نشریه دانش آب و خاک / جلد ۳۰ شماره ۱ صفحه‌های ۱۰۹ تا ۱۲۱ / سال ۱۳۹۹

مقاله پژوهشی

بهره‌برداری بهینه از سامانه سد تک‌مخزنه با الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی: (مطالعه موردی: سد دز در استان خوزستان)

رامتین معینی[1]*، فرناز سقراطی[2]

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۱۱

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۲-دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r.moeini@eng.ui.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، برای حل مساله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم تک مخزنه استفاده شده است. بدین منظور، با ایجاد اصلاحاتی در الگوریتم پایه کلونی زنبور عسل مصنوعی، الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی معرفی شد. مساله بهره‌برداری بهینه ساده و برقابی از سیستم سد تک مخزنه سد دز (در دو دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله) حل و نتایج آن با سایر یافته‌های دیگران مقایسه شد. برای حل دو فرمولبندی ارائه شد که در فرمولبندی اول، مقدار آب خروجی از مخزن سد و در فرمولبندی دوم حجم ذخیره مخزن سد به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در حل مساله بهره‌برداری ساده ۵ و ۲۰ ساله با استفاده از فرمولبندی اول، مقادیر تابع هدف الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی نسبت به الگوریتم پایه به ترتیب، ٪۹/۹۴ و ٪۵۵/۲۶۶ بهبود یافته و در حل مساله بهره‌برداری ساده ۵ و ۲۰ ساله با استفاده از فرمولبندی دوم، درصد بهبود مقادیر تابع هدف به ترتیب، برابر با ٪۱۴/۶۳ و ٪۷/۱۸ بود. علاوه بر این، در حل مساله بهره‌برداری برقابی ۵ و ۲۰ ساله با استفاده از فرمولبندی اول، مقادیر تابع هدف الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی نسبت به الگوریتم پایه به ترتیب ٪۷/۷۶ و ٪۲۶/۴۷ بهبود یافته و در حل مساله بهره‌برداری برقابی ۵ و ۲۰ ساله با استفاده از فرمولبندی دوم، درصد بهبود مقادیر تابع هدف به ترتیب، برابر با ٪۳/۷۹ و ٪۲۵/۴۹ بود. در مجموع، مقایسه نتایج نشان دهنده آن است که با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی نتایج مناسب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر در مقایسه با الگوریتم پایه حاصل شده است که در آن نتایج فرمولبندی اول از دوم مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی، بهره‌برداری بهینه، سامانه سد تک مخزنه، سد دز

Optimal Operation of Single Reservoir System Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm (Case study: Dez Reservoir in Khozestan)

R Moeini[1]*, F Soghrati[2]

Received: November 6, 2016 Accepted: May 31, 2020
1Asist. Prof., Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2M.Sc. Grad., Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
*Corresponding Author, E-mail: r.moeini@eng.ui.ac.ir

Abstract

In this research, artificial honey bee colony algorithm, is used to solve single reservoir operation optimization problem. For this purpose, improved artificial bee colony algorithm is proposed using some modification in the basic algorithm. The simple and hydropower operation problems of Dez reservoir over 5- and 20-year time periods are solved using the proposed algorithm and the outputs are compared with the other available research results. In order to solve these problems, two different formulations are proposed in which the water release and storage volumes are considered as decision variables in the first and second formulations, respectively. If the first formulation of the improved artificial bee colony algorithm is used to solve the simple reservoir operation over 5 and 20 years, the objective function values are improved %9.94 and %55.266 than basic artificial bee colony algorithm, respectively. If the second formulation is used to solve simple reservoir operation over 5 and 20 years, the objective function values are improved %14.63 and %7.18 than basic artificial bee colony algorithm, respectively. In addition, if the first formulation of improved artificial bee colony algorithm is used to solve hydropower reservoir operation over 5 and 20 years, the objective function values are improved %7.76 and %26.47 than basic artificial bee colony algorithm, respectively. If the second formulation is used to solve hydropower reservoir operation over 5 and 20 years, the objective function values are improved %3.79 and %25.49 than basic artificial bee colony algorithm, respectively. Finally, comparison of the results shows that using the improved artificial bee colony algorithm leads to better results with low computational costs.

Keywords: Dez reservoir, Improved artificial bee colony algorithm, Optimal operation, Single reservoir system

مقدمه

در حالت کلی، منابع تامین آب شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد که سازه‌های مختلفی برای بهره‌برداری از آن‌ها احداث می‌شود. به عنوان نمونه، رودخانه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع سطحی تامین آب می‌باشند، که سدها برای ذخیره‌سازی و بهره‌برداری از آن‌ها ساخته می‌شوند. امروزه با توجه به محدودیت‌های موجود در منابع تامین آب، بهره‌برداری بهینه از منابع موجود (از جمله آب ذخیره شده در مخازن سدها) ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، محققین با ارائه روش‌های مناسب سعی کرده‌اند تا بهره برداری از مخازن را بهبود ببخشند که این روش‌ها در حالت کلی، در چهار دسته برنامه‌ریزی خطی[1]، برنامه‌ریزی غیرخطی[2]،

