



Application of the Slime Mould Optimization Algorithm (SMOA) in the Hydropower Three-Reservoir System Optimal Operation

Parisa-Sadat Ashofteh 

Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 22 August 2023

Received in revised form

14 September 2023

Accepted 4 October 2023

Published online 17 January 2024

Keywords:

Climate change

Genetic algorithm

Hydropower three-reservoir system

Slime mould optimization algorithm

ABSTRACT

Hydropower energy management is essential under climate change conditions. In this research, Slime Mould Optimization Algorithm (SMOA) is used to optimize the system of three hydropower reservoirs, and its results are compared with Genetic Algorithm (GA) to evaluate the performance of SMOA. First of all, SMOA performance is measured for Akley test function, which has been successfully performed. In the next step, the optimization is used on the three-reservoir hydropower system of Sazbon reservoir, Seymareh and Karkheh stream located in the Karkheh basin (Iran). The optimization of the hydropower problem is carried out for the baseline period of 1976-2005 and the future period of 2040-2069 under the RCP8.5 climate change scenario. The objective function is to minimize the lack of hydropower supply. For the optimization of the three-reservoir hydropower problem, the results show that the value of the objective function based on SMOA is close to the absolute optimal value, especially in the period of climate change. In general, the performance of SMOA to achieve the optimal value of the objective function in climate change periods is better than the baseline period and the solutions are more stable. In the comparison between SMOA and GA for the three-reservoir operation mode in the baseline and future period under the RCP8.5 scenario, the performance of SMOA in reaching the desired value of the objective function is much better, the speed of convergence is higher, the run-time is shorter, and the solutions of the objective function are more stable.

Cite this article: Ashofteh, P. S. (2024). Application of the Slime Mould Optimization Algorithm (SMOA) in the Hydropower Three-Reservoir System Optimal Operation. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (4), 929-944. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.364129.1096>

© The Author(s).
Press.

Publisher: The University of Tehran



DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.364129.1096>



کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی (SMOA) در بهره‌برداری بهینه از سامانه سه‌مخزنه برق آبی

پریسا سادات آشفته ✉

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷	
کلیدواژه‌ها: الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی برنامه‌ریزی ژنتیک تغییر اقلیم سامانه سه‌مخزنه برق آبی	<p>مدیریت انرژی برق آبی تحت شرایط تغییر اقلیم ضروری است. در این پژوهش برای بهینه‌سازی سامانه سه‌مخزنه برق آبی از الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی^۱ (SMOA) استفاده می‌شود و برای ارزیابی عملکرد SMOA، نتایج آن با الگوریتم ژنتیک^۲ (GA)، مقایسه می‌شود. قبل از هر چیز، عملکرد SMOA برای تابع آزمون اکلی^۳ سنجیده می‌شود که عملکرد موفقیت‌آمیزی داشته است. در گام بعد، بهینه‌سازی بر روی سامانه سه‌مخزنه برق آبی سازهین مخزنه، سیمره و کرخه جریانی واقع در حوضه آبریز کرخه (ایران) استفاده می‌شود. بهینه‌سازی مسئله برق آبی برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5 اجرا می‌شود. تابع هدف عبارت است از کمینه‌سازی کمبود تأمین انرژی برق آبی. برای بهینه‌سازی مسئله سه‌مخزنه برق آبی، نتایج نشان می‌دهند که مقدار تابع هدف براساس SMOA به مقدار بهینه مطلق نزدیک می‌باشد به‌ویژه در دوره تغییر اقلیم. به‌طور کلی، عملکرد SMOA برای دست‌یابی به مقدار بهینه تابع هدف در دوره‌های تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه بهتر و جواب‌ها پایاتر می‌باشد. در مقایسه بین SMOA و GA برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه در دوره پایه و دوره آتی تحت سناریوی RCP8.5، عملکرد SMOA در رسیدن به مقدار مطلوب تابع هدف بسیار بهتر، سرعت همگرایی بیش‌تر، مدت زمان اجرا کم‌تر و جواب‌های تابع هدف پایاتر می‌باشد.</p>

استناد: آشفته، پریسا سادات (۱۴۰۲). کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی (SMOA) در بهره‌برداری بهینه از سامانه سه‌مخزنه برق آبی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۴)، ۹۴۴-۹۲۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.364129.1096>



۱. مقدمه

تقاضای روزافزون به انرژی به‌علت ازدیاد جمعیت، تولید انرژی تجدیدپذیر را از اولویت‌های کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، قرار داده است. این امر به‌دلیل سازگار بودن این نوع انرژی با محیط زیست است. تولید انرژی برق‌آبی تحت اثر تغییر اقلیم قرار می‌گیرد، این امر به‌دلیل تغییر در میزان بارش و توزیع زمانی آن ناشی از تغییر اقلیم دارد. مدیریت بهینه سامانه‌های برق‌آبی برای تأمین اهدافی چون تولید برق نیازمند ابزار بهینه‌سازی قدرتمند است. با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در حوزه فناوری رایانه، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نوین در زمینه بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های برق‌آبی به‌سرعت در حال افزایش می‌باشند. تاکنون روش‌های متفاوتی برای بهینه‌سازی تولید انرژی برق‌آبی به‌عنوان منبع اصلی انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

