بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی با الگوریتم جستجوی کلاغ براساس یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره

حمیدرضا وزیری[۱]، حجت کرمی[۱]، سید فرهاد موسوی[۱*] و امید هادیانی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۲۵)

چکیده

بهره‌برداری از مخازن سدها یکی از مسائل مهم در زمینه مدیریت منابع آب می‌باشد. در این تحقیق، الگوریتم جستجوی کلاغ برای نخستین بار برای بهره‌برداری از مخازن سدها استفاده شده است. همچنین، نتایج مربوط به بهره‌برداری سیستم تک- مخزنه سد شهید رجایی در استان مازندران، جهت تأمین نیازهای پایین‌دست سد، با الگوریتم‌های تکاملی ازدحام ذرات و ژنتیک مقایسه گردید. برای انتخاب روش برتر، از شاخص‌های اعتمادپذیری زمانی، اعتمادپذیری حجمی، آسیب‌پذیری و بازگشت‌پذیری و مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز استفاده گردید. نتایج نشان داد که الگوریتم جستجوی کلاغ دارای پاسخی نزدیک به پاسخ بهینه مطلق مسئله است. به‌گونه‌ای که میانگین پاسخ‌ها در الگوریتم‌های جستجوی کلاغ، ازدحام ذرات و ژنتیک به‌ترتیب ۹۹، ۷۵ و ۶۱ درصد پاسخ بهینهٔ مطلق است. همچنین، الگوریتم جستجوی کلاغ، به‌جز از لحاظ شاخص اعتمادپذیری زمانی، در بقیه شاخص‌ها دارای عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات می‌باشد. ضریب تغییرات پاسخ‌های به‌دست آمده توسط الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات به‌ترتیب به‌میزان ۱۶ و ۱۴ برابر کوچک‌تر می‌باشد. مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مشخص نمود که الگوریتم جستجوی کلاغ دارای رتبهٔ یک نسبت به دو الگوریتم دیگر در حل مسئله بهره‌برداری از مخزن سد شهید رجایی می‌باشد.

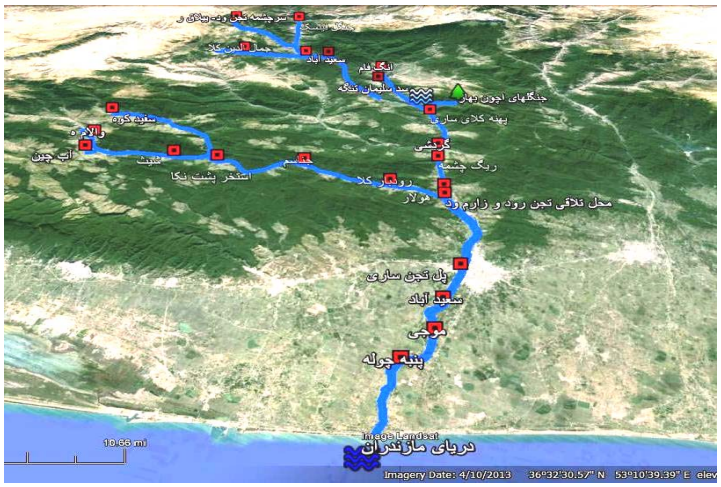
واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های تکاملی، مدیریت منابع آب، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۲. دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائم‌شهر، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fmousavi@semnan.ac.ir

