

## بررسی عملکرد چند الگوریتم هوشمند در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن

سعید اکبری فرد<sup>1\*</sup>، کورش قادری<sup>2</sup>، بهرام بختیاری<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1395/3/22 تاریخ پذیرش: 1395/10/4

### چکیده

یکی از راهکارهای مقابله با مسائل و مشکلات مدیریت منابع آب و عدم توزیع زمانی و مکانی متناسب آن، بهره‌برداری بهینه از مخازن است. در این پژوهش از الگوریتم فراابتکاری چرخه آب (WCA) برای بهره‌برداری بهینه از سیستم دو مخزنه، چندمنظوره سدهای گلستان و وشمگیر واقع در حوضه آبریز گرگان‌رود (شمال ایران)، برای یک دوره پنج ساله (از سال آبی 86-87 تا 90-91) استفاده شد. پس از اطمینان از درستی عملکرد الگوریتم WCA با استفاده از چندین تابع محک استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه سیستم مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود توسعه داده شد. تابع هدف در سیستم مورد مطالعه به صورت کمینه‌سازی کل کمبود در طول دوره آماری تعریف شد. برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، از شاخص‌های عملکرد قابلیت اعتماد زمانی، حجمی و آسیب‌پذیری استفاده شد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج روش‌های شناخته شده الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) و الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مقایسه شد. الگوریتم‌های WCA، HS و ICA به ترتیب قادر به تامین 97/73، 85/57 و 93/17 درصد از نیازهای پایین دست سد گلستان و همچنین 97/06، 86/88 و 93/44 درصد از نیازهای سد وشمگیر بودند. قابلیت اعتماد زمانی ( $\alpha=0/9$ ) برای الگوریتم‌های WCA، HS و ICA به ترتیب برابر 95، 25 و 50 درصد برای سد گلستان و 91/67، 38/33 و 65 درصد برای سد وشمگیر به دست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم جستجوی هارمونی، الگوریتم چرخه آب، الگوریتم رقابت استعماری، بهره‌برداری از مخزن، سد گلستان، وشمگیر

### مقدمه

برای تعریف سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. اکثر روش‌های بهینه‌سازی از تکنیک‌های ریاضی برای پیدا کردن بهترین پاسخ‌های امکان‌پذیر بر اساس عملکرد تابع هدف و قیود بهره می‌گیرند. انتخاب روش بهینه‌سازی به خصوصیات سیستم در نظر گرفته شده، در دسترس بودن داده‌ها، نوع تابع هدف، قیود و متغیرها بستگی دارد (Labadie., 2004). در چند دهه اخیر روش‌های متعدد بهینه‌سازی توسط محققان مختلف در سراسر دنیا توسعه یافته است. ایسات و هال عملکرد الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی پویا (DP) را در یک سیستم چهار مخزنی مقایسه نموده و نشان دادند که GA پتانسیل مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب دارد (Esat and

Hall., 1994). اولیویرا و لاکس، واردلو و شریف، چانگ و همکاران نیز از الگوریتم ژنتیک برای استخراج منحنی فرمان در سیستم‌های چند مخزنه استفاده نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک بوده است (Oliveira and Loucks., 1997, Wardlaw and Sharif., 1999, Chang et al., 2005). کومار و ردی برای استخراج سیاست بهره‌برداری برای یک مخزن چند منظوره از الگوریتم مورچگان (ACO) استفاده کردند. نتایج، عملکرد مناسب الگوریتم ACO را نشان می‌دهد (Kumar and Reddy., 2006). ردی و کومار با استفاده از الگوریتم گروه ذرات (PSO) مسئله بهره‌برداری مخزن با اهداف کشاورزی و تولید انرژی برق‌آبی را مورد بررسی قرار داده‌اند (Reddy and Kumar., 2007). بالترو و فونتنتن از الگوریتم چندهدفه گروه ذرات (MOPSO) برای بهره‌برداری کیفی از مخزن سد با سه تابع هدف استفاده نمودند (Baltar and Fontane., 2008). افشار و متاعی با استفاده از الگوریتم انفجار بزرگ - انهدام بزرگ (BB-BC) به بهره‌برداری بهینه از مخزن دز در ایران پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کارایی و قدرت بالای الگوریتم مورد بررسی در حل مسئله بهره-

1- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
3- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
\* - نویسنده مسئول: (Email: Akbarifard\_saeid@yahoo.com)

زیست محیطی از این الگوریتم استفاده کردند (Baghipour et al., 2014). بزرگ حداد و همکاران با استفاده از الگوریتم چرخه آب به بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن کارون 4 و یک سیستم چهار مخزنه در ایران پرداختند. نتایج نشان‌دهنده همگرایی و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم می‌باشد (Bozorg Haddad et al., 2014).

در پژوهش حاضر کاربرد الگوریتم چرخه آب (WCA)، به عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری جدید، در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن سد‌های گلستان و وشمگیر، مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد الگوریتم توسعه داده شده نتایج حاصل از اجرای آن با روش‌های فراابتکاری دیگر مانند HS و ICA مورد مقایسه قرار گرفته است. کدنویسی الگوریتم‌های مورد بررسی در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R2014a) انجام شد. هم‌چنین برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل قابلیت اعتماد زمانی و حجمی و آسیب‌پذیری استفاده گردیده است.

## مواد و روش‌ها

حوضه آبریز گرگان‌رود از شریان‌های اصلی شمال کشور و استان گلستان می‌باشد که در شرق از کوه‌های واقع در استان خراسان شمالی آغاز شده و در غرب در مجاورت حوضه آبریز رودخانه قره‌سو به دریای خزر ختم می‌شود. طول رودخانه اصلی گرگان‌رود از ابتدای تشکیل تا محل اتصال به دریا 359/4 کیلومتر و پهنا حوضه از طول جغرافیایی 54 درجه تا 56 درجه و 29 دقیقه شرقی و از عرض جغرافیایی 36 درجه و 36 دقیقه تا 37 درجه و 47 دقیقه شمالی گسترده شده است. شکل 1 موقعیت جغرافیایی سد‌های گلستان و وشمگیر را روی رودخانه گرگان‌رود نشان می‌دهد.



شکل 1- نقشه موقعیت سد‌های وشمگیر و گلستان در حوضه گرگان‌رود

برداری از مخزن نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی بوده است (Afshar and Motaei., 2011). پرادهان و تری پاتی به بهره‌برداری بهینه چند منظوره از مخزن هیدراکود با استفاده از GA پرداختند. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک با سیاست فعلی بیانگر توانایی و تاثیر GA می‌باشد (Pradhan and Tripathy., 2013). فلاح مهدی‌پور و همکاران یک قاعده بهره‌برداری موثرتر نسبت به الگوریتم ژنتیک (GA) در سیستم سد - آبخوان بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) توسعه دادند. نتایج نشان داد که مقدار تابع هدف به دست آمده 26 درصد بهتر نسبت به قاعده الگوریتم ژنتیک معمولی (GA) بوده است (Fallah-Mehdipour et al., 2013). سونالیا و سوریانارایانا با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهره‌برداری بهینه از مخزن یوکای (Ukai) در هند پرداختند. نتایج نشان داد که GA می‌تواند به طور کامل نیازهای پایین دست آبیاری را تامین نماید و رهاسازی را به حداقل برساند (Sonalija and Suryanarayana., 2014). آجیبولا و آدیوملا و آدیوملا مروری کلی بر مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش فراابتکاری مبتنی بر جمعیت انجام دادند (Ajibola and Adewumi., 2014).

