

EXTENDED ABSTRACTS

Development and Evaluation of a Self-Adaptive Horse Optimization Algorithm (SA-HA) for the Operation Management of the Reservoir

Parisa-Sadat Ashofteh *, Leila Shakarami

Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom 3716146611, Iran

Received: 09 November 2022; **Reviewed:** 24 January 2026; **Accepted:** 31 January 2026

Keywords:

Self-Adaptive Horse Algorithm (SA-HA), Single-objective optimization, Dynamic learning, Adaptive convergence, Sustainable water-resources management.

1. Introduction

Optimal water resources management under increasing climatic uncertainty requires robust optimization techniques capable of solving complex nonlinear problems. Nature-inspired metaheuristic algorithms have been widely applied due to their strong global search capability; however, many suffer from premature convergence and sensitivity to control parameters. To address these limitations, this study proposes a Self-Adaptive Horse Algorithm (SA-HA) that dynamically adjusts its control parameters during the optimization process, improving the balance between exploration and exploitation. The proposed algorithm is evaluated for the optimal operation of the Qaranqu Reservoir (East Azerbaijan Province, Iran), aiming to maximize water supply reliability while minimizing water shortages under operational constraints.

2. Methodology

This study was conducted to optimize the operation of the Qaranqu Reservoir using a self-adaptive metaheuristic optimization algorithm. The research framework consisted of three main stages: (i) analysis of hydrological and climatic data, (ii) development of the proposed SA-HA, and (iii) performance evaluation under reservoir operation conditions.

Hydrological and meteorological data, including precipitation, temperature, evaporation, reservoir inflow, and irrigation water demand, were collected for the period 1971-2000. These data were used to estimate reservoir inflow and water demand and served as inputs for the optimization model. The study area is located in the Qaranqu watershed, East Azerbaijan Province, Iran, where reservoir operation plays a critical role in agricultural water supply.

The proposed SA-HA algorithm was developed by introducing an adaptive parameter adjustment mechanism into the original Horse Algorithm (HA). Unlike the conventional HA, the control parameters of each search agent are dynamically updated according to its optimization performance, enabling a better balance between global exploration and local exploitation. This adaptive strategy improves convergence accuracy while reducing the risk of premature convergence and eliminating the need for manual parameter tuning.

The performance of SA-HA was first evaluated using the standard Sphere benchmark function and compared with the original HA in terms of convergence speed, solution quality, and stability. The algorithm was then applied to optimize reservoir operation with the objective of maximizing water supply reliability over

the 30-year simulation period while satisfying storage capacity, release, evaporation, and spill constraints. The reliability index was adopted to assess the effectiveness of the optimized reservoir operation strategy.

3. Results and discussion

The proposed SA-HA demonstrated superior performance compared with the original HA in both benchmark optimization and reservoir operation. In the Sphere benchmark function, SA-HA achieved lower objective function values, faster convergence, and greater solution stability, indicating that the adaptive parameter adjustment mechanism effectively balanced exploration and exploitation while reducing premature convergence.

The algorithm was subsequently applied to optimize water allocation in the Qaranqu Reservoir. Compared with the conventional HA, SA-HA improved the objective function value by approximately 17% and reduced computational time by nearly 25%. In addition, the adaptive strategy enhanced reservoir operation by increasing water releases during critical periods, improving final storage, reducing spill volume by about 14%, and decreasing water supply deficits by approximately 27%.

System reliability analysis further confirmed the advantages of the proposed approach. The reliability index increased from 0.59 for HA to 0.68 for SA-HA, representing an improvement of approximately 15%. These results demonstrate that the adaptive learning mechanism enhances optimization efficiency, produces more stable solutions, and improves the overall performance of reservoir water allocation under operational constraints.

4. Conclusions

This study demonstrated that incorporating a self-adaptive mechanism into the Horse Algorithm significantly improves optimization performance for reservoir operation. By dynamically adjusting control parameters during the search process, the proposed SA-HA achieved faster convergence, greater solution stability, and higher optimization accuracy than the original HA. Application of the algorithm to the Qaranqu Reservoir showed improvements in water supply reliability, reservoir storage, spill reduction, and deficit minimization, highlighting its effectiveness for water allocation under operational constraints. The adaptive parameter adjustment strategy also eliminates the need for manual parameter tuning, making the algorithm more robust and computationally efficient. Overall, SA-HA provides a promising optimization framework for water resources management and can be extended to multi-reservoir systems and climate change scenarios in future studies.

توسعه و ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی اسب خودتطبیقی (SA-HA) برای مدیریت بهره‌برداری از مخزن