مقدمه

براساس گزارش‌های به‌دست آمده توسط سازمان ملل متحد، ۱۵٪ از جمعیت دنیا- یعنی ۷۸۳ میلیون نفر- دچار مشکل عدم دسترسی به آب سالم می‌باشند (۸). به همین منظور، در سراسر دنیا سدهای مختلفی وجود دارد که جهت تأمین نیاز آبی شرب و کشاورزی ساخته شده‌اند. اما ساخت سدها در جهت تأمین آب، هزینه‌بر می‌باشد. به‌گونه‌ای که نیاز به بودجه لازم و همچنین تأمین نیروی انسانی دارد (۱۲). لذا، می‌توان به‌جای ساخت سدهای متعدد با هزینه زیاد، از مدیریت منابع آب و بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها استفاده نمود. در ارتباط با بحث مدیریت بهینه منابع آب، میزان، نحوه و زمان رهاسازی آب از یک سد مهم می‌باشد. به همین منظور، برنامه‌ریزی صحیح در جهت مدیریت منابع آب و بهره‌برداری صحیح از سدها ضروری می‌باشد (۱۹). روش‌های برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و یا روش برنامه‌ریزی پویا به‌عنوان روش‌های قدیمی بودند که از آنها جهت بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها استفاده می‌شده است (۳ و ۱۷). اما روش‌های مذکور نیاز به زمان محاسباتی زیاد داشته و یا گاه قادر به حل مسائل پیچیدهٔ بهره‌برداری از مخازن نظیر سیستم‌های چند مخزنه نیستند. الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های هوش مصنوعی طی سال‌های اخیر به‌عنوان ابزاری مناسب توسط پژوهشگران جهت حل این مسائل معرفی گردیده‌اند (۱۵). مسائل مرتبط با بهره‌برداری از سدها به‌عنوان یک مسئلهٔ بسیار پیچیده در زمینه بهینه‌سازی با داشتن توابع هدف غیرخطی و همچنین قیود فراوان، همواره مورد توجه پژوهشگران جهت دست‌یابی به بهترین پاسخ‌ها بوده است. کای و همکاران (۹) از الگوریتم‌های تکاملی مختلف جهت بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه در جهت تأمین نیازهای آبیاری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک و جستجوی هارمونی دارای همگرایی سریع‌تر و همچنین پاسخ‌های نزدیک‌تری نسبت به پاسخ‌های بهینهٔ مطلق مسئله بود. چن (۱۰) روش‌های هیبریدی مختلف را براساس ترکیب الگوریتم ژنتیک با سایر الگوریتم‌های تکاملی، استفاده نمود. نتایج بیانگر ارتقاء الگوریتم ژنتیک براساس ترکیب با سایر الگوریتم‌های تکاملی نظیر ازدحام ذرات بود. به‌گونه‌ای که الگوریتم ژنتیک هیبریدی نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده، میزان آب مورد نیاز را در جهت تأمین نیازهای آبیاری و کشاورزی بهتر تأمین می‌نمود. احمد و سارما (۲) از الگوریتم ژنتیک جهت بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه با اهداف متفاوت استفاده نموده و نتایج را با روش برنامه‌ریزی غیرخطی و خطی مقایسه کردند. چنگ و همکاران (۱۱) از الگوریتم ژنتیک آشفته جهت حل مسئله بهره‌برداری از مخازن و تأمین نیازهای آب‌رسانی استفاده نمودند. نتایج، نسبت به الگوریتم ژنتیک بیانگر دست‌یابی به پاسخ‌های بهینه مطلق مسئله براساس همگرایی سریع‌تر بود. ممتحن و داریان (۱۸) از الگوریتم ژنتیک مستقیم در ارتباط با بهره‌برداری از مخازن استفاده نمودند. نتایج، بیانگر قابلیت بالای روش مذکور در حل مسائل غیرخطی بود. ماتور و نیکام (۱۶) از الگوریتم ژنتیک جهت بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه و همچنین استخراج منحنی‌های فرمان استفاده نمودند. منحنی‌های فرمان استخراج شده نشان دادند که الگوریتم ژنتیک استفاده شده در تحقیق، به خوبی مقادیر نیاز آبی را در ماه‌های مختلف تأمین می‌نماید. فلاح مهدی‌پور و همکاران (۱۳) از الگوریتم ازدحام چند هدفه جهت بهره‌برداری از مخازن استفاده نمودند. روش مذکور نسبت به الگوریتم ژنتیک چند هدفه دارای جواب‌های بهتر و تأمین نیازهای آب‌رسانی دقیق‌تر بود. افشار (۱) از روش اتومای سلولی جهت بهره‌برداری از مخازن استفاده نمود، که نتایج نسبت به الگوریتم ژنتیک دارای دقت بیشتری بود. بزرگ حداد و همکاران (۶) از الگوریتم چرخه آب برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۴ و بزرگ حداد و همکاران (۷) از روش خفاش جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های تک‌مخزنه کارون ۴ و همچنین سیستم ۴ مخزنه و ۱۰ مخزنه در جهت افزایش تولید انرژی استفاده نمودند. نتایج بیانگر دست‌یابی روش خفاش به پاسخ بهینه مطلق مسئله براساس همگرایی سریع‌تر و پاسخ‌هایی با دقت بیشتر نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بود. بزرگ حداد و همکاران (۸) از الگوریتم جغرافیای زیستی برای

شکل ۱. سد شهید رجایی



شکل ۲. مسیر رودخانه‌های حوضه تجن از سرچشمه تا دریا

بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۴ به‌منظور افزایش تولید انرژی استفاده نمودند. نتایج، بیانگر انطباق بالای مقادیر رهاسازی آب براساس این الگوریتم با مقادیر نیازها بود.

یکی از الگوریتم‌هایی که به‌تازگی ایجاد گردیده است، الگوریتم جستجوی کلاغ می‌باشد. گروه کلاغ‌ها رفتارهایی دارند که برای حل مسائل بهینه‌سازی مناسب می‌باشند (۵). عسکرزاده (۵) از الگوریتم جستجوی کلاغ جهت بهینه‌سازی چند تابع ریاضی پیچیده استفاده نمود. نتایج، بیانگر دقت بالای الگوریتم جستجوی کلاغ در حل مسائل با تابع هدف پیچیده غیرخطی می‌باشد. در مطالعه حاضر، از الگوریتم جستجوی کلاغ در جهت بهره‌برداری از یک مخزن سد استفاده می‌گردد. هدف و نوآوری پژوهش حاضر معرفی الگوریتم جستجوی کلاغ برای اولین بار در زمینه مدیریت منابع آب و حل یک مسئله با تابع هدف پیچیده غیرخطی و همچنین معرفی یک شاخص تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسائل بهینه‌سازی مخزن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از اطلاعات مخزن سد شهید رجایی (سلیمان تنگه)، در ۴۰ کیلومتری جنوب شهر ساری، در استان مازندران، استفاده می‌گردد (شکل ۱).

این سد روی رودخانه دودانگه (شکل ۲)، یکی از

سرشاخه های رودخانه تجن، ایجاد گردیده و اهداف عمده طرح شامل تنظیم و تأمین آب اراضی کشاورزی دشت تجن، تأمین آب آشامیدنی ساری و روستاهای اطراف آن، تأمین آب مورد نیاز صنعت، تولید برقابی و کنترل طغیان سیلاب می باشد. سد مذکور از نوع بتنی دو قوسی با سرریز آزاد، به ارتفاع ۱۱۲ متر از بستر رودخانه، طول تاج ۴۲۷ متر، حجم مفید و بیشینه مخزن ۱۵۸/۳ و ۱۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. برای یک دوره سی ساله (۹۳-۱۳۶۳)، متوسط آبدهی رودخانه در محل سد در حدود ۲۰۳ میلیون مترمکعب در سال و آبدهی حوضه میانی، حد فاصل سد مخزنی شهید رجایی و بند انحرافی تجن، در حدود ۳۲۵ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. سد مذکور در سال ۱۳۸۱ به بهره‌برداری رسیده است.