جنت رستمی و همکاران (1389) به مقایسه الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) با برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم ژنتیک برای بهره‌برداری بهینه از سد مخزنی دز پرداختند. مفتاح هلقی و همکاران (1390) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی مقدار کمبود حجم بهینه مخزن سد وشمگیر را در سیستم بهره‌برداری دو سدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در شرایط فعلی نیاز به افزایش حجم سد وشمگیر نمی‌باشد ولی در شرایط آبی افزایش ظرفیت حجم سد وشمگیر تا حدود 9 میلیون متر مکعب ضروری است. عراقی نژاد و همکاران (1392) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کارون 4 با هدف کمینه کردن آسیب‌پذیری برق‌آبی از الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک استفاده کردند. نتایج حاصل از دو الگوریتم نشان دهنده قدرت بالاتر الگوریتم ICA در رسیدن به جواب بهینه بود. قادری و همکاران (1393) از الگوریتم تکاملی رقابتی جوامع (SCE) و الگوریتم ژنتیک (GA) در بهره‌برداری بهینه از سیستم سه مخزنی حوضه کرخه استفاده نمودند.

الگوریتم چرخه آب (WCA) یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که توسط اسکندر و همکاران در سال 2012، بر پایه چرخه آب یا چرخه هیدرولوژیکی در طبیعت ارائه شد. مفاهیم بنیادی این روش بر اساس مشاهدات از فرآیند چرخه آب و جریان رودخانه‌ها و نهرها به دریا در جهان واقعی می‌باشد (Eskandar et al., 2012). کاربردهای بسیار کمی از این الگوریتم و به ویژه در زمینه مهندسی منابع آب گزارش شده است. اسکندر و همکاران (Eskandar et al., 2013) از الگوریتم چرخه آب در بهینه‌سازی وزن سازه خرپا و باقی پور و همکاران برای تخصیص بهینه در مسائل

می‌آید.

$$C_i = Cost_i = f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{Nvar}^i), i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (3)$$

که،  $C_i$  مقدار هدف هر قطره می‌باشد. در گام اول، به تعداد  $N_{pop}$  قطره باران ایجاد و سپس به تعداد  $N_{SR}$  از بهترین قطرات (حداقل ارزش) به عنوان دریا و رودخانه انتخاب می‌شوند. قطره باران با کم-ترین مقدار به عنوان دریا در نظر گرفته می‌شود.  $N_{SR}$  مجموع تعداد رودخانه‌ها (که یک پارامتر کاربردی است) و یک دریا (رابطه 4) می‌باشد. بقیه جمعیت (نهرهایی که ممکن است به رودخانه‌ها و یا به طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند) با استفاده از رابطه 5 محاسبه می‌شود.

$$N_{SR} = \text{Number of Rivers} + \frac{sea}{1} \quad (4)$$

$$N_{Raindrops} = N_{pop} - N_{SR} \quad (5)$$

به منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودخانه‌ها و دریا، بسته به شدت جریان از رابطه 6 استفاده می‌شود.

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left[ \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} Cost_i} \right] \times N_{Raindrops} \right\}, n = 1, 2, \dots, N_{SR} \quad (6)$$

که،  $N_{SR}$  تعدادی از نهرها است که به رودخانه‌های خاص و یا دریا جریان می‌یابد. یک نهر جریان تا رسیدن به رودخانه در امتداد خط اتصال بین آن‌ها با استفاده از یک فاصله که به طور تصادفی انتخاب شده، جریان می‌یابد که این فاصله با توجه به رابطه 7 مشخص می‌شود.

$$X \in (0, C \times d), \quad C > 1 \quad (7)$$

که،  $C$  مقداری بین یک و دو (نزدیک به دو) دارد و بهترین مقدار برای  $C$  برابر با دو در نظر گرفته می‌شود (Eskandar et al., 2012).  $d$  فاصله فعلی بین نهر و رودخانه می‌باشد. مقدار  $X$  در رابطه 7 یک عدد تصادفی توزیع شده (یکنواخت و یا هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و  $(C \times d)$  می‌باشد. موقعیت جدید نهرها و رودخانه‌ها را می‌توان با روابط 8 و 9 محاسبه نمود.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (8)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (9)$$

که،  $rand$  یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع شده بین صفر و یک است. اگر راه حل ارائه شده توسط یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر عوض می‌شود. این تبادل نیز می‌تواند به همین شکل برای رودخانه‌ها و دریا اتفاق افتد. یکی از مهم‌ترین عواملی که از همگرایی سریع الگوریتم و به دام افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند تبخیر است. فرایند تبخیر باعث می‌شود که آب دریا با تبخیر به صورت جریان رودخانه‌ها و یا نهرها دوباره به دریا بریزد. شبه کد (10) چگونگی تعیین این که آیا رودخانه به دریا می‌ریزد یا نه را نشان می‌دهد.

سد وشمگیر، قدیمی‌ترین سد استان گلستان بوده که در سال 1349 با هدف توسعه و بهبود اراضی کشاورزی حاشیه گرگان‌رود و پایین‌دست، کنترل و مهار سیلاب منطقه و زهکشی اراضی به بهره‌برداری رسیده است. ظرفیت ذخیره این سد 47 و قابلیت تنظیم سالیانه آن (MCM) 117 است. سد مخزنی گلستان در بالادست سد وشمگیر و در محدوده دشت گرگان در فاصله 15 کیلومتری شمال-شرقی گنبد کاووس واقع شده است. مخزن سد در ابتدای ساخت حدود (MCM) 86 ظرفیت ذخیره داشته و حجم مخزن به هنگام سیلاب برابر (MCM) 135 طراحی شده است. به دلیل حجم رسوبات وارده به سد طی سال‌های اخیر به ویژه در سیل سال 1380، ظرفیت ذخیره سد به (MCM) 62 کاهش یافته و قابلیت تنظیم سالیانه آن (MCM) 115 است. نیازهای پایین‌دست سد گلستان شامل کشاورزی، صنعت، رهاسازی برای سد وشمگیر و زیست محیطی و نیازهای پایین‌دست سد وشمگیر شامل کشاورزی، آبی‌پروری مخزن، آبی‌پروری شبکه، زیست محیطی و سایر نیازها می‌باشد.