پریساسادات آشفته^{1*}، لیلا شاکرمی²

¹ دانشجوی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

² دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

دریافت: 1404/8/18، بازنگری: 1404/11/4، پذیرش: 1404/11/11، نشر آنلاین: 1404/11/11

چکیده

مدیریت بهینه منابع آب در شرایط اقلیمی ناپایدار، نیازمند ابزارهای محاسباتی پیشرفته برای تصمیم‌گیری هوشمند و سازگار با تغییرات محیطی است. در این پژوهش، نسخه‌ای خودتطبیقی از الگوریتم اسب (Horse Algorithm (HA)) توسعه داده شد تا محدودیت‌های نسخه کلاسیک مانند همگرایی زودرس و حساسیت به تنظیم پارامترها کاهش یابد. در مدل پیشنهادی، هر عامل (اسب) دارای ضریب یادگیری پویا است که براساس میزان بهبود تابع هدف در هر تکرار به صورت خودکار به روزرسانی می‌شود. این فرآیند موجب برقراری تعادل هوشمند میان جستجوی گسترده در مراحل اولیه و تمرکز دقیق بر نواحی امیدبخش در مراحل پایانی می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد، الگوریتم اسب خودتطبیقی (Self-Adaptive Horse Algorithm (SA-HA)) و نسخه کلاسیک (HA) در مسئله تخصیص بهینه آب مخزن قرقو در استان آذربایجان شرقی، با تابع هدف بیشینه‌سازی نسبت آب تأمین شده در طول دوره بهره‌برداری اجرا شدند. نتایج نشان داد که نسخه خودتطبیقی در مقایسه با نسخه پایه، باعث افزایش حدود 17 درصدی در کارایی تأمین آب، کاهش 27 درصدی در کمبود و ارتقای شاخص اطمینان‌پذیری سامانه از 0/59 به 0/68 گردید. همچنین SA-HA با تنظیم پویا و خودکار پارامترهای حرکتی، از نوسانات نتایج کاسته و روند همگرایی را تسریع کرده است. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن هستند که افزودن سازوکار خودتطبیقی به HA می‌تواند دقت، پایداری و انعطاف‌پذیری الگوریتم را در مدیریت سامانه‌های پیچیده منابع آب به‌طور چشمگیری افزایش دهد و در نتیجه به‌عنوان روشی مؤثر برای بهینه‌سازی تصمیمات بهره‌برداری پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم خودتطبیقی اسب، بهینه‌سازی تک‌هدفه، یادگیری پویا، همگرایی تطبیقی، مدیریت پایداری منابع آب.

1- مقدمه

در میان این روش‌ها، الگوریتم‌های جمعیت‌محور مانند الگوریتم ژنتیک (GA)¹ (Goldberg, 1989)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)² (Kennedy و Eberhart, 1995)، الگوریتم کلونی زنبور (ABC)³ (Karaboga, 2005)، کاربرد گسترده‌ای در مسائل منابع آب داشته‌اند (Goldberg, 1989، Kennedy و Eberhart, 1995، Karaboga, 2005).

مطالعات متعددی از جمله Lu و همکاران (2015)؛ Ashofteh و همکاران (2019)؛ Moslemzadeh و همکاران (2023)؛ Farzin و Khoramipoor (2024) و (2025)، نشان داده‌اند که

مدیریت منابع آب، به‌ویژه در شرایط اقلیمی متغیر و محدودیت‌های فزاینده، نیازمند ابزارهایی است که بتوانند تصمیم‌گیری را در محیط‌های پیچیده و غیرخطی پشتیبانی کنند. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فراابتکاری الهام‌گرفته از طبیعت به دلیل توانایی بالا در جست‌وجوی فضای پاسخ و عدم وابستگی به مشتقات ریاضی، جایگاه ویژه‌ای در حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب پیدا کرده‌اند (Najafi و همکاران، 2024؛ Garcia و Alamanos, 2023).

3. Artificial Bee Colony

1. Genetic Algorithm

2. Particle Swarm Optimization



دقیق‌تر همگرا شود و از همگرایی زودرس جلوگیری نماید. برای ارزیابی عملکرد این روش، الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن قرقو در استان آذربایجان شرقی به کار گرفته شد. هدف مدل، بهینه‌سازی قابلیت اطمینان در تأمین آب طی دوره بهره‌برداری بود. داده‌های ورودی شامل حجم ورودی، تقاضا و محدودیت‌های بهره‌برداری مخزن بوده و تابع هدف به گونه‌ای تعریف شد که کمبود آب را کمینه شود.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن قرقو، مجموعه‌ای از مراحل تحلیلی و محاسباتی در سه گام اصلی انجام شد. این مراحل شامل تحلیل داده‌های پایه، توسعه الگوریتم پیشنهادی و ارزیابی عملکرد مدل هستند که در ادامه تشریح می‌شوند و در شکل (1) آورده شده است:

الف) تحلیل داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی

در گام نخست، داده‌های بارش، دما، تبخیر، جریان‌های ورودی و نیاز آبیاری برای دوره آماری 1971 تا 2000 گردآوری و تحلیل شدند. با استفاده از روابط تراز آبی و منحنی مشخصه مخزن، حجم ورودی و تقاضای سالانه برآورد گردید. نتایج این مرحله مبنای ورودی مدل بهینه‌سازی در گام بعدی قرار گرفت.

ب) طراحی و توسعه الگوریتم اسب خودتطبیقی (SA-HA)

در گام دوم، نسخه اصلاح شده‌ای از الگوریتم اسب طراحی گردید تا توانایی جست‌وجو در فضای پیچیده تصمیم‌گیری را بهبود دهد. در نسخه پیشنهادی SA-HA، پارامترهای کنترلی الگوریتم نظیر اندازه گام حرکتی و ضریب یادگیری هر اسب به صورت پویا و بر اساس عملکرد آن در بهبود تابع هدف تنظیم می‌شوند. این سازوکار خودتطبیقی، تعادل میان جست‌وجوی گسترده در مراحل اولیه و تمرکز موضعی در مراحل پایانی را برقرار کرده و از همگرایی زودرس جلوگیری می‌کند. تابع هدف مدل به صورت تک‌هدفه تعریف شد و هدف آن بهینه‌سازی قابلیت اطمینان تأمین آب مخزن در طول دوره بهره‌برداری است.

ج) ارزیابی و تحلیل نتایج بهینه‌سازی

در گام سوم، عملکرد الگوریتم SA-HA در مسئله تخصیص منابع آب اجرا و با نسخه کلاسیک الگوریتم اسب (HA) مورد مقایسه قرار گرفت. شاخص‌هایی نظیر سرعت همگرایی، پایداری نتایج و مقدار تابع هدف نهایی برای ارزیابی کارایی روش استفاده شدند.