هدف از مطالعه حاضر، بهره برداری از مخزن سد رجایی به‌منظور تأمین نیازهای آبی پایین‌دست می‌باشد. به همین منظور، تابع هدف به منظور کمینه کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار نیاز و مقدار رهاسازی شده از مخزن به بیشنیه نیاز در طول دوره بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود. سپس، نتایج الگوریتم جستجوی کلاغ با الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه می گردد. برای مقایسه نتایج، از شاخص های اعتمادپذیری، آسیب پذیری و بازگشت پذیری استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه چندین شاخص برای ارزیابی استفاده می گردد، لذا از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مقایسه روش‌ها براساس شاخص‌های مذکور استفاده می‌شود تا بهترین روش جهت بهره‌برداری مخزن به‌دست آید. علت مقایسه روش الگوریتم جستجوی کلاغ با روش‌های فوق، این است که هر کدام از این دو روش دارای نتایج خوبی در بحث‌های مرتبط با بهره‌برداری از مخازن می‌باشند.

کلاغ‌ها به‌عنوان پرندگانی باهوش در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، از فرایند پیچیده‌ای جهت پنهان کردن غذا در یک مکان برای بهره بردن در زمان‌های مورد نیاز استفاده می نمایند. کلاغ‌ها به تماشای پرندگان دیگر مشغول می‌گردند. سپس، محل غذای پرندگان دیگر را متوجه می شوند و پس از ترک آن پرنده از محل، غذای وی را می ربایند. روند الگوریتم جستجوی کلاغ به شرح زیر می‌باشد. فرض کنید فضای محیط پیرامون شامل d بُعد و N کلاغ است. موقعیت هر کلاغ در هر مرحله از تکرار براساس بردار $(x^{i,iter}=[x_1^{i,iter},\ldots,x_d^{i,iter}])x^{i,iter}$ می باشد. همچنین، هر کلاغ دارای حافظه‌ای است که محل پنهان کردن غذا را به ذهن می‌سپارد. در هر مرحله از تکرار، موقعیت مکان پنهان کلاغ به‌صورت $m^{i,iter}$ مشخص می‌گردد. موقعیت مذکور به‌عنوان بهترین موقعیتی می‌باشد که کلاغ جهت پنهان کردن غذا انتخاب کرده است. در ضمن، بهترین مکان پنهان کردن غذا در حافظهٔ کلاغ ذخیره می‌گردد و کلاغ‌ها در محیط جستجو می‌کنند تا بهترین مکان پنهان کردن غذا جهت مواقع نیاز را پیدا نمایند. فرض کنید در هر مرحله، کلاغ j ام می‌خواهد محل پنهان کردن غذای خود $(m^{j,iter})$ را مشاهده کند. در این مرحله، کلاغ i ام تصمیم می‌گیرد که کلاغ j ام را تعقیب نماید تا به محل غذای وی دسترسی پیدا کند. در اینجا، دو حالت رخ می‌دهد (۵):

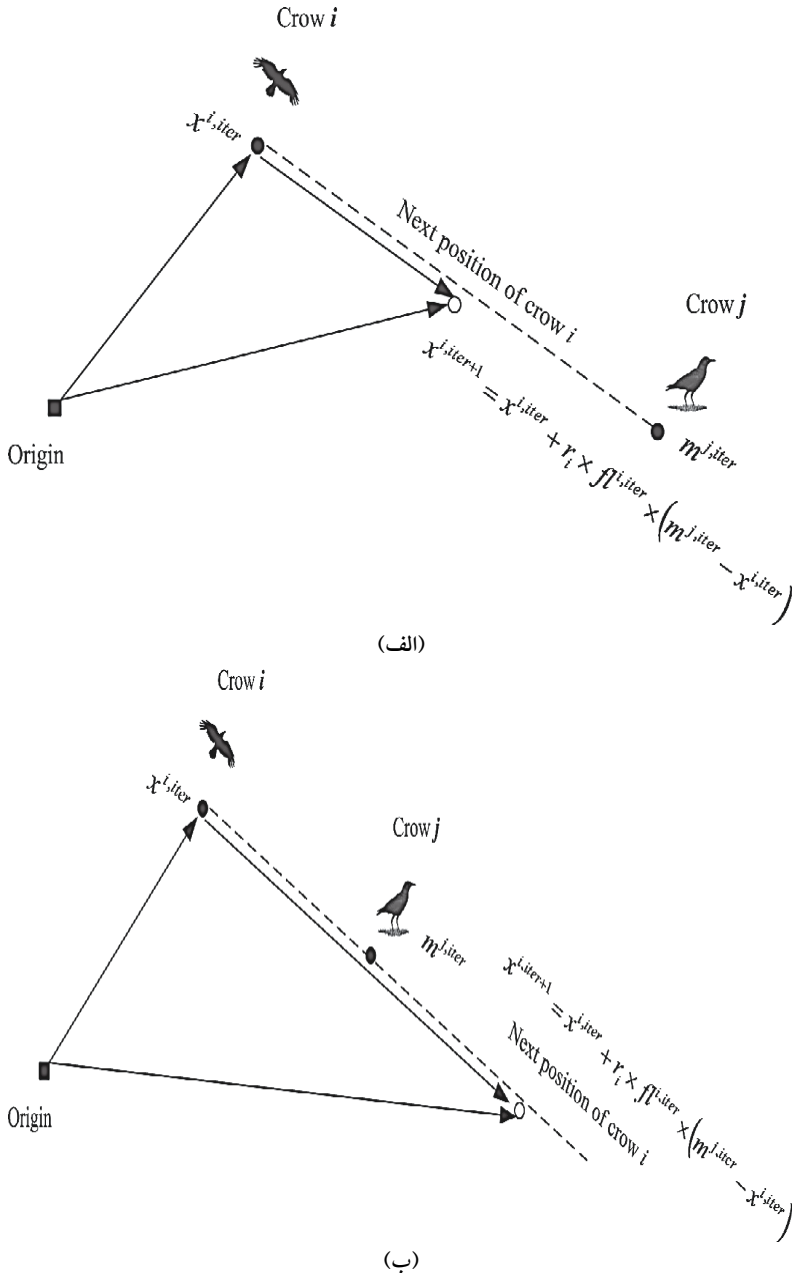
۱- کلاغ j ام نمی‌داند که کلاغ i ام آن را تعقیب می‌نماید و در نتیجه کلاغ i ام به مکان کلاغ j ام دسترسی پیدا می‌کند. بنابراین، موقعیت جدید کلاغ i ام براساس رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$x^{i,iter+1}=x^{i,iter}+r_i\times fl^{i,iter}\times\left(m^{j,iter}-x^{i,iter}\right) \qquad [1]$$