### الگوریتم چرخه آب (WCA)

مشابه دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، روش WCA نیز با جمعیت اولیه به اصطلاح قطرات باران شروع می‌شود. در ابتدا، فرض می‌شود که باران یا بارش وجود دارد. بهترین فرد (بهترین قطره آب) به عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن، تعدادی از قطرات باران خوب به عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران به عنوان نهرها در نظر گرفته می‌شوند که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان پیدا می‌کنند. در روش WCA به یک راه‌حل واحد «قطره باران» اطلاق می‌شود. در روش‌های HS و ICA اصطلاحاً چین آرایه‌ای به ترتیب «هارمونی» و «کشور» نامیده می‌شوند. در یک مسئله بهینه‌سازی چند بعدی، یک قطره باران، آرایه‌ای به شکل  $1 \times N_{var}$  است. این آرایه به صورت رابطه 1 تعریف می‌شود.

$$Raindrop = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{Nvar}] \quad (1)$$

که،  $X_1$  تا  $X_{Nvar}$  بیانگر متغیرهای تصمیم می‌باشند. برای شروع، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه  $N_{pop} \times N_{var}$  به طور تصادفی ایجاد می‌گردد (رابطه 2).

$$\text{Population of raindrops} = \begin{bmatrix} Raindrop_1 \\ Raindrop_2 \\ \vdots \\ Raindrop_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 X_2^1 X_3^1 & \dots & X_{Nvar}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} X_2^{N_{pop}} X_3^{N_{pop}} & \dots & X_{Nvar}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که،  $N_{pop}$  و  $N_{var}$  به ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی می‌باشند. مقادیر تابع هدف که در مسائل کمینه‌سازی عنوان تابع هزینه (C) بیان می‌شود از رابطه 3 به دست

از استعمارگر برسند (هزینه کم‌تر نسبت به استعمارگر). در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با یکدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه می‌یابد و این بار این کشور استعمارگر جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند. در هر تکرار الگوریتم، ضعیف‌ترین استعمارگر، یک یا چند تا از ضعیف‌ترین مستعمرات خود را از دست داده و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان سایر استعمارگرها ایجاد می‌شود. پس از مدتی، همه استعمارگرها سقوط کرده و تنها یک استعمارگر وجود خواهد داشت و بقیه کشورها تحت کنترل این استعمارگر واحد قرار می‌گیرند. در چنین موقعیتی رقابت استعماری به پایان می‌رسد (Atashpaz-Gargari and Lucas., 2007).

**الگوریتم جستجوی هارمونی (HS):** این الگوریتم بر اساس اصول و رفتار موسیقی‌دانان می‌باشد که برای ساخت یک قطعه موسیقی با هم همکاری کرده و سعی می‌کنند از میان نت‌های مختلف، گزینه‌های مناسب‌تر را انتخاب کنند تا در نهایت بهترین قطعه موسیقی ایجاد گردد. بدین ترتیب می‌توان ابزارها و آلات موسیقی را با متغیرهای تصمیم در مسئله بهینه‌سازی، متناظر دانست. در موسیقی، به منظور دستیابی به بهترین اجرا، هر تمرین با تمرین قبل مورد مقایسه قرار می‌گیرد و در هر تکرار قطعه موسیقی جدید به حافظه سپرده می‌شود. اگر قطعه موسیقی جدید تولید شده بهتر از بدترین قطعه موسیقی موجود در حافظه باشد، جایگزین آن در حافظه می‌شود و به این ترتیب قطعه موسیقی بدتر از حافظه خارج می‌شود. اما اگر قطعه موسیقی جدید بهتر از بدترین قطعه موسیقی موجود در حافظه باشد در این صورت بدون هیچ جایگزینی الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا بهترین قطعه موسیقی حاصل گردد (Geem., 2000).

### مدل ریاضی بهره‌برداری

شماتیک مدل ساخته شده برای سیستم دو مخزنی (گلستان و وشمگیر) در شکل 2 آورده شده است. متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، مقادیر خروجی بهینه ماهانه از مخازن سدها می‌باشند. افق برنامه‌ریزی در این پژوهش 60 ماه (دوره 91-86) در نظر گرفته شده، بنابراین الگوریتم WCA در سیستم دو مخزنه دارای 120 متغیر می‌باشد. قیود ذکر شده برای هر دو مخزن یکسان می‌باشد. معیار سنجش پاسخ‌ها مقایسه آن‌ها با نیاز پایین دست و بهترین مقدار برای ذخیره در ماه‌های مختلف سال است.

$$\text{if } |X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}, i = 1, 2, 3, \dots, N_{SR} - 1 \quad (10)$$

پایان → فرایند بارش و تبخیر →

که،  $d_{max}$  عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است. بنابراین، اگر فاصله بین رودخانه و دریا کم‌تر از  $d_{max}$  باشد، یعنی رودخانه به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرآیند تبخیر اثر می‌کند و پس از تبخیر کافی، بارش شروع خواهد شد.  $d_{max}$  شدت جستجو در نزدیکی دریا (راه حل بهینه) را کنترل می‌کند. مقدار  $d_{max}$  به صورت رابطه 11 در هر مرحله کاهش می‌یابد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{\text{max iteration}} \quad (11)$$

پس از برآورده شدن تبخیر، بارندگی اعمال می‌شود. در فرایند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان‌های مختلف تشکیل می‌دهند (شبیه به عمل گر جهش در GA). رابطه 12 مکان جدید نهرهای تازه شکل گرفته را نشان می‌دهد.

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (12)$$

که، LB و UB به ترتیب، کران پایین و بالای تعریف شده توسط مسئله است. بهترین قطرات باران جدید تشکیل شده به عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران به عنوان نهرهای جدید که به سمت رودخانه‌ها در جریان‌اند در نظر گرفته می‌شوند. به منظور افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید از رابطه 13 استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = X_{Sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \quad (13)$$

که،  $\mu$  ضریبی است که محدوده جستجوی در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد.  $randn$  عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقادیر بزرگ  $\mu$  امکان خروج از منطقه امکان‌پذیر را افزایش می‌دهد و مقادیر کوچک  $\mu$  منجر به جستجوی الگوریتم در منطقه کوچک‌تر در نزدیکی دریا می‌شود. مقدار مناسب  $\mu$ ، 0/1 تعیین شده است (Eskandar et al., 2012). معیار همگرایی در این پژوهش رسیدن به حداکثر تعداد تکرار برابر 1000 در نظر گرفته شده است.

### سایر الگوریتم‌های مورد استفاده

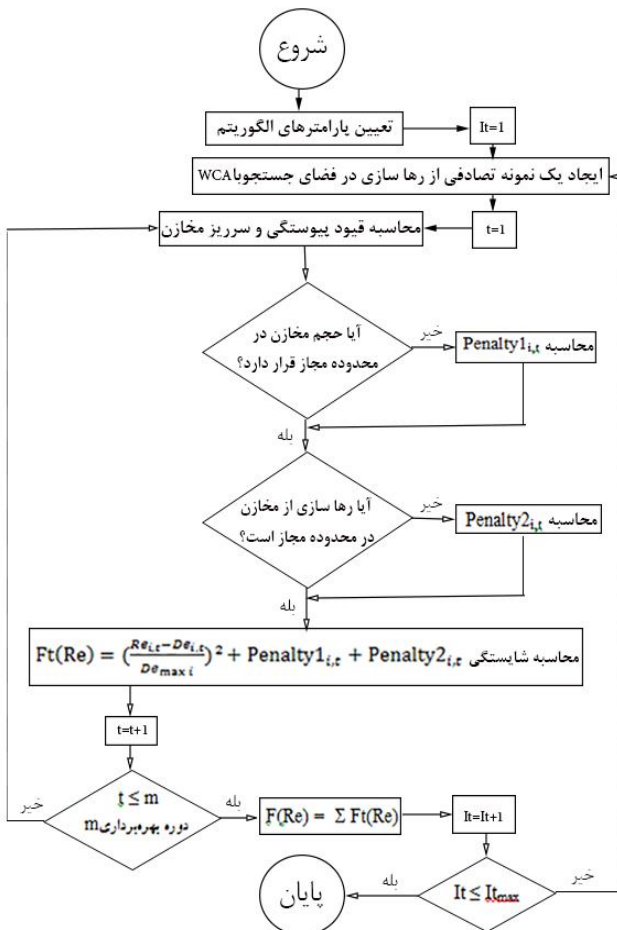
برای ارزیابی توانایی الگوریتم WCA، نتایج آن با نتایج الگوریتم‌هایی که در ادامه ذکر می‌گردند مقایسه گردید.