Arun Kumar and Jothiprakash (2012) برای پیشینه‌کردن تولید انرژی برق‌آبی از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده کردند. ایشان بهینه‌سازی را در سه شرایط مختلف رواناب که بیان‌گر به‌ترتیب، سال‌های مرطوب، نرمال و خشک می‌باشد، مورد بررسی قرار دادند. مطالعات بر روی مخزن چندمنظوره کوینا انجام گرفت. نتایج نشان دادند که مخزن کوینا پتانسیل تولید انرژی بیش‌تری را دارد. Zaman *et al.* (2014) برای پیشینه‌کردن تولید انرژی برق‌آبی در نیروگاه‌های مخازن آنجیانگ و فوچونجیانگ از الگوریتم ازدحام ذرات^۴ (PSO) و GA استفاده کردند. نتایج نشان دادند که سرعت همگرایی PSO بیش‌تر از GA و مقدار تابع هدف GA بهتر از PSO بود. هم‌چنین GA در مقایسه با PSO برق بیش‌تری تولید نمود. Jahandideh-Tehrani *et al.* (2015) سامانه سه‌مخزنه برق‌آبی (خرسان یک و کارون سه و چهار) را تحت شرایط تغییر اقلیم شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند. در این مطالعه از مدل اقلیمی HadCM3 و سناریوی انتشار A2 برای دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۸۶) و سه دوره آتی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که سامانه مخازن در هر سه دوره آتی با کمبود انرژی مواجه خواهد شد. هم‌چنین بررسی‌ها نشان دادند که استفاده از مدل بهینه‌سازی غیرخطی موجب افزایش ۱۰ تا ۲۲ درصد توان تولیدی در دوره‌های آتی خواهد شد. Hosseini-Moghari *et al.* (2015) برای بهره‌برداری بهینه سامانه تک‌مخزن از الگوریتم رقابت استعماری^۵ (ICA) و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته^۶ (COA) استفاده کردند. ایشان مطالعات خود را بر روی مخزن کارون چهار واقع در استان چهارمحال بختیاری در غرب ایران برای یک دوره ۳۶۰ ماهه و با هدف پیشینه‌کردن بهره‌وری، انجام دادند. برای ارزیابی عملکرد ICA و COA، نتایج را با GA و برنامه‌ریزی غیرخطی^۷ (NLP) مورد مقایسه قرار دادند. نتایج عملکرد بالای COA در استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه را نشان دادند (با مقدار میانگین تابع هدف ۵/۵۴۵) و پس از آن ICA با مقدار میانگین تابع هدف ۶/۴۶۱ در رتبه دوم قرار گرفت. Garousi-Nejad *et al.* (2016) برای بهره‌برداری بهینه سامانه مخزن با اهداف تأمین آب کشاورزی و تولید انرژی برق‌آبی از الگوریتم کرم شب‌تاب^۸ (FA) استفاده کردند ایشان نتایج روش NLP را به‌عنوان راه‌حل‌های بهینه سرتاسری در نظر گرفتند. مقدار میانگین تابع هدف در روش NLP مقدار ۳/۳۷۲۷ محاسبه شد. نتایج، برتری FA (با مقدار میانگین تابع هدف ۳/۶۰۷۸) را نسبت به GA (با مقدار میانگین تابع هدف ۶/۶۷۵۴) برای مخزن آیدوگموش با هدف تأمین آب کشاورزی نشان دادند. نتایج مخزن کارون چهار با هدف تولید انرژی برق‌آبی نشان دادند که FA راه‌حل‌های بهینه بهتری و هم‌چنین سرعت بالاتری برای حل مسئله نسبت به GA داشت. هم‌چنین FA، برای نتایج پنج دوره بهینه‌سازی انحراف معیار کم‌تری نسبت به GA داشت. Akbari-Alashti *et al.* (2018) اثرات تغییر اقلیم را تا ۲۱۰۰ بر مدیریت آب دو مخزن اصلی، به‌نام‌های دز و علویان، ارزیابی نمودند. نتایج نشان دادند که هیدرولوژی پیش‌بینی‌شده آینده، بهره‌برداری از مخازن، عملکرد پایین‌تری (یعنی کمبود آب بیش‌تری) نسبت به شرایط فعلی، به‌ویژه برای سد علویان خواهد داشت. Chang *et al.* (2018) روشی مرکب از مدل‌های شبیه‌ساز و بهینه‌ساز برای شناسایی قواعد اجرایی در نیروگاه مخازن

برق‌آبی ارائه دادند. از روش شبیه‌ساز برای قواعد بهره‌برداری تطبیقی مخازن برق‌آبی برای کاهش اثرات پدیده تغییر اقلیم و از مدل بهینه‌ساز برای بهره‌برداری بهینه سامانه مخزن برق‌آبی آبخاری با هدف بیشینه‌سازی تولید انرژی برق‌آبی تحت شرایط اقلیم استفاده کردند. ایشان مطالعات خود را بر روی سامانه مخزن برق‌آبی رودخانه هانجیانگ پیاده کردند. نتایج نشان دادند که براساس نمودار بهره‌برداری بهینه میزان تضمین تولید انرژی برق‌آبی ۸۷ درصد و میانگین تولید برق سالانه ۱۶/۱ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین تولید انرژی برق‌آبی نسبت به نمودار بهره‌برداری مرسوم در سال‌های مرطوب، نرمال و خشک، به ترتیب ۴/۴، ۹/۰ و ۷/۳ درصد افزایش نشان دادند. Zhang *et al.* (2019) از روش‌های تحلیلی برای قواعد بهینه برق‌آبی برای تخصیص بهینه مخزن در سامانه‌های چندمخزنه استفاده کردند. ایشان از یک تابع انرژی (تابع E) برای تخمین تولید انرژی برق‌آبی استفاده کردند. تابع E برای سامانه چندمخزنه تابعی از دو متغیر، ضریب تناسب^۱ آلفا (نشان‌دهنده تناسب بین هر دو مخزن سامانه چندمخزنه) و افزایش ذخیره‌سازی بود. تابع تحلیلی E با شبیه‌سازی عددی برق‌آبی مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که خطاهای محاسبه‌شده بین تابع تحلیلی E و شبیه‌سازی عددی برق‌آبی قابل قبول بودند. Liu *et al.* (2020) تأثیرات تغییرات متوسط جریان ورودی سالانه^{۱۰} (AAIV) را بر بهره‌برداری بلندمدت سامانه چندمخزنه برق‌آبی^{۱۱} (MHR) بررسی نمودند. ایشان از الگوریتم‌های فراابتکاری مختلفی از جمله الگوریتم یادگیری ماشین^{۱۲} (ML)، PSO و GA برای سناریوهای مختلف جریان ورودی، استفاده نمودند. آن‌ها در نهایت الگوریتم ML را برای حل این مسئله توصیه کردند. Ren *et al.* (2021) از الگوریتم بهینه‌سازی گاو وحشی توسعه یافته^{۱۳} (DWHO) برای بهینه‌سازی مخازن برق‌آبی استفاده کردند و برای بررسی عملکرد آن، با سایر الگوریتم‌ها مقایسه شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که این الگوریتم راه‌حل مناسبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها تولید نمود. Sharifi *et al.* (2022) توانایی EA را در بهینه‌سازی تولید انرژی از مخزن برق‌آبی کارون^۴، بررسی نمودند. بهترین راه‌حل توسط الگوریتم ازدحام پروانه‌ها^{۱۴} (MSA) حاصل شد که حدود ۶۵ درصد بیش‌تر از تولید انرژی واقعی بود. Liu *et al.* (2023) الگوریتم جستجوی کلاغ^{۱۵} (CSA) را براساس PSO (CSA-PSO) برای حل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه مخزن برق‌آبی پیشنهاد کردند. ایشان PSO-CSA را با PSO، CSA و GA مقایسه کردند. نتایج برتری الگوریتم پیشنهادی را در حل مسئله کنترل آب مخازن برق‌آبی نشان دادند. Qiu *et al.* (2023) روش جدیدی را برای استخراج قواعد بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی پیشنهاد دادند. ایشان از ماشین بردار پشتیبان^{۱۶} (SVM) برای استخراج قواعد بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی در رودخانه یانگ‌تسه چین استفاده نمودند.

تاکنون مطالعاتی در ارتباط با بهره‌برداری بهینه سامانه برق‌آبی براساس الگوریتم‌های فراابتکاری صورت گرفته است. مسئله بهره‌برداری از سامانه‌های برق‌آبی تحت شرایط تغییر اقلیم به‌ذات مسئله‌ای پیچیده و غیرخطی می‌باشد و این پیچیدگی در سامانه چندمخزنه برق‌آبی به دلیل افزایش محدودیت‌ها و غیره بیش‌تر می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، توسعه SMOA برای اولین بار در مسئله بهینه‌سازی چندمخزنه برق‌آبی است و مقایسه و ارزیابی عملکرد این روش با GA است. برای بررسی مسئله برق‌آبی، سامانه پیچیده سه‌مخزنه برق‌آبی (سازبن مخزنی، سیمره و کرخه جریانی) در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و دوره ۳۰ ساله تغییر اقلیم (۲۰۴۰-۲۰۶۹) تحت سناریوی RCP8.5 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

روش‌های پژوهش حاضر در پنج بخش ارائه می‌شود. در بخش اول تابع آزمون ریاضی اکلی برای ارزیابی الگوریتم بهینه‌ساز SMOA معرفی شدند. در بخش دوم مسئله برق‌آبی مدل‌سازی شد. در بخش سوم SMOA تشریح شد و در بخش چهارم GA به‌طور مختصر توضیح داده شد و نتایج SMOA با آن مقایسه و تحلیل گردید.