که $0<r_j<1$ و $fl^{i,iter}$ طول پرواز کلاغ i ام می‌باشد. شکل (۳) اثر $fl^{i,iter}$ را بر قابلیت جستجوی الگوریتم نشان می‌دهد.

مقادیر کوچک پارامتر مذکور منجر به جستجوی محلی و مقادیر بزرگ آن منجر به جستجوی بهینه مطلق می‌گردد. شکل (۳) نشان می‌دهد اگر مقدار fl کمتر از یک باشد، موقعیت بعدی کلاغ i ام بین $x^{i,iter}$ و $m^{j,iter}$ در امتداد خط فاصله مشخص می‌گردد. همچنین، چنانچه پارامتر مذکور بزرگ‌تر از یک باشد، آنگاه موقعیت جدید کلاغ ممکن است روی خط فاصله و بعد از $m^{j,iter}$ باشد که در شکل (۳) مشخص گردیده است.

۲- کلاغ j می‌داند که کلاغ i در تعقیبش می‌باشد. در نتیجه، کلاغ j سعی می کند که کلاغ i را فریب دهد و به موقعیت



شکل ۳. الف) پارامتر fl کوچک‌تر از یک و ب) پارامتر fl بزرگ‌تر از یک

دیگری ببرد. بنابراین، حالت‌های ۱ و ۲ با فرمول زیر بیان می‌گردند:

$$x^{i,iter+1} = \begin{bmatrix} x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times \left(m^{j,iter} - x^{i,iter} \right) \leftarrow r_j \geq AP^{i,iter} \\ \text{ranodm}\left(\text{posdition}\right) \leftarrow \text{otherwise} \end{bmatrix} \quad [۲]$$

که r_j یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و ۱ و $AP^{i,iter}$ احتمال آگاهی کلاغ j در هر مرحله از تکرار است.

در الگوریتم مذکور، قابلیت تنوع و تشدید براساس پارامتر AP کنترل می‌گردد. بدین‌صورت که مقادیر کوچک AP، مقدار تشدید و مقادیر بزرگ AP تنوع‌گرایی را افزایش می‌دهد.

مراحل اجرای الگوریتم کلاغ به‌ترتیب زیر است:

۱- در ابتدا، متغیرهای تصمیم و قیود تعریف می‌گردند. تعداد کلاغ‌ها (N)، طول پرواز (fl)، ماکزیمم تکرار و AP مشخص می‌گردند.

۲- در مرحله دوم، حافظه $\left(\text{Memory}=\begin{bmatrix} m_1^1 & \cdots & m_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1^N & \cdots & m_d^N \end{bmatrix}\right)$ و جمعیت $\left(\text{Crows}=\begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & \cdots & x_d^N \end{bmatrix}\right)$ الگوریتم نصب می‌گردد. هر کلاغ به‌عنوان یک پاسخ منطقی و d تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشد.

۳- در مرحلهٔ سوم، ارزیابی تابع هدف انجام می‌پذیرد و مقادیر تابع هدف برای هر کلاغ محاسبه می‌گردد.

۴- حافظه کلاغ‌ها براساس فرمول زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$m^{i,iter+1}=\begin{bmatrix} x^{i,iter+1} \leftarrow f\left(x^{i,iter}\right) \text{is(better) than} \left(f\left(m^{i,iter}\right)\right) \\ m^{i,iter} \leftarrow \text{otherwise} \end{bmatrix} \quad [3]$$

۵- در این مرحله، شرط همگرایی کنترل می‌گردد و در صورتی‌که رضایت‌بخش بود، الگوریتم به اتمام رسیده است.

تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن به شرح زیر است:

$$\min(OF)=\sum_{i=1}^{T}\left(\frac{D_t-R_t}{D_{max}}\right)^2 \quad [4]$$

که OF تابع هدف، D_t حجم آب مورد نیاز در پایین‌دست، T کل بازه بهره‌برداری و D_{max} ماکزیمم حجم آب مورد نیاز در پایین‌دست می‌باشد.

یکی از قیدهای مهم در ارتباط با مسئله بهره‌برداری از مخزن، رابطه پیوستگی است. رابطهٔ پیوستگی براساس معادله زیر است:

$$S_{i,t+1}=S_{i,t}+Q_{i,t}+R_{i,t}-L_{i,t}-sp_{i,t} \quad [5]$$

که $S_{i,t+1}$ حجم ذخیره شده در انتهای دوره، $S_{i,t}$ حجم ذخیره شده در ابتدای دوره، $Q_{i,t}$ حجم جریان ورودی در دوره t (میلیون مترمکعب)، $L_{i,t}$ حجم افت (میلیون مترمکعب) و $sp_{i,t}$ حجم آب سرریز شده (میلیون مترمکعب) است.