[1] Linear Programming
[2] Non-Linear Programming

برنامه‌ریزی پویا[1] و الگوریتم‌های فراکاوشی[2] تقسیم‌بندی می‌شوند. در این میان، الگوریتم‌های فراکاوشی مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌های سنتی و ریاضی دارند و بنابراین، امروزه بیش از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الگوریتم‌های فراکاوشی دسته‌ای از روش‌ها هستند که برمبنای رفتار طبیعی موجودات زنده و پدیده‌های واقعی ارائه می‌شوند. این الگوریتم‌ها توانایی یافتن جوابی نزدیک به جواب بهینه را با هزینه محاسباتی مناسب دارند. امروزه از این الگوریتم‌ها برای حل مساله بهره‌برداری بهینه از مخازن نیز استفاده می‌شود. در این زمینه، چونگ و الشافی (۲۰۱٤) تحقیق جامعی در زمینه مدل‌سازی مخازن سدها و بهره‌برداری از آن‌ها با استفاده از روش‌های مختلف و بویژه الگوریتم‌های فراکاوشی ارائه نمودند. از جمله، واردلاو و شریف (۱۹۹۹) از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل این مساله استفاده نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که با استفاده از GA جوابی برابر ٪۹۹/۷ جواب بهینه سراسری برای آن حاصل می‌شود. ردی و کومار (۲۰۰٦) با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات و تبدیل مسائل چندهدفه به تک‌هدفه، مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف تولید انرژی برقابی و کشاورزی حل نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که با اجرای خروجی این روش، متوسط انرژی برقابی نسبت به GA حدود ٪۳٦/۹۷ افزایش می‌یابد. افشار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل[3] مساله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را حل نموده و نتایج حاصل را با خروجی به‌دست آمده از برنامه‌ریزی ریاضی مقایسه نمودند. لازم به ذکر است جواب بهینه کلی برای تابع هدف همین مساله با استفاده از نرم‌افزار لینگو[4] ۰/۷۹٦۱۱۵ بود، در صورتیکه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی جواب ۰/۸۲۳۵۹۵ حاصل شد. بزرگ‌حداد و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل توسعه یافته الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل مساله بهره‌برداری از یک مخزن را با هدف حداقل نمودن کمبود آب، حل کردند. شایان ذکر است که با استفاده از نرم‌افزار لینگو جواب شدنی برای مساله حاصل نشد، در صورتیکه با استفاده از الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل جواب مساله ۲٤/۲۰۵ حاصل شد. افشار و معینی (۲۰۰۸) الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان مقید[5] را معرفی نمودند و از آن برای حل مسائل بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داد که در حل مساله بهره‌برداری ساده در دوره زمانی ٤۰ ساله با استفاده از الگوریتم مقید، مقدار تابع هدف نسبت به الگوریتم پایه ٪۷۱/٤ بهبود می‌یابد و در مساله بهره‌برداری برقابی میزان بهبودی ٪٤۱/۲۵ است. رانی و موریرا (۲۰۱۰) عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در حل مسائل بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن را بررسی نمودند و نشان دادند که الگوریتم‌های تکاملی دارای قابلیت‌های زیادی برای حل این مسائل هستند. چنگ و همکاران (۲۰۱۰) از GA مقید برای بهینه‌سازی مخازن چند منظوره استفاده کردند و نشان دادند که با استفاده از GA مقید می‌توان دبی را به‌میزان ٪۱۲۳/۵ نسبت به الگوریتم پایه افزایش داد. وانگ و همکاران (۲۰۱۱) از GA چند رده‌ای تعاملی[6] برای بهینه‌سازی بلند مدت از

[1] Dynamic Programming
[2] Meta-heuristic Algorithm
[3] Honey bee mating algorithm
[4] LINGO
[5] Constrained ant colony optimization algorithm
[6] Multi-tier Interactive Genetic Algorithm

مخازن سدها استفاده کردند. در این تحقیق، با استفاده از این الگوریتم، مقادیر تابع هدف به میزان ۲۵ درصد بهبود یافته و همچنین زمان محاسبه به میزان ۸۰ درصد کاهش یافت. نوروزی و همکاران (۲۰۱۱) از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چندمخزنه شامل سدهای وشمگیر، گلستان و بوستان واقع بر حوضه گرگان‌رود با تمرکز بر دو سد گلستان و وشمگیر استفاده کردند. نتایج نشان داد که، بیشترین میزان خروجی از مخزن سد گلستان جهت تامین نیازهای کشاورزی ۲۰/۱۷٤ میلیون مترمکعب در ماه اردیبهشت بود، در صورتیکه برای سد وشمگیر این میزان ٦۰/۳۸۱ میلیون مترمکعب بود. ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) از الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات ترکیبی[1] اصلاح شده برای مدیریت انرژی برقابی سیستم چندمخزنه در حوضه آبریز مینجیانگ در کشور چین استفاده نمودند. ایشان با استفاده از الگوریتم اصلاح شده نسبت به الگوریتم پایه توانستند تولید برق سالیانه را ٪۳/۰٤ افزایش دهند. همچنین، کاستلتی و همکاران (۲۰۱۳) مساله بهره برداری از سیستم های منابع آب را در مقیاس بزرگ با رویکرد چند هدفه بررسی نمودند. حسین و الشافی (۲۰۱٤) عملکرد روش‌های هوش مصنوعی و الگوریتم-های تکاملی در حل مساله بهره برداری بهینه از مخازن بررسی نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های کلونی زنبور عسل مصنوعی و هوش جمعی ذرات قادر به برآوردن تقاضا به میزان ٪٦۱/۳٦ و ٪۵۹/٤۷ می‌باشند. دین‌پژوه و همکاران (۲۰۱٦) با استفاده از الگوریتم GA و مجموعه ذرات نسبت به یافتن روش صحیح بهره‌برداری آب از سد مخزنی علویان اقدام کردند. حسینی موغاری و بنی‌حبیب (۲۰۱٤) از الگوریتم کرم شب‌تاب[2] برای بررسی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد، برای تامین آب کشاورزی استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر این روش نسبت به الگوریتم ژنتیک وبهینه‌سازی هوش جمعی ذرات بود، به گونه‌ای که جواب نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و هوش جمعی ذرات به ترتیب ٪۳۳/۹۸ و ٪۵۵/۳۱ درصد بهبود می‌یابد. در ادامه، بشیری عطرآبی و همکاران (۲۰۱۵) از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی[3] برای بررسی عملکرد مخازن استفاده کردند، و با استفاده از آن نتیجه‌ای برابر با جواب بهینه مطلق به‌دست آوردند. محمدرضاپور و زینلی (۲۰۱۵) از الگوریتم بیشینه-کمینه مورچگان برای بررسی عملکرد یک سیستم دو مخزنه در حوضه گرگان استفاده کردند. در نهایت یاشار (۲۰۱٦) از الگوریتم جست‌وجوی فاخته[4] برای بهینه‌سازی عملکرد مخزن یک سد در غرب ترکیه به منظور بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی استفاده نمود. نتایج نشان دهنده بهبود عملکرد سیستم و افزایش تولید انرژی در حدود ۱۰٪ نسبت به مقادیر واقعی بود.