۱.۲. منطقه مطالعاتی

رودخانه کرخه از مناطق میانی و جنوب‌غربی رشته کوه‌های زاگرس در نواحی غرب و شمال‌غرب کشور سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی در حدود ۹۰۰ کیلومتر در امتداد شمال به جنوب، سرانجام در مرز مشترک ایران و عراق به مرداب هورالعظیم می‌رسد. رودخانه کرخه از دو شاخه اصلی سیمره و کشکان تشکیل شده است. سیمره نیز از دامنه کوه‌های شاهو و ارتفاعات کوه‌های زاگرس نشأت گرفته و از دو شاخه اصلی قره‌سو و گاماسب و چند آبراهه تشکیل شده است (Anonymous, 2009). حوضه آبریز رودخانه کرخه به‌وسعت حدود ۴۳ هزار کیلومترمربع می‌باشد. حوضه آبریز کرخه از نظر مختصات جغرافیایی بین ۴۶/۰۶ تا ۴۹/۱۰ درجه طول شرقی و ۳۰/۴۹ تا ۳۴/۵۹ درجه عرض شمالی قرار گرفته است. این حوضه از غرب به رودخانه‌های مرزی ایران و عراق، از شرق به حوضه رودخانه دز و کارون و از شمال و جنوب به‌ترتیب از طریق حوضه‌های آبریز سفیدرود، قره‌چای و تالار هورالعظیم محدود می‌شود.

حوضه رودخانه کرخه در رشته کوه زاگرس (با توده هوای کم‌فشار و مرطوب که از حوضه‌های غربی وارد این منطقه می‌شوند) واقع شده است. این ناحیه از سمت شرق از میزان رطوبت و بارندگی کمی برخوردار است. حدود ۵۵/۵ درصد این ناحیه را مناطق کوهستانی دربرگرفته است که در بخش‌های شرقی و میانی قرار دارد. در محدوده دشت خوزستان نواحی مسطحی وجود دارد که اختلاف ارتفاع کمی از دریا دارند. در این مناطق به‌سبب وجود توده‌های هوایی گرم و خشک نواحی عربستان، عدم شرایط جوی نامناسب، درجه حرارت بالا و بارندگی کم وجود دارد. اما در برخی از سال‌ها در زمستان، یخبندان و کاهش دما در فواصل زمانی کوتاهی ایجاد می‌گردد. به‌صورت کلی، اقلیم این حوضه کرخه در حوضه آبریز قره‌سو نیمه‌مرطوب، در ناحیه آبریز سیمره، اقلیم نیمه‌خشک سرد، در ناحیه حوضه آبریز رودخانه کشکان، نیمه‌مرطوب و سرد و در ناحیه شمال (خوزستان)، خشک و گرم است (Anonymous, 2010).

داده‌های هواشناسی مستقر در این حوضه از ایستگاه‌های دو سازمان هواشناسی و وزارت نیرو است. در مجموع ۳۳۶ ایستگاه شامل ایستگاه‌های باران‌سنجی، تیخیرسنجی، سینوپتیک، کلیماتولوژی در منطقه مورد مطالعاتی واقع شده است. تعدادی از ایستگاه‌های مذکور به‌دلیل نداشتن طول دوره آماری مناسب، مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. تابستان‌ها اغلب بدون بارندگی بوده و دارای رژیم بارندگی شبه‌مدیترانه‌ای است. متوسط بارندگی سالانه حوضه آبریز مورد مطالعه در دوره ۴۶ ساله برابر با ۴۲۲/۷ میلی‌متر می‌باشد. از باران سالانه بهار ۲۵/۷ درصد، تابستان کم‌تر از یک درصد، پاییز ۲۹/۳ درصد و زمستان ۴۴/۸ درصد سهم دارند. بیشینه میزان بارندگی متعلق به ماه اسفند است (۱۷ درصد). مردادماه گرم‌ترین و بهمن‌ماه سردترین ماه سال است. تعداد روزهای یخبندان ۳۳/۵ روز و متوسط سالانه سرعت باد ۱/۴۵ متر بر ثانیه می‌باشد (Anonymous, 2014).

سد مخزنی و نیروگاه برق‌آبی کرخه در فاصله ۲۴ کیلومتری شمال‌غرب اندیمشک در استان خوزستان احداث گردیده است. سد سیمره در مسیر رود سیمره در استان ایلام و در شهرستان بدره قرار دارد. سد سازین در مناطق کوهستانی چرمین و سازند واقع شده است (Anonymous, 2014). در این پژوهش، مخازن تک‌منظوره برق‌آبی سازین مخزنی، سیمره و کرخه مورد مطالعه قرار می‌گیرند. این سامانه سه‌مخزنه به‌منظور تولید انرژی برق‌آبی تعریف شده است. در این پژوهش، مخازن تک‌منظوره برق‌آبی سازین مخزنی، سیمره و کرخه مورد مطالعه قرار می‌گیرند. هدف بهره‌برداری در هر سه مخزن کرخه جریانی، سیمره، سازین مخزنی، تولید برق‌آبی می‌باشد. بازده نیروگاه در این سه مخزن به‌ترتیب ۰/۹۳، ۰/۹۳۵، ۰/۹۳ می‌باشد و ضریب کارکرد در این سه مخزن به‌ترتیب ۰/۲۵، ۰/۱۶، ۰/۱۶ می‌باشد.

حوضه آبریز کرخه به‌عنوان یکی از منابع آبی مهم کشور از نظر توسعه تولید انرژی برق‌آبی و کشاورزی است. در این پژوهش، مخازن برق‌آبی (به‌عنوان یک سامانه سه‌مخزنه)، از جمله سازین مخزنی، سیمره و کرخه جریانی مورد بررسی قرار می‌گیرند. ظرفیت نصب نیروگاه سازین مخزنی، سیمره و کرخه جریانی، به‌ترتیب ۳۰۰، ۴۸۰ و ۳۶۰ مگاوات می‌باشد.

همچنین حجم مخزن در رقوم نرمال به ترتیب ۱۵۷۵/۷، ۲۴۷۳/۶ و ۱۳۱/۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. نحوه اتصال این سامانه سه‌مخزنه به صورت سری بوده که تصویر نمایشی آن در شکل (۱) آورده شده است.