روش‌های فراابتکاری نسبت به مدل‌های قطعی، توانایی بیشتری در رسیدن به پاسخ‌های نزدیک به بهینه و مدیریت عدم قطعیت دارند. با وجود موفقیت این روش‌ها، محدودیت‌هایی مانند گیرافتادن در کمینه‌های محلی، حساسیت به پارامترها و کاهش تنوع جمعیت، منجر به توسعه نسل جدیدی از الگوریتم‌ها شد. در این میان، الگوریتم‌های الهام گرفته از رفتار حیوانات مانند الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)⁴ (Mirjalili و همکاران، 2014) و الگوریتم بهینه‌سازی شاهین (HHO)⁵ (Heidari و همکاران، 2019)، مطرح گردیدند. در این میان، HA به عنوان یکی از روش‌های هوشمند مبتنی بر رفتار اجتماعی اسبها (Miar-Naeimi و همکاران، 2021)، توانسته است عملکرد مناسبی در جست‌وجوی نواحی بهینه نشان دهد. این الگوریتم از اصولی مانند حرکت گروهی، پیروی از رهبر و رقابت در فضای جست‌وجو برای یافتن پاسخ‌های بهتر استفاده می‌کند. با این حال، کارایی الگوریتم به شدت به تنظیم پارامترهای کنترلی وابسته است و انتخاب نادرست آن‌ها می‌تواند موجب کندی همگرایی یا گرفتار شدن در بهینه‌های محلی شود.

به عنوان نمونه، Zhang و Zhang (2020) با معرفی سازوکار خودتنظیمی در PSO توانستند از نوسانات شدید در مسیر همگرایی جلوگیری کنند.

همچنین Han و همکاران (2025) در مطالعه‌ای مشابه، نسخه خودتطبیقی الگوریتم MOGWO را برای مدیریت بهره‌برداری مخازن چندمنظوره پیشنهاد کردند و نتایج نشان داد که تنظیم پویا، دقت و پایداری مدل را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. برای غلبه بر این چالش، در پژوهش حاضر نسخه‌ای خودتطبیقی از الگوریتم اسب معرفی و توسعه داده شد که با عنوان SA-HA شناخته می‌شود. در این نسخه، پارامترهای الگوریتم به صورت پویا و در طی فرآیند بهینه‌سازی تغییر می‌کنند تا تعادل میان اکتشاف⁶ و بهره‌برداری⁷ به طور خودکار برقرار شود.

در SA-HA هر عضو جمعیت (اسب) دارای یک ضریب تطبیقی است که متناسب با کیفیت عملکردش در بهبود تابع هدف، در هر تکرار به روزرسانی می‌شود. این سازوکار نوعی یادگیری درون جمعیتی را فراهم می‌کند. به این معنا که اسب‌هایی که در یافتن پاسخ‌های بهتر موفق‌ترند، سرعت یا دامنه حرکت خود را کاهش داده و روی نواحی امیدبخش تمرکز می‌کنند. در حالی که سایر اعضا با افزایش گام حرکتی به جست‌وجوی گسترده‌تر در فضای مسئله می‌پردازند. مزیت اصلی این رویکرد در آن است که نیازی به تعیین دستی پارامترهای حساس الگوریتم وجود ندارد و فرآیند بهینه‌سازی به صورت پویا با ویژگی‌های خود مسئله سازگار می‌شود. در نتیجه، SA-HA می‌تواند با سرعت بیشتری به پاسخ‌های

6. Exploration
7. Exploitation

4. Grey Wolf Optimization
5. Harris Hawks Optimization

حجم مرده در نظر گرفته شده است، در این پژوهش، از داده‌های ایستگاه هیدرومتری تونل هفت (به‌عنوان خروجی حوضه) و اطلاعات بارش و دمای ایستگاه میانه برای دوره آماری 1971 تا 2000 استفاده شد.

بررسی میانگین بلندمدت ماهانه دما، بارندگی، رواناب و تقاضای آب، بیانگر اقلیم نیمه‌خشک منطقه، تمرکز بارش در فصل‌های سرد و افزایش قابل توجه تقاضای آب در تابستان هستند. الگویی که تضاد زمانی بین عرضه و تقاضای آب را به‌خوبی نشان داده و ضرورت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن را تأیید می‌کند.

2-2- مدل SA-HA

مدل SA-HA نسخه اصلاح‌شده و تکامل‌یافته‌ای از مدل پایه HA است که نخستین‌بار توسط Miari Naeimi و همکاران (2021) معرفی شد. این نسخه جدید با هدف ارتقای پویایی جست‌وجو، افزایش دقت همگرایی و حذف نیاز به تنظیم دستی پارامترها توسعه یافته است. در الگوریتم کلاسیک، پارامترهای کنترلی ثابت (مانند ضریب گام حرکتی یا وزن یادگیری) ممکن است موجب همگرایی زودرس یا کاستی در جست‌وجوی فضای پاسخ شوند. برای رفع این محدودیت، SA-HA با بهره‌گیری از سازوکار تطبیق درونی پارامترها طراحی شده است. بدین‌صورت که هر اسب، براساس میزان موفقیت خود در بهبود تابع هدف، پارامترهای حرکتی خود را در طول اجرا به‌طور خودکار تنظیم می‌کند. درواقع هر عضو جمعیت، دارای یک بردار موقعیت و یک ضریب یادگیری تطبیقی است که در هر تکرار به‌روزرسانی می‌شوند. این فرآیند، نوعی یادگیری تکاملی درون‌جمعیتی ایجاد می‌کند که به الگوریتم امکان می‌دهد در مراحل ابتدایی با گام‌های بزرگ به جست‌وجوی گسترده (اکتشاف) بپردازد و در مراحل پایانی با گام‌های کوچک‌تر به پالایش دقیق پاسخ (بهره‌برداری) روی آورد. ویژگی‌های اصلی SA-HA عبارت‌اند از:

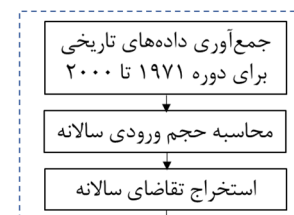
خودتنظیمی پارامترها: ضرایب حرکتی و پارامترهای یادگیری هر اسب به‌صورت پویا با عملکرد آن در فرآیند جست‌وجو تغییر می‌کنند.