بررسی سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن نشان دهنده آن است که ارائه الگوریتم‌های جدید و یا اصلاح الگوریتم‌های موجود، زمینه تحقیقاتی قابل توجه در این حوزه می‌باشد. لذا در این تحقیق، تلاش شده که با ایجاد اصلاحاتی در الگوریتم الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی[5] (ABC)، الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی[6] (IABC) معرفی و از آن در حل این مساله بهینه‌سازی

[1] Particle swarm optimization Algorithm

[2] Firefly worm algorithm
[3] Harmony search algorithm
[4] Cuckoo search algorithm
[5] Artificial Bee Colony
[6] Improved Artificial Bee Colony

استفاده گردد. الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی اولین بار توسط کارابوغا وباسترک (۲۰۰۷) معرفی شد. در ادامه، ناوینا و همکاران (۲۰۱۵) الگوریتم مذکور را توسعه داده و ازآن برای حل برخی از توابع معروف ریاضی و عددی استفاده نمودند. بررسی نتایج حل مسائل مختلف با استفاده از این الگوریتم نشان دهنده قابلیت‌های این الگوریتم در حل مسائل مختلف بهینه‌سازی مهندسی می‌باشد و بنابراین، عملکرد این الگوریتم و الگوریتم اصلاحی پیشنهادی درحل مساله بهره‌برداری از مخازن مورد ارزیابی واقع شده‌است. بدین منظور، دو فرمو-لبندی پیشنهاد گردید که در آن‌ها به ترتیب، میزان آب رهاسازی شده از مخزن و یا حجم مخزن به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده و بهره‌برداری ساده و برقابی سد دز با استفاده از الگوریتم مذکور حل می‌گردد. بر این اساس، ساختار تحقیق به شرح زیر می‌باشد. در ابتدا مفاهیم پایه الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی ارائه می‌شود. سپس الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی معرفی می‌شود. در ادامه با ارائه مدل ریاضی بهره‌برداری ساده و برقابی از سیستم سد تک مخزنه دز، مسائل مذکور با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی حل شده و نتایج تحلیل می‌گردد. در انتها نیز جمع بندی مطالب و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی است که اولین بار توسط کارابوغا و باسترک (۲۰۰۷) معرفی شد. اساس این الگوریتم بر پایه رفتار طبیعی یک گروه زنبور عسل است که برای یافتن غذا با یکدیگر همکاری می کنند. به منظور معرفی این الگوریتم، مدلسازی این الگوریم در یک سیستم مصنوعی بررسی می‌شود. در این الگوریتم سه دسته زنبورکارگر[1]، تماشاچی[2]و پیش‌آهنگ[3] تعریف می‌شود. زنبورهای کارگر با رفتن به منابع غذایی مختلف و جمع آوری اطلاعات آنها نظیر میزان شهد، جهت و فاصله تا کندو، نقش خود را در چرخه جست‌وجوی غذا ایفا می‌کنند. آنها پس از برگشتن به کندو اطلاعات خود را با دیگر زنبورها به اشتراک می‌گذارند و زنبورهای تماشاچی را برای یافتن منابع غذایی که احتمال بیشتری برای داشتن شهد هستند، راهنمایی می‌کنند. زنبورهای تماشاچی پس از کسب اطلاعات به سوی منابع غذایی که دارای احتمال بیشتری برای وجود شهد دارند، حرکت می‌کنند. دسته سوم (زنبورهای پیش‌آهنگ) بدون در نظر گرفتن اطلاعات زنبورهای دیگر به جست و جوی تصادفی بین منابع غذایی انجام می‌پردازند تا اینکه هیچ منبع غذایی خوب از دست نرود (ناوینا و همکاران ۲۰۱۵) .

در حالت کلی، در الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، تعداد زنبورهای کارگر و تماشاچی برابر هم یعنی برابر با نصف تعداد کل زنبورهاست. با توجه به مطالب مذکور، در هر تکرار این الگوریتم، جست و جو شامل سه مرحله است (ناوینا و همکاران ۲۰۱۵):

۱- فرستادن زنبورهای کارگر به موقعیت منابع غذایی و تعیین میزان شهد آنها.
۲- انتخاب منابع غذایی به‌وسیله زنبورهای تماشاچی پس از به اشتراک گذاشتن اطلاعات با زنبورهای کارگر و تعیین میزان شهد منابع غذایی.
۳- فرستادن زنبورهای پیش‌آهنگ به‌سمت موقعیت منابع غذایی محتمل.

بر این اساس، روند یافتن جواب بهینه در این الگوریتم را می‌توان به‌شرح زیر توضیح داد. ابتدا، برای

[1] Employed Bees
[2] Onlookers Bees
[3] Scout Bees

هر متغیر تصمیم مساله، به‌تعداد نصف کل زنبورها جواب تصادفی تولید می‌شود. با منظور نمودن هر جواب در تابع هدف مساله، مقدار آن که همان شهد منبع غذایی است، محاسبه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که از این پس، ملاک بهتر شدن هر جواب در هر مرحله، بهبود مقدار تابع هدف می‌باشد. پس از آن، روند اصلی یافتن جواب بهینه آغاز می‌شود. در ابتدا هر زنبور یک جواب اولیه را به‌عنوان منبع غذایی اصلی انتخاب می‌کند. به منظور تغییر در آن و جست‌وجو پیرامون یافتن جواب بهتر، یک جواب اولیه دیگر به صورت تصادفی (به‌عنوان منبع غذایی کمکی) انتخاب می‌شود. یکی از پارامترهای مهمی که در مرحله تنظیم پارامتر الگوریتم باید توجه ویژه به آن شود، تعداد تغییر در جواب اولیه برای یافتن جواب جدید در هر مرحله است. در اینجا به‌صورت تصادفی و به‌تعداد مشخص شده متغیر انتخاب شده و با در نظر گرفتن دو جواب اصلی و کمکی و با استفاده از رابطه زیر برای درایه‌های نظیر متغیرهای موردنظر، مقدار جدید تولید می‌شود (ناوینا و همکاران ۲۰۱۵) .