**الگوریتم رقابت استعماری (ICA):** این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک کشور نامیده می‌شوند، شروع و تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (کشورهای دارای کم‌ترین مقدار تابع هزینه) به عنوان استعمارگر و باقیمانده جمعیت نیز مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک استعمارگر تعلق دارند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند. در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر

ماه  $t$ ،  $R_{i,t}$  ارتفاع بارش مخزن سد نام در ماه  $t$  و  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب رابطه حجم-سطح مخزن سد نام می‌باشند.

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + Q_{1,t} - Re_{1,t} - Loss_{1,t} - Sp_{1,t} \quad (18)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + Q_{2,t} + Sp_{1,t} + (Re_{1,t} - De_{1,t}) - Re_{2,t} - Loss_{2,t} - Sp_{2,t} \quad (19)$$



شکل 3 - فلوچارت الگوریتم WCA در بهره‌برداری از سیستم مخازن

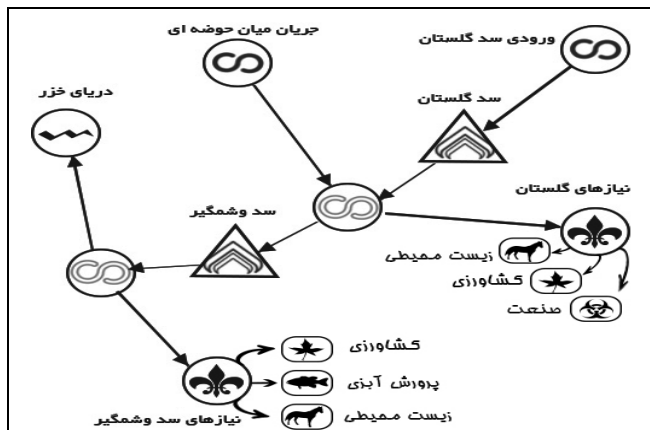
که،  $S_{i,t+1}$  حجم مخزن سد نام در انتهای دوره  $t$  و  $Q_{i,t}$  حجم آب ورودی به مخزن سد نام در ماه  $t$  می‌باشند.

$$S_{min i} \leq S_{i,t} \leq S_{max i} \quad (20)$$

$$Re_{min i,t} \leq Re_{i,t} \leq Re_{max i,t} \quad (21)$$

که،  $Re_{min i,t}$  حداقل رها سازی سد نام در ماه  $t$  و  $Re_{max i,t}$  حداکثر رها سازی سد نام در ماه  $t$  می‌باشند. به منظور اعمال قیود 20 و 21 در مدل از توابع جریمه 23 استفاده شده است.

$$Penalty1_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left( \frac{S_{i,t} - S_{min i}}{S_{min i}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} < S_{min i} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left( \frac{S_{i,t} - S_{max i}}{S_{max i}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} > S_{max i} \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \geq S_{min i} \text{ and } S_{i,t} \leq S_{max i} \end{cases} \quad (22)$$



شکل 2- شماتیک مدل ساخته شده برای سیستم دو مخزنه گلستان و وشمگیر

رها سازی از مخازن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت می‌باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم آورد رودخانه، ارتفاع تباخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به صورت ماهانه می‌باشد. تابع هدف مسئله رها سازی در این پژوهش به صورت کمینه سازی کل کمبود (کشاورزی، زیست محیطی و صنعت) در طول دوره آماری تعریف گردید. تابع هدف سیستم دو مخزنه مورد بررسی به صورت رابطه 14 می‌باشد.

$$\text{Minimize } F(Re) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left( \frac{Re_{i,t} - De_{i,t}}{De_{max i}} \right)^2 + Penalty1_{i,t} + Penalty2_{i,t} \quad (14)$$

که،  $F(Re)$  مقدار تابع هدف (کمبود)،  $Re_{i,t}$  حجم رها سازی از مخزن سد نام در ماه  $t$  مقدار نیاز سد نام در ماه  $t$   $De_{i,t}$  بیشینه نیاز سد نام در طول دوره بهره‌برداری،  $De_{max i}$  بهره‌برداری،  $i$  تعداد مخازن،  $Penalty1_{i,t}$  مقدار جریمه مربوط به حجم مخزن در سد نام در ماه  $t$  و  $Penalty2_{i,t}$  مقدار جریمه مربوط به حجم رها سازی از مخزن سد نام در ماه  $t$  می‌باشند. محدودیت‌های سیستم دو مخزنه مورد مطالعه در معادلات 15 تا 23 آورده شده است. محدودیت مربوط به حجم سرریز به صورت رابطه 15 تا 17 اعمال می‌شود.

$$Sp_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} - S_{max i} + S_{min i} & \text{if } S_{i,t} > (S_{max i} - S_{min i}) \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \leq (S_{max i} - S_{min i}) \end{cases} \quad (15)$$

$$Loss_{i,t} = A_{i,t} \times (Ev_{i,t} - R_{i,t}) \quad (16)$$

$$A_{i,t} = a + b \times S_{i,t} + c \times S_{i,t}^2 \quad (17)$$

که،  $Sp_{i,t}$  مقدار آب سرریز شده از مخزن سد نام در ماه  $t$   $S_{i,t}$  حجم مخزن سد نام در ابتدای دوره  $t$  و  $S_{max i}$  حداکثر حجم مخزن سد نام در رقوم حداکثر،  $S_{min i}$  حداقل حجم مخزن سد نام،  $Loss_{i,t}$  میزان تلفات مخزن سد نام در ماه  $t$   $Ev_{i,t}$  ارتفاع تباخیر از دریاچه پشت سد نام در

ICA با اندازه جمعیت 300 مناسب‌ترین مقدار تابع هدف در مسئله بهره‌برداری از مخزن را ارائه کرده‌اند. این در حالی است که الگوریتم WCA با تغییر اندازه جمعیت نوسان کم‌تری در تابع هدف داشته است که نشان می‌دهد این الگوریتم حساسیت کم‌تری نسبت به اندازه جمعیت دارد و با اندازه جمعیت کم که منجر به افزایش سرعت اجرای برنامه می‌شود ما را به بهینه‌سازی سراسری نزدیک می‌کند. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی، اندازه جمعیت برای هر الگوریتم بهترین مقدار به دست آمده از شکل 4 و تعداد تکرارها برابر 1000 در نظر گرفته شده است. بهترین مقادیر پارامترهای اولیه الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر که با تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها بدست آمد، در جداول 1 تا 3 نشان داده شده است.

### شاخص‌های عملکرد مخزن

ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری، آخرین و مهم‌ترین گام در استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی جهت بهره‌برداری از مخازن است.