تعادل پویا بین اکتشاف و بهره‌برداری: سازوکار تطبیقی موجب می‌شود الگوریتم بدون نیاز به دخالت کاربر، میان جست‌وجوی سراسری و محلی تعادل برقرار کند.

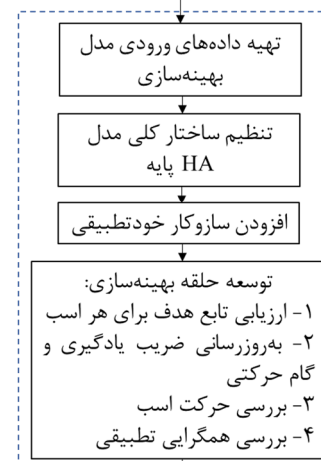
پایداری و دقت بالا: به‌دلیل تنظیم خودکار گام‌های حرکتی، نوسانات مسیر جست‌وجو کاهش یافته و احتمال گیرافتادن در بهینه‌های محلی کمتر می‌شود.

سادگی پیاده‌سازی: با وجود افزایش هوشمندی در تنظیم پارامترها، ساختار اصلی الگوریتم حفظ شده و قابل انطباق با مسائل مختلف بهینه‌سازی است.

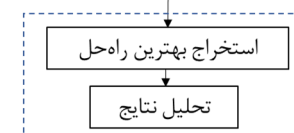
مرحله (۱) تحلیل داده‌های اقلیمی و آب‌شناسی



مرحله (۲) طراحی و توسعه الگوریتم اسب خودتطبیقی (SA-HA)



مرحله (۳) ارزیابی و تحلیل نتایج بهینه‌سازی



شکل 1- روند نمای انجام تحقیق

2-1- منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز قرقنو در جنوب‌غرب شهرستان هشتروند (استان آذربایجان شرقی) و در دامنه‌های شمالی کوه سهند قرار دارد. این منطقه دارای توپوگرافی کوهستانی با شیب‌های تند و ارتفاعاتی تا حدود 3700 متر است. ساختار زمین‌شناسی از ترکیب سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و آهکی تشکیل شده که در نفوذ و تغذیه منابع آب زیرزمینی نقش مؤثری دارند.

رودخانه اصلی حوضه به‌سمت شمال غرب جریان داشته و نهایتاً به رودخانه قزل‌اوزن می‌پیوندد. جریان‌های سطحی فصلی و چشمه‌های متعدد در منطقه، منابع اصلی تأمین آب کشاورزی و شرب هستند. اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد بوده و میانگین بارش سالانه بین 300 تا 500 میلی‌متر متغیر است. بخش عمده بارندگی در ماه‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد، درحالی‌که تابستان‌ها گرم و خشک است.

فعالیت غالب اقتصادی در منطقه کشاورزی و دامداری است. محصولات اصلی شامل گندم، جو، ذرت، یونجه و سیب‌زمینی بوده و حدود 14'500 هکتار از اراضی قابل کشت را پوشش می‌دهد. برای تأمین آب مورد نیاز این اراضی، سد قرقنو با حجم کل 165 میلیون مترمکعب احداث شده است. از این مقدار، 135 میلیون مترمکعب به‌عنوان حجم مفید و 17 میلیون مترمکعب به‌عنوان

در این مطالعه، تابع اسفیر⁸ به عنوان تابع مرجع مورد استفاده قرار گرفت. این تابع به دلیل ساختار ساده، محدب بودن و وجود تنها یک بهینه جهانی، برای تحلیل رفتار پایه الگوریتم‌های جدید مناسب است که مشخصات آن در جدول (1) آورده شده است. تابع اسفیر به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (1)$$

که در آن، x_i مؤلفه‌های بردار تصمیم n بعدی هستند. دامنه تغییرات متغیرها در این تابع برابر با $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$ در نظر گرفته می‌شود و مقدار بهینه جهانی در نقطه $x^* = (0, \dots, 0, 0)$ با مقدار $f(x^*)=0$ حاصل می‌گردد.

برای اجرای آزمایش‌ها، اندازه جمعیت برابر با 100 و تعداد تکرارها 1000 تعیین شد. به منظور اطمینان از پایداری نتایج، هر آزمایش 10 بار تکرار گردید و میانگین مقادیر نهایی تابع هدف به عنوان معیار ارزیابی عملکرد گزارش شد.

در ارزیابی‌های انجام‌شده، عملکرد SA-HA با نسخه پایه الگوریتم HA مقایسه گردید. شاخص‌های مورد بررسی شامل میانگین مقدار تابع هدف، سرعت همگرایی و انحراف معیار نتایج بودند. نتایج نشان دادند که افزودن سازوکار خودتطبیقی موجب افزایش پایداری و کاهش نوسانات جست‌وجو شده و الگوریتم را قادر می‌سازد تا در مراحل نهایی، با دقت بیش‌تری به مقدار بهینه جهانی نزدیک شود.