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}\left(x_{ij} - x_{kj}\right) \qquad [۱]$$

که در رابطه فوق، v نشان‌دهنده نام منبع غذایی جدید، اندیس‌های k وi نشان‌دهنده شماره دو منبع غذایی مورد نظر، j نشان‌دهنده شماره متغیر مورد نظر، φ_{ij} یک عدد تصادفی بین [-1,1] و x_{ij} نشان دهنده متغیرj ام از منبع غذایی i ام می‌باشد. پس از محاسبه تابع هدف(که در ادامه برای مسائل مختلف در روابط ۳ و ٤ ارائه شده است.)، اگر مقدار تابع هدف در مقایسه با مقدار متناظر آن در جواب اصلی، نشان دهنده بهبود شرایط باشد، جواب جدید جایگزین جواب اصلی شده و جواب اصلی حذف می‌گردد. اما در صورتی که شرایط مساله با جواب جدید بهبود نیابد، جواب اصلی به شکل اولیه خود باقی مانده و تغییر نمی‌کند. در ادامه، کار زنبورهای تماشاچی شروع می‌شود که به یافتن جواب بهینه کمک می‌کنند. آنها نیز هرکدام یک بار به‌سوی یک منبع غذایی می‌روند و با ایجاد تغییراتی در جوابهای منتخب، مشابه آنچه در مورد زنبورهای کارگر به آن اشاره شد، جواب بهتر را انتخاب می‌کنند. تفاوت اساسی در روند کار زنبورهای تماشاچی و کارگر در نحوه انتخاب منابع غذایی است. زنبورهای کارگر همه منابع غذایی را بررسی نموده و هرکدام را دقیقا یک بار بررسی می‌کنند. ولیکن زنبورهای تماشاچی با استفاده از اطلاعات شهد منابع غذایی به سراغ منابع غذایی دارای احتمال بیشتر می‌روند. در این الگوریتم احتمال مربوط به منبع غذایی i ام با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (ناوینا و همکاران ۲۰۱۵) .

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \qquad [۲]$$

که در رابطه فوق، p_i نشان دهنده مقدار احتمال منبع غذایی i ام، fit_i نشان دهنده مقدار تابع هدف برای منبع غذایی i ام و SN تعداد منابع غذایی می‌باشد، که مقدار مناسب برای هر مساله با استفاده از آنالیز حساسیت (روش سعی و خطا) حاصل می‌شود. بر این اساس، هر زنبور تماشاچی یک منبع غذایی که احتمال آن از یک عدد تصادفی بیشتر است را بررسی نموده و بنابراین، ممکن است بعضی از منابع غذایی چندین بار بررسی شوند. مراحل ذکر شده به تعداد تکرارهای تعیین شده انجام می‌شود تا روند جست‌وجو خاتمه یابد.

الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی(IABC)

در الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی تعداد زنبورهای کارگر و تماشاچی مساوی هم و برابر با نصف تعداد کل زنبورها است. در این تحقیق به‌منظور بهبود روند الگوریتم، این نسبت تغییر کرده و الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی معرفی می‌شود.

در الگوریتم اصلاحی، تعداد زنبورهای تماشاچی درصدهای مختلفی از تعداد کل زنبورها منظور می‌شود. با اعمال این تغییر تعامل بهتری در اکتشاف[1] و بهره‌برداری[2] برقرار می‌شود. شایان ذکر است اکتشاف عبارت است از توانایی الگوریتم در جست‌وجوی گسترده فضای جست‌وجوی مساله و در حالیکه اصطلاح بهره برداری به توانایی الگوریتم در جستجوی جواب در همسایگی‌های جواب‌های موضعی و محلی مربوط می‌شود، که در آن از جواب‌های مناسب قبلی به‌دست آمده استفاده می‌شود. ایجاد تعامل مناسب بین این دو مفهوم از چالش‌های اساسی در ارائه الگوریتم‌های فراکاوشی است که با معرفی الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی این تعامل در الگوریتم مذکور به خوبی ایجاد می‌شود. این قابلیت ویژه در حل مسائل نمونه در بخش نتایج و بحث به خوبی نشان داده می‌شود.

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سد تک مخزنه

دراین بخش، فرمولبندی ریاضی مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری ساده و برقابی از یک سیستم سد تک مخزنه، ارائه می‌شود. مدل ریاضی مساله با تعیین متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود مساله تعریف می‌شود. مدل‌سازی این مسائل با تعریف دو فرمولبندی امکان‌پذیر است که در فرمولبندی اول مقدار آب خروجی از مخزن سد و در فرمولبندی دوم حجم ذخیره مخزن سد به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. در ادامه فرمولبندی ریاضی این مسائل ارائه می‌شود.

تابع هدف و قیود مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

الف) مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری ساده از مخزن سد:

در این مدل، تابع هدف به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$F = Minimize \sum_{t=1}^{NT} \left[\frac{D_t - r_t}{D_{\max}} \right]^2 \qquad [۳]$$

که در رابطه فوق، NT کل دوره زمانی، D_t میزان نیاز در دوره زمانی t ام، r_t میزان جریان خروجی از مخزن در دوره زمانی t ام و $D_{\max}$ بیشینه نیاز کل دوره‌های زمانی می‌باشند.