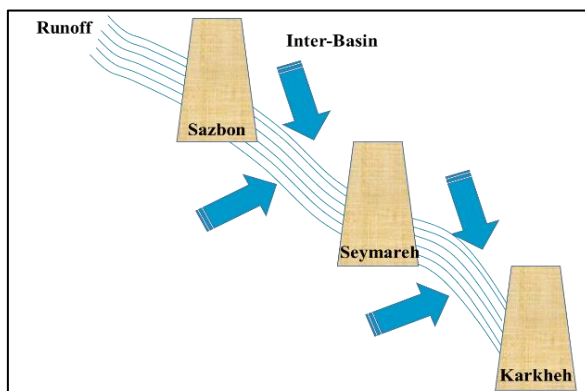


Figure 1. Schematic of the three-reservoir system under study

رواناب رودخانه حوضه (رودخانه‌های سیمره و کرخه) پیش از این توسط (Rahmati *et al.* (2022) شبیه‌سازی شد و تغییرات اقلیمی براساس گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^{۱۷} (AR5-IPCC) تحت سناریوی RCP8.5 (IPCC, 2013) برای دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵) مورد بررسی قرار گرفت. رواناب شبیه‌سازی شده برای دو رودخانه مذکور در دوره آینده تحت سناریوی RCP8.5 در شکل (۲) آورده شده است.

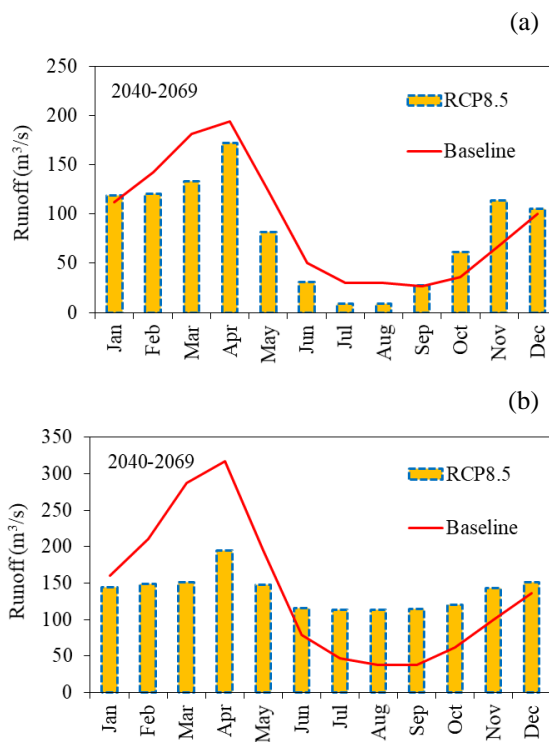


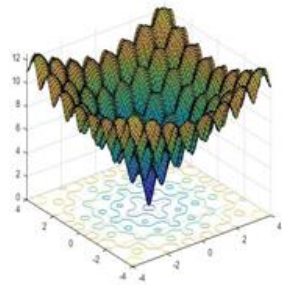
Figure 2. Comparison of runoff (a) of the Seymareh River in the baseline period with 2040-2069; and (b) Karkkeh River in the baseline period with 2040-2069 under the RCP8.5 scenario.

مطابق شکل (۲-a)، متوسط بلندمدت رواناب رودخانه سیمره در آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۹) تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه ۱۰/۲ درصد کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۲-b)، متوسط بلندمدت رواناب رودخانه کرخه در آینده نسبت به پایه ۰/۷ درصد کاهش خواهد یافت.

۲.۲. تابع آزمون ریاضی

در این پژوهش از تابع آزمون ریاضی اکلی برای ارزیابی SMOA استفاده می‌شود. تابع اکلی یک تابع پیوسته و غیرمحدب می‌باشد که کمینه‌های محلی زیادی دارد و احتمال گیر افتادن در بهینه‌های محلی وجود دارد. مشخصات تابع آزمون ریاضی در جدول (۱) آورده شد.

Table 1. Math test functions

Name of test function	Function	Search space	Absolute Solution	Figure	Reference
Akley function	$F(x) = -20 \cdot \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi \cdot x_i)\right) + 20 + \exp(1)$ $(n = 1, 2, \dots, N)$	[-32, 32]	0		(Deb, 2012)

۳.۲. مدل‌سازی سامانه مخازن برق آبی

در این پژوهش تابع هدف شامل کمینه‌سازی کمبود انرژی تولیدی نیروگاه مطابق با رابطه (۱) محاسبه شد (Akbari-Alashti et al., 2014):

$$\text{Minimize } EnDI = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left(\frac{EnGC_i - En_{i,t}}{EnGC_i} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، $En_{i,t}$: انرژی تولیدی نیروگاه مخزن i ام طی دوره زمانی t ام (گیگاوات ساعت)؛ $EnGC_i$: ظرفیت تولید انرژی نیروگاه i ام (گیگاوات ساعت)، و $EnDI$: شاخص کمبود انرژی هستند.

۴.۲. قیودات مسئله

یکی از قیودات مسئله، معادله پیوستگی مخزن بوده که مطابق با رابطه (۲) بیان شد (Bolouri-Yazdeli et al., 2014):

$$STO_{i,t+1} = STO_{i,t} + Q_{i,t} - REL_{i,t} - \frac{(ARE_{i,t} \times EVA_{i,t})}{1000} - SPI_{i,t} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن، $STO_{i,t+1}$: حجم ذخیره مخزن i ام در ابتدای دوره $t+1$ ام (میلیون مترمکعب)؛ $STO_{i,t}$: حجم ذخیره مخزن i ام در ابتدای دوره t ام (میلیون مترمکعب)؛ $Q_{i,t}$: حجم آورد ورودی به مخزن i ام طی دوره زمانی t ام (میلیون مترمکعب)؛ $REL_{i,t}$: حجم رهاسازی از مخزن i ام طی دوره زمانی t ام (میلیون مترمکعب)؛ $ARE_{i,t}$: سطح دریاچه مخزن i ام طی دوره زمانی t ام (کیلومتر مربع)؛ $EVA_{i,t}$: تبخیر از سطح مخزن i ام طی دوره زمانی t ام (میلی متر)، و $SPI_{i,t}$: حجم سرریز از مخزن i ام طی دوره زمانی t ام (میلی متر).

لام طی دوره زمانی t ام (میلیون مترمکعب)، هستند. قید مربوط به سرریز از مخازن مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود (Bolouri-Yazdeli et al., 2014):

$$SPI_{i,t} = \begin{cases} STO_{i,t+1} - STO_{max_i} & \text{if } STO_{i,t+1} > STO_{max_i} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، STO_{max_i} : بیشینه حجم ذخیره مخزن t ام است. توان نیروگاه، افت خالص مخزن و انرژی تولیدی نیروگاه به ترتیب مطابق روابط (۴) تا (۶) محاسبه شدند (Zolghadr-Asli, 2017):

$$POW_{i,t} = \frac{9.81(REL_{i,t} \times eff_i \times LHN_{i,t})}{1000(PEF \times M)} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$LHN_{i,t} = ELE_{i,t} - TW_{i,t} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$En_{i,t} = \frac{POW_{i,t} \times PeHo_i \times Da}{1000} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن‌ها، eff_i : راندمان نیروگاه t ام؛ $LHN_{i,t}$: افت خالص آب مخزن t ام طی دوره t ام؛ $POW_{i,t}$: توان تولیدی نیروگاه t ام طی دوره t ام؛ PEF : ضریب کارکرد نیروگاه مخزن t ام، M : ضریب تبدیل واحد؛ $ELE_{i,t}$: تراز آب مخزن t ام طی دوره t ام؛ $TW_{i,t}$: تراز آب در پایاب نیروگاه t ام طی دوره t ام؛ Da : تعداد روزهای ماه؛ $PeHo_i$: ساعت اوج (پیک) تولید انرژی هر نیروگاه و $En_{i,t}$: انرژی تولیدی نیروگاه مخزن t ام طی دوره t ام، هستند.