فرآیند اجرای SA-HA را می‌توان در مراحل زیر خلاصه کرد:
مرحله آغازین) تولید جمعیتی اولیه از اسب‌ها با موقعیت‌های تصادفی در فضای جست‌وجو و محاسبه مقدار تابع هدف برای هر عضو

به‌روزرسانی تطبیقی پارامترها) در هر تکرار، براساس بهبود نسبی تابع هدف، پارامترهای گام و یادگیری برای هر اسب تنظیم می‌شوند.

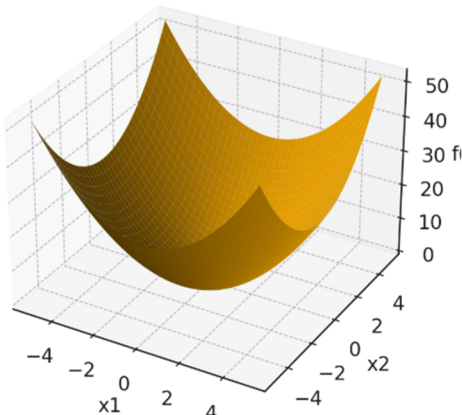
حرکت و یادگیری) موقعیت هر اسب با ترکیبی از حرکت به سمت بهترین عضو جمعیت و مؤلفه‌های تصادفی کنترل شده به‌روزرسانی می‌شود.

ارزیابی عملکرد) بهترین مقدار تابع هدف به عنوان پاسخ بهینه ثبت شده و تغییرات جمعیت از نظر همگرایی بررسی می‌شود.
شرط توقف) فرآیند تا رسیدن به تعداد مشخصی از تکرارها یا پایداری تابع هدف ادامه می‌یابد.

3-2- ارزیابی عملکرد SA-HA

به منظور سنجش کارایی و پایداری الگوریتم پیشنهادی SA-HA در حل مسائل بهینه‌سازی، از یک تابع معیار استاندارد تک‌هدفه استفاده شد. ارزیابی الگوریتم‌ها با استفاده از توابع آزمون، یکی از روش‌های پذیرفته‌شده در حوزه فراابتکاری است. زیرا این توابع امکان بررسی توانایی مدل در همگرایی به پاسخ بهینه سراسری، پرهیز از کمینه‌های محلی و پایداری عملکرد در تکرارهای مختلف را فراهم می‌سازند.

جدول 1- تابع استاندارد به کار رفته برای ارزیابی مدل HA-SA

نام تابع	معادله ریاضی	شکل تابع
$f(x)$: Sphere	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$ $-5.12 \leq x_i \leq 5.12$	

4-2- بهینه‌سازی تخصیص منابع آب بر اساس تابع هدف

بیشینه‌سازی با SA-HA

پس از اطمینان از عملکرد مناسب الگوریتم SA-HA در توابع آزمون، این الگوریتم برای حل مسئله واقعی تخصیص منابع آب در سامانه مخزن قرقوچای به کار گرفته شد. در این مدل، تمرکز بر افزایش کارایی تأمین آب است؛ به عبارت دیگر، الگوریتم تلاش می‌کند تا نسبت آب تأمین شده در طول دوره بهره‌برداری بیشینه شود. روابط مربوط به توابع هدف و قیود آن‌ها به صورت رابطه (2) تعریف شدند:

$$\text{Maximize } Z_1 = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t \leq R_t)}{T} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

که در آن Z_1 تابع هدف، D_t تقاضای آب در هر دوره t ، R_t مقدار آب رهاسازی شده در هر دوره t ، T طول دوره بهره‌برداری.

مسئله بهینه‌سازی برای بازه زمانی 30 ساله (1971-2000) بررسی شد. این تابع نشان‌دهنده نسبت تأمین تحقق یافته به کل تقاضا در بازه شبیه‌سازی است و هدف الگوریتم، بیشینه‌سازی این نسبت با رعایت محدودیت‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی مخزن می‌باشد.

قیود مدل شامل محدودیت‌های حجمی، توازن عرض و تقاضای آب و محدودیت تبخیر و سرریز مطابق با روابط (3) تا (5) هستند:

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, 360 \quad (3)$$

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, 360 \quad (4)$$

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t - (E_t * A_t / 1000) - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - (E_t * A_t / 1000) \geq S_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن، S_t حجم ذخیره مخزن به ترتیب در ابتدای هر دوره t ، Q_t حجم جریان ورودی به مخزن در دوره t ، E_t ارتفاع تبخیر مخزن در دوره t ، S_{min} و S_{max} به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین حجم ذخیره مخزن در کل دوره بهره‌برداری، Sp_t حجم سرریز از مخزن در دوره t ، A_t مساحت دریاچه مخزن در شروع دوره t می‌باشد.

مدل SA-HA با بهره‌گیری از سازوکار تطبیقی خود، در هر تکرار مقدار رهاسازی بهینه (R_t) را جست‌وجو می‌کند تا مقدار تابع هدف بیشینه شود. در مراحل اولیه، جست‌وجو با گام‌های گسترده برای پوشش فضای تصمیم انجام می‌شود و با نزدیک شدن به پاسخ بهینه، گام‌ها به صورت خودکار کاهش یافته تا دقت نهایی افزایش یابد.

5-2- سنجش عملکرد سامانه

به منظور سنجش پایداری عملکرد سامانه تخصیص آب، شاخص اطمینان‌پذیری⁹ می‌باشد. این شاخص مطابق با رابطه (6) به معنای احتمال تأمین تقاضای آب (به عنوان یک عامل رضایت¹⁰ (Sat) در سامانه تأمین آب) در کل دوره بهره‌برداری است:

$$\alpha = \text{Probability}\{x_t \in Sa_t\} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

که در آن α شاخص اطمینان‌پذیری در کل دوره بهره‌برداری، x_t وضعیت سامانه از نظر تأمین یا عدم تأمین آب در دوره t ، Sat عامل رضایت، یعنی تأمین تقاضا در دوره t است.