ب) مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری برقابی از مخزن سد:

در این مدل، تابع هدف به شکل زیر تعریف می‌شود (افشار و معینی ۲۰۰۸):

$$F = Minimize \sum_{t=1}^{NT} \left[1 - \frac{p_t}{power} \right] \qquad [٤]$$

که در رابطه فوق، NT کل دوره زمانی، P_t توان تولیدی نیروگاه در دوره زمانی t ام و $power$ ظرفیت نصب نیروگاه می‌باشند. میزان توان تولیدی نیروگاه در دوره زمانی t ام از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$p_t = \min \left[\left(\frac{g \times \eta \times R_t}{PF} \right) \times \left(\frac{h_t}{1000} \right), power \right] \qquad [٥]$$

$$h_t = \left[\frac{H_t + H_{t+1}}{2} \right] - TWL \qquad [٦]$$

$$H_t = f(S_t) \qquad [٧]$$

که در رابطه فوق، h_t بار آب موثر نیروگاه بر حسب متر، g شتاب ثقل، η بازده نیروگاه، PF ضریب کارکرد نیروگاه، H_t تراز مخزن از سطح دریا که در حالت کلی تابع حجم ذخیره مخزن می‌باشد (رابطه ۷)، R_t میزان دبی آب عبوری از توربین در دوره زمانی t ام و TWL تراز پایاب نیروگاه از سطح دریا بر حسب متر می‌باشند.

قیدهای هر دو مدل را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - r_t - l_t \qquad [٨]$$

$$S_{\min} \le S_t \le S_{\max} \qquad [٩]$$

$$r_{\min} \le r_t \le r_{\max} \qquad [١٠]$$

[1] exploration
[2] exploitation

که در روابط فوق، S_t حجم مخزن در ابتدای دوره زمانی t ام ($t=1,\ldots,NT$)، I_t میزان جریان ورودی به مخزن در دوره زمانی t ام، l_t میزان تلفات در دوره زمانی t ام، r_t میزان جریان خروجی از مخزن در دوره زمانی t ام، S_{t+1} حجم مخزن در ابتدای دوره زمانی $t+1$ ام (انتهای دوره زمانی t ام)، S_{min} حداقل حجم ذخیره مخزن، S_{max} حداکثر حجم ذخیره مخزن، r_{max} حداکثر میزان جریان خروجی از مخزن، r_{min} حداقل میزان جریان خروجی از مخزن و NT کل دوره زمانی بهره-برداری است که در این تحقیق دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله می‌باشد.

نتایج و بحث

به‌منظور بررسی قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی، در این بخش، مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن سد دز (در دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله) و برای هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی حل می‌گردد. در حل این مسائل، حجم اولیه مخزن برابر ۱۴۳۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. همچنین، حداقل و حداکثر مقدار جریان خروجی به‌ترتیب صفر و ۱۰۰۰ میلیون مترمکعب و حداقل و حداکثر حجم ذخیره مجاز مخزن ۸۳۰ و ۳۳۴۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. در مساله بهره‌برداری برقابی، ضریب کارکرد ۰/۴۱۷، ظرفیت نصب نیروگاه ۶۵۰ مگاوات، بازده ۹۰٪ و تراز پایاب نیروگاه معادل ۱۷۲ متر از سطح دریا در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، در مساله برقابی، برای محاسبه تراز مخزن از رابطه زیر استفاده شده است (افشار و معینی ۲۰۰۸).

$$H_t = a + b \times s_t + c \times s_t^{2} + d \times s_t^{3} \qquad [11]$$

که در رابطه فوق، مقادیر ضرایب رابطه فوق به شرح a=۲۴۹/۸۳۳۶۴، b=۰/۰۵۸۷۲۰۵، c=-۱/۳۷×۱۰$^{-5}$ و d= ۱/۱۰×۵۲۹$^{-9}$ به‌دست آمدند.

مسائل مذکور به ازای ۲۰۰ جمعیت (SN) و ۲۰۰۰ تکرار حل شده است. برای حل مساله از روش ضریب جریمه ثابت استفاده می‌شود که مقدار ضریب جریمه با روش سعی و خطا برای مسائل مذکور تعیین می‌شود. شایان ذکر است که به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، مسائل مذکور با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) و الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل (IABC) حل شوند.

نتایج حل مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن دز با استفاده از الگوریتم ABC به‌ازای ۱۰ بار اجرای برنامه و برای هر دو فرمولبندی پیشنهادی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. مقایسه نتایج جداول نشان دهنده آن است که با استفاده از الگوریتم ABC برای هر دو مساله جواب تقریبا مناسبی حاصل می‌شود که جواب فرمول‌بندی دوم پیشنهادی از فرمولبندی اول مناسب‌تر است.

به‌منظور ارزیابی قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی، مسائل مذکور با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی (IABC) در هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی نیز حل شده است. در جداول ۳ و ٤ نتایج حاصل از حل مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن دز با استفاده از الگوریتم (IABC) به ازای ۱۰ بار اجرای برنامه و برای هر دو فرمولبندی پیشنهادی ارائه شده است. شایان ذکر است برای حل این مسائل حالت‌های مختلفی برای الگوریتم IABC منظور شده است، که در آن‌ها تعداد زنبورهای تماشاچی ۰/۶۷، ۰/۷۵ و ۰/۸ تعداد کل زنبورها می‌باشد. این نکته قابل ذکر است که برای مسائل ساده و برقابی در فرمولبندی اول و دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله، بهترین جواب‌ها زمانی حاصل می‌شود که تعداد زنبورهای تماشاچی معادل ۰/۶۷ تعداد کل زنبورهاست، حاصل می‌شود. ولیکن برای مسائل برقابی در فرمول-بندی دوم و دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله و مساله ساده در فرمولبندی دوم و دوره زمانی ۲۰ ساله، بهترین جواب‌ها در حالتی که تعداد زنبورهای تماشاچی ۰/۸ تعداد کل زنبورهاست، حاصل می‌شود. در نهایت،

برای مساله ساده در فرمول‌بندی دوم و دوره زمانی ۵ ساله، بهترین جواب‌ها در حالتی که تعداد زنبورهای تماشاچی ۰/۷۵ تعداد کل زنبورهاست، حاصل می‌شود. مقایسه نتایج جداول ۳ و ٤ با نتایج جداول ۱ و ۲ بیانگر آن است که با استفاده از الگوریتم IABC تمامی مقادیر بدست آمده از جمله کمترین، میانگین و بیشترین مقدار تابع هدف و انحراف معیار نرمال سازی شده در مقایسه با الگوریتم ABC بهبود می‌یابد، که علت آن در بخش الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل اشاره شده است. علاوه بر این، در هر دو الگوریتم، نتایج فرمول-بندی دوم از فرمولبندی اول بهتر است. مهم‌ترین دلیل آن این است که فضای جست‌وجوی جواب‌ها در حالت دوم از حالت اول بزرگتر است و همچنین تعامل مناسب‌تر بین دو مفهوم اکتشاف و بهره‌برداری امکان پذیر است. در مجموع، نتایج نشان دهنده آن است که استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی در حل مسایل باعث بهبود در جواب‌ها نسبت به الگوریتم پایه کلونی زنبور عسل مصنوعی شده است.