دیگر قیودات مسئله شامل قیودات مربوط به حجم ذخیره مخزن، حجم رهاسازی و توان تولیدی می‌باشند که براساس روابط (۷) تا (۹) در نظر گرفته شدند (Rahmati et al., 2021):

$$REL_{min_i} \leq REL_{i,t} \leq REL_{max_i} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$STO_{min_i} \leq STO_{i,t} \leq STO_{max_i} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$0 \leq POW_{i,t} \leq PIC_i \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن‌ها، REL_{min_i} : کمینه حجم رهاسازی مخزن t ام؛ REL_{max_i} : بیشینه حجم رهاسازی مخزن t ام؛ STO_{min_i} : کمینه حجم ذخیره مخزن t ام، و PIC_i : ظرفیت نصب نیروگاه t ام، هستند. در این پژوهش، تابع جریمه ناشی از تخطی از حجم ذخیره مخزن ($PeFu_1$) و تابع جریمه ناشی از تخطی از حجم کمینه مخزن ($PeFu_2$) مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شدند. در صورت تخطی از قیود ذکر شده فوق، توابع جریمه ($PeFu_1$) و ($PeFu_2$) به تابع هدف کمینه‌سازی، اضافه می‌شوند.

$$PeFu_1 = U \times (1 + STO_{min_i} - STO_{i,t})^2 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$PeFu_2 = V \times \left(\frac{|STO_{min_i} - STO_{i,t}|}{STO_{max_i} - STO_{min_i}} \right)^2 + W \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن‌ها، U ، V و W : مقادیر ثابت مثبت هستند (که با سعی و خطا محاسبه می‌شوند). رابطه تراز-حجم و سطح-حجم مربوط به هریک از مخازن به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) تعریف شدند (Zolghadr-Asli, 2017):

$$ARE_i = a_1(STO_{i,t})^5 + b_1(STO_{i,t})^4 + c_1(STO_{i,t})^3 + d_1(STO_{i,t})^2 + e_1(STO_{i,t}) + f_1 \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$ReH_i = a_2(STO_{i,t})^5 + b_2(STO_{i,t})^4 + c_2(STO_{i,t})^3 + d_2(STO_{i,t})^2 + e_2(STO_{i,t}) + f_2 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن‌ها، ARE_i : سطح مخزن t ام؛ ReH_i : تراز مخزن t ام، و پارامترهای a ، b ، c ، d ، e ، f : ضرایب ثابت هستند.

۴.۲. الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی (SMOA)

مزیت اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، توانایی آن‌ها در انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای سامانه تحت شرایط مختلف است و دارای ویژگی‌های صرفه‌جویی در زمان هستند.

در این پژوهش برای بهینه‌سازی از الگوریتم جدید کپک مخاطی (SMOA) استفاده خواهد شد. این الگوریتم در زمره الگوریتم‌های فراابتکاری است. SMOA توسط Li et al. (2020) ارائه شد. کپک‌های مخاطی می‌توانند کارهای هوشمندانه‌ای انجام دهند و در مسیرهای پر پیچ و خم‌دار راه خود را پیدا کنند. آن‌ها به دقت در تغذیه خود کیفیت غذا و خطرپذیری^{۱۸} آن را می‌سنجند. برای شبیه‌سازی فرایند تولید، از بازخورد مثبت و منفی موج انتشار کپک مخاطی مبتنی بر موج زیستی^{۱۹} استفاده می‌شود تا مسیر بهینه برای اتصال مواد غذایی را با توانایی اکتشاف^{۲۰} و استخراج^{۲۱} بالا فراهم کند. SMOA با رفتاری که از خود در یافتن منبع غذایی با کیفیت نشان می‌دهد، در جهت‌های مختلف گسترش می‌یابد و قلمرو خود را تشکیل می‌دهد. این الگوریتم رفتار و تغییرات ریخت‌شناسی^{۲۲} کپک مخاطی را در جستجوی منبع غذایی شبیه‌سازی می‌کند.

وقتی شاخه یا رگ^{۲۳} کپک مخاطی به یک منبع غذایی نزدیک می‌شود، این شاخه‌ها یا رگ‌ها ضخیم‌تر خواهند بود. از طریق این بازخورد مثبت- منفی کپک می‌تواند مسیر بهینه برای اتصال غذا را ایجاد کند. وقتی کیفیت منابع غذایی متفاوت باشد، کپک مخاطی منبع با کیفیت‌تر را انتخاب می‌کند. در عین حال، باید در تصمیم‌گیری سریع باشد و هرچه این سرعت بالاتر باشد، احتمال یافتن منبع اصلی کاهش می‌یابد. کپک مخاطی به منبع غذایی براساس بو به‌صورت رابطه (۱۴) نزدیک خواهد شد (Li et al., 2020):

$$\vec{X}_{t+1} = \begin{cases} \vec{X}_{b,t} + \vec{V}_b \times (\vec{W} \cdot \vec{X}_{A,t} - \vec{X}_{B,t}) & r < p \\ \vec{V}_c \times \vec{X}_t & r \geq p \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن، \vec{V}_b : پارامتری که از a تا $-a$ متغیر است؛ \vec{V}_c : نشان‌دهنده پارامتری که به شکل خطی از یک به صفر کاهش می‌یابد؛ $\vec{X}_{b,t}$: موقعیت فعلی مربوط به غلظت بالای بو؛ X : مکان کپک مخاطی؛ $\vec{X}_{A,t}$ و $\vec{X}_{B,t}$: انتخاب افراد از کپک مخاطی به‌صورت تصادفی؛ W : وزن کپک مخاطی؛ t : تکرار فعلی؛ $t+1$: تکرار بعدی؛ r : مقدار تصادفی در فاصله [0,1] را نشان می‌دهد و p به‌صورت رابطه (۱۵) تعریف شد (Li et al., 2020):

$$p = \tanh|S(i) - DF| \quad i \in 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

که در آن، $S(i)$: نیمه اول جمعیت و DF : بهترین برآزش به‌دست‌آمده در تمام تکرارها، هستند. رفتار کپک مخاطی در تشکیل ساختار شبکه‌ای به‌صورت رابطه ریاضی (۱۶) محاسبه شد (Li et al., 2020):

$$\vec{X}^* = \begin{cases} \text{rand} \cdot (\text{UpperB} - \text{LowerB}) + \text{LowerB} & \text{rand} < z \\ \vec{X}_{b,t} + \vec{V}_b \times (\vec{W} \cdot \vec{X}_{A,t} - \vec{X}_{B,t}) & r < p \\ \vec{V}_c \times \vec{X}_t & r \geq p \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که در آن، UpperB و LowerB : مرزهای بالا و پایین محدوده جستجو هستند. هم‌چنین rand مانند r مقدار تصادفی در فاصله [0,1] را نشان می‌دهد.