قید ذخیره مخزن و رهاسازی آب عبارتند از:

$$S\min_i \le S_{i,t} \le S\max_i \quad [6]$$

$$R\min_i \le R_{i,t} \le R\max_i \quad [7]$$

که $S\min_i$ و $S\max_i$ مقدار ماکزیمم و مینیمم ذخیرهٔ مخزن و $R\min_i$ و $R\max_i$ مینیمم و ماکزیمم رهاسازی می‌باشد.

$$L_{i,t}=A_{i,t}\times E_{i,t} \quad [8]$$

که $A_{i,t}$ سطح مخزن و $E_{i,t}$ متوسط تبخیر از سطح آب مخزن می‌باشد. همچنین، قید مربوط به سرریز از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Sp_{i,t}=\begin{bmatrix} S_{i,t}-S_{maxi} \leftarrow \text{if}\left(S_{i,t+1}\right)>S\max_i \\ 0 \leftarrow \text{else} \end{bmatrix} \quad [9]$$

همچنین، در ارتباط با حجم اولیه و نهایی مخزن روابط زیر نوشته شده:

$$\begin{matrix} S_{i,1}=S(\text{initial})_i \\ S_{i,T+1}=S_{i,1} \end{matrix} \quad [10]$$

که $S(\text{initial})_i$ حجم ذخیره در ابتدای دوره می‌باشد.

در حالتی که قید ذکر شده در بالا رعایت نگردد، تابع پنالتی براساس رابطه زیر اعمال می‌گردد:

$$P1_i=K1\left[S_{i,T+1}-S_{initial}\right]^2+c \quad [11]$$

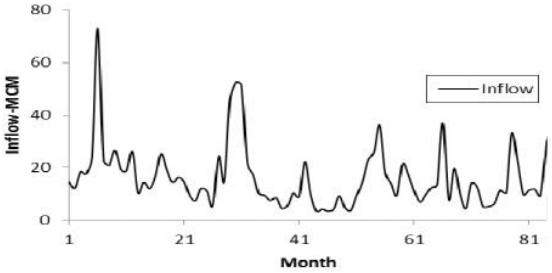
که $P1_i$ تابع پنالتی، K1 ضریب پنالتی و c مقدار ثابت می‌باشد.

برای مقایسه نتایج، علاوه بر الگوریتم کلاغ، از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات نیز استفاده گردید. همچنین، برای ارزیابی الگوریتم‌های تکاملی از شاخص‌های مختلف زیر استفاده گردید:

۱- اعتمادپذیری حجمی: عبارت است از مقدار حجم آب رها شده در کل دوره نسبت به کل مقدار نیاز:

$$\alpha_V=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}Re_{i,t}}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}De_{i,t}}\times 100 \quad [12]$$

که α_V اعتمادپذیری حجمی سیستم، T کل دوره و N تعداد رها سازی یا تقاضا می‌باشد. با افزایش اعتمادپذیری حجمی سیستم، قابلیت اطمینان سیستم بیشتر می‌شود.



شکل ۴. ورودی‌های به مخزن سد شهید رجایی

۲- اعتمادپذیری زمانی: درصد دوره‌هایی است که سیستم به‌طور کامل نیاز موجود را تأمین می‌نماید:

$$\alpha_T = \left(1 - \frac{NDef}{T}\right) \times 100 \qquad [13]$$

که در آن NDef تعداد کل شکست‌های رخ داده است. با افزایش اعتمادپذیری سیستم، عملکرد سیستم مطلوب‌تر است.

۳- آسیب‌پذیری: در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، معمولاً شکست‌های رخ داده در سیستم، مقدار و اهمیت یکسانی ندارند:

$$\lambda = \max_{i=1}^{N}\left(\max_{i=1}^{T}\left(\frac{D_t - R_t}{D_t}\right)\right) \qquad [14]$$

که در آن λ آسیب‌پذیری سیستم می‌باشد و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، آسیب‌پذیری بیشتر است.

۴- شاخص بازگشت‌پذیری: نشان‌دهندهٔ این است که سیستم در مواجهه با شکست با چه سرعتی از آن خارج می‌شود:

$$\gamma_i = \frac{fs_i}{F_i} \qquad [15]$$

که γ_i بازگشت‌پذیری سیستم، fs_i تعداد سری‌های شکست و F_i تعداد دوره‌های شکست ایجاد شده در مخزن می‌باشد. همچنین، برای تصمیم‌گیری در انتخاب بهترین روش، از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌گردد. مدل مذکور بر پایه مجموع باقیمانده وزنی و حاصل‌ضرب وزنی عمل می‌نماید. ابتدا مقادیر شاخص‌های به‌دست‌آمده برای هر الگوریتم نرمال‌سازی می‌گردد. در مرحله بعد، براساس وزن اختصاص داده شده به هر شاخص، مجموع (ϕ_e^1) و حاصل‌ضرب (ϕ_e^2) متغیرهای تصمیم‌گیرنده محاسبه می‌گردد:

$$\phi_e^1 = \sum_{f=1}^{nc} \bar{x}_{ef}\, w_f \qquad [16]$$

$$\phi_e^2 = \prod_{f=1}^{n_c} \left(\bar{x}_{ef}\right)^{wf} \qquad [17]$$

که x_{ef} مقدار هر شاخص در روش f ام، nc تعداد روش‌های مورد ارزیابی و w_f ضابطهٔ وزنی می‌باشد. در پایان:

$$\phi = \lambda\phi_e^1 + (1-\lambda)\phi_e^2 \qquad [18]$$

که مقدار λ از صفر تا ۱ در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۴)، ورودی‌های مخزن را برای ۷ سال (۲۰۱۲-۲۰۰۵) نمایش می‌دهد. طول بازهٔ مطالعاتی در ارتباط با بهره‌برداری از مخزن، هفت‌ساله است.