جدول ۱– مقادیر به‌دست آمده برای مساله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم ABC (متغیر تصمیم:مقدار جریان خروجی از مخزن).

مساله	دوره زمانی(سال)	کمترین مقدار تابع هدف	میانگین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	انحراف معیار نرمال‌سازی شده	تعداد جواب شدنی
ساده	۵	۰/۹۲۳۲۵	۱/۰٤۹۵۳٤	۱/۱۳٤۸	۰/۰۵۵۰۳	۱۰
	۲۰	۱۰/۳۲۵۸	۱۲/۹۹۸۲۹	۱٤/۹۱۳۲	۰/۱۳۹٦۸۸	۱۰
برقابی	۵	۹/۱۰۱۲	۹/۷۸۸۰۷	۱۰/۳٦۰۲	۰/۰٤۳۸۹۵	۱۰
	۲۰	۳٦/۱۰۲۳	۳۹/۸۳۲۲۹	٤٤/۵٦۵۷	۰/۰۷۵۰۸۳	۱۰

جدول ۲– مقادیر به‌دست آمده برای مساله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دزبا استفاده از الگوریتم ABC (متغیر تصمیم:حجم ذخیره مخزن).

مساله	دوره زمانی(سال)	کمترین مقدار تابع هدف	میانگین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	انحراف معیار نرمال‌سازی شده	تعداد جواب شدنی
ساده	۵	۰/۸۵۹۳۱	۰/۹٤۱٤۲	۰/۹۹۱۷۹	۰/۰٤۵۵۵۹	۱۰
	۲۰	۵/۸۰٤۹	٦/۱٤۱۱۸	٦/٦۳۲۷	۰/۰٤۸٦٤۸	۱۰
برقابی	۵	۷/۷۳۲	۷/۹۹۲۷۹	۸/۳۳۳٤	۰/۰۲۲۳۰۸	۱۰
	۲۰	۳۳/۳٤۹۸	۳۵/۳۹۵۰۷	۳۷/۹٤٦۱	۰/۰۳۷٦٦۱	۱۰

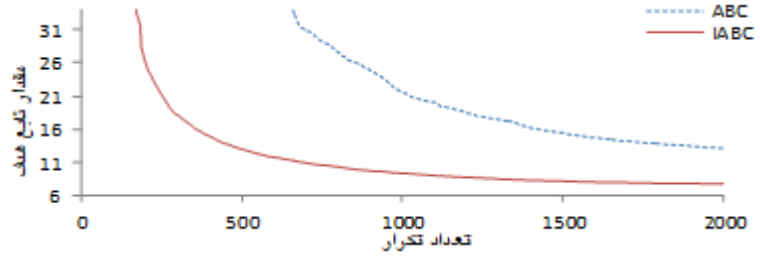
جدول ۳– مقادیر به‌دست آمده برای مساله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم IABC (متغیر تصمیم:مقدار جریان خروجی از مخزن).

مساله	دوره زمانی(سال)	کمترین مقدار تابع هدف	میانگین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	انحراف معیار نرمال‌سازی شده	تعداد جواب شدنی
ساده	۵	۰/۸۳۹۷۵	۰/۹۰۱۷٤	۰/۹٦۸۸٤	۰/۰۵۰۳۳٤	۱۰
	۲۰	٦/٦۵۰٤	۷/٦۹۵٦۹	۸/۸۵۷٤	۰/۰۸۸۱۲۸	۱۰
برقابی	۵	۸/٤٤۵٤	۹/۳۵۰٤۲	۹/۸۷٦۲	۰/۰۵۹٦۹۸	۱۰
	۲۰	۲۸/۵٤٦۷	۳۱/۳٤۱۷۵	۳۵/۰۷۰٤	۰/۰۵۹۳٦۹	۱۰

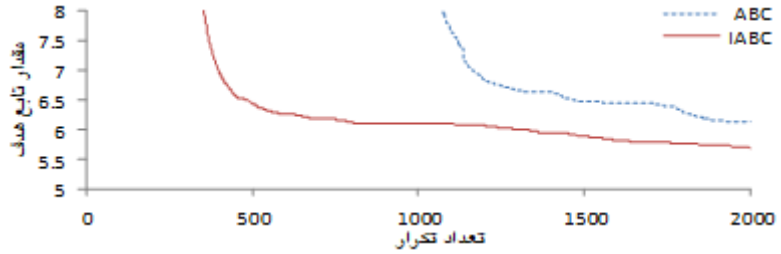
جدول ۴– مقادیر به‌دست آمده برای مساله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم IABC (متغیر تصمیم:حجم ذخیره مخزن).

مساله	دوره زمانی(سال)	کمترین مقدار تابع هدف	میانگین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	انحراف معیار نرمال‌سازی شده	تعداد جواب شدنی
ساده	۵	۰/۷۴۹۶۶	۰/۷۷۴۹۴۷	۰/۸۱۳۴۹	۰/۰۲۸۹۵۴	۱۰
	۲۰	۵/۴۱۵۸	۵/۷۰۲۲۱	۵/۸۷۷۹	۰/۰۲۵۹۱۳	۱۰
برقابی	۵	۷/۴۴۹۲	۷/۵۲۵۳۴	۷/۶۵۴۲	۰/۰۰۹۳۸۴	۱۰
	۲۰	۲۶/۵۷۴۵	۳۰/۹۰۲۲۶	۳۲/۸۸۵۶	۰/۰۶۶۵۵	۱۰

شکل‌های ۱ و ۲ نحوه تغییرات مقدار میانگین تابع با استفاده از الگوریتم‌های ABC وIABC در دوره زمانی ۲۰ ساله در هر دو فرمولبندی پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که در مقایسه با الگوریتم ABC، با استفاده از الگوریتم IABC جواب‌های بهتر و هزینه محاسباتی یکسان برای مسائل حاصل می‌شود. به‌عبارت دیگر، نمودار IABC در تمامی تکرارها پایین تر از نمودار ABC می‌باشد.