### قابلیت اعتمادپذیری

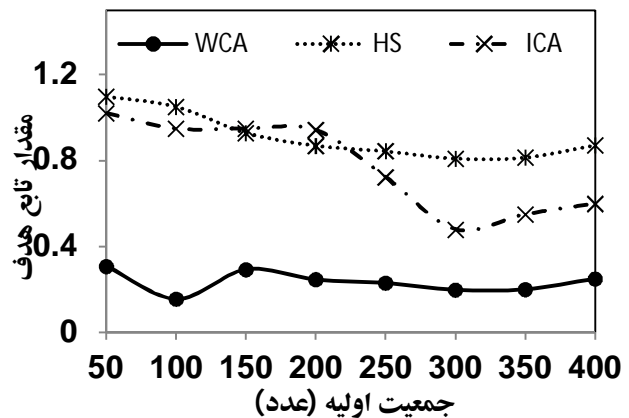
اعتمادپذیری را می‌توان به دو صورت زمانی و حجمی تعریف کرد. منظور از اعتمادپذیری زمانی، درصد دوره‌هایی است که سیستم به طور کامل نیازهای موجود را تأمین کرده و با شکست روبرو نمی‌شود. مقدار آن از رابطه 24 محاسبه می‌شود.

$$Penalty2_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left( \frac{Re_{i,t} - De_{min,i,t}}{De_{min,i,t}} \right)^2 & \text{if } Re_{i,t} < De_{min,i,t} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left( \frac{Re_{i,t} - De_{max,i,t}}{De_{max,i,t}} \right)^2 & \text{if } Re_{i,t} > De_{max,i,t} \\ 0 & \text{if } Re_{i,t} \geq De_{min,i,t} \text{ and } Re_{i,t} \leq De_{max,i,t} \end{cases} \quad (23)$$

که،  $De_{min,i,t}$  حداقل نیاز سد نام  $t$  و  $De_{max,i,t}$  حداکثر نیاز سد نام  $t$  می‌باشند.

شکل 3 فلوچارت الگوریتم WCA را در بهره‌برداری از سیستم دو مخزنه گلستان و وشمگیر نشان می‌دهد.

برای تخمین بهترین تعداد جمعیت، تحلیل حساسیت نسبت به اندازه جمعیت از 50 تا 400 مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی در شکل 4 آمده است.



شکل 4- روند تغییرات مقدار تابع هدف در الگوریتم‌های مورد بررسی

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود الگوریتم‌های HS و

جدول 1- مقادیر پارامترهای الگوریتم WCA در مسئله بهره‌برداری از سیستم دو مخزنه

$d_{max}$	CI	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد تکرار
		متغیرهای تصمیم	رودخانه‌ها و دریا	قطرات باران	
1	2	120	50	100	1000

جدول 2- مقادیر پارامترهای الگوریتم HS در مسئله بهره‌برداری از سیستم دو مخزنه

PAR	HMCR	تعداد متغیرهای تصمیم	اندازه حافظه هارمونی	تعداد تکرار
0/3	0/95	120	300	1000

جدول 3- مقادیر پارامترهای الگوریتم ICA در مسئله بهره‌برداری از سیستم دو مخزنه

تعداد تکرار	تعداد کشور اولیه	تعداد متغیرهای تصمیم	تعداد استعمارگر اولیه	نرخ انقلاب	نرخ جذب
1000	300	120	10	0/4	0/5

خروجی در دوره  $i$  و  $t$  تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری می‌باشد.

### نتایج و بحث

برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های (WCA، ICA و HS) که کدنویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شد، از چندین تابع محک استاندارد استفاده گردیده است. جدول 4 نتایج پیاده‌سازی الگوریتم WCA و دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری را بر روی توابع محک استاندارد نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت و تعداد ارزیابی تابع هدف در هر الگوریتم یکسان و متناسب با بعد هر تابع بوده و تعداد تکرارها برابر 1000 می‌باشد.

نتایج جدول 4 نشان دهنده عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر می‌باشد. همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر سه الگوریتم به طور تقریبی یکسان و مناسب می‌باشد. با افزایش بعد مسئله و پیچیدگی آن (تابع Rosenbrock با ابعاد 30 و 120) عملکرد دو الگوریتم HS و ICA سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته است اما الگوریتم WCA نسبت به دو الگوریتم دیگر به مراتب به جواب بهینه نزدیک‌تر بوده و خطای پایین‌تری دارد.

$$\alpha_t = \left(1 - \frac{NDe_f}{T}\right) \times 100, NDe_f = \text{تعداد}(\alpha \times De_t > Re_t) \quad (24)$$

که  $NDe_f$  تعداد کل شکست‌های رخ داده در طول دوره بهره‌برداری،  $De_t$  مقدار نیاز در دوره  $t$  و  $Re_t$  مقدار خروجی دوره  $t$ ، درصد تأمین نیاز و  $\alpha_t$  اعتمادپذیری سیستم در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. هر چه مقدار این پارامتر بیش‌تر باشد، قابلیت اعتماد زمانی سیستم بیش‌تر خواهد بود.

نوع دیگر قابلیت اعتماد، قابلیت اعتماد حجمی می‌باشد که عبارت است از مقدار حجم آب رها شده در کل دوره نسبت به مقدار کل نیاز مخزن. که از رابطه 25 محاسبه می‌شود (Hashimoto et al., 1982). گاهی اوقات قابلیت اعتماد را به صورت مخالف ریسک مطرح می‌شود (قابلیت اعتماد=1-ریسک).

$$\alpha_v = \frac{Re_t}{De_t} \times 100 \quad (25)$$

### آسیب پذیری

این شاخص نشان دهنده بزرگی شکست‌های سیستم است که از رابطه 26 محاسبه می‌شود (Hashimoto et al., 1982).

$$\eta = \max\left\{\frac{(De_i - Re_i)}{De_i}\right\}, i = 1, 2, \dots, t \quad (26)$$

که  $\eta$  بزرگی شکست،  $De_i$  مقدار نیاز در دوره  $i$  و  $Re_i$  مقدار

جدول 4- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر روی توابع محک استاندارد

ICA	HS	WCA	مقدار هدف	بعد	تابع
3	3	3	3	2	Goldsten-Price
-1/9132	-1/9132	-1/9132	-1/9133	2	Mccormick
$2/7 \times 10^{-15}$	$1/08 \times 10^{-6}$	$8/9 \times 10^{-9}$	0	2	Rosenbrock
2/1	63/03	$2/82 \times 10^{-6}$	0	30	Rosenbrock
371/66	1369/92	$2/21 \times 10^{-5}$	0	120	Rosenbrock
-10/532	-6/4619	-10/5316	-10/5364	4	Shekel
-1/0316	-1/0316	-1/0316	-1/0316	2	Six-Hump Camel

تعداد تکرار در سه الگوریتم برابر 1000 و تعداد ارزیابی تابع هدف در الگوریتم‌های WCA، HS و ICA به ترتیب برابر 100100، 300300 و 300300 بوده است.

همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف در الگوریتم چرخه آب برابر 0/157 به دست آمده در حالی که مقدار تابع هدف محاسبه شده با استفاده از الگوریتم‌های HS و ICA به ترتیب برابر با 0/81 و 0/48 بوده است. دلیل این امر می‌تواند با توجه به نتایج ارائه شده در جدول 4، عملکرد پایین الگوریتم‌های HS و ICA در مسائل با ابعاد بزرگ باشد.