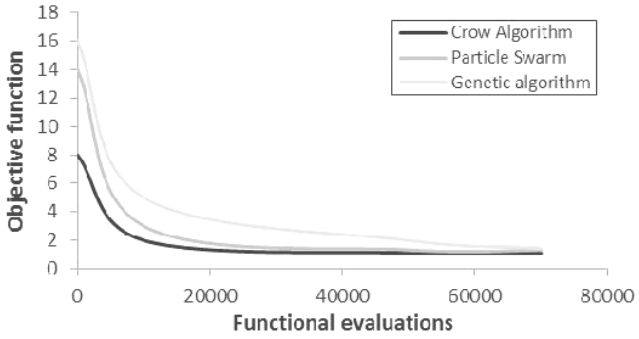
نتایج و بحث

مطابق با آنالیز حساسیت پارامترهای سه الگوریتم، بهترین تعداد جمعیت برای کلاغ ها ۳۰ عدد با تابع هدف ۱/۱۲ و بهترین مقدار پارامترهای fl و AP به‌ترتیب معادل ۲ و ۰/۳ می‌باشد. جدول (۱) مقایسهٔ نتایج الگوریتم های تکاملی مختلف را نشان می دهد. پاسخ بهینهٔ مطلق براساس روش غیرخطی و نرم افزار لینگو نسخه ۸، برابر ۱/۱۱ به‌دست آمده است. میانگین پاسخ‌های به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ الگوریتم جستجوی کلاغ ۹۹٪ پاسخ بهینهٔ مطلق می شود. همچنین، میانگین پاسخ الگوریتم‌های ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۷۵٪ و ۶۱٪ پاسخ بهینهٔ مطلق می‌باشد.

براساس جدول (۱)، ضریب تغییرات پاسخ‌های الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به الگوریتم های ازدحام ذرات و ژنتیک

جدول ۱. مقایسه الگوریتم‌های تکاملی مختلف برای بهره‌برداری از سیستم تک‌مخزنه سد شهید رجایی

گام اجرا در نرم‌افزار	الگوریتم کلاغ	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک
۱	۱/۱۲	۱/۵۶	۱/۹۸
۲	۱/۱۱	۱/۴۶	۱/۸۲
۳	۱/۱۲	۱/۶۶	۱/۷۸
۴	۱/۱۱	۱/۴۶	۱/۸۹
۵	۱/۱۲	۱/۴۶	۱/۷۵
۶	۱/۱۲	۱/۴۶	۱/۷۸
۷	۱/۱۲	۱/۴۶	۱/۷۸
۸	۱/۱۲	۱/۴۶	۱/۷۸
۹	۱/۱۲	۱/۴۶	۱/۷۸
۱۰	۱/۱۲	۱/۴۶	۱/۷۸
میانگین	۱/۱۲	۱/۴۹	۱/۸۱
بدترین جواب	۱/۱۲	۱/۶۶	۱/۹۸
بهترین جواب	۱/۱۱	۱/۴۶	۱/۷۵
ضریب تغییرات	۰/۰۰۴۴	۰/۰۶۱	۰/۰۷۳۱
جواب بهینه مطلق		۱/۱۱	



شکل ۵. نحوه همگرایی پاسخ‌ها

به‌میزان ۱۴ و ۱۶ برابر کوچک‌تر است. این نتایج بیانگر کیفیت بالای جواب‌های الگوریتم جستجوی کلاغ می‌باشد. شکل (۵) نحوه همگرایی جواب ها را نشان می دهد. الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات بهتر عمل نموده است.

جدول (۲) شاخص های مختلف را در دو حالت درصدی و نرمال شده برای سه الگوریتم جستجوی کلاغ، ژنتیک و ازدحام ذرات نشان می دهد. الگوریتم جستجوی کلاغ دارای بیشترین مقدار شاخص اطمینان‌پذیری حجمی، کمترین آسیب‌پذیری و بیشترین مقدار شاخص بازگشت‌پذیری می‌باشد و الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین، الگوریتم ازدحام ذرات دارای بیشترین مقدار شاخص اطمینان‌پذیری زمانی می‌باشد و الگوریتم‌های جستجوی کلاغ و ژنتیک در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول (۳) نتایج مقادیر ϕ^2 و ϕ^1 را برای الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۴)، مقادیر λ را از صفر تا ۱ و مقدار ϕ را به ازای مقادیر مختلف λ نمایش می‌دهد. سپس، رتبهٔ هر الگوریتم اعلام گردیده است. رتبهٔ الگوریتم جستجوی کلاغ در تمامی بازه‌های λ و برای مقادیر ϕ محاسبه شده برابر ۱ می‌باشد و رتبهٔ

جدول ۲. مقایسهٔ شاخص‌های به‌دست آمده به‌وسیلهٔ الگوریتم‌های تکاملی مختلف

الگوریتم	اطمینان‌پذیری حجمی	اطمینان‌پذیری زمانی	آسیب‌پذیری	بازگشت‌پذیری	تابع هدف
		ماتریس تصمیم (٪)			
کلاغ	۹۰	۸۹	۳۲	۴۶	۱/۱۲
ازدحام ذرات	۸۵	۹۱	۳۳	۴۲	۱/۴۹
ژنتیک	۷۸	۷۶	۳۹	۳۸	۱/۸۱
		ماتریس تصمیم نرمال			
کلاغ	۱	۰/۹۷	۱	۱	۱
ازدحام ذرات	۰/۹۴	۱	۰/۹۶	۰/۸۱	۰/۷۵
ژنتیک	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۶۱