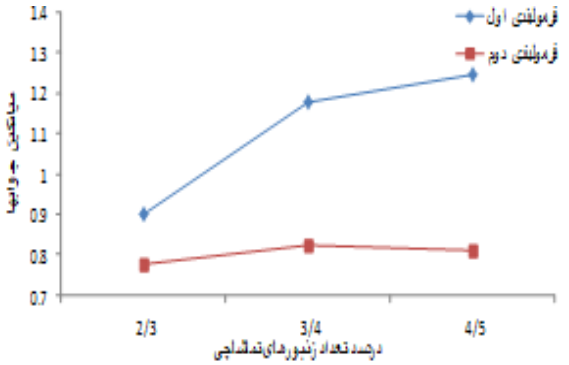


شکل ۱– نحوه تغییرات مقدار میانگین تابع هدف با استفاده از الگوریتم‌های ABC وIABC در فرمول‌بندی اول پیشنهادی در دوره زمانی ۲۰ ساله.

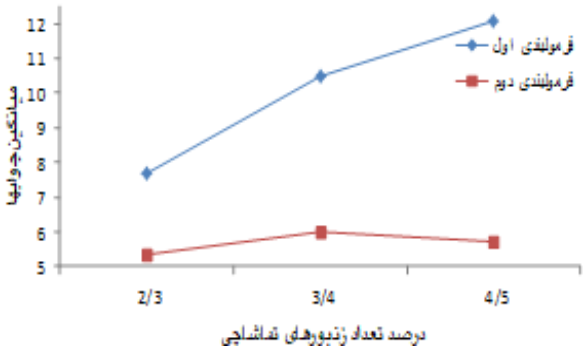


شکل ۲– نحوه تغییرات مقدار میانگین تابع هدف با استفاده از الگوریتم‌های ABC وIABC در فرمول‌بندی دوم پیشنهادی در دوره زمانی۲۰ ساله.

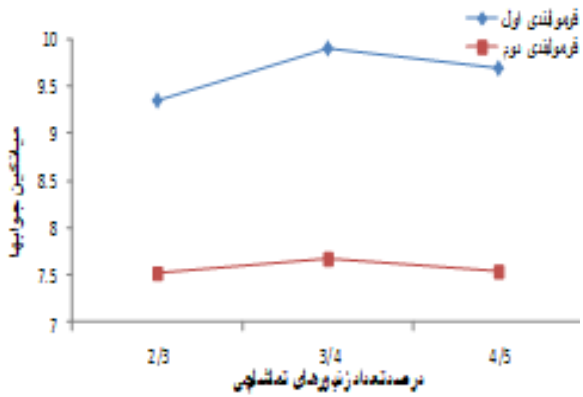
همانگونه که ذکر شد، برای حل مسائل این تحقیق، حالت‌های مختلفی برای الگوریتم IABC منظور شد. شکل‌های ۳ تا ٦ نحوه تغییرات میانگین تابع با استفاده از الگوریتم IABC در دو **فرمول‌بندی** پیشنهادی برای تمامی حالات (زمانی که تعداد زنبورهای تماشاچی درصدهای مختلفی از تعداد کل زنبورهاست) را نشان می‌دهد.



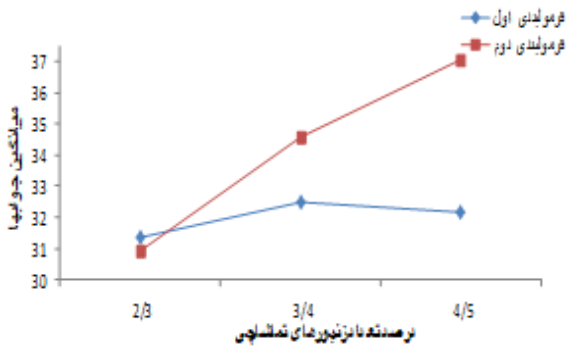
شکل ۳- مقادیر میانگین تابع هدف با استفاده از الگوریتم IABC در مساله بهره‌برداری ساده و در دوره زمانی ۵ ساله.



شکل ۴- مقادیر میانگین تابع هدف با استفاده از الگوریتم IABC در مساله بهره‌برداری ساده و در دوره زمانی ۲۰ ساله.



شکل ۵- مقادیر میانگین تابع هدف با استفاده از الگوریتم IABC در مساله بهره‌برداری برقابی و در دوره زمانی ۵ ساله.



شکل۶-مقادیر میانگین تابع هدف با استفاده از الگوریتم IABC در مساله بهره‌برداری برقابی و در دوره زمانی ۲۰ ساله.

مسائل مذکور توسط افشار (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات و با منظور نمودن مقدار جریان خروجی از مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم حل شده است. در مساله بهره‌برداری ساده، کمترین مقدار تابع هدف برای دوره زمانی ۵ ساله ۱/٤۷ بود و برای دوره زمانی ۲۰ ساله جواب شدنی حاصل نشد. در حالیکه برای این مسائل با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله به‌ترتیب، برابر۰/۹۲۳۲۵ و ۱۰/۳۲۵۸ و با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف به‌ترتیب، برابر با ۸۳۹۷۵/ ۰ و ٦/٦٥۰٤ می‌باشد. علاوه بر این، در مساله بهره‌برداری برقابی برای دوره زمانی ۵ ساله کمترین مقدار تابع هدف ۸/۳۹ بود و برای دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات جواب شدنی[1] حاصل نشد (افشار ۲۰۱۲). در حالیکه برای این مسائل با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله به‌ترتیب، برابر با ۹/۱۰۱۲ و ۳٦/۱۰۲۳ می‌باشد و با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف به‌ترتیب برابر ۸/٤٤٥٤ و ۲٦/٥٤٤٥ می‌باشد. همچنین مساله مذکور توسط افشار و معینی (۲۰۰۸) با استفاده

[1] feasible solution

از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و با منظور نمودن حجم ذخیره مخزن به عنوان متغیر تصمیم حل شد. در مساله بهره‌برداری ساده کمترین مقدار تابع هدف در دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله به‌ترتیب، ۱/۳۸ و ۱۲/۳۳۸ بود، در حالی که با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف به‌ترتیب، ۰/۸۵۹۳۱ و ۵/۸۰۴۹ و با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف به‌ترتیب، برابر با ۰/۷۴۹۶۶ و ۵/۴۱۵۸ می‌باشد. علاوه بر این در مساله بهره‌برداری برقابی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان کمترین مقدار تابع هدف برای دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله به‌ترتیب، ۸/۶۵ و ۳۳/۲۹ بود، در حالی که با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع به‌ترتیب، ۷/۷۳۲ و ۳۳/۳۴۹۸ و با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی کمترین مقدار تابع هدف به‌ترتیب، برابر با ۷/۴۴۹۲ و ۲۶/۵۷۴۵ می‌باشد. مقایسه نتایج مسائل مورد بررسی با سایر نتایج موجود نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی در حل مسائل نمونه می‌باشد که مهم‌ترین دلیل آن ایجاد تعامل بهتر بین دو مفهوم اکتشاف و بهره‌برداری در این الگوریتم است.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، قابلیت‌های الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی در حل مساله بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این به منظور افزایش قابلیت‌های این الگوریتم، الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی معرفی شد. مسائل بهره‌برداری بهینه ساده وبرقابی از سد دز در دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله و در دو فرمول‌بندی مختلف حل و نتایج تجزیه و تحلیل شد. مقایسه نتایج با سایر نتایج موجود نشان دهنده آن است که با استفاده از این الگوریتم‌ها جواب مناسبی برای مسائل حاصل می‌شود که جواب‌های فرمول‌بندی دوم از اول مطلوب‌تر است. علاوه بر این نتایج الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی از الگوریتم پایه کلونی زنبور عسل مصنوعی بهتر بود. لذا استفاده از این الگوریتم برای حل مساله بهره‌برداری بهینه از مخزن توصیه می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که قابلیت‌های الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی در حل سایر مسائل حوزه مهندسی آب نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

Afshar A, Bozorg Haddad O, Marino MA, Adams BJ, 2007. Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation. Journal of the Franklin Institute 344: 452-462.

Afshar MH, Moeini R, 2008. Partially and fully constrained ant algorithms for the optimal solution of large-scale reservoir operation problems. Water Resources Management 22: 1835-1857.

Afshar MH, 2012. Large scale reservoir operation by Constrained Particle SwarmOptimization algorithms. Hydro-environment Research 6: 75-87.

Bashiri-Atrabi H, Qaderi K, Rheinheimer D, Sharifi E, 2015. Application of harmony search algorithm to reservoir operation optimization. Water Resources Management 29(15):5729–5748

Bozorg Hadad O, Afshar A, Marino MA, 2008. Honey-Bee Mating Optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs. Journal of. Hydroinformatics 10(3): 257-264.

Castelletti A, Pianosi F, Restelli M, 2013. A multi objective reinforcement learning approach to water resources systems operation: Pareto frontier approximation in a single run. Water Resources Research 49: 3476-3486.

Chang L Ch, Chang FJ, Wang KW, Dai Sh Y, 2010. Constrained Genetic Algorithm for optimizing multi-use reservoir operation. Journal of Hydrology 390: 66-74.

Choong SM, El-Shafie A, 2014. State-of-the-art for modelling reservoir inflows and management optimization. Water Resources Management 20: 1-16.

Dinpazhoh V, Sattari MT, Ebrahimi S, and Darbandi S, 2016.Optimum operation of reservoir using Genetic Algorithm and particle Swarm optimization (Case study: Alavian dam). Soil and Water Science-University of Tabriz 27(2): 17-29. (In Persian)

Hossain MS, and El-Shafie A, 2014. Evolutionary techniques versus swarm intelligences: application in reservoir release optimization. Neural Computing and Applications 24: 1583-1594.

Hosseini Moghari M, Banihabib ME, 2014. Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly algorithm. Journal of Soil and Water Resources Conservation 3(4): 17-31. (In Persian)

Karaboga D, Basturk B, 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. Journal of Global Optimization 39: 459-471.

Mohammad Reza Pour O, Zeynali MJ, 2015. Application of an max-min ant system algorithm for optimal operation of multi – reservoirs (Case study: Golestan and Voshmgir Reservoir Dams). International Journal of Agriculture and Crop Sciences 8(1): 27-33.

Naveena S, Malathy S, Saranya D, Kumar DR, 2015. An Improved Artificial Bee Colony (IABC) algorithm for numerical function optimization. International Journal of Advanced Information in Engineering Technology 1: 13-17.

Norouzi B, Barani GH.A, Meftah Halaghi M,Dehghani AA, 2011. Amulti reservoir system operation optimization using multi population genetic algorithm (case study: Golstan and Voshmgir reservoirs). Journal of Soil and Water Resources Conservation 18(4): 43-62. (In Persian)

Rani D, Moreira MM, 2010. Simulation–optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. Water Resources Management 24: 1107-1138.

Reddy MJ, Kumar DN, 2006. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation. Journal of Water Resource Management 20: 879-889.

Wang KW, Chang LC, Chang FJ, 2011. Multi-tier interactive genetic algorithms for the optimization of long-term reservoir operation. Advances in Water Resources 34: 1343-1351.

Wardlaw R, Sharif M, 1999. Evaluation of genetic algorithm for the optimal reservoir system operation. Journal of Water Resources Planning and Management 125: 25-33

Yasar M, 2016. Optimization of reservoir operation using cuckoo search algorithm: Example of Adiguzel Dam, Denizli, Turkey. Mathematical Problems in Engineering 2016: 1-7

Zhang J Wu Zh, Cheng Ch, Zhang Sh, 2011. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. Water Science and Engineering 4(1): 61-73.