۵.۲. الگوریتم ژنتیک (GA)

در مطالعه حاضر به‌منظور بررسی عملکرد SMOA در تخصیص بهینه منابع آب مخازن برق‌آبی از GA استفاده خواهد شد. GA از مفهوم تکامل الهام گرفته شده است و اولین بار توسط Holland (1992) ارائه شد که الگوریتمی تصادفی و برپایه جمعیت است. بدین معنی که با تولید جمعیت اولیه تصادفی کروموزوم‌ها آغاز شده و در مرحله بعد، آن دسته از کروموزوم‌هایی که جواب بهینه‌تری از مسئله را نمایش می‌دهند، احتمال بیشتری برای تولیدمثل خواهند داشت، این روند در هر نسل، ادامه پیدا کرده و ژن‌های کروموزوم‌های تشکیل‌دهنده جمعیت به‌طوری تغییر می‌کنند که جواب‌ها به سمت جواب بهینه همگرا شود. به‌طور کلی، GA از اجزای زیر تشکیل می‌شوند:

۱. کروموزوم

در GA، هر کروموزوم نشان‌دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسئله موردنظر است. خود کروموزوم‌ها (راه‌حل‌ها) از تعداد ثابتی ژن (متغیر) تشکیل می‌شوند.

۲. جمعیت

مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. با تأثیر عملگرهای ژنتیکی بر روی هر جمعیت، جمعیت جدیدی با همان تعداد کروموزوم تشکیل می‌شود.

۳. تابع برازش

به‌منظور حل هر مسئله با استفاده از GA، ابتدا باید یک تابع برازش برای آن مسئله ابداع شود. برای هر کروموزوم، این تابع عددی غیرمنفی را برمی‌گرداند که نشان‌دهنده شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است.

۴. عملگرهای GA

در GA در طی مرحله تولید مثل از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود. با تأثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت، نسل بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش به‌طور معمول بیش‌ترین کاربرد را در GA دارند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ارزیابی SMOA براساس تابع آزمون ریاضی

در این قسمت نتایج حاصل از بهینه‌سازی تابع آزمون ریاضی ارائه می‌شوند. مقادیر سه اجرای بهینه‌سازی تابع آزمون براساس SMOA در جدول (۲) آورده شده است. همچنین، نمودار همگرایی تابع آزمون ریاضی اکلی براساس SMOA در شکل (۳) ارائه شده است.

Table 2. Values of the objective function (dimensionless) and run-time (in seconds) obtained from SMOA for the Akley math test function

Specifications of runs	Value	Time
First run	0.000008	12.7
Second run	0.000006	12.8
Third run	0.00007	13.3
best run	0.000006	
worst run	0.00007	
Average run	0.00002	
Standard deviation of runs	0.00002	
Coefficient of variation	1	
Best run-time	12.7	

مطابق شکل (۳)، منحنی همگرایی تابع اکلی به سرعت به جواب بهینه نزدیک می‌شود. SMOA سرعت همگرایی بالایی برای رسیدن به جواب بهینه مطلق دارد.

۳.۲. نتایج حاصل از بهینه‌سازی براساس SMOA

در این قسمت نتایج حاصل از بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سامانه سه‌مخزنه سازبن مخزنی، سیمره و کرخه جریانی در دوره

پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت سناریوی RCP8.5 ارائه می‌گردد. نتایج سه اجرای تابع هدف در دوره پایه و آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5 و هم‌چنین زمان اجرای مربوطه در جدول (۳) آورده شده است.

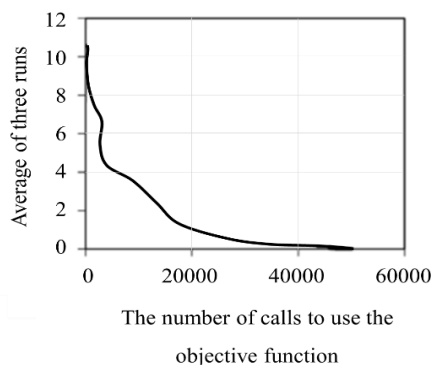


Figure 3. Convergence diagram of Akley's mathematical test function based on SMOA

Table 3. Objective function values (dimensionless) and run-time (in seconds) resulting from SMOA in the baseline period and the future period under RCP 8.5 climate change scenario

Specifications of runs	Baseline		Future	
	Value	Time	Value	Time
First run	1	402.2	0.04	407.9
Second run	1	403.6	0.01	406.1
Third run	1	404.9	0.001	402.9
best run	1		0.001	
worst run	1		0.01	
Average run	1		0.017	
Standard deviation of runs	0		0.02	
Coefficient of variation	0		120	
Best run-time	402.2		402.9	

مطابق جدول (۳) برای حالت سه‌مخزنه برق‌آبی، کمینه مقدار تابع هدف در آینده تحت سناریوی RCP8.5 برای اجرای سوم به مقدار ۰/۰۰۱ است. مقدار انحراف معیار در دوره تغییر اقلیم نزدیک به مقدار صفر می‌باشد. ضریب تغییرات در دوره آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. نمودارهای همگرایی برای حالت سه‌مخزنه برق‌آبی، براساس SMOA در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5 در شکل (۴) ارائه شده است.

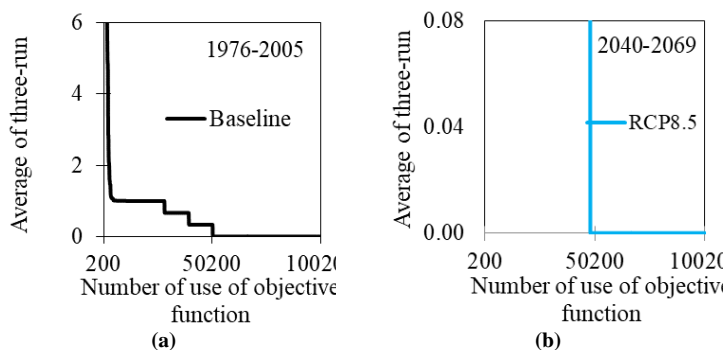


Figure 4. Convergence diagram of the average of three runs of SMOA in (a) baseline period and (b) 2040-2069, under RCP8.5 scenario

مطابق شکل (۴) برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری، SMOA در دوره پایه و آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5

به سرعت همگرا می‌شود و همچنین در این حالت بهره‌برداری مقدار تابع هدف در آینده تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه به مقدار بهینه مطلق بسیار نزدیک می‌شود. انرژی تولیدی برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 و همچنین ظرفیت تولید انرژی نیروگاه در شکل (۵) آورده شده است.