جدول ۳. مقادیر ϕ^2 و ϕ^1 برای الگوریتم‌های تکاملی مختلف

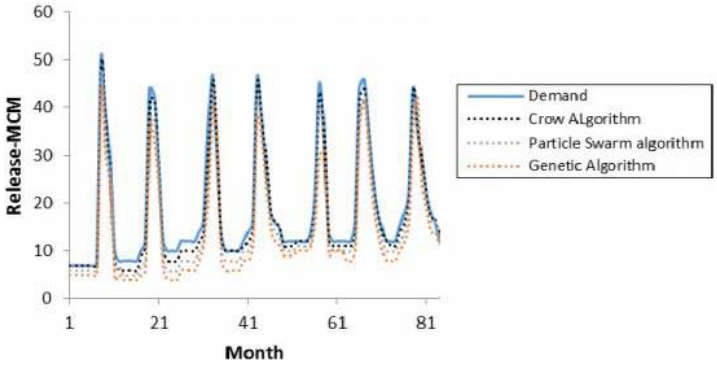
پارامتر	الگوریتم کلاغ	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک
ϕ^1	۰/۹۹۴۰	۰/۹۱۲۰	۰/۷۹۲۰
ϕ^2	۰/۹۹۳۹	۰/۹۰۷۶	۰/۷۸۵۹

جدول ۴. بررسی عملکرد الگوریتم‌های مختلف براساس مقدار λ

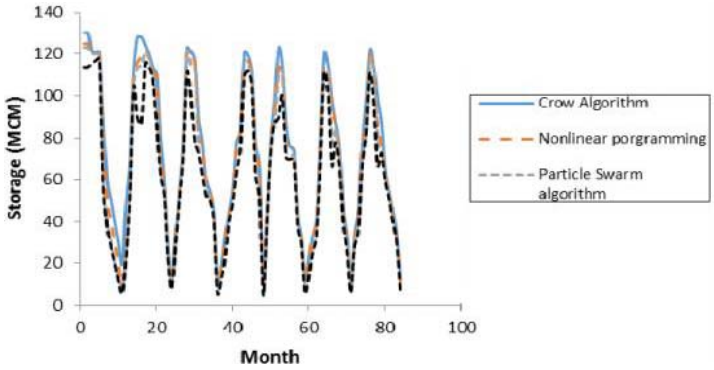
مقدار λ	ϕ_{crow}	$\phi_{particle}$	$\phi_{genetic}$
$\lambda = ۰/۰$	۰/۹۹۳۹۰	۰/۹۰۷۶	۰/۷۸۵۹
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۲$	۰/۹۳۹۲	۰/۹۰۸۴	۰/۷۸۷۱
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۴$	۰/۹۹۳۹۴	۰/۹۰۹۳	۰/۷۸۸۳
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۶$	۰/۹۹۳۹۶	۰/۹۱۰۲	۰/۷۸۹۵
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۸$	۰/۹۹۳۹۸	۰/۹۱۱۱	۰/۷۹۰۷
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۱/۰$	۰/۹۹۴۰	۰/۹۱۲۰	۰/۷۹۲۰
رتبه	۱	۲	۳

می‌باشد و رتبهٔ الگوریتم‌های ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک به‌ترتیب ۲ و ۳ می‌باشد.

در شکل‌های (۶) و (۷)، نحوهٔ رهاسازی آب از مخزن و مقادیر ذخیره در سد شهید رجایی مشاهده می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که مقادیر رهاسازی آب براساس الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارای انطباق بیشتری با مقادیر نیاز است. همچنین، نتایج الگوریتم جستجوی کلاغ در ارتباط با ذخیرهٔ مخزن با روش غیرخطی حاصل از نرم‌افزار لینگو انطباق بیشتری دارد. لازم به یادآوری است که تا جایی که اطلاعات نویسندگان این مقاله نشان می‌دهد و براساس بررسی منابع موجود، تحقیقی در زمینه مدیریت بهره‌برداری از مخازن سدها با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ صورت نگرفته، ولی در زمینه‌های علوم ریاضی، مخابرات و انرژی می‌توان برای نمونه به تحقیقات عسکرزاده (۵)، کائور و گویال (۱۴) و علی و همکاران (۴) اشاره کرد که نتایج خوبی هم از کاربرد الگوریتم جستجوی کلاغ به‌دست آورده‌اند.



شکل ۶. مقایسهٔ مقادیر رهاسازی آب به‌وسیلهٔ الگوریتم‌های تکاملی مورد استفاده



شکل ۷. مقایسهٔ مقادیر ذخیرهٔ مخزن با کاربرد الگوریتم‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، الگوریتم تکاملی جستجوی کلاغ به‌عنوان ابزاری مناسب جهت بهره‌برداری از یک سیستم تک مخزنه استفاده گردید. تابع هدف، تأمین مقادیر نیازهای آب در پایین‌دست سد بود. نتایج الگوریتم جستجوی کلاغ با الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک مقایسه گردید. نتایج بیانگر آن می‌باشد که پاسخ بهینهٔ مطلق مسئله برابر ۱/۱۱ است که الگوریتم جستجوی کلاغ به پاسخ ۱/۱۲ دست یافته و مقدار پاسخ آن ۹۹٪ پاسخ بهینهٔ مطلق می‌باشد. علاوه بر آن، ضریب تغییرات پاسخ الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات به‌میزان ۱۶ و ۱۴ برابر کوچک‌تر است. همچنین، از شاخص‌های اعتمادپذیری حجمی، اعتمادپذیری زمانی، آسیب‌پذیری و بازگشت‌پذیری برای ارزیابی این سه الگوریتم استفاده گردید. نتایج نشان داد که الگوریتم جستجوی کلاغ دارای عملکرد مطلوبی در ارتباط با تمامی شاخص‌ها، به‌جز شاخص اعتمادپذیری زمانی، است و در این شاخص، الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم جستجوی کلاغ بهتر عمل نمود. بنابراین، برای انتخاب روش برتر براساس شاخص‌های مختلف، از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده گردید. مدل مذکور مشخص نمود که الگوریتم جستجوی کلاغ با داشتن رتبهٔ ۱ در بین سایر الگوریتم‌ها دارای شرایط بهتری جهت شبیه‌سازی و تأمین نیازهای آبی پایین‌دست مخزن سد می‌باشد. در ادامه پژوهش حاضر، آزمودن الگوریتم کلاغ برای سیستم‌های پیچیده‌تر با توابع هدف و قیود غیر خطی پیشنهاد می‌گردد.