3- نتایج

3-1- تحلیل عملکرد مدل SA-HA در حل تابع ریاضی

اسفیر

برای ارزیابی دقت و پایداری الگوریتم پیشنهادی، عملکرد الگوریتم اسب پایه (HA) و نسخه خودتطبیقی آن (SA-HA) در حل تابع استاندارد اسفیر (Sphere) بررسی شد. این تابع به دلیل سادگی ساختار، محدب بودن و وجود تنها یک کمینه سراسری، یکی از متداول‌ترین معیارها برای ارزیابی الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل تک‌هدفه است. هر دو الگوریتم در فضای جست‌وجو با بازه $[-5.12, 5.12]$ و با پارامترهای اولیه یکسان شامل اندازه جمعیت، تعداد تکرارها و نرخ حرکت اجرا شدند. برای بررسی پایداری نتایج، هر مدل 10 بار به صورت مستقل اجرا گردید و میانگین و انحراف معیار مقادیر نهایی تابع هدف به عنوان شاخص‌های آماری مقایسه شدند.

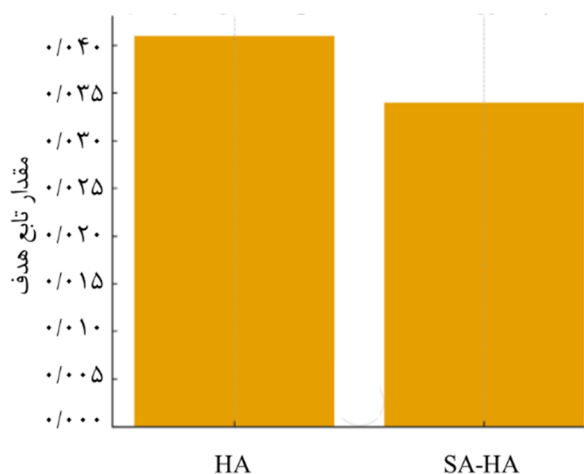
نتایج حاصل از آزمایش‌ها در شکل (2) خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که الگوریتم SA-HA نسبت به نسخه پایه، مقدار تابع هدف کم‌تری را در میانگین اجراها به دست آورده و پراکندگی نتایج نیز کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که افزودن سازوکار خودتطبیقی موجب بهبود پایداری و افزایش دقت جست‌وجو در فضای پاسخ شده است.

برای بررسی روند همگرایی، در شکل (3) تغییرات مقدار تابع هدف در طول تکرارها نشان داده شده است. نمودارها بیانگر آن هستند که SA-HA در مقایسه با HA با سرعت بیش‌تری به سمت مقدار بهینه حرکت می‌کند و نوسانات کم‌تری در مراحل پایانی دارد. این رفتار نتیجه تنظیم پویا و خودکار پارامترهای حرکتی در طول فرآیند بهینه‌سازی است که منجر به تعادل بهتر میان اکتشاف (جست‌جوی گسترده) و استخراج (بهبود دقیق پاسخ‌ها) شده است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که نسخه خودتطبیقی الگوریتم اسب توانسته است با حفظ ساختار ساده و الهام‌گرفته از رفتار

گردید. بدین ترتیب، تفاوت‌های مشاهده‌شده در نتایج فقط ناشی از رفتار ذاتی و سازوکار درونی الگوریتم‌ها است.

3-2-1- مقایسه عملکرد تابع هدف

مقادیر نهایی تابع هدف برای دو الگوریتم در شکل (4) نشان داده شده است. مقدار میانگین تابع هدف برای SA-HA برابر 0/034 و برای HA برابر 0/041 به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش حدود 17 درصدی در کارایی تأمین آب در نسخه خودتطبیقی است. این تفاوت بیانگر آن است که سازوکار یادگیری پویا در SA-HA موجب تنظیم بهتر ضرایب حرکتی و همگرایی مؤثرتر به نواحی بهینه فضای پاسخ می‌شود. از سوی دیگر، سرعت اجرای الگوریتم SA-HA نسبت به HA حدود 25 درصد کاهش را نشان می‌دهد. در واقع، درحالی‌که الگوریتم پایه پس از 5000 تکرار به حالت پایدار می‌رسد، نسخه خودتطبیقی با کنترل تدریجی گام جستجو و کاهش تطبیقی نرخ حرکت، توانسته است پاسخ بهینه را سریع‌تر و با نوسان کم‌تر بیابد. این ویژگی در مدل‌های منابع آب که فضای جستجو پیوسته و قیود متعددی دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد.



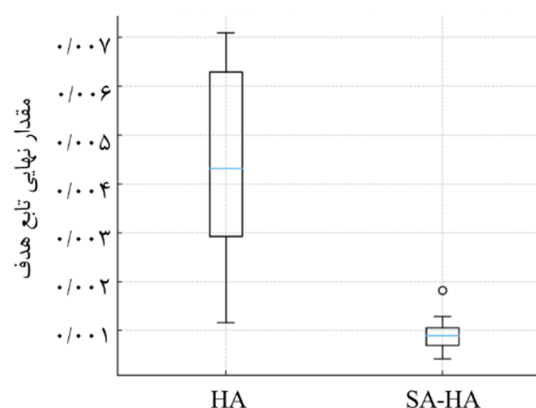
شکل 4- مقایسه مقدار تابع هدف بین الگوریتم‌های HA و SA-HA برای مسئله منابع آب