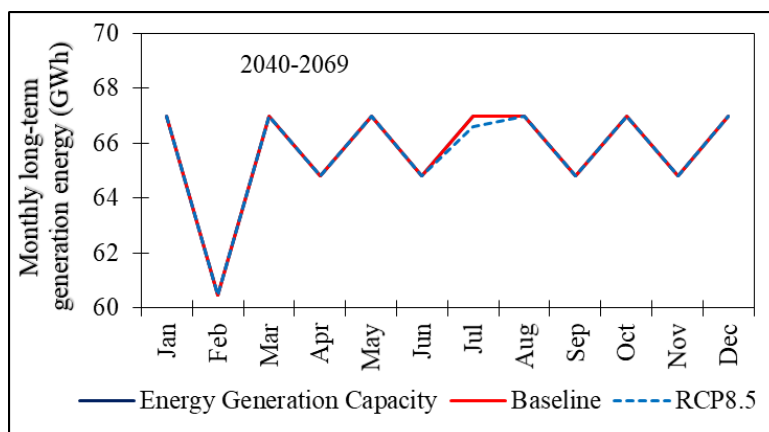


Figure 5. Comparison of the long-term energy production of the baseline period based on SMOA with 2040-2069 under the RCP8.5 scenario

مطابق شکل (۵) برای حالت سه‌مخزنی بهره‌برداری، انرژی تولیدی نیروگاه کرخه جریانی در آینده تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه ۰/۰۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد و کاهش تنها در ماه ژولای می‌باشد. این موضوع به دلیل کاهش قابل توجه در جریان ورودی به مخزن است. در ادامه، نتایج حجم ذخیره مخزن و رهاسازی در دوره آتی نسبت به دوره پایه به صورت کمینه، میانگین و بیشینه برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه براساس SMOA در جدول (۴) نشان داده شده است.

Table 4. Minimum, average and maximum volume of reservoir storage and release (in million cubic meters) in the baseline and future periods under the RCP 8.5 climate change scenario for the three-reservoir operation mode based on SMOA

Characteristic	1976-2005			2040-2069		
	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum
Storage volume	107	130	131	99	129	131
Release	65	151	228	60	149	239

مطابق جدول (۴) برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری، حجم ذخیره مخزن در دوره آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. بیشینه حجم ذخیره مخزن در آینده دور تحت سناریوی RCP2.6 می‌باشد. بیشینه رهاسازی از مخزن در دوره تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد.

۳.۳. نتایج حاصل از بهینه‌سازی براساس GA

به منظور بررسی عملکرد مدل SMOA در بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سامانه مخازن، در این بخش بهینه‌سازی براساس GA برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه در دوره پایه و آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 به تفکیک آورده شده است. نتایج حاصل از سه اجرای تابع هدف و زمان اجرای آن‌ها برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه در دوره پایه و آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 در جدول (۵) آورده شده است.

Table 5. Values of objective function (dimensionless) and run-time (in seconds) resulting from GA in the baseline period and the future period under RCP 8.5 climate change scenario

Specifications of runs	Baseline		Future	
	Value	Time	Value	Time
First run	20.4	647.6	9.2	64704
Second run	17.5	647.9	10.8	655.4
Third run	26.7	644.2	9.1	651.6
best run	17.5		9.1	
worst run	26.7		10.8	
Average run	21.5		9.7	
Standard deviation of runs	4.7		0.9	
Coefficient of variation	20		9	
Best run-time	644.2		647.4	

همان‌طور که در جدول (۵) مشخص است، مقدار تابع هدف در دوره تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. کمینه تابع هدف در دوره آتی و برای اجرای سوم می‌باشد. انحراف معیار در دوره تغییر اقلیم نسبت به پایه کاهش می‌یابد. کمینه ضریب تغییرات در دوره آتی تحت سناریوی RCP8.5 می‌باشد. نمودار هم‌گرایی برای بهره‌برداری از سه‌مخزنه براساس GA در دوره پایه و دو دوره آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم در شکل (۶) آورده شده است.

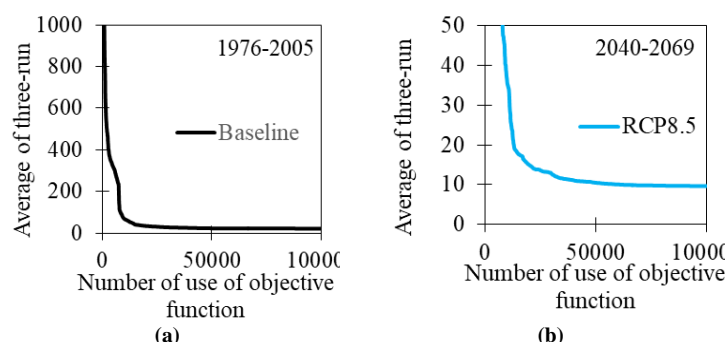


Figure 6. Convergence diagram of the average of three runs of GA in (a) baseline period and (b) 2040-2069, under RCP8.5 scenario

مطابق شکل (۶) برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه، GA در دوره آتی نسبت به دوره پایه، عملکرد بهتری برای رسیدن به مقدار بهینه تابع هدف دارد. در ادامه، انرژی تولیدی (میانگین انرژی به‌دست‌آمده از سه اجرای تابع هدف) در دوره پایه و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه در شکل (۷) آورده شده است.

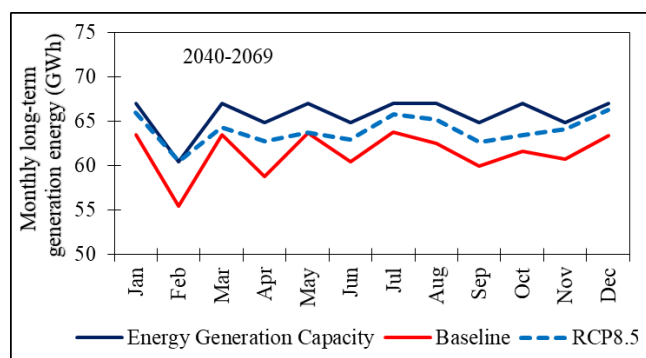


Figure 7. Comparison of the long-term energy production of the baseline period based on GA with 2040-2069 under the RCP8.5 scenario

همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، برای حالت سه‌مخزنه، انرژی تولیدی در دوره آینده تحت سناریوی تغییر اقلیم افزایش می‌یابد. در دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بیشینه اختلاف بین ظرفیت تولید انرژی و انرژی تولیدی در سناریوی RCP8.5 می‌باشد (۲۱ گیگاوات ساعت). در ادامه، نتایج حجم ذخیره مخزن و رهاسازی براساس GA در دوره آتی نسبت به دوره پایه به‌صورت کمینه، میانگین و بیشینه برای حالت بهره‌برداری سه‌مخزنه در جدول (۶) نشان داده شده است.

Table 6. Minimum, average and maximum volume of reservoir storage and release (in million cubic meters) in the baseline and future periods under the RCP 8.5 climate change scenario for the three-reservoir operation mode based on GA

Characteristic	1976-2005			2040-2069		
	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum
Storage volume	92	127	131	92.5	128	131
Release	100	127	260	92	128	200

مطابق جدول (۶) برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری، حجم ذخیره مخزن در دوره آتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. میانگین رهاسازی از مخزن در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش و بیشینه رهاسازی کاهش را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای بهینه‌سازی سامانه چندمخزنه برق‌آبی از SMOA استفاده شد. بهینه‌سازی بر روی مخازن برق‌آبی حوضه آبریز کرخه (سازبن مخزنی، سیمره و کرخه جریانی) انجام گرفت. تابع هدف، کمینه‌سازی کمبود انرژی برق‌آبی در نظر گرفته شد. تابع هدف براساس SMOA برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری در دوره پایه و دوره آینده تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 اجرا شد. برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری کمینه تابع هدف در آینده تحت سناریوی RCP8.5 (۰/۰۰۱ برای اجرای سوم) و بیشینه آن در دوره پایه (۱/۰) می‌باشد. انحراف معیار اجراها در آینده تحت سناریوی RCP8.5 (۰/۰۲) و برای دوره پایه (۰/۰) می‌باشد. به‌طور کلی، SMOA در دستیابی به مقدار مطلوب تابع هدف در دوره تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه عملکرد بهتری دارد.