منابع مورد استفاده

1. Afshar, M. H. 2013. A cellular automata approach for the hydro-power operation of multi-reservoir systems. J. Proc. ICE-Water Manage. 166(9): 465-478.
2. Ahmed, J. A. and A. K. Sarma. 2005. Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. Water Resour. Manage. 19(2): 145-161.
3. Ai, X., Z. Dong and M. Mo. 2017. A method for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands. In 19th EGU General Assembly, EGU2017, conference proceedings, 23-28 April, 2017, Vienna, Austria, p. 4238.
4. Ali, I., Pamir, M. Sufyan Khan, H. Abubakar Sadiq, S. H. Faraz and N. Javaid. 2017. Home energy management based on harmony search algorithm and crow search algorithm. *In:* Proceeding of the International Conference on Network-Based Information Systems, NBiS 2017, Ryerson University, Canada, PP. 218-230.
5. Askarzadeh, A. 2016. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. Comput. Struct. 169: 1-12.
6. Bozorg-Haddad, O., M. Moravej and H. Loáiciga. 2014a. Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems. J. Irrig. Drain. Eng. 141(5): 570-584.
7. Bozorg-Haddad, O., I. Karimirad, S. Seifollahi-Aghmiuni and H. Loáiciga. 2014b. Development and application of the bat algorithm for optimizing the operation of reservoir systems. J. Water Resour. Plann. Manage. 142(1): 66-80.
8. Bozorg-Haddad, O., S. M. Hosseini-Moghari and H. Loáiciga. 2015. Biogeography-based optimization algorithm for optimal operation of reservoir systems. J. Water Resour. Plann. Manage. 142(1): 04015034.
9. Cai, X., D. McKinney and L. Lasdon. 2001. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. Adv. Water Resour. 24(6): 667-676.
10. Chen, L. 2003. Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation. J. Am. Water Resour. Assoc. 39(5): 1157-1165.
11. Cheng, C. T., W. C. Wang, D. Xu and K. W. Chau. 2007. Optimizing hydropower reservoir operation using hybrid genetic algorithm and chaos. Water Resour. Manage. 22(7): 895-909.
12. Chitsaz, N., and M. E. Banihabib. 2015. Comparison of different multi criteria decision-making models in prioritizing flood management alternatives. Water Resour. Manage. 29(8): 2503-2525.
13. Fallah-Mehdipour, E., O. Bozorg-Haddad and M. A. Marino. 2011. MOPSO algorithm and its application in multi-purpose multi-reservoir operation. J. Hydroinform. 13(4): 794-811.
14. Kaur, J. and S. Goyal. 2017. Optimal side lobes reduction of linear array antenna using crow search algorithm. Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. 5: 388-397.
15. Li, Y., Q. Cui, C. Li, X. Wang, Y. Cai, G. Cui and Z. Yang. 2017. An improved multi-objective optimization model for supporting reservoir operation of China's South-to-North Water Diversion Project. Sci. Total Environ. 575: 970-981.
16. Mathur, Y. and S. Nikam. 2009. Optimal reservoir operation policies using genetic algorithm. Int. J. Eng. Technol. 1(2): 184-187.
17. Ming, B., P. Liu, T. Bai, R. Tang and M. Feng. 2017. Improving optimization efficiency for reservoir operation using a search space reduction method. Water Resour. Manage. 31(4): 1173-1190.
18. Momtahen, S. and A. B. Dariane. 2007. Direct search approach using genetic algorithm for optimization of water reservoir operating policies. J. Water Resour. Plann. Manage. 3(202): 202-209.
19. Nicklow, J. 2010. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. J. Water Resour. Plann. Manage. 34(6): 412-432.

J. Water and Soil Sci. (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)
Vol. 22, No. 1, Spiring 2018, Isf. Univ. Technol., Isf., Iran.

Optimizing Reservoirs Exploitation with A New Crow Search Algorithm Based on a Multi-Criteria Decision-Making Model

H. R. Vaziri[1], H. Karami[1], S. F. Mousavi[1*] and O. Hadiani[2]

(Received: Aug. 3-2016; Accepted: Sept. 16-2017)

Abstract

Exploitation of dam reservoirs is one of the major problems in the management of water resources. In this research, Crow Search Algorithm (CSA) was used for the first time to manage the operation of reservoirs. Also, the results related to the exploitation of the single-reservoir system of Shahid-Rajaei dam, located in Mazandaran province, northern Iran, which meets the downstream water demands, were compared to those obtained by applying the Particle Swarm and Genetic algorithms. Time reliability, volume reliability, vulnerability and reversibility indices, and a multi-criteria decision-making model were used to select the best algorithm. The results showed that the CSA obtained results close to the problem's absolute optimal response, such that the average responses in the Crow, Particle Swarm and Genetic Algorithms were 99, 75 and 61 percent of the absolute optimal response, respectively. Besides, except for the time reliability index, the CSA had a better performance in the rest of the indices, as compared to Particle Swarm and Genetic Algorithms. The coefficient of variation of the obtained responses by CSA was 14 and 16 times smaller than the Genetic and Particle Swarm Algorithms, respectively. The multi-criteria decision-making model revealed that the CSA was ranked first, as compared to the other two algorithms, in the Shahid-Rajaei Reservoir's operation problem.

Keywords: Evolutionary algorithms, Water resources management, Genetic Algorithm, Particle Swarm Algorithm.

1. Faculty of Civil Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.
2. College of Eng., Islamic Azad Univ., Ghaemshahr branch, Ghaemshahr, Iran.
*: Corresponding Author, Email: fmousavi@semnan.ac.ir