3-2-2- تحلیل اجزای حجمی مخزن

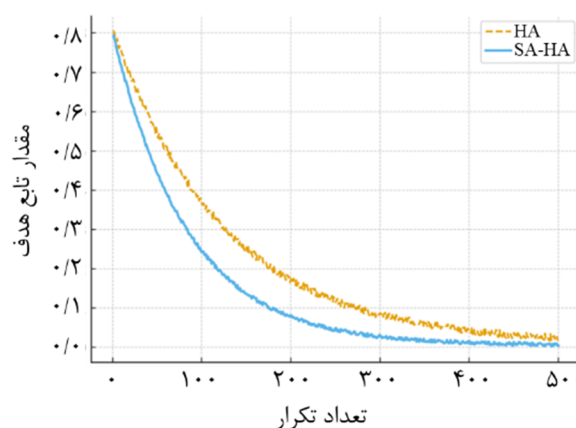
برای ارزیابی اثر الگوریتم‌ها بر عملکرد سامانه، متغیرهای کلیدی شامل رهاسازی (R_t)، ذخیره نهایی (S_t)، سرریز (Sp_t)، و کمبود تأمین (Df_t) مورد بررسی قرار گرفتند. مطابق شکل (5):

- مقدار رهاسازی در SA-HA اندکی بیش‌تر از HA است (122 در برابر 118 میلیون مترمکعب) که نشان‌دهنده توزیع مناسب‌تر آب میان ماه‌های خشک و مرطوب است.

طبیعی، کارایی بالاتری در همگرایی و پایداری نسبت به مدل پایه ارائه دهد. بنابراین، در ادامه از مدل SA-HA برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب در مخزن قرقو استفاده شده است.



شکل 2- مقایسه آماری عملکرد HA و SA-HA در حل تابع اسفیر



شکل 3- روند همگرایی HA و SA-HA در حل تابع اسفیر

3-2-3- تحلیل بهینه‌سازی تک‌هدفه در تخصیص منابع آب

با الگوریتم‌های HA و SA-HA

در این بخش، عملکرد دو نسخه از الگوریتم بهینه‌سازی اسب شامل مدل کلاسیک (HA) و مدل خودتطبیقی اصلاح شده (SA-HA) در حل مسئله تخصیص بهینه‌ی آب مخزن قرقو بررسی و مقایسه شده است. هدف از این تحلیل، سنجش توانایی هر الگوریتم در بهینه‌سازی نسبت آب تأمین شده در طول دوره بهره‌برداری و کاهش نوسانات در پاسخ‌هاست.

مدل تخصیص آب با تابع هدف بهینه‌سازی کارایی تأمین آب اجرا شد و هر الگوریتم در شرایط به‌طور کامل یکسان شامل اندازه جمعیت، تعداد تکرارها و محدوده قیود مخزن آزمایش

این افزایش ناشی از کاهش دفعات و شدت دوره‌های کمبود و همچنین توزیع یکنواخت‌تر رهاسازی در طول زمان است. در واقع، یادگیری تطبیقی در SA-HA به آن امکان داده است تا در هر مرحله با توجه به کیفیت پاسخ‌های پیشین، رفتار حرکتی خود را اصلاح کند و از نوسانات شدید در تصمیمات بهره‌برداری جلوگیری نماید.

4- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزودن سازوکار خودتطبیقی به HA منجر به بهبود قابل توجه در کارایی جستجو و کیفیت پاسخ‌ها شده است. مدل پیشنهادی SA-HA با تنظیم خودکار پارامترهای حرکتی و یادگیری پویا، توانسته است ضمن حفظ سادگی ساختار، عملکردی پایدارتر و دقیق‌تر در حل مسئله تخصیص آب ارائه دهد.

در فرآیند ارزیابی، نتایج حاصل از SA-HA با نسخه اولیه HA مقایسه گردید. یافته‌ها نشان دادند که نسخه خودتطبیقی علاوه بر افزایش سرعت همگرایی، موجب پایداری بیشتر نتایج و کاهش نوسانات عملکرد در تکرارهای متوالی شد. همچنین، توزیع مکانی اسب‌ها در فضای جستجو یکنواخت‌تر باقی ماند و احتمال گرفتار شدن در نقاط بهینه محلی به شکل محسوسی کاهش یافت.

به‌طور کلی، توسعه SA-HA نشان داد که افزودن سازوکار خودتطبیقی به الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند دقت، پایداری و انعطاف‌پذیری آن‌ها را در مسائل پیچیده بهینه‌سازی منابع آب افزایش دهد و گامی مؤثر در جهت تصمیم‌گیری هوشمند و مدیریت پایدار به‌شمار آید.

براساس تحلیل‌های انجام‌شده، نسخه خودتطبیقی نسبت به نسخه کلاسیک مزایای زیر را دارد:

بهبود تابع هدف: افزایش حدود 17 درصد در نسبت تأمین به تقاضا و کاهش نوسانات همگرایی

پایداری سامانه: کاهش قابل توجه سرریز و کمبود و افزایش ذخیره مخزن در بازه زمانی بلندمدت

اطمینان‌پذیری بالاتر: توانایی سریع‌تر سامانه برای بازایی شرایط پایدار پس از دوره‌های کمبود

انعطاف‌پذیری محاسباتی: عدم نیاز به تنظیم دستی پارامترها و سازگاری خودکار با ویژگی‌های مسئله

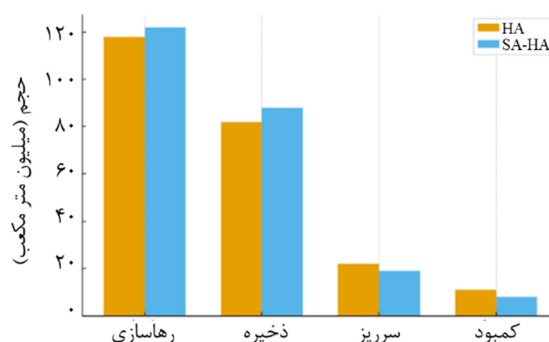
در مجموع، الگوریتم SA-HA رویکردی نوین و مؤثر برای حل مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه در مدیریت منابع آب به‌شمار می‌رود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این مدل در سامانه‌های چندمخزنه و تحت سناریوهای تغییر اقلیم نیز آزموده شود تا ظرفیت آن در تصمیم‌گیری‌های پیچیده‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد.

• ذخیره نهایی در SA-HA حدود 7 درصد افزایش یافته است که نشان‌دهنده پایداری بیشتر مخزن و توان ذخیره‌سازی بهتر در مواجهه با تغییرات ورودی است.

• سرریز مخزن در SA-HA حدود 14 درصد کاهش یافته است، به دلیل تصمیم‌گیری هوشمندتر در حفظ حجم بهینه و جلوگیری از اتلاف آب

• کمبود تأمین آب در SA-HA نسبت به HA حدود 27 درصد کاهش یافته است. این شاخص مهم‌ترین معیار موفقیت الگوریتم در مدیریت منابع محدود محسوب می‌شود.

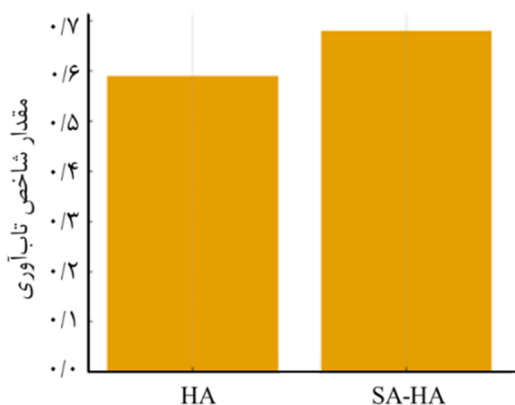
در مجموع، SA-HA نه تنها مقدار تابع هدف را بهبود داده، بلکه موجب تغییر مثبت در اجزای حجمی و کارایی سامانه بهره‌برداری از مخزن نیز شده است.



شکل 5- مقایسه اجزای حجمی مخزن بین دو الگوریتم

3-2-3- تحلیل شاخص اطمینان‌پذیری سامانه

برای سنجش پایداری عملکرد سامانه تخصیص آب، شاخص اطمینان‌پذیری برای هر الگوریتم محاسبه شد (شکل 6). مقدار این شاخص برای SA-HA برابر 0/68 و برای HA برابر 0/59 به دست آمد. یعنی حدود 15 درصد افزایش در توانایی سامانه برای بازگشت به شرایط مطلوب پس از وقوع کمبودها می‌باشد.



شکل 6- مقایسه شاخص اطمینان‌پذیری سامانه در HA و SA-HA

Najafi M, Najarchi M, Mirhosseini S-M, "Multi-objective simulation-optimization for water resources management and uses in multi-dam systems in low-water regions", *Applied Water Science*, 2024, 14 (238).

<https://doi.org/10.1007/s13201-024-02296-y>

Zhang F, Zhang, Y, "A multi-objective optimization prediction approach for water resources based on swarm intelligence", *Earth Science Informatics*, 2020, 14, 457-468.

<https://doi.org/10.1007/s12145-020-00521-1>

5- مراجع

Ashofteh PS, Bozorg-Haddad O, Loáiciga HA, "Multi-objective optimization of reservoir operation considering climate change impacts", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145 (3), 04019004.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001049)

Garcia JA, Alamanos A, "A multi-objective optimization framework for water resources allocation considering stakeholder input", *Environmental Sciences Proceeding*, 2023, 25 (1), 32.

<https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14227>

Goldberg DE, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison-Wesley Publishing.

Heidari AA, Mirjalili S, Faris H, Aljarah I, Chen H, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications", *Future Generation Computer Systems*, 2019, 97, 849-872.

<https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>

Han Y, Dong Z, Cui C, Zhang T, Luo Y, "Multi-objective optimization scheduling for extensive plain lake water resources incorporating flood resource utilization", *Journal of Hydrology*, 2025, 651, 132584.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132584>

Karaboga D, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, Turkey, 2005.

Khoramipoor Z, Farzin S, "A combination approach for optimization operation of multi-objective cascade reservoir systems (Case study: Karun reservoirs)", *Journal of Hydroinformatics*, 2024, 26 (6), 1313-1332.

<https://doi.org/10.2166/hydro.2024.264>

Khoramipoor Z, Farzin S, "A methodology to improving the performance of MOAHA optimization algorithm using chaos theory; principle and application in optimal reservoir operation", *Water Resources Management*, 39, 2025.

<https://doi.org/10.1007/s11269-025-04092-y>

Kennedy J, Eberhart R, "Particle swarm optimization", *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, 4, 1942-1948.

<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>

Lu J, Chen Ch, Xie J, "Multi-objective immune algorithm with preference-based selection for reservoir flood control operation", *Water Resources Management*, 2015, 29, 1447-1466.

<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0886-6>

Miar-Naeimi F, Azizian Gh, Rashki M, "Horse herd optimization algorithm: A nature-inspired algorithm for high-dimensional optimization problems", *Knowledge-Based Systems*, 2021, 213, 106711.

Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A, "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, 2014, 69, 46-61.

<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

Moslemzadeh M, Farzin S, Karami H, Ahmadianfar I, "Introducing improved atom search optimization (IASO) algorithm: Application to optimal operation of multi-reservoir systems", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2023, 131, 103415.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103415>