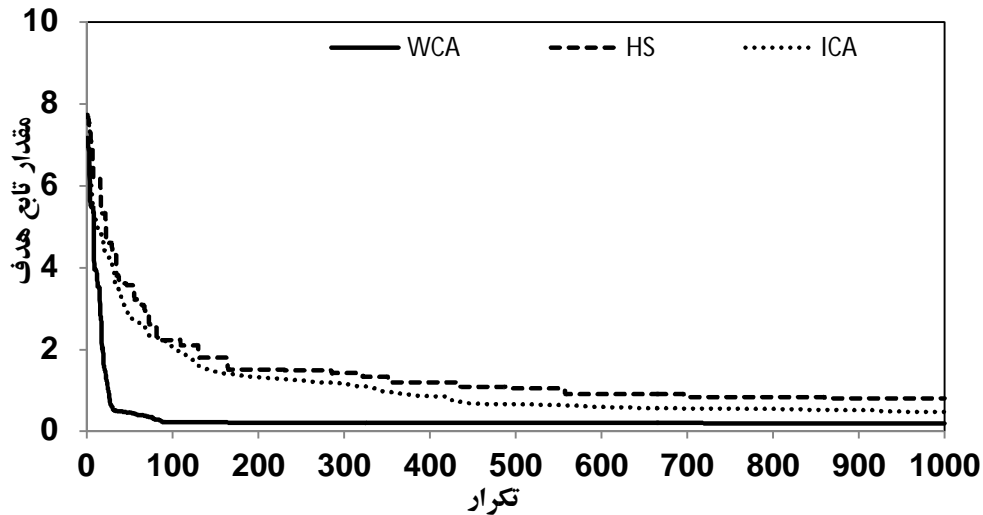
با توجه به نتایج به دست آمده در جدول 4، الگوریتم چرخه آب چه در مسائل با بعد کم و چه در مسائل بزرگ مقیاس دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. پس از صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد بررسی با استفاده از توابع محک استاندارد، سه مدل برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر بر اساس الگوریتم‌های WCA، HS و ICA توسعه داده شد.

میانگین مقادیر تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از 50 بار اجرای مختلف الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش، در جدول 5 ارائه شده است.

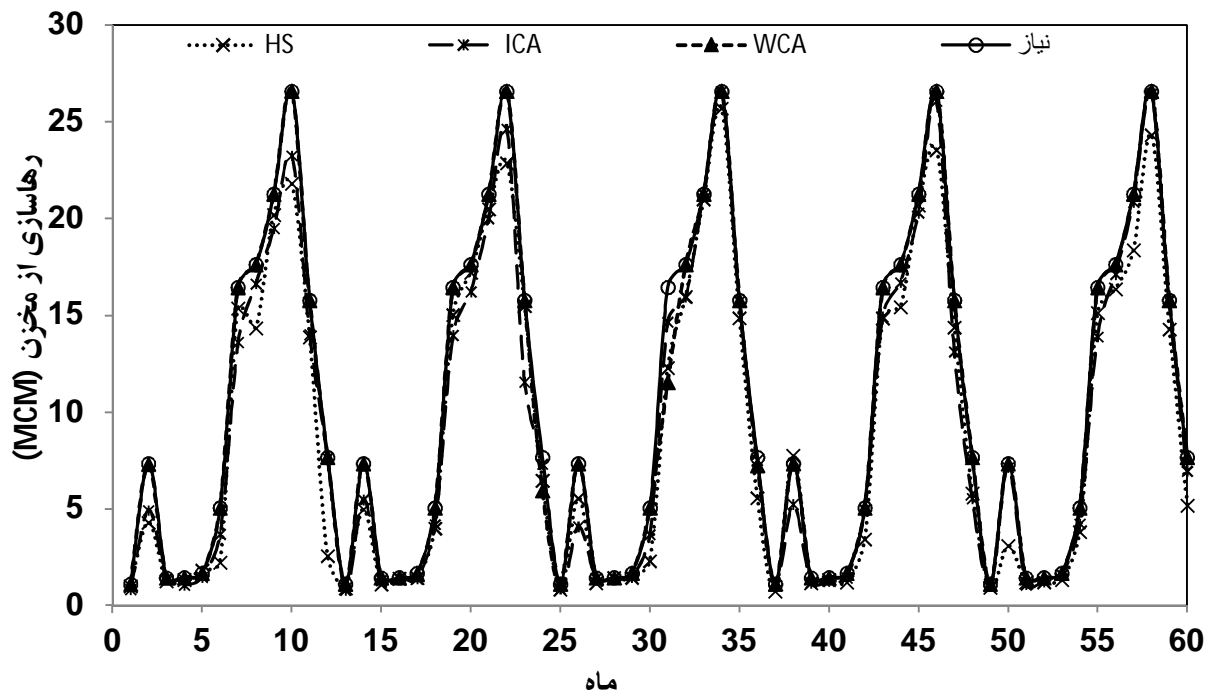


جدول 5- مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای الگوریتم‌ها

الگوریتم	تابع هدف	کمبود گلستان (MCM)		کمبود وشمگیر (MCM)		قابلیت اعتماد گلستان			قابلیت اعتماد وشمگیر		آسیب پذیری (درصد)
		گلستان	وشمگیر	زمانی		حجمی	زمانی		حجمی		
				$\alpha=0.95$	$\alpha=0.9$		$\alpha=0.95$	$\alpha=0.9$			
WCA	0/157	14/021	17/175	97/73	95	93/33	97/06	91/67	88/33	33	69
ICA	0/48	57/17	54/19	90/75	51/67	31/67	90/73	48/33	28/33	44	86
HS	0/81	82/14	62/62	86/71	40	16/67	89/29	53/33	31/67	66	98