افزایش انرژی تولیدی و به تبع آن کاهش میزان کمبود تأمین انرژی در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه به‌دلیل تغییر الگوی رواناب می‌باشد. کاهش جریان‌های اوج برای رودخانه کرخه در ماه‌های پرآب، به‌طور عمده در فوریه تا ژوئن باعث کاهش سرریز از مخزن و افزایش حجم ذخیره مخزن می‌شود و رهاسازی‌ها برای تأمین نیاز برق‌آبی افزایش یافته و در نتیجه میزان کمبود در دوره‌های تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه کاهش نشان می‌یابد.

هم‌چنین، نتایج بهینه‌سازی براساس GA برای حالت سه‌مخزنه بهره‌برداری نشان دادند که نیروگاه کل ظرفیت تولید انرژی را تأمین می‌کند.

به‌طور کلی، SMOA برای دستیابی به مقدار مطلوب تابع هدف نسبت به GA عملکرد بهتری، جواب‌ها پایاتر و زمان اجرای کمتری دارد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Slime Mould Optimization Algorithm
2. Genetic Algorithm
3. Akley
4. Particle Swarm Optimization

5. Imperialist Competitive Algorithm
6. Cuckoo Optimization Algorithm
7. Non-Linear Programming
8. Firefly Algorithm
9. Proportional Coefficient
10. Average Annual Inflow Volume
11. Multi-Hydropower-Reservoir
12. Machine Learning
13. Developed Wildebeest Herd Optimization
14. Crow Search Algorithm
15. Exploration
16. Exploitation
17. Vein
18. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Akbari-Alashti, H., Bozorg-Haddad, H., Fallah-Mehdipour, E., & Mariño, M. A. (2014). Multi-reservoir real-time operation rules: a new genetic programming approach. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, 167 (10), 561-576.
- Akbari-Alashti, H., Soncini, A., Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Talatahari, S., & Bocchiola, D. (2018). Operation of two major reservoirs of Iran under IPCC scenarios during the XXI century. *Hydrological Processes*, 32 (21), 3254-3271.
- Anonymous. (2009). Meteorological and Climate Studies Report. Iran Water and Power Resources Development Company, Karkheh Watershed System Studies, 1, 1-319. (In Persian).
- Anonymous. (2010). Water Resources Planning Studies. Iran Water and Power Resources Development Company, Karkheh Watershed System Studies, Vol. 5, 1-361. (In Persian).
- Anonymous. (2014). Report on Seymareh Project. Mahab Ghodss Consulting Company, Vol. 1, 1-100. (In Persian).
- Arunkumar, R., & Jothiprakash, V. (2012). Optimal reservoir operation for hydropower generation using non-linear programming model. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 93 (2), 111-120.
- Bolouri-Yazdali, Y., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E., & Marino, M. A. (2014). Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation. *Water Resources Management*, 28, 715-729.
- Chang, J., Wang, X., Li, Y., Wang, Y., & Zhang, H. (2018). Hydropower plant operation rules optimization response to climate change. *Energy*, 160, 886-897.
- Deb, K. (2012). Optimization for engineering design: Algorithms and examples. Second Edition, PHI Learning Private Limited.
- Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H. A., & Mariño, M. A. (2016). "Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142 (10), 04016041.
- Holland, J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific American*, 267 (1), 66-72.
- Hosseini-Moghari, S. M., Morovati, R., Moghadas, M., & Araghinejad, S. (2015). Optimum operation of reservoir using two evolutionary algorithms: imperialist competitive algorithm (ICA) and cuckoo optimization algorithm (COA). *Water Resources Management*, 29 (10), 3749-3769.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Rep. of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T. F. Stocker, et al., eds., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

- Jahandideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2015). Hydropower reservoir management under climate change: The Karoon reservoir system. *Water Resources Management*, 29 (3), 749-770.
- Liu, S., Xie, Y., Fang, H., Huang, Q., Huang, Sh., Wang, J., & Li, Zh. (2020). Impacts of inflow variations on the long term operation of a multi-hydropower-reservoir system and a strategy for determining the adaptable operation rule. *Water Resources Management*, 34, 1649-1671, DOI: 10.1007/s11269-020-02515-6.
- Liu, X., Lu, J., Zou, Ch., Deng, B., Liu, L., & Yan, Sh. (2023). Research on sustainable scheduling of cascade reservoirs based on improved crow search algorithm. *Water*, 15 (3), 578, DOI: 10.3390/w15030578.
- Li, Sh., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, 111, 300-323.
- Qiu, H., Hu, T., Zhang, S., & Xiao, Y. (2023). "Deriving operating rules of hydropower reservoirs using multi-strategy ensemble Henry Gas solubility optimization driven support vector machine. *Water*, 15 (3), 437, DOI: 10.3390/w15030437.
- Rahmati, K., Ashofteh, P.-S., Afzali, R., & Loáiciga, H. A. (2022). System-dynamics approach to multireservoir energy generation under climate change. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27 (9), DOI: 10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0002197.
- Rahmati, K., Ashofteh, P.-S., & Loáiciga, H. A. (2021). Application of the grasshopper optimization algorithm (GOA) to the optimal operation of hydropower reservoir systems under climate change. *Water Resources Management*, 35, 4325-4348, Doi: 10.1007/s11269-021-02950-z.
- Ren, X., Zhao, Y., Hao, D., Sun, Y., Chen, Sh., & Gholinia, F. (2021). Predicting optimal hydropower generation with help optimal management of water resources by Developed Wildebeest Herd Optimization (DWHO). *Energy Reports*, 7, 968-980.
- Sharifi, M. R., Akbarifard, S., Madadi, M. R., Qaderi, K., & Akbarifard, H. (2022). Optimization of hydropower energy generation by 14 robust evolutionary algorithms. *Scientific Reports*, 12, DOI: 10.1038/s41598-022-11915-0.
- Zaman, M., Fang, G., Huang, X., Shuo, X., & Xin, W. (2014). Optimization of the Xin'anjiang hydropower station using particle swarm optimization and genetic algorithm. In *2014 10th International Conference on Natural Computation (ICNC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Zhang, X., Liu, P., Xu, Ch.-Y., Guo, Sh., Gong, Y., & Li, H. (2019). Derivation of hydropower rules for multireservoir systems and its application for optimal reservoir storage allocation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145 (5), 04019010.
- Zolghadr-Asli, B. (2017). Investigation of hydropower energy generation's uncertainties under climate change conditions. M.Sc. Thesis, College of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agriculture Engineering and Technology, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran.