



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال سوم، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۳

بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب

سید محمد حسینی موعاری^۱، محمد ابراهیم بنی‌حبیب^{۲*}

(۱) دانشجو دکتری؛ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ دانشگاه تهران؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ کرج؛ ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱؛ ایران

(۲) دانشیار؛ گروه مهندسی آبیاری و زهکشی؛ دانشگاه تهران؛ پردیس ابوریحان؛ پاکدشت؛ ۳۳۹۱۶-۵۳۷۵۵؛ تهران؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: banihabib@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

چکیده

بیشترین مقدار آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. بنابراین استفاده بهینه از آب در این بخش، به میزان قابل توجهی در حفاظت منابع آب و استفاده حداکثری از آب موجود موثر است. در بسیاری از مناطق، سدهای ذخیره‌ای وظیفه تأمین آب کشاورزی پایین دست خود را بر عهده دارند. بهره‌برداری بهینه از مخازن یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت منابع آب سطحی بوده و روش‌های بهینه‌سازی گوناگونی در این زمینه استفاده شده‌اند، که پرکاربردترین آنها روش‌های فراکاشی می‌باشند. در این پژوهش الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) به عنوان روشی نوین برای تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن بازفت، به کار گرفته شده است. مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد بازفت برای یک بازه ۱۲۰ ماهه مربوط به سال‌های آبی ۶۶-۶۵ تا ۷۵-۷۴ صورت گرفت. تابع هدف در نظر گرفته شده به صورت کمینه‌کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار نیاز و مقدار رهاسازی شده از مخزن، به بیشینه نیاز طی دوره بهره‌برداری تعریف گردید. عملکرد الگوریتم FA با الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO) که روش‌های بهینه‌سازی متداول و شاخصی می‌باشند، مقایسه و ارزیابی شد. نتایج حاکی از عملکرد بهتر FA نسبت به دو روش دیگر بود، به گونه‌ای که مقدار متوسط تابع هدف حاصل از FA برابر ۰/۴۰۸ و متوسط تابع هدف برای PSO و GA به ترتیب برابر ۰/۶۱۸ و ۰/۹۱۳ به‌دست آمد. افزون بر مقدار مناسب تابع هدف، FA مقدار کمبودهای کمتر و خفیف‌تری نسبت به PSO و GA ایجاد کرده است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم کرم شب‌تاب؛ بهره‌برداری بهینه؛ روش‌های فراکاشی؛ مخزن بازفت

مقدمه

می‌دهد، بسیار ضروری است (امیدواری‌نیا و موسوی جهرمی، ۱۳۹۱؛ رزاقی و همکاران، ۱۳۹۲). تاکنون از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی برای بهره‌برداری از مخازن استفاده شده است. با این وجود روش‌های جدیدتر به منظور رفع نواقص روش‌های قبلی توسعه داده می‌شوند. شروع استخراج سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخازن با برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP) بود (نجفی و همکاران،

افزایش جمعیت و نیاز به تولید غذای بیشتر از یک طرف و کمبود آب و کاهش بارش‌های جوی از طرف دیگر ضرورت مدیریت بهینه منابع آب را روشن می‌سازد. بخش قابل توجه‌ای از نیاز آبی کشور به خصوص در قسمت غربی از منابع آب سطحی و از طریق مخازن سدها تأمین می‌گردد. بنابراین جستجوی سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخازن به‌ویژه در بخش کشاورزی که عمده‌ترین میزان مصرف آب کشور را به خود اختصاص

^۱ Linear Programming

هارمونی^۸ (HS) برای مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی استفاده کردند. بزرگ حداد و همکاران (۱۳۸۹) از الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورهای عسل^۹ (HBMO) در بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده کردند. الگوریتم ژنتیک^{۱۰} (GA) و بهینه‌سازی مجموعه ذرات^{۱۱} (PSO) به صورت گسترده در زمینه آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند و عملکرد آنها در زمینه‌های مختلف با موفقیت گزارش شده است، برای مثال Esat و Hall (۱۹۹۴) از GA برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه چهارمخزنه استفاده نمودند. Fahmy و همکاران (۱۹۹۴) GA و DP را در زمینه بهره‌برداری از مخزن مورد مقایسه قرار دادند و بیان کردند GA توانایی بالاتری نسبت به DP دارد. Loucks و Oliveira (۱۹۹۷) از GA به منظور استخراج قوانین بهره‌برداری از سامانه‌های چند مخزنه استفاده نمودند. Kumar و Reddy (۲۰۰۷) از PSO برای بهره‌برداری بهینه چند هدفه از مخزن استفاده کردند. Ostadrahimi و همکاران (۲۰۱۲) از PSO چندهدفه در استخراج قوانین بهره‌برداری از سامانه چند مخزنه استفاده نمودند.

بهره‌برداری از مخازن سدها اگر به صورت هدفمند انجام نشود، علاوه بر هدر رفت هزینه‌های بالای ساخت سد و غیراقتصادی شدن ساخت آن، منابع آب کشور را نیز هدر می‌دهد. از طرفی دیگر ساخت سدها اثرات زیست‌محیطی فراوانی به همراه دارد. با در نظر گرفتن هزینه‌های بالای اقتصادی و زیست‌محیطی در کنار محدودیت منابع آب کشور کاملاً واضح است که بایستی حداکثر استفاده ممکن را از منابع آب پشت سدها به عمل آورد. اما بهره‌برداری از مخزن مسئله‌ای غیرخطی و پیچیده‌ای است، بنابراین استفاده از هر روش بهینه‌سازی در این زمینه مناسب نیست. روش‌های فراکاشی در این زمینه بارها به صورت

پس از آن از برنامه‌ریزی پویا^۲ (DP) و برنامه‌ریزی پویای تصادفی^۳ (SDP) مورد استفاده قرار گرفتند (Mousavi et al. 2005; Ben-Alaya et al. 2003). این روش‌ها به ترتیب دارای محدودیت خطی در نظر گرفتن مسئله، گسسته‌سازی مسئله و مشکل ابعادی^۴ هستند. مشکل ابعادی به مفهوم افزایش نمایی حجم محاسبات با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم مسئله است. با ظهور روش‌های فراکاشی، انقلابی در زمینه بهینه‌سازی صورت گرفت. این روش‌های نه وابسته به نوع مسئله از نظر خطی و غیرخطی بودن هستند و نه نیازی به گسسته‌سازی مسئله دارند؛ همچنین دارای سرعت و دقت مناسب در مقایسه با سایر روش‌های موجود می‌باشند (Rani and Moreira, 2010).

روش‌های فراکاشی نیز در درون خود به روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی تقسیم می‌شوند، که علت این تنوع و معرفی روش‌های جدید را، می‌توان بهبود بخشیدن دقت و افزایش سرعت رسیدن به جواب بهینه دانست. در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن از روش‌های فراکاشی گوناگون استفاده شده است. Manatwy و همکاران (۲۰۰۵) و خادمی و همکاران (۱۳۹۰) از الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده^۵ (SA) به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده کردند و نتایج حاکی از کارایی SA در بهینه‌سازی بود. Karaboga و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه^۶ (TS) عملکرد بهینه خروجی سرریزهای مخزن را استخراج نمودند. بنی بشر و همکاران (۱۳۸۹) و افشار و همکاران (۱۳۹۰) از الگوریتم جامعه مورچگان^۷ (ACO) در بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده کردند و عملکرد آن را مناسب گزارش نمودند. جنت رستمی و همکاران (۱۳۸۹) از الگوریتم جستجوی

^۸ Harmony Search

^۹ Honey-Bee Mating Optimization

^{۱۰} Genetic Algorithm

^{۱۱} Particle Swarm Optimization

^۲ Dynamic Programming

^۳ Stochastic Dynamic Programming

^۴ Curse of Dimensionality

^۵ Simulated Annealing

^۶ Tabu Search

^۷ Ant Colony Optimization

مواد و روش‌ها

الف- مطالعه موردی

در این تحقیق مخزن بازفت به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. این مخزن بر روی رودخانه بازفت در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. متوسط حجم آورد سالانه آن در دوره آماری سال‌های ۳۵-۱۳۳۴ تا ۷۷-۱۳۷۶ حدود ۲۰۰۰ میلیون متر مکعب است و با حجم کمینه ۱۴۲ میلیون متر مکعب و حجم بیشینه ۴۵۰ میلیون متر مکعب وظیفه تامین آب کشاورزی پایین دست خود را برعهده دارد. برای مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن بازفت از آمار و اطلاعات جریان ورودی به مخزن در طول سال‌های آبی ۶۶-۶۵ تا ۷۵-۷۴ به مدت ۱۰ سال استفاده گردید. جدول ۱ نیاز ماهانه کشاورزی منطقه مربوطه و جدول ۲ جریان ورودی به مخزن بازفت در طول سال‌های آبی ۶۶-۶۵ تا ۷۵-۷۴ را نشان می‌دهد.

موفقیت‌آمیزی به‌کار گرفته شده‌اند؛ اما نقطه ضعف این روش‌ها این است که به جواب نزدیک به بهینه مطلق می‌رسند و کاملاً نمی‌تواند جواب مطلق مسئله را نتیجه دهند. این نقطه ضعف در الگوریتم‌های فراکاوشی جدید در حال برطرف شدن است و روش‌های فراکاوشی جدید با دقت مناسب‌تری به جواب بهینه مطلق نزدیک می‌شوند. به همین دلیل در این تحقیق الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) به‌عنوان یک روش فراکاوشی جدید برای بهبود بهره‌برداری از مخزن پیشنهاد شده است. به منظور بررسی کارایی FA علاوه بر این الگوریتم از GA و PSO نیز که از مطرح‌ترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی ارائه شده تا به امروز می‌باشند و به عنوان مبنایی برای ارزیابی کارایی روش‌های فراکاوشی جدید پذیرفته شده‌اند؛ استفاده گردید و سپس عملکرد این سه روش با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول ۱. نیاز کشاورزی پایین دست مخزن بازفت (میلیون متر مکعب).

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع کل
نیاز	۱۰۶	۱۱۳	۱۰۱	۸۷	۸۵	۱۷۵	۲۱۱	۱۸۹	۱۶۰	۲۰۰	۱۸۷	۱۴۹	۱۷۶۳

جدول ۲. جریان ورودی به مخزن بازفت در طی سال‌های آبی ۶۶-۶۵ تا ۷۵-۷۴ (میلیون متر مکعب).

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۶۵-۶۶	۶۴/۰	۹۸/۵	۳۵۳/۶	۱۴۰/۰	۱۹۹/۱	۶۸۰/۱	۶۱۳/۹	۶۳۴/۸	۳۴۱/۵	۱۷۳/۳	۱۱۰/۴	۷۱/۸
۱۳۶۶-۶۷	۶۶/۴	۱۶۲/۸	۱۳۰/۴	۲۷۵/۰	۲۳۹/۸	۶۶۱/۹	۴۸۸/۰	۳۹۶/۹	۲۱۴/۳	۱۳۱/۵	۱۰۰/۲	۸۲/۲
۱۳۶۷-۶۸	۵۲/۱	۹۹/۸	۸۳/۷	۱۲۶/۰	۱۰۴/۷	۳۰۶/۸	۴۱۵/۲	۳۲۶/۰	۱۸۶/۷	۱۰۹/۶	۷۷/۱	۵۹/۷
۱۳۶۸-۶۹	۴۵/۴	۱۳۰/۱	۲۵۱/۹	۱۳۲/۷	۱۸۴/۸	۳۵۸/۴	۳۲۱/۹	۲۶۷/۳	۱۷۳/۳	۱۰۱/۲	۶۷/۵	۴۳/۷
۱۳۶۹-۷۰	۶۵/۸	۴۳/۶	۳۸/۹	۶۷/۴	۱۱۶/۶	۳۰۹/۱	۵۶۵/۴	۲۴۸/۶	۱۳۹/۳	۸۵/۷	۶۴/۰	۴۹/۸
۱۳۷۰-۷۱	۶۳/۲	۴۴/۱	۳۱۷/۸	۱۲۳/۶	۱۱۷/۹	۳۵۳/۸	۶۰۷/۵	۷۰۳/۶	۳۶۰/۵	۲۰۶/۸	۱۲۱/۶	۷۰/۴
۱۳۷۱-۷۲	۸۴/۲	۷۸/۰	۲۰۴/۰	۴۸۷/۶	۳۳۲/۸	۱۰۰۲/۵	۶۳۲/۹	۸۴۴/۸	۴۱۲/۲	۲۷۰/۵	۱۶۳/۷	۱۱۳/۸
۱۳۷۲-۷۳	۴۸/۲	۱۴۴/۱	۱۳۰/۱	۱۶۱/۲	۲۲۳/۷	۲۳۸/۶	۲۹۴/۴	۲۱۳/۷	۱۳۷/۷	۸۵/۲	۶۷/۵	۵۶/۸
۱۳۷۳-۷۴	۵۶/۰	۳۵۳/۳	۶۸۰/۹	۲۱۸/۳	۲۴۳/۱	۲۶۰/۳	۳۵۴/۶	۳۵۶/۸	۲۱۱/۹	۱۲۷/۰	۹۵/۶	۱۰۰/۴
۱۳۷۴-۷۵	۵۸/۳	۵۱/۶	۵۱/۱	۷۰/۰	۱۳۸/۷	۳۸۲/۱	۶۵۵/۷	۴۷۵/۴	۲۳۸/۴	۱۲۸/۰	۸۵/۲	۶۰/۸

ب- مدل بهره‌برداری از مخزن

به منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی بایستی ابتدا مدل بهره‌برداری از مخزن مشخص گردد. بدین منظور تابع هدفی به صورت کمینه‌کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار نیاز و مقدار رهاسازی شده از مخزن، به بیشینه نیاز در طول دوره بهره‌برداری در نظر گرفته شد، که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T \left(\frac{De(t) - Re(t)}{De_{\max}} \right)^2 \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

که در این رابطه، Z تابع هدف، T طول دوره بهره‌برداری (۱۲۰ ماه)، $De(t)$ مقدار نیاز در ماه t ام (میلیون مترمکعب)، $Re(t)$ خروجی مخزن در ماه t ام (میلیون مترمکعب) و De_{\max} بیشینه نیاز در طول دوره بهره‌برداری (میلیون مترمکعب) است. معادله پیوستگی نیز از اساسی‌ترین روابط مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} + Q_{(t)} - Re_{(t)} - Sp_{(t)} - Loss_{(t)} \quad (2)$$

که در این رابطه $S_{(t)}$ و $S_{(t+1)}$ به ترتیب حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره t (میلیون مترمکعب)، $Q_{(t)}$ جریان ورودی به مخزن در طول دوره t (میلیون مترمکعب)، $Sp_{(t)}$ مقدار سرریز از مخزن در طول دوره t (میلیون مترمکعب) و $Loss_{(t)}$ مقدار تلفات از مخزن در طول دوره t (میلیون مترمکعب) است. برای محاسبه $Loss$ نیز از روابط زیر استفاده شده است:

$$Loss_{(t)} = A_{(t)} \times Ev_{(t)} \quad (3)$$

$$A_{(t)} = aS_{(t)}^3 + bS_{(t)}^2 + cS_{(t)} + d \quad (4)$$

که در این روابط $A_{(t)}$ سطح مخزن در ماه t ام (کیلومتر مربع)، $Ev_{(t)}$ تبخیر خالص از مخزن (تفاوت میزان بارش و تبخیر) در ماه t ام (متر) و a ، b ، c و d ضرایب ثابت معادله سطح-حجم مخزن می‌باشند، که به ترتیب برابر $9/97 \times 10^{-7}$ ، $-8/02 \times 10^{-5}$ ، $0/029$ و $0/259$ هستند.

علاوه بر روابط فوق بایستی قیودی نیز برای مدل بهره‌برداری در نظر گرفته شوند؛ مثلاً حجم آب مخزن نمی‌تواند از حجم کمینه مخزن کمتر یا از حجم بیشینه آن تجاوز کند. این قیود به صورت زیر در مدل‌سازی وارد شده‌اند:

$$0 \leq Re_{(t)} \leq De_{(t)} \quad (5)$$

$$S_{\min} \leq S_{(t)} \leq S_{\max} \quad (6)$$

$$Q_{(t)} = \begin{cases} S_{(t)} + Q_{(t)} - Re_{(t)} - Loss_{(t)} - S_{\max} & \text{if } S_{(t)} + Q_{(t)} - Re_{(t)} - Loss_{(t)} > S_{\max} \\ 0 & \text{if } S_{(t)} + Q_{(t)} - Re_{(t)} - Loss_{(t)} \leq S_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

که S_{\min} و S_{\max} به ترتیب حجم کمینه و بیشینه مخزن (میلیون متر مکعب) می‌باشند. قید اول که به صورت رابطه (۵) بیان شده است، قید مربوط به بازه‌ی متغیرهای تصمیم مسئله، یعنی خروجی‌های بهینه از مخزن است. این قید می‌تواند در ابتدای فرآیند بهینه‌سازی، با تعریف بازه‌ی مجاز برای ایجاد جمعیت‌های تصادفی هر الگوریتم، در نظر گرفته شود. قید بعد مربوط به حجم مخزن است. این قید را نمی‌توان به صورت مستقیم در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفت. برای ارضا نمودن قیودی به جز قید مربوط به بازه مورد قبول متغیرهای تصمیم مسئله، از تابع جریمه استفاده می‌شود. در این حالت، زمانی که یکی از قیود ارضا نشود، مقدار بزرگی به تابع هدف افزوده می‌شود (در مسائل کمینه‌سازی) که باعث می‌شود راه‌حل متناظر با آن تابع هدف به‌عنوان راه‌حل مناسب شناخته نشود؛ بدین صورت راه‌حل نهایی، راه‌حلی است که تمام قیدها در آن رعایت شده است. رابطه (۷) وجود سرریز از مخزن در ماه t ام را بررسی می‌کند، تا مادامی که حجم آب مخزن از S_{\max} کمتر است مقدار سرریز برابر صفر خواهد بود و در صورتی که حجم آب بیشتر از S_{\max} شود، مازاد آن سرریز خواهد کرد.

ج- معیارهای کارایی در بهره‌برداری از مخزن

در بهره‌برداری از مخزن همواره به دنبال افزایش اطمینان‌پذیری^{۱۲} تامین آب و کاهش آسیب‌پذیری^{۱۳} در تامین نیازها هستیم. شاخص‌های اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری در بهره‌برداری از مخزن توسط Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) معرفی گردیدند. این شاخص‌ها می‌توانند به عنوان یک مبنا برای مقایسه روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن استفاده گردند. اطمینان‌پذیری حجمی به صورت نسبت حجم آب رها شده به حجم نیاز در طول دوره بهره‌برداری تعریف می‌شود. با توجه به آنچه که گفته شد رابطه (۸) به منظور محاسبه اطمینان‌پذیری حجمی استفاده گردید.

$$Rel = \frac{\sum_{t=1}^T Re(t)}{\sum_{t=1}^T De(t)} \quad (8)$$

در این رابطه، Rel شاخص اطمینان‌پذیری حجمی، که معمولاً بر حسب درصد بیان می‌شود. در بهره‌برداری از مخزن مقدار شکست‌ها دارای اهمیت متفاوت هستند. برای مثال پنج کمبود ۱ میلیون مترمکعبی اهمیت کمتری نسبت به یک کمبود ۵ میلیون مترمکعبی دارد. شاخص آسیب‌پذیری برای بررسی این موضوع مطرح شده است. آسیب‌پذیری عبارتست از حداکثر کمبود نسبی ایجاد شده در طول دوره بهره‌برداری که توسط رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$Vul = \max_{t=1}^T \left(\frac{De(t) - Re(t) | De(t) > Re(t)}{De(t)} \right) \quad (9)$$

که در این رابطه، Vul شاخص آسیب‌پذیری است. هر سیاست بهره‌برداری که بتواند مقدار اطمینان‌پذیری بیشتر و آسیب‌پذیری کمتری ایجاد کند، مناسب‌تر خواهد بود.

د- الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)

الگوریتم کرم شب‌تاب از الگوریتم‌های برگرفته از طبیعت است که رفتار اجتماعی کرم‌های شب‌تاب را شبیه‌سازی می‌کند. این الگوریتم توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ معرفی گردید (Yang, 2008). کرم‌های شب‌تاب نورهایی تولید می‌کنند که الگوی نوری هر کدام با دیگری متفاوت است. آنها به منظور جذب جفت و شکار از این نور استفاده می‌کنند، میزان این نور رابطه مستقیم با جذابیت کرم شب‌تاب دارد. با در نظر گرفتن میزان نور هر کرم به عنوان مقدار تابع هدف، می‌توان رفتار کرم‌های شب‌تاب را به صورت یک الگوریتم بهینه‌ساز مدل نمود. برای راحتی شبیه‌سازی زندگی کرم‌های شب‌تاب در فرآیند مدل‌سازی سه فرض اساسی در نظر گرفته شده‌است: (۱) کرم‌های شب‌تاب همگی تک جنسیتی هستند، بنابراین جنسیت نقشی در جذب آنها به سمت یکدیگر ندارد.

(۲) میزان جذب بین دو کرم شب‌تاب با درخشندگی آنها نسبت مستقیم و با فاصله بین آنها نسبت عکس دارد؛ بنابراین کرم شب‌تاب درخشان‌تر سایر کرم‌های شب‌تاب که در همسایگی‌اش است را به سمت خود جذب می‌کند و اگر هیچ کدام درخشان‌تر از دیگری نبودند حرکت آنها به صورت تصادفی انجام می‌شود.

(۳) میزان درخشندگی کرم‌های شب‌تاب بر اساس مقدار تابع هدف مربوط به آنها تعیین می‌گردد.

همان‌طور که گفته شد میزان جذابیت کرم‌های شب‌تاب (β) نسبی بوده و به فاصله بین دو کرم شب‌تاب (r) و ضریب جذب نور (γ) بستگی دارد که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (10)$$

در این رابطه، β_0 ، میزان جذابیت کرم درخشان‌تر در $r = 0$ است. موقعیت کرم i ام پس از حرکت به سمت کرم j ام که درخشان‌تر است از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

¹² Reliability
¹³ Vulnerability

در تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم FA معمولاً مقادیر α و β در بازه $[0,1]$ و مقدار γ در بازه $(0, \infty)$ متغیر است (Yang, 2008). در مسئله بهره‌برداری از مخزن، هدف ما یافتن بهترین نقطه از فضای تصمیم مسئله می‌باشد با این شرط که تمامی قیودات مسئله رعایت شوند؛ بنابراین در حل این مسئله با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب بهترین نقطه محلی است که، کرم شب‌تاب بیشترین جذابیت را داشته باشد. این نقطه خروجی‌های بهینه مخزن را در دوره بهره‌برداری نشان می‌دهد.

۵- بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO)

PSO از رفتار جمعی ماهیان و پرندگان الگوبرداری شده است. این الگوریتم توسط کندی و ابراهام در سال ۱۹۹۵ معرفی گردیده است (Kennedy and Eberhart, 1995). در این الگوریتم هر ذره دارای یک بردار سرعت است که این بردار از دو عامل تاثیر می‌پذیرد: عامل اول بهترین موقعیتی است که ذره تا به حال به آن رسیده است ($Pbest$) و عامل دوم بهترین موقعیتی است که بهترین ذره به آن رسیده است ($Gbest$). برای یک مسئله D بعدی با N جمعیت اولیه، سرعت حرکت ذره i ام از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد:

$$v_{id}^{n+1} = \chi(w.v_{id}^n + c_1r_1^n (Pbest_{id}^n - x_{id}^n) + c_2r_2^n (Gbest^n - x_{id}^n)) \quad (13)$$

$i = 1, \dots, N \quad d = 1, \dots, D$

که در این رابطه v ، سرعت ذرات، n ، شماره تکرار فرآیند بهینه‌سازی، χ ، فاکتور انقباض که بزرگی سرعت را در هر مرحله کنترل می‌کند، w ، وزن اینرسی که تاثیر مهمی در همگرایی الگوریتم دارد، c_1 و c_2 ، ضرایب شناختی و اجتماعی و r_1 و r_2 ، اعدادی تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت که وجود آنها باعث جستجوی جامع‌تر فضای تصمیم می‌شود. بنابراین موقعیت i امین ذره در جمعیت در هر تکرار از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

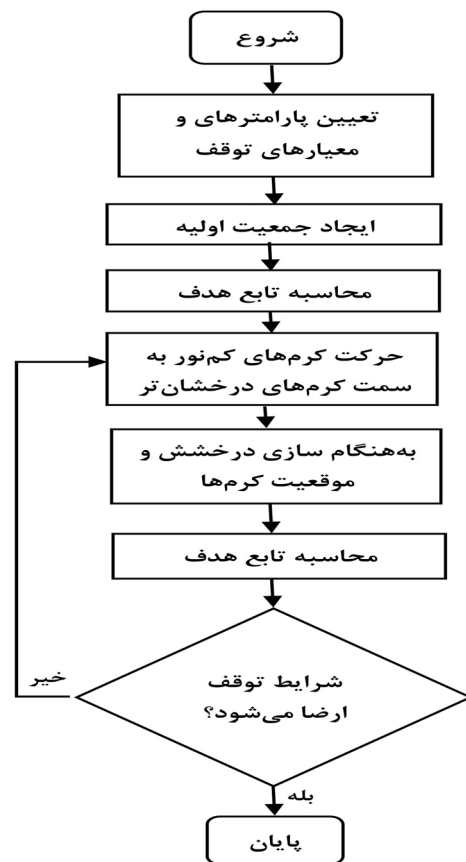
$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (14)$$

$i = 1, \dots, N$
 $d = 1, \dots, D$

$$x_i^n = x_i^{n-1} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^{n-1} - x_i^{n-1}) + \alpha e_i^{n-1} \quad (11)$$

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| \quad (12)$$

که x_i ، موقعیت کرم شب‌تاب کم نورتر، x_j ، موقعیت کرم شب‌تاب درخشان‌تر، n ، شماره تکرار، α ، عددی تصادفی و e_i^{n-1} ، یک بردار از اعداد تصادفی است که می‌تواند دارای توزیع یکنواخت یا گوسی باشد. قسمت سوم رابطه ۱۱، ترم تصادفی رابطه محسوب می‌شود که باعث جستجوی جامع‌تر فضای تصمیم مسئله توسط الگوریتم می‌شود. جذب کرم‌های شب‌تاب تا جایی ادامه پیدا می‌کند که آنها به سمت درخشان‌ترین کرم موجود جذب شوند، در واقع این کرم بهترین مقدار را برای تابع هدف ما ایجاد می‌کند. شکل ۱ روندنمای این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۱. روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی FA

را ایجاد می‌کند. همچنین در انتخاب دو ضریب c_1 و c_2 معمولاً رابطه $c_1 + c_2 \leq 4$ رعایت می‌شود. بهترین موقعیت ذرات در انتهای فرآیند بهینه‌سازی، نقطه‌ای از فضای تصمیم است که بهترین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن را نتیجه می‌دهد. شکل ۲ روندنمای الگوریتم PSO را نشان می‌دهد.

خ- الگوریتم ژنتیک (GA)

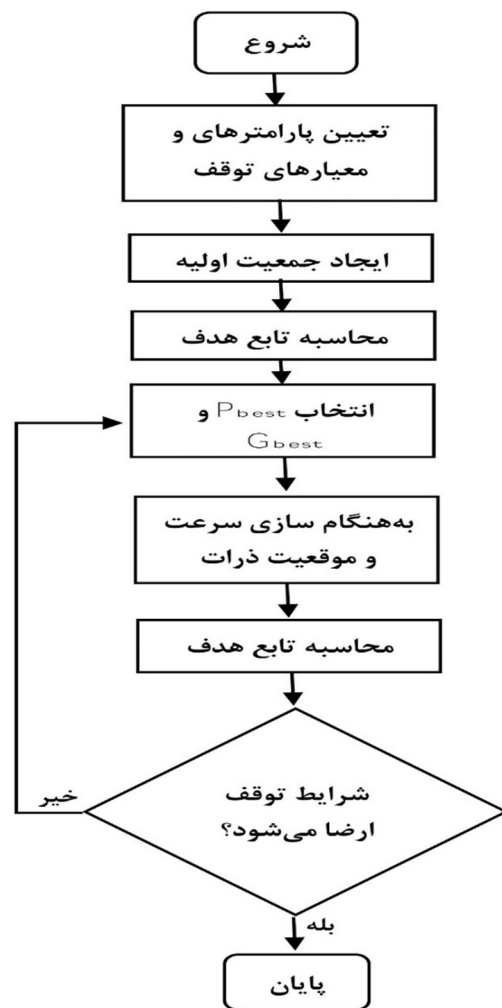
GA مشهورترین الگوریتم فراکاوشی است که توسط هلند در سال ۱۹۷۵ معرفی گردید (Holland, 1975). این الگوریتم با جمعیت اولیه‌ای از کروموزوم‌ها شروع به کار می‌کند، این کروموزوم‌ها به تعداد ابعاد مسئله دارای ژن هستند، طی فرآیند بهینه‌سازی این ژن‌ها توسط عملگرهای ژنتیکی ترکیب^{۱۴} و جهش^{۱۵} بهبود می‌یابند. کروموزوم‌ها بر اساس شایستگی تابع هدف متناظر با آنها برای انتقال به نسل بعد انتخاب می‌گردند. به‌منظور این انتخاب، از عملگرهایی چون چرخ رولت^{۱۶} و انتخاب رقابتی^{۱۷} که عملگرهای تکاملی هستند، استفاده می‌شود. با استفاده از عملگر ترکیب تعدادی از ژن‌های دو کروموزوم انتخاب شده، با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند و توسط عملگر جهش به‌صورت تصادفی برخی ژن‌ها تغییر می‌کنند. همچنین توسط پارامتر نخبه‌گرایی می‌توان احتمال انتخاب بهترین کروموزوم‌ها را افزایش داد و همگرایی الگوریتم را بهبود بخشید. در تولید هر نسل جدید سه عملگر انتخاب، جهش و ترکیب، فرآیند بهینه‌سازی را به نحوی پیش می‌برند که کروموزوم‌های ایجاد شده، مقدار تابع هدف را در هر تکرار بهتر و بهتر کنند، تا جایی که فرآیند بهینه‌سازی توسط یکی از شرط‌های توقف، پایان یابد.

مقدار نرخ ترکیب یکی از پارامترهای حساس در GA است که مقدار آن در بازه (۰،۱) تغییر می‌کند. مقدار نرخ

تجربه نشان می‌دهد، مقدار W اگر در ابتدا بزرگ و در طی فرآیند بهینه‌سازی کاهش یابد نتایج بهتری را حاصل می‌کند بنابراین برای W از رابطه زیر استفاده گردید:

$$w_n = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times n}{iter_{\max}} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, N \\ d = 1, \dots, D \end{matrix} \quad (15)$$

که در آن w_{\max} ، میزان اولیه اینرسی، w_{\min} ، میزان نهایی اینرسی، $iter_{\max}$ ، حداکثر تعداد تکرار الگوریتم و n ، شماره تکرار است.



شکل ۲. روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی PSO

مقدار مناسب این پارامترها وابسته به نوع مسئله هستند. پارامترهای PSO محدوده مشخصی ندارند ولی معمولاً مقدار W از ۲ تجاوز نمی‌کند و λ برابر ۱ همگرایی لازم

¹⁴ Crossover

¹⁵ Mutation

¹⁶ Roulette wheel

¹⁷ Tournament Selection

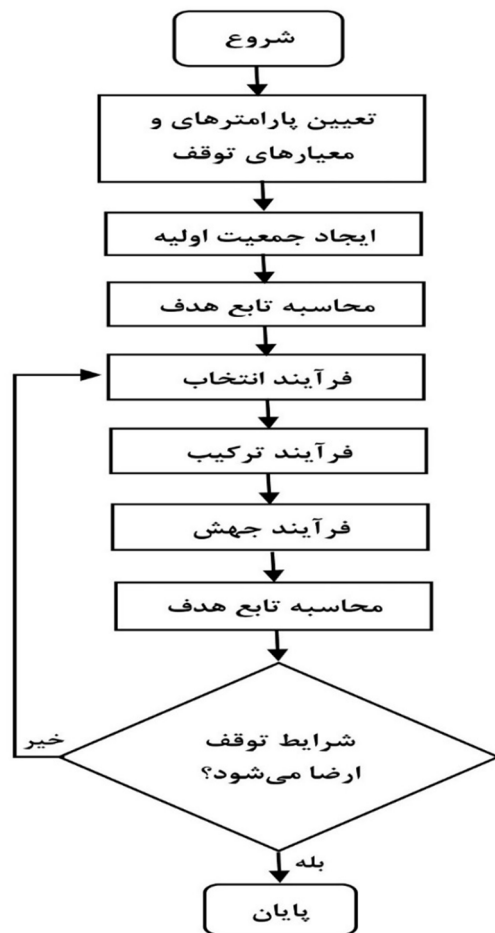
شده است و به راحتی قابل استفاده است، اما برای PSO و FA رابطه گرافیکی وجود ندارد. این دو الگوریتم به صورت کدنویسی در محیط این نرم‌افزار پیاده‌سازی شدند.

نتایج و بحث

یکی از معایب الگوریتم‌های فراکاوشی تعیین مقدار بهینه پارامترهای هر روش است. در بسیاری از موارد پارامترها نقش اساسی در نزدیک شدن الگوریتم به جواب بهینه دارند. به هر میزان که تعداد پارامترهای یک الگوریتم کمتر باشد، تنظیم مقدار مناسب این پارامترها به مراتب آسان‌تر خواهد شد. FA از این نظر از دو الگوریتم دیگر مناسب‌تر است؛ از آن جهت که این الگوریتم تنها دارای ۳ پارامتر است و مقدار مناسب این پارامترها نیز تقریباً در همان محدوده توصیه شده توسط یانگ (Yang, 2008) قابل تنظیم است. تنظیم پارامترهای FA مانند تمامی الگوریتم‌های دیگر با روش آزمون و خطا انجام می‌شود. جدول ۳ پارامترهای تنظیم شده FA در این مطالعه را نشان می‌دهد. پارامترهای مناسب الگوریتم PSO و GA نیز به ترتیب در جدول ۴ و جدول ۵ آورده شده است.

با توجه به این موضوع که در الگوریتم‌های فراکاوشی جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و همچنین عملگرهای موجود در این روش‌ها (همانند جهش در GA) باعث ایجاد جواب‌های تصادفی در طی فرآیند اجرای هر الگوریتم می‌شوند، جواب‌های حاصل از هر الگوریتم در اجراهای مختلف، متفاوت خواهد بود. به همین علت با خوب یا بد شدن نتیجه در یک اجرا نمی‌توان در مورد توانایی الگوریتم به درستی اظهار نظر کرد. بنابراین بایستی هر الگوریتم بیش از یک‌بار اجرا گردد. در این تحقیق پس از مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد بازفت و تعیین پارامترهای بهینه هر سه الگوریتم مذکور، ۱۰ اجرای مختلف، با ۱۰۰۰ تکرار

جهش یک درصد و تعداد نخبه‌گرایی برابر ۲ معمولاً همگرایی GA را تضمین می‌کند؛ با این حال مقدار آنها وابسته به نوع مسئله است و نمی‌توان مقدار دقیقی برای آنها در نظر گرفت. نوع تابع انتخاب و تابع جهش نیز تاثیر بسزایی در عملکرد الگوریتم دارند و بایستی با آزمون و خطا برای هر مسئله تعیین گردد. بهترین کروموزم در انتهای الگوریتم بهترین خروجی‌های مخزن در طول دوره بهره‌برداری (هر ژن خروجی یک ماه) را نشان می‌دهد. شکل ۳ روندنمای این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۳. روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی GA.

به منظور انجام مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن بازفت از نرم‌افزار MATLAB 2010b استفاده گردید. GA به صورت یک رابطه گرافیکی آماده در این نرم‌افزار تعبیه

سه الگوریتم دارد. مقدار ضریب تغییرات مربوط به FA برابر ۰/۲۹ و برای PSO و GA به ترتیب برابر ۰/۱۳۶ و ۰/۰۸۶ به دست آمده است. شکل ۴ نحوی همگرایی این سه الگوریتم را نشان می‌دهد. این شکل مربوط به متوسط عملکرد سه روش در ۱۰ اجرا است. با توجه به این شکل همگرایی FA مناسب‌تر از دو روش دیگر است. همچنین PSO تا حدود ارزیابی ۱۲۰۰۰ بهتر از GA عمل کرده است اما پس از آن پیشرفت قابل توجهی نداشته است.

(حدود ۳۰ هزار ارزیابی تابع هدف) برای هر الگوریتم در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل از این ۱۰ اجرا، متوسط تابع هدف حاصل از الگوریتم FA برابر ۰/۴۰۸ و متوسط تابع هدف با استفاده از PSO و GA به ترتیب برابر ۰/۹۱۳ و ۰/۶۱۸ به دست آمده است. جدول ۶ نتایج حاصل از این ۱۰ اجرا، به همراه پارامترهای آماری مربوطه را، نشان می‌دهد. یکی از معیارهای مقایسه روش‌های فراکاوشی نزدیک بودن جواب‌های حاصل از یک الگوریتم در اجرای مختلف است. در این رابطه FA با کمترین مقدار ضریب تغییرات بهترین وضعیت را در بین

جدول ۳. پارامترهای تنظیم شده FA.

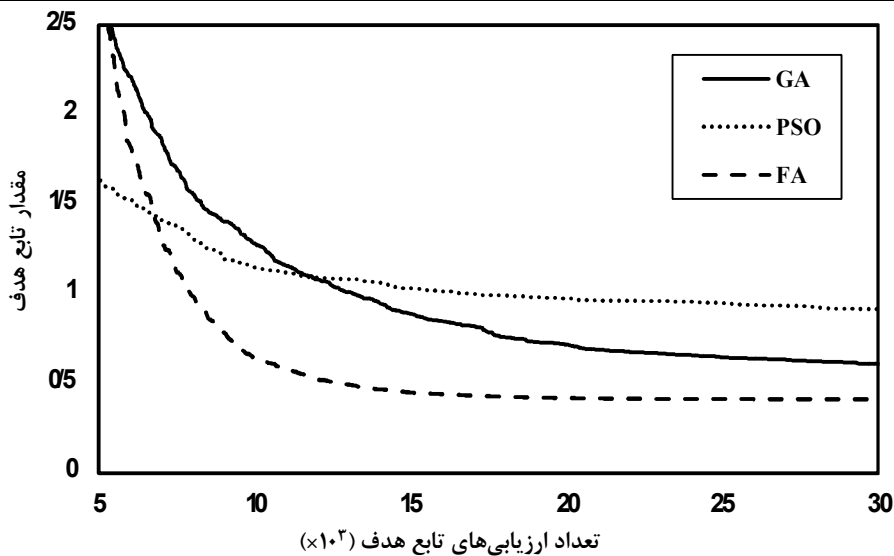
α	γ	β_0	تعداد جمعیت	پارامتر FA
۰/۸	۱۰	۰/۱	۳۰	مقدار

جدول ۴. پارامترهای تنظیم شده PSO.

χ	W_{max}	W_{min}	C2	C1	تعداد جمعیت	پارامتر PSO
۱	۰/۹۵	۰/۲۵	۲	۲	۳۰	مقدار

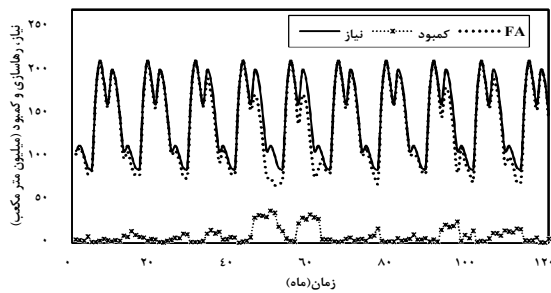
جدول ۵. پارامترهای تنظیم شده GA.

تایع جهش	تایع انتخاب	تعداد نخبه‌گرایی	نرخ جهش	نرخ ترکیب	تعداد جمعیت	پارامتر GA
یکنواخت	چرخ رولت	۲	۰/۰۱	۰/۵	۳۰	مقدار

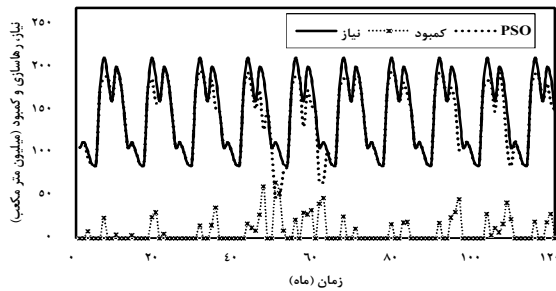


شکل ۴. نحوی همگرایی الگوریتم‌های FA, PSO و GA.

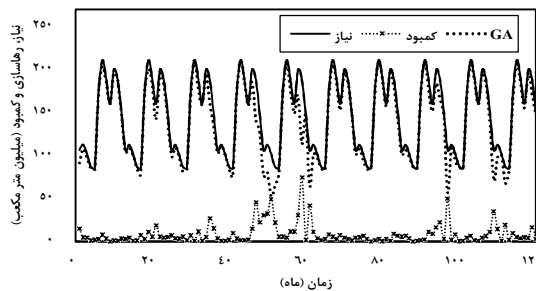
و بر اساس روش PSO و GA به ترتيب برابر ۰/۵۷ و ۰/۴۸ بوده است. از نظر معيار اطمینان‌پذیری تفاوت چندانی بين سه روش وجود ندارد ولی از نظر آسیب‌پذیری به ترتيب FA در جایگاه نخست و GA و PSO در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند. به منظور مقایسه دقیق‌تر، میزان خروجی بهینه منتج از سه الگوریتم در جدول‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۵. خروجی‌های حاصل از FA در کنار نیازها و کمبودها.



شکل ۶. خروجی‌های حاصل از GA در کنار نیازها و کمبودها



شکل ۷. خروجی‌های حاصل از PSO در کنار نیازها و کمبودها

شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ تغییرات حجم مخزن، ورودی به مخزن، خروجی از مخزن و سرریز از مخزن را برای سه الگوریتم مورد بحث نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌های مشخص است که قیدهای مربوط به سرریز و حجم مخزن به درستی برقرار هستند. در زمان‌های که

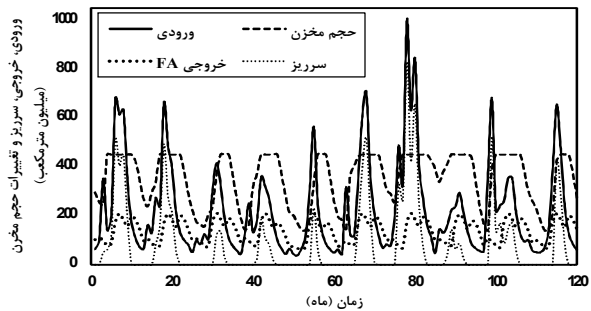
جدول ۶. نتایج اجرای الگوریتم FA، PSO و GA.

شماره اجرا	مقدار تابع هدف		
	FA	PSO	GA
۱	۰/۴۲۱	۰/۷۵۵	۰/۶۸۱
۲	۰/۴۱۳	۱/۱۶۴	۰/۵۷۹
۳	۰/۴۱۷	۰/۹۱۲	۰/۵۶۲
۴	۰/۴۰۴	۰/۸۴۴	۰/۶۴۵
۵	۰/۴۰۱	۰/۹۰۱	۰/۵۷۶
۶	۰/۳۹۶	۰/۸۸۷	۰/۶۶۳
۷	۰/۴۰۹	۱/۰۴۳	۰/۵۵۴
۸	۰/۴۲۱	۰/۷۶۵	۰/۵۷۸
۹	۰/۴۱۶	۰/۸۶۹	۰/۶۵۴
۱۰	۰/۳۸۴	۰/۹۸۶	۰/۶۹۱
متوسط عملکرد	۰/۴۰۸	۰/۹۱۳	۰/۶۱۸
بهترین عملکرد	۰/۳۸۴	۰/۷۵۵	۰/۵۵۴
بدترین عملکرد	۰/۴۲۱	۱/۱۶۴	۰/۶۹۱
انحراف معیار	۰/۰۱۲	۰/۱۲۵	۰/۰۵۳
ضریب تغییرات	۰/۰۲۹	۰/۱۳۶	۰/۰۸۶

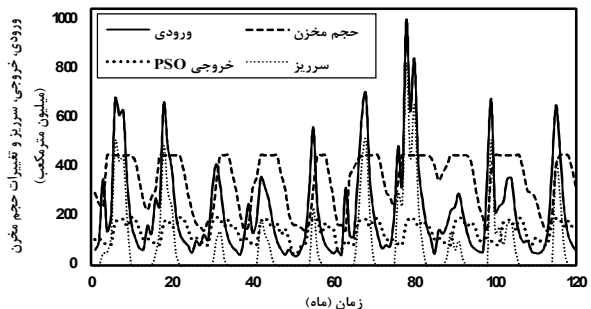
بعد از اجرای سه الگوریتم برای مدل بهره‌برداری از مخزن، سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از هر روش حاصل گردید. به منظور مقایسه عملکرد این سه الگوریتم از نظر استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهترین عملکرد هر روش در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که مقدار خروجی‌های به‌دست آمده از FA کمبودهای کمتری نسبت به دو روش PSO و GA ایجاد کرده است. شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ میزان خروجی از مخزن بر اساس این سه الگوریتم را در کنار نیاز و میزان کمبود ایجاد شده در طول دوره بهره‌برداری نشان می‌دهند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، FA کمبود کمتر و خفیف‌تری را ایجاد نموده است. البته از نظر معيار اطمینان‌پذیری تفاوت زیادی بين سه روش وجود ندارد. مقدار اطمینان‌پذیری برای هر سه روش با در نظر گرفتن دو رقم اعشار ۹۴ درصد به‌دست آمده است. شاخص آسیب‌پذیری نیز در دوره ۱۰ ساله بهره‌برداری از مخزن بازفت بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم FA برابر ۰/۳۴

شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند جریان ورودی در برخی ماه‌ها، مانند ماه ۴۸ تا ۵۲ مقدار کمی است، بنابراین طبیعی است در این دوره‌ها تمامی الگوریتم‌های کمبودهایی را ایجاد نمایند، اما چگونگی توزیع این کمبودها در طول دوره، باید به نحوی باشد که مقدار تابع هدف مورد نظر حداقل شود؛ توزیع مناسب کمبودها، وظیفه الگوریتم‌ها است. در ماه‌های ۴۸ تا ۵۲ با توجه به ورودی‌ها، خروجی‌ها و کمبودها مشخص است که FA توانایی بالاتری در توزیع مناسب کمبودها در این دوره داشته است و پس از آن GA عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. از نظر مقداری، بیشترین کمبود ایجاد شده توسط FA در ماه‌های ۴۸ تا ۵۲، مربوط به ماه ۵۰ است که برابر ۳۷/۲۵ میلیون مترمکعب است و برای GA و PSO به ترتیب برابر ۴۸/۸۹ و ۶۴/۸۴ میلیون مترمکعب است که در ماه ۵۱ و ۵۰ رخ داده است. این نتایج با نتیجه تحقیق Pal و همکاران (۲۰۱۲) که به مقایسه عملکرد FA و PSO در بهینه‌سازی چند تابع غیرخطی پرداختند، سازگار است. ایشان در نتایج خود کارایی FA نسبت به PSO را گزارش نمودند. Senthilnath و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی دقت FA، PSO و چند الگوریتم فراکاوشی دیگر با هدف خوشه‌بندی پرداختند، نتایج نشان داد که FA بهترین عملکرد را در میان تمامی الگوریتم‌ها دارد. Gandomi و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد FA را با GA و PSO در چندین مسئله آزمون، مقایسه کردند، نتایج تحقیق آنها نیز حاکی از کارایی FA نسبت به سایر روش‌ها بود.

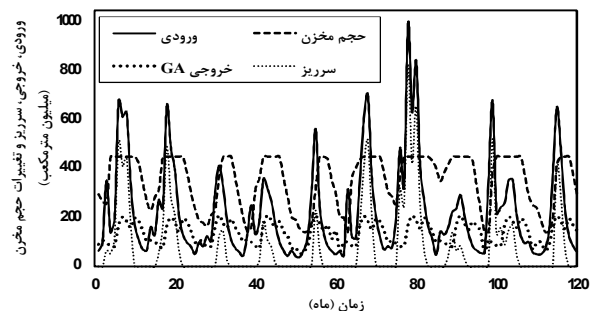
حجم مخزن در بیشترین مقدار خود (۴۵۰ میلیون مترمکعب) قرار دارد، اگر جریان ورودی بیشتر از نیاز و تلفات باشد، سرریز از مخزن داریم. همچنین در هیچ دوره‌ای حجم مخزن از حجم کمینه آن (۱۴۲ میلیون مترمکعب) کمتر نشده است.



شکل ۸. خروجی‌های حاصل از FA در کنار جریان ورودی، سرریز از مخزن و تغییرات حجم مخزن.



شکل ۹. خروجی‌های حاصل از PSO در کنار جریان ورودی، سرریز از مخزن و تغییرات حجم مخزن.



شکل ۱۰. خروجی‌های حاصل از GA در کنار جریان ورودی، سرریز از مخزن و تغییرات حجم مخزن.

جدول ۷- جریان خروجی‌های بهینه از مخزن بازفت به‌دست آمده از FA.

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۶۵-۶۶	۱۰۲/۶	۱۰۹/۷	۹۹/۱	۷۹/۴	۸۴/۵	۱۷۳/۸	۲۰۹/۳	۱۸۴/۳	۱۵۷/۳	۱۹۸/۷	۱۸۴/۸	۱۴۷/۰
۱۳۶۶-۶۷	۹۸/۰	۱۰۶/۰	۸۷/۸	۷۸/۰	۷۸/۴	۱۶۸/۹	۲۰۹/۱	۱۸۴/۶	۱۵۶/۴	۱۹۹/۲	۱۸۷/۳	۱۴۶/۶
۱۳۶۷-۶۸	۱۰۲/۷	۱۰۷/۰	۹۶/۰	۷۶/۴	۷۵/۴	۱۷۳/۷	۲۱۰/۸	۱۸۸/۱	۱۵۸/۳	۱۹۰/۰	۱۷۳/۲	۱۳۸/۴

۱۱۸/۰	۱۵۵/۷	۱۷۱/۴	۱۵۳/۷	۱۸۶/۳	۲۱۰/۳	۱۷۴/۵	۷۹/۳	۸۰/۳	۹۷/۳	۱۰۸/۹	۹۳/۵	۱۳۶۱-۶۹
۱۱۶/۳	۱۶۰/۵	۱۷۱/۴	۱۳۷/۷	۱۸۷/۵	۲۰۹/۱	۱۶۹/۹	۷۱/۷	۶۸/۲	۶۶/۸	۷۵/۵	۷۶/۱	۱۳۶۹-۷۰
۱۴۵/۷	۱۸۵/۴	۱۹۴/۰	۱۵۵/۴	۱۸۷/۳	۲۱۰/۶	۱۷۳/۰	۸۱/۳	۸۲/۷	۹۷/۳	۸۵/۱	۷۶/۷	۱۳۷۰-۷۱
۱۴۵/۹	۱۸۵/۱	۱۹۴/۹	۱۵۸/۹	۱۸۷/۲	۲۱۰/۵	۱۷۲/۲	۶۹/۱	۷۸/۳	۹۴/۳	۱۱۰/۲	۱۰۱/۵	۱۳۷۱-۷۲
۱۲۹/۸	۱۶۹/۵	۱۷۹/۴	۱۴۵/۱	۱۸۷/۶	۲۰۷/۶	۱۷۳/۵	۸۰/۰	۸۲/۸	۹۷/۸	۱۰۳/۳	۱۰۱/۸	۱۳۷۲-۷۳
۱۴۰/۸	۱۷۶/۷	۱۸۹/۰	۱۵۵/۴	۱۸۷/۳	۲۰۹/۳	۱۷۳/۹	۷۱/۵	۸۱/۳	۹۲/۳	۱۱۰/۱	۸۱/۴	۱۳۷۳-۷۴
۱۴۴/۶	۱۸۷/۴	۲۰۰/۰	۱۵۳/۹	۱۸۶/۱	۲۰۹/۲	۱۷۲/۰	۶۹/۸	۷۰/۱	۸۹/۴	۹۹/۶	۹۱/۶	۱۳۷۴-۷۵

جدول ۸- جریان خروجی‌های بهینه از مخزن بازفت به‌دست آمده از PSO.

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۶۵-۶۶	۱۰۶/۱	۱۱۲/۸	۹۳/۲	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۸۷/۴	۱۸۸/۸	۱۶۰/۲	۱۹۶/۵	۱۸۷/۷	۱۴۹/۲
۱۳۶۶-۶۷	۱۰۶/۱	۱۰۹/۳	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۸۶/۹	۱۵۸/۶	۱۶۰/۲	۱۹۵/۳	۱۸۷/۷	۱۴۹/۲
۱۳۶۷-۶۸	۱۰۶/۱	۱۱۲/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۹۶/۴	۱۸۸/۸	۱۶۰/۲	۱۸۵/۰	۱۵۱/۹	۱۴۹/۲
۱۳۶۸-۶۹	۱۰۶/۱	۱۱۲/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۹۴/۰	۱۷۶/۵	۱۵۱/۶	۱۷۲/۶	۱۲۷/۲	۱۴۹/۲
۱۳۶۹-۷۰	۱۰۶/۱	۴۷/۹	۴۸/۷	۷۸/۱	۸۵/۴	۱۷۴/۶	۱۹۰/۰	۱۸۸/۸	۱۳۰/۴	۱۷۲/۴	۱۵۵/۰	۱۴۹/۲
۱۳۷۰-۷۱	۶۵/۵	۶۵/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۸۶/۰	۱۸۸/۸	۱۶۰/۲	۱۸۹/۱	۱۸۷/۷	۱۴۹/۲
۱۳۷۱-۷۲	۱۰۶/۱	۱۱۲/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۹۴/۸	۱۸۸/۸	۱۶۰/۲	۱۸۲/۱	۱۶۸/۸	۱۴۹/۲
۱۳۷۲-۷۳	۱۰۶/۱	۱۱۲/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۹۳/۸	۱۸۸/۸	۱۶۰/۲	۱۷۶/۲	۱۵۷/۱	۱۰۳/۳
۱۳۷۳-۷۴	۱۰۶/۱	۱۱۲/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۸۲/۸	۱۸۵/۱	۱۴۸/۲	۱۹۳/۳	۱۷۰/۹	۱۰۷/۸
۱۳۷۴-۷۵	۸۳/۹	۱۱۲/۸	۱۰۱/۴	۸۶/۷	۸۵/۴	۱۷۴/۸	۱۹۲/۲	۱۸۸/۸	۱۶۰/۲	۱۸۱/۶	۱۵۹/۲	۱۴۹/۲

جدول ۹- جریان خروجی‌های بهینه از مخزن بازفت به‌دست آمده از GA.

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۶۵-۶۶	۹۱/۴	۱۰۷/۹	۹۶/۸	۸۵/۶	۸۳/۵	۱۷۲/۰	۲۰۳/۷	۱۸۵/۵	۱۶۰/۱	۱۹۹/۲	۱۸۷/۱	۱۴۵/۹
۱۳۶۶-۶۷	۱۰۳/۴	۱۰۸/۶	۱۰۰/۵	۸۵/۷	۷۷/۸	۱۷۱/۷	۲۰۰/۶	۱۸۳/۲	۱۴۱/۸	۱۹۵/۰	۱۸۳/۰	۱۴۴/۲
۱۳۶۷-۶۸	۹۹/۳	۱۰۹/۲	۹۸/۱	۸۱/۱	۸۳/۹	۱۶۷/۷	۲۱۰/۸	۱۷۷/۴	۱۵۹/۵	۱۹۵/۴	۱۶۰/۹	۱۳۴/۱
۱۳۶۸-۶۹	۱۰۲/۷	۱۱۱/۸	۱۰۰/۹	۸۴/۸	۷۵/۶	۱۷۱/۶	۲۱۰/۱	۱۸۷/۳	۱۵۸/۰	۱۸۵/۷	۱۴۲/۳	۱۲۷/۰
۱۳۶۹-۷۰	۷۵/۷	۸۰/۵	۵۲/۵	۶۵/۰	۷۹/۹	۱۶۹/۴	۲۰۷/۲	۱۷۷/۳	۱۴۸/۸	۱۷۰/۰	۱۱۳/۴	۱۴۷/۲
۱۳۷۰-۷۱	۶۴/۵	۱۰۱/۹	۹۷/۶	۸۵/۲	۸۲/۶	۱۶۶/۴	۲۰۶/۰	۱۸۶/۲	۱۵۲/۷	۱۹۶/۰	۱۸۴/۹	۱۴۸/۲
۱۳۷۱-۷۲	۱۰۱/۹	۱۰۸/۰	۹۴/۶	۸۴/۱	۸۵/۲	۱۷۳/۳	۲۰۸/۵	۱۸۸/۵	۱۵۷/۸	۱۹۹/۵	۱۷۸/۸	۱۴۲/۷
۱۳۷۲-۷۳	۱۰۰/۸	۱۰۶/۵	۹۸/۰	۸۶/۷	۸۴/۸	۱۷۳/۵	۲۰۹/۴	۱۷۷/۹	۱۵۱/۳	۱۸۴/۱	۱۶۵/۶	۱۴۶/۶
۱۳۷۳-۷۴	۵۶/۵	۱۱۱/۱	۹۳/۲	۸۶/۴	۸۴/۵	۱۷۰/۴	۲۰۵/۱	۱۸۷/۳	۱۵۹/۸	۱۹۶/۲	۱۸۱/۵	۱۳۸/۰
۱۳۷۴-۷۵	۷۱/۱	۹۸/۴	۱۰۰/۶	۶۷/۴	۸۳/۶	۱۶۵/۳	۲۰۶/۴	۱۸۵/۳	۱۵۵/۴	۱۹۶/۳	۱۷۱/۲	۱۴۶/۵

مناسب‌تر می‌توان، استفاده بهینه از منابع آب محدود کشور را بهبود بخشید و از حداقل آب موجود حداکثر بهره‌وری را داشت. در انتها پیشنهاد می‌گردد از این الگوریتم در مسائل مختلف دیگر مربوط به آب کشور نظیر بهینه‌سازی الگو کشت و غیره استفاده گردد.