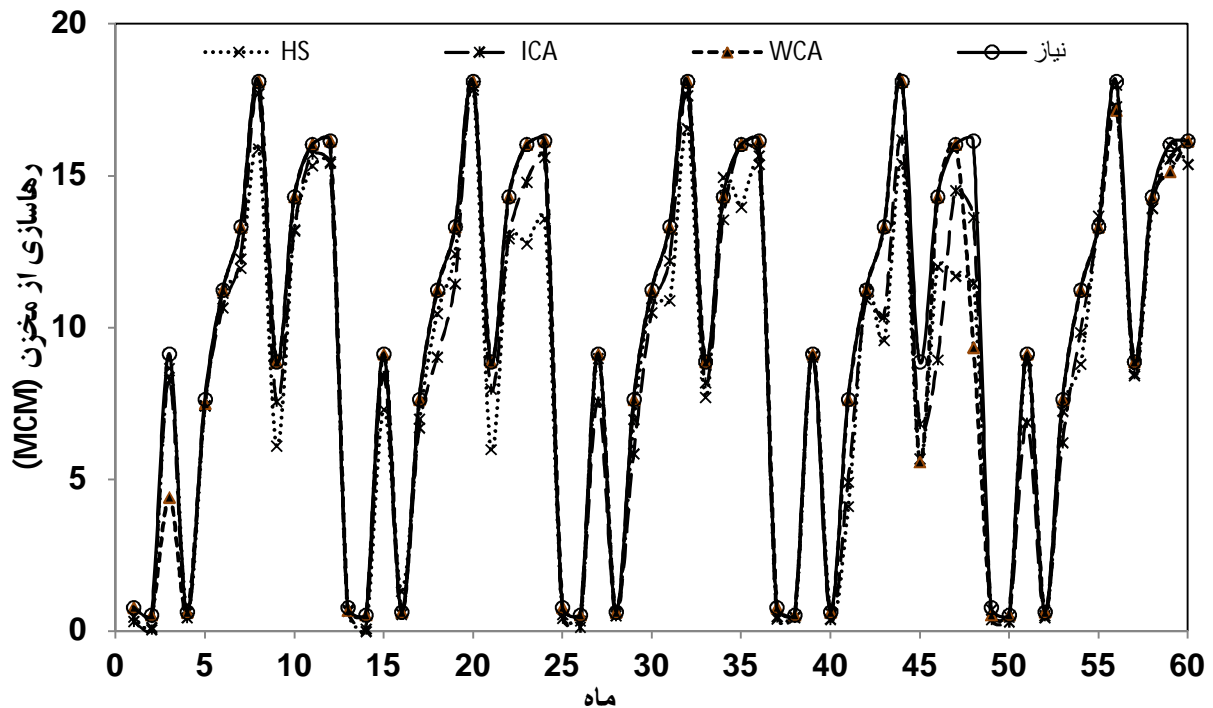


شکل 5- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری از سیستم مخزن



شکل 6- مقدار نیاز و رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف مخزن سد گلستان





شکل 7- مقدار نیاز و رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف مخزن سد وشمگیر

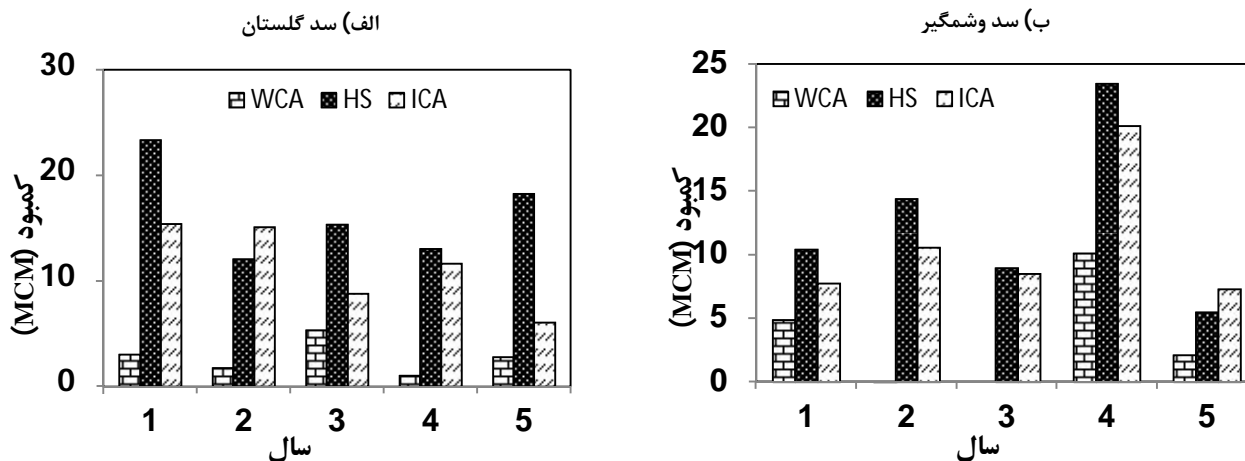
مورد مطالعه را داشته است. میزان کل کمبودها برای سدهای گلستان و وشمگیر در روش WCA به ترتیب برابر  $2/26$  و  $2/93$  درصد است در حالی که این مقادیر در روش HS به ترتیب برابر  $13/2$  و  $10/7$  درصد و در روش ICA،  $9/2$  و  $9/24$  درصد می‌باشد. روش WCA نسبت به روش‌های HS و ICA از کمبودهای کمتری در بیش‌تر دوره‌ها برخوردار می‌باشد.

با توجه به شکل‌های 6 و 7 الگوریتم HS در سیستم دو مخزنه مورد بررسی به خوبی نتوانسته نیاز ماهانه پایین دست سدهای گلستان و وشمگیر را تأمین کند و در تعدادی از ماه‌ها دچار کمبود می‌باشد. در الگوریتم ICA شدت و تعداد ماه‌هایی که سیستم با کمبود روبرو است به نسبت الگوریتم HS کم‌تر است.

شکل 8 مقادیر متوسط کمبود سالانه مخزن سد گلستان و وشمگیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 8 (الف) شدت کمبودها در الگوریتم HS، نسبت به دو الگوریتم دیگر بیش‌تر بوده است. مقدار حداکثر کمبود در الگوریتم‌های WCA، HS و ICA به ترتیب  $5/34$ ،  $19/58$  و  $11/5$  (MCM) می‌باشد. با توجه به شکل 8 (ب)، مقدار حداکثر کمبود در الگوریتم‌های WCA، HS و ICA به ترتیب  $10/1$ ،  $20/5$  و  $17/97$  (MCM) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار کمبودها در الگوریتم WCA نسبت به دو الگوریتم دیگر پایین‌تر بوده است.

الگوریتم WCA با رفع این ضعف توانسته نتایج قابل قبولی در مسائل با ابعاد بزرگ در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر داشته باشد. همچنین شاخص‌های عملکرد (قابلیت اعتماد و آسیب‌پذیری) محاسبه شده در جدول 5 عملکرد مناسب‌تر الگوریتم WCA نسبت به دو الگوریتم دیگر را نشان می‌دهد. الگوریتم چرخه آب به ترتیب با تأمین  $97/1$  و  $97/7$  درصد از نیازهای کل پایین دست سدهای گلستان و وشمگیر و شاخص‌های عملکرد مناسب نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در این پژوهش که در جدول 5 آورده شده عملکرد مناسب خود را در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن به خوبی نشان می‌دهد. نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر در شکل 5 آورده شده است. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است الگوریتم چرخه آب نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی و رقابت استعماری سریع‌تر همگرا شده است. شکل‌های 6 و 7 مقدار رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف را در مخازن گلستان و وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه (سال آبی 86 تا 91) نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار رهاسازی به دست آمده از الگوریتم چرخه آب بسیار نزدیک به مقدار کل نیازهای پایین دست سدهای مورد مطالعه بوده و حداقل کمبود در بین روش‌های دیگر



شکل 8- مقدار کمبود مخزن به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف

مهندسی و به طور خاص در مسئله بهره‌برداری از مخزن می‌باشد (Bozorg Haddadet al., 2014).

### منابع

جنت‌رستمی، س.، خلقی، م. و بزرگ حداده، ا. 1389. مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم اصلاح شده جستجوی هارمونی، مجله دانش آب و خاک، جلد اول، شماره 3، صص 61-71.

عراقی نژاد، ش.، مروتی، ر. و حسینی موغاری، س. م. 1392. بررسی عملکرد الگوریتم رقابت استعماری در بهره‌برداری بهینه از مخزن، اولین همایش ملی بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان.

قادری، ک.، زلفی، آ. و بختیاری، ب. 1393. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعه موردی: حوضه کرخه)، مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره 4، شماره 2: 228-215.

مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا. ا.، مساعدی، ا. و اسلامی، ح. ر. 1390. تعیین کمبود حجم بهینه مخزن سد وشمگیر در سیستم بهره‌برداری چند سدی، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شماره 1: 230-215.

