان داد، این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم های WCA, IWO و GWO از دقت بالاتری برخوردار می باشد. سپس مدل توسعه داده شده برای بهینه سازی شماتیک سرریز پلکانی سد سیاه بیشه مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس معیارهای ارزیابی، نتایج نشان داد HHO در مقایسه با سه الگوریتم دیگر از همگرایی و پراکندگی مناسبی در حل مسئله پیچیده سرریزهای پلکانی برخوردار است. به گونه ای که با مقایسه یکی از پاسخ های موجود بر روی

منابع

درخشان علمدارلو، پ.، و م. اژدری مقدم. ۱۳۹۷. طراحی بهینه سرریزهای پلکانی جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم تفاضلی و الگوریتم کرم شب تاب و ترکیب هر دو الگوریتم. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، سال پنجم، شماره ۱۷، ص ۳۹-۵۰.

زارعی، ر.، ح. قدوسی، و ک. شهوردی. ۱۳۹۸. به کارگیری الگوریتم علف های هرز مهاجم (IWO) و الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه سازی بهره برداری تلفیقی از سد طارزان. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال نهم، شماره ۳۵، ص ۱۱۳-۱۲۴. معینی، ر.، و پ. جزائی. ۱۳۹۷. حداقل سازی هزینه احداث سرریز پلکانی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، سال پنجم، شماره ۱۸، ص ۲۵-۳۷.

Azhdary Moghaddam, M., H. Shahheydari, and E. Jafari Nodushan. 2011. Investigation on effect of Discharge, spillway's slope and step's characteristics on the Ogee-stepped spillway on energy dissipation by applying numerical models. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 1(4): 23-34.

Chatila, J.G., and B.R. Jurdi. 2004. Stepped spillway as an energy dissipater. *Journal of Canadian Water Resources*, 29(3): 147-158.

Eskandar, H., A. Sadollah, A. Bahreininejad, and M. Hamdi. 2012. Water Cycle Algorithm—A Novel Metaheuristic Optimization Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems. *Journal of Computers & Structures*, 110: 151-166.

Ferdowsi, A., S. Farzin, S.F. Mousavi, and H. Karami. 2019. Hybrid Bat and Particle Swarm Algorithm for Optimization of Labyrinth Spillway Based on Half and Quarter Round Crest Shapes. *Journal of Flow Measurement and Instrument*, 66: 209–217.

Ghasemi Rad, M.J.G., S. Ohadi, J. Jafari-Asl, A. Vatani, S.A. Ahmadabadi, and J.A. Correia. 2022. GND0-SVR: An Efficient Surrogate Modeling Approach for Reliability-Based Design Optimization of Concrete Dams. *Journal of Structures*, 35: 722-733.

Ghorbani Mooselu, M., Nikoo, M. R., Bakhtiari Rayani, N. and Izady, A. 2019. Fuzzy multi objective simulation-optimization of stepped spillways considering flood uncertainty. *Water Resources Management*, 33: 2261–2275.



Haddad, O.B., F. Sharifi, and M. Naderi. 2005. Optimum design of stepped spillways using genetic algorithm. In Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Evolutionary Computing, Lisbon, Portugal, 325-331.

Hassanvand, M. R., Karami, H. and Mousavi, S. F. 2019. Use of multi-criteria decision-making for selecting spillway type and optimizing dimensions by applying the harmony search algorithm: Qeshlagh Dam Case Study. *Lakes and Reservoirs* 24 (1): 66–75. [https://doi.org/ 10.1111/lre.12250](https://doi.org/10.1111/lre.12250).

Jangir, P., and N. Jangir. 2017. Non-dominated sorting whale optimization algorithm (NSWOA): a multi-objective optimization algorithm for solving engineering design problems. *Global Journal of Research In Engineering*.

Jazayeri, P. and Moeini, R. 2020. Construction cost minimization of the stepped spillway using improved particle swarm optimization and artificial bee colony algorithms. *Water and Environment Journal*, 34: 468–480. <https://doi.org/10.1111/wej.12548>.

Jafari-Asl, J., B.S. Kashkooli, & M. Bahrami. 2020. Using Particle Swarm Optimization Algorithm to Optimally Locating and Controlling of Pressure Reducing Valves for Leakage Minimization in Water Distribution Systems. *Journal of Sustainable Water Resources Management*, 6(4): 1-11.

Jafari-Asl, J., M. Seghier, S. Ohadi, and P. van Gelder. 2021. Efficient method using Whale Optimization Algorithm for Reliability-Based Design Optimization of Labyrinth Spillway. *Journal of Applied Soft Computing*, 101: 1-15.

Mehrabian, A.R., and C. Lucas. 2007. A Novel Numerical Optimization Algorithm Inspired from Weed Colonization. *Journal of Ecological informatics*, 1(4): 355-366.

Mooselu, M.G., M.R. Nikoo, N.B. Rayani, and A. Izady. 2019. Fuzzy Multi-Objective Simulation Optimization of Stepped Spillways Considering Flood Uncertainty. *Journal of Water Resources Management*, 1-15.

Ohadi, S., and J. Jafari-Asl. 2021. Multi-Objective Reliability-Based Optimization for Design of Trapezoidal Labyrinth Weirs. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 77: 1-29.

Ohtsu, I., Y. Yasuda, and M. Takahashi. 2004. Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9): 860-869.

Parsaie, A. and Haghiabi, A.H. 2019. Evaluation of energy dissipation on stepped spillway using evolutionary computing. *Applied Water Science* 9(144), <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1019-4>.

Pegram, G.G., A.K. Officer, and S.R. Mottram. 1999. Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 125(5): 500-510.

Premkumar, M., P. Jangir, R. Sowmya, H. Alhelou, A.A. Heidari, and H. Chen. 2020. MOSMA: Multi-objective slime mould algorithm based on elitist non-dominated sorting. *IEEE Access*, 9: 3229-3248.

Salmasi, F., and H. Arvanaghi. 2013. Effect of Slope on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Iranian Journal of Water and Environmental engineering*, 1(1): 47-56.

Salmasi, F. and Özger, M. 2014. Neuro-fuzzy approach for estimating energy dissipation in skimming flow over stepped spillways. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(8): 6099–6108.

Salmasi, Farzin, and Abrahamb, John, 2021. Genetic algorithms for optimizing stepped spillways to maximize energy dissipation. *Water Supply*, 22(2): 1255, doi: 10.2166/ws.2021.353, pp. 1255-1274.



Shoja, F., F. Salmasi, D. Farsadizadeh, A. nazemi, and A. Sadraddini. 2012. Optimal Design of Stepped Spillways for Maximizing Energy Dissipation Using Genetic Algorithm. *Journal of Water and Soil Science*, 22(4): 60-83.

Sohrabi, Z., J. Sarvarian, and J. Mamizadeh. 2019. 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 Algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2): 469-478.

Sori, N., and A. Mojtahedi. 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): 25-40.

Tabari, M.M.R., and S. Tavakoli, 2016. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4): 1215-1224.

Li, L.L., X.Y. Ren, M.L. Tseng, D.S. Wu, & M.K. Lim. 2022. Performance evaluation of solar hybrid combined cooling, heating and power systems: A multi-objective arithmetic optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 258: 115541.

Heidari, A.A., S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, & H. Chen. 2019. Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97: 849-872.