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی عملکرد الگوریتم فراکاوشی FA به عنوان یک روش جدید در حوزه بهینه‌سازی، برای استخراج سیاست‌های بهینه بهره‌برداری

همان‌گونه که از نتایج مشخص است FA توانایی بسیار مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت عملکرد FA در سامانه‌های آبی همانند کاربرد آن در علوم دیگر مناسب است و می‌تواند به عنوان یک جایگزین به جای روش‌های پیشین مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج مناسبی که از FA در این تحقیق حاصل گردید، به نظر می‌رسد که این الگوریتم، یک الگوریتم قدرتمند در بهینه‌سازی مسائل مربوط به آب باشد. از این رو با استفاده از الگوریتم‌های دقیق‌تر و

بزرگ‌حداد، ا.، افشار، ع. و افشار، م. ه. ۱۳۸۹. الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبورهای عسل (HBMO) در حل مسائل بهینه‌سازی. نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۹(۲): ۹۹-۱۱۲.

بنی‌بشر، م.، اعلمی، م. ت. و عباسی، ح. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد چند منظوره علویان با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان. مجله دانش آب و خاک. ۲۰(۴): ۱-۱۳.

خادمی، م.، عمادی، م. ر. و محسنی‌موحد، ا. ۱۳۹۰. بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت و کاربرد روش مجانب در صحت‌سنجی آن. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۲(۳): ۸۰-۹۴.

جنت‌رستمی، س.، خلقی، م. و بزرگ‌حداد، ا. ۱۳۸۹. مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم اصلاح شده جستجوی هارمونی. مجله دانش آب و خاک. ۲۰(۳): ۶۱-۷۱.

رزاقی، پ.، بابازاده، ح. و شوریان، م. ۱۳۹۲. توسعه سیاست جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن چند منظوره در شرایط محدودیت منابع آبیا استفاده از مدل MODSIM 8.1. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۳(۲): ۱۱-۲۳.

نجفی، م. ر.، هاشم‌پور، ج. و خیاط‌خلقی، م. ۱۳۸۴. بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و کاربرد آن در سد وشمگیر. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۵): ۲۷-۳۵.

Ben-Alaya, A., Souissi, A., Tarhouni, J. and Ncib, K. 2003. Optimization of Nebhana reservoir water allocation by stochastic dynamic programming. Water Resources Management. 17(4): 259-272.

Esat, V. and Hall, M.J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithms. Proceedings of first international conference on hydro informatics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 225-231.

Fahmy, H.S., King, J.P., Wentzel, M.W. and Seton, J.A. 1994. Economic Optimization of River Management Using Genetic Algorithms. ASAE 1994 International Summer Meeting. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA.

Gandomi, A.H., Yang, X.S. and Alavi, A. H. 2011. Mixed variable structural optimization using

از مخزن بازفت با هدف تامین نیاز کشاورزی بود. بدین منظور مخزن بازفت به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد و مدل بهره‌برداری از آن با هدف کمینه کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار نیاز و مقدار رهاسازی شده از مخزن، به بیشینه نیاز برای یک دوره ۱۲۰ ماهه طی سال‌های ۶۵ تا ۷۵ تهیه گردید. پس از آن FA برای بهینه‌سازی خروجی‌های مخزن بازفت در طول این دوره به کار گرفته شد. همچنین از GA و PSO نیز به عنوان روش‌های مقایسه‌ای برای قضاوت در مورد توانایی FA استفاده گردید.

نتایج نشان داد FA توانایی بالاتری نسبت به GA و PSO در دستیابی به جواب بهینه دارد به نحوی که مقدار متوسط تابع هدف حاصل از این الگوریتم در ۱۰ اجرا مختلف برابر ۰/۴۰۸ به دست آمد؛ در حالی که متوسط تابع هدف GA و PSO به ترتیب برابر ۰/۶۱۸ و ۰/۹۱۳ بوده است. همچنین به علت کم بودن پارامترهای FA نسبت به سایر الگوریتم‌ها، تنظیم پارامترهای آن بسیار ساده‌تر و سریع‌تر از سایر روش‌ها انجام می‌شود. از نظر معیار اطمینان‌پذیری هر سه روش با اطمینان‌پذیری ۹۴ درصدی دارای وضعیت مشابه‌ای هستند اما از نظر آسیب‌پذیری FA با کمترین مقدار آسیب‌پذیری بهترین عملکرد را داشته است. بر اساس نتایج حاصل FA الگوریتمی قدرتمند و مناسب برای بهینه‌سازی در سامانه‌های آبی خواهد بود.

فهرست منابع

افشار، م. ه.، رضایی‌سنگدلی، ا. و معینی، ر. ۱۳۹۰. بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها با استفاده از مکانیزم نظریه تطبیقی قطعی در الگوریتم مورچه‌ها. نشریه مهندسی عمران. ۲۳(۱): ۸۳-۶۵.

امیدواری‌نیا، م.، و موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۹۱. تاثیر طول آستانه و زاویه در پرتاب کننده های مثلثی بر مسیر کلی پرتابه خروجی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱(۴): ۱-۱۸.

- Oliveira, R. and Loucks, D.P. 1997. Operating rules for multi reservoir systems. *Water Resources Research*, 33(4): 839-852.
- Ostadrhimi, L, Mariño, M.A. and Afshar, A. 2012. Multi-reservoir operation rules: multi-swarm PSO-based optimization approach. *Water Resources Management*, 26(2): 407-427.
- Pal, S.K., Rai, C.S. and Singh, A.P. 2012. Comparative study of firefly algorithm and particle swarm optimization for noisy non-linear optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 4(10), 50-57.
- Rani, D. and Moreira, M.M. 2010. Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water resources management*, 24(6), 1107-1138.
- Reddy, M.J. and Kumar, D.N. 2007. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. *Hydrological Processes*. 21: 2897-2909.
- Senthilnath, J., Omkar, S.N. and Mani, V. 2011. Clustering using firefly algorithm: Performance study. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(3), 164-171.
- Yang, X.S. 2008. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press.
- firefly algorithm. *Computers & Structures*, 89(23), 2325-2336.
- Hashimoto, T. Stedinger, J. R. and Loucks, D.P. 1982. Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1): 14-20.
- Holland, J.H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Karaboga, D., Bagis, A. and Haktanir, T. 2008. Controlling spillway gates of dams by using fuzzy logic controller with optimum rule number. *Applied Soft Computing*. 8: 232-238.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. *Particle Swarm Optimization*. Proceeding of the international conference on neural networks, Perth Australia, IEEE, Piscataway. 1942-1948.
- Manatwy, A.H., Soliman, S.A. and El-Hawary, M.E. 2003. An innovative simulated annealing approach to the long-term hydro scheduling problem. *Electrical Power & Energy Systems*. 25:41-46.
- Mousavi, S.J., Ponnambalam, K. and Karray, F. 2005. Reservoir operation using a dynamic programming fuzzy rule-based approach. *Water Resources Management*. 19(5): 655-672.



Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly algorithm

Seyed Mohammad Hosseini-Moghari¹ and Mohammad Ebrahim Banihabib^{2*}

1) Ph.D. Student, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2*) Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Tehran, Aboureyhan college, University of Tehran, Tehran, Iran

Corresponding author email: Banihabib@ut.ac.ir

Received: 16-02-2013

Accepted: 22-09-2014

Abstract

The largest amount of water in Iran is used in agricultural sector. Thus, efficient use of water in this sector will be significantly effective in maintaining water resources and optimum use of available water. In many regions, surface reservoirs are responsible for providing water to downstream agriculture. Optimal operation of reservoir is one of the major parts of surface water resource optimization. So far, several optimization approaches have been used, among them, the most popular methods are Evolutionary Algorithms. In this study, Firefly Algorithm (FA), as a new method, was proposed for optimal operating of Bazoft reservoir. The operation modeling was carried out for a period of 120 months related to 1986 to 1995 years. The considered objective function was defined as minimizing the sum of squared differences between the demands and the release from the reservoir divided by maximum demand during operation. The model performance was examined compared to Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). These two mentioned algorithms are known as common and standard methods. The results indicated that firefly algorithm can better perform than other methods. The mean value of the objective function of this method was 0.408, and the mean of the objective function for the GA and PSO were 0.618 and 0.913, respectively. In addition, FA has created less deficiency values and milder deficiency compares to GA and PSO.

Keywords: Bazoft reservoir; evolutionary methods; firefly algorithm; optimal operation