Afshar, M.H., Motaei, I. 2011. Constrained Big Bang-Big Crunch Algorithm for optimal solution of large scale reservoir operation problem. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2: 357-375.

Ajibola A.S., Adewumi, A.O. 2014. Review of Population Based Metaheuristics in Multi-

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از الگوریتم چرخه آب (به عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری جدید)، پس از بررسی کارآمدی آن توسط تعدادی توابع محک استاندارد، در حل مسئله بهره‌برداری بهینه‌ساز سیستم مخزن سدهای گلستان و وشمگیر، استفاده شد. همچنین عملکرد الگوریتم توسعه داده شده با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن (قابلیت اعتماد زمانی و حجمی و آسیب‌پذیری) بررسی شد و نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم با روش‌های فرا ابتکاری دیگر از قبیل HS و ICA مورد مقایسه قرار گرفت.

میزان خروجی حاصل از اجرای الگوریتم‌های WCA، HA و ICA به ترتیب قادر به تأمین 97/73، 86/71 و 90/75 درصد از نیاز کل پایین دست سد گلستان و تأمین 97/06، 89/29 و 90/73 درصد از نیاز کل پایین دست وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه (دوره 86 تا 91) می‌باشد که عملکرد مناسب‌تر الگوریتم WCA را نسبت به دو الگوریتم دیگر نشان می‌دهد. همچنین میزان حجم کل کمبودها در کل دوره 5 ساله برای روش‌های WCA، HS و ICA به ترتیب برابر 14/021، 82/14 و 57/17 (MCM) برای سد گلستان و 62/62 و 54/19 (MCM) برای سد وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل کم‌ترین حجم کمبود مربوط به الگوریتم WCA و بیش‌ترین حجم کمبود مربوط به الگوریتم HS می‌باشد. قابلیت اعتماد زمانی ( $\alpha=0/9$ ) در روش‌های WCA، HS و ICA به ترتیب برابر 95، 40 و 51/67 درصد برای سد گلستان و 91/67، 53/33 و 48/33 درصد برای سد وشمگیر می‌باشد. بنابراین الگوریتم WCA دارای قابلیت بالایی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم دو مخزنه در بین الگوریتم‌های دیگر مورد بررسی می‌باشد.

همچنین نتایج پژوهش بزرگ حداد و همکاران نشان‌دهنده همگرایی و قابلیت اطمینان بالای الگوریتم چرخه آب در مسائل

- Marino, M.A. 2013. Extraction of Optimal Operation Rules in an Aquifer-Dam System: Genetic Programming Approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139:872-879.
- Geem, Z.W. 2000. Optimal design of water distribution networks using harmony search. Ph.D Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P. 1982. Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 1: 14-20.
- Kumar, D.N., Reddy, M.J. 2006. Ant Colony Optimization for Multi-Purpose Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Management*, 6: 879-898.
- Labadie, J.W. 2004. Optimal operation of multi-reservoir system: State of the art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2: 93-111.
- Oliveira, R., Loucks, D.P. 1997. Operating rules for multi-reservoir system. *Journal of Water Resources Research*. 4: 839-852.
- Pradhan, S.N., Tripathy, U.K. 2013. Optimization of the operating policy of the multipurpose Hirakud reservoir by Genetic Algorithm. *American Journal of Engineering Research*. 11: 260-266.
- Reddy, M.J., Kumar, D.N. 2007. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. *Hydrological Processes*. 21: 2897-2909.
- Sonaliya, S., Suryanarayana, T.M.V. 2014. Optimal Reservoir Operation Using Genetic Algorithm: A Case Study of Ukai Reservoir Project. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*. 6: 13681-13687.
- Wardlaw, R., Sharif, M. 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 1: 25-33.
- objective Optimization Problems. *International journal of computing communication and instrumentation engineering*. 1: 126-128.
- Atashpaz-Gargari, C.L., Lucas, C. 2007. Imperialist Competitive Algorithm: an algorithm for optimization inspires by imperialistic competition. Congress on evolutionary computation, Singapore.
- Baghipour, R., Hosseini, S.M., Boor, Z. 2014. A Water Cycle Algorithm for Optimal Allocation of DGs in Distribution System Considering Environmental Profit. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*. 11: 430-454.
- Baltar, A.M., Fontane, D.G. 2008. Use of multi-objective particle swarm optimization in water resources management. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 3: 265-275.
- BozorgHaddad, O., Moravej, M., Loáiciga, H.A. 2014. Application of the Water Cycle Algorithm to the Optimal Operation of Reservoir Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 141.5:1-10.
- Chang, J.X., Huang, Q., Wang, Y.M. 2005. Genetic algorithms for optimal reservoir dispatching. *Journal of Water Resources Management*, 19:321-331.
- Esat, V., Hall, M.J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithms hydro informatics. Processes Its International Conference on Hydro informatics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 225-231.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., Hamdi, M. 2012. Water cycle algorithm -A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers and Structures*. 110-111: 151-166.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. 2013. Weight optimization of truss structures using water cycle algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 1:115-129.
- Fallah-Mehdipour, E., BozorgHaddad, O.,

## Evaluation of Some Intelligent Method in Optimal Operation of Multireservoirs

S.Akbarifard<sup>1\*</sup>, K.Qaderi<sup>2</sup>, B.Bakhtiari<sup>3</sup>

Received: Jun.11, 2016

Accepted: Des.24, 2016

### Abstract

Optimal operation of reservoirs is one of the ways of dealing with water management issues and encountering with inappropriate spatial and temporal distribution of water. In this research, a metaheuristic algorithm called Water Cycle Algorithm (WCA), has been developed in MATLAB software, with the purpose of optimal operation of a Multi-reservoirs system (Golestan and Voshmgir dams) located at Gorganrood Basin (North of Iran), for a five year period (from 2007-2008 to 2011-2012). At first, the performance of the developed model was investigated through several standard test functions. Next, the developed model is applied for monthly allocation of Gorganrood Multi-reservoirs system. The objective function was defined as the "minimization of the total deficit for the study period". In order to performance evaluation of the developed model, two criteria of reliability (temporal and volume) and vulnerability have been used. The results of the developed model were compared with those of the other metaheuristic algorithms including Harmony Search Algorithm (HS) and Imperialist Competitive Algorithm (ICA). The WCA, HS and ICA were capable to supply 97.73, 85.57 and 93.17 percent of Golestan dam water demand, respectively. For the Voshmgir dam, the mentioned models could supply 97.06, 86.88 and 93.44 percent of water demand, in same order. The temporal reliability ( $\alpha=0.9$ ) for WCA, HS and ICA models, was obtained 95, 25 and 50 percent for Golestan dam and 91.67, 38.33 and 65 percent for Voshmgir dam, respectively, revealed that the WCA was superior in optimal allocation of Multi-reservoirs system.

**Key Words:** Water Cycle Algorithm, Imperialist Competitive Algorithm, Harmony Search Algorithm, Optimal operation of reservoir, Golestan and Voshmgir Dams.

1- M. Sc. in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Iran

2- Assistant., Professor., Department of Water Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Iran

3- Assistant., Professor., Department of Water Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Iran

(\*-Corresponding Author Email: Akbarifard\_saeid@yahoo.com)