

تخصیص بهینه ی منابع آب با استفاده از الگوریتم چرخه ی آب (مطالعه ی موردی: حوضه آبخیز گرگان رود)

سعید اکبری فرد^۱، کورش قادری^{۲*}، بهرام بختیاری^۳

چکیده

در این پژوهش از الگوریتم فرا ابتکاری چرخه ی آب (WCA) برای یافتن راهکارهای تخصیص بهینه ی منابع آب در سامانه دو مخزنه سد های گلستان و وشمگیر، واقع در حوضه ی آبخیز گرگان رود (شمال ایران)، برای یک دوره ی پنج ساله (از سال آبی ۸۷-۸۶ تا ۹۱-۹۰) استفاده شده است. پس از اطمینان از درستی عملکرد الگوریتم WCA با استفاده از چندین تابع محک معیار، مدلی برای تخصیص بهینه ی سامانه مخازن حوضه ی آبخیز گرگان رود توسعه داده شد. تابع هدف در سامانه مورد مطالعه به صورت کمینه سازی کل کمبود در طول دوره ی آماری تعریف شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم های مورد بررسی در تخصیص بهینه از سامانه مخازن، از شاخص های عملکرد قابلیت اعتماد زمانی، حجمی و آسیب پذیری استفاده شده است. همچنین، نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج روش های شناخته شده ی الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم گروه ذرات (PSO) مقایسه شده اند. الگوریتم های WCA، GA و PSO به ترتیب قادر به تأمین ۹۷/۷۳، ۸۷/۰۷ و ۹۴/۳ درصد از نیازهای پائین دست سد گلستان، و همچنین ۹۷/۰۶، ۸۷/۵۹ و ۹۴/۴۷ درصد از نیازهای سد وشمگیر بودند. قابلیت اعتماد زمانی (۰/۹) برای الگوریتم های WCA، GA و PSO به ترتیب برابر با ۹۵، ۲۶/۶۷ و ۵۸/۳۳ درصد برای سد گلستان، و ۳۸/۳۳ و ۶۶/۶۷ درصد برای سد وشمگیر به دست آمده اند. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با دیگر الگوریتم های مورد بررسی در تخصیص بهینه سامانه مخازن می باشند.

واژه های کلیدی: الگوریتم چرخه ی آب، تخصیص بهینه، حوضه ی گرگان رود، سد گلستان و وشمگیر.

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۷۱۵۴۷۳۴ Email: kouroshqaderi@uk.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

مقدمه

برای تعریف سیاست‌های بهره‌وری بهینه از مخازن می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. اکثر روش‌های بهینه‌سازی از روش‌های ریاضی برای پیدا کردن بهترین پاسخ‌های امکان‌پذیر بر اساس عملکرد تابع هدف و قیود بهره می‌گیرند. انتخاب روش بهینه‌سازی به خصوصیات سامانه در نظر گرفته شده، در دسترس بودن داده‌ها، نوع تابع هدف، قیود و متغیرها بستگی دارد (لابادیه، ۲۰۰۴). در چند دهه اخیر روش‌های متعدد بهینه‌سازی به وسیله‌ی محققان مختلف در سراسر دنیا توسعه یافته است.

یه (۱۹۸۵)، وربز (۱۹۹۳) و لابادیه (۲۰۰۴) مروری کلی را بر انواع روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در مهندسی منابع آب، و به ویژه بهره‌وری از مخازن، انجام داده‌اند. ایسات و هال (۱۹۹۴) عملکرد الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی پویا (DP) را در یک سامانه چهار مخزنی مقایسه و نشان دادند که GA توان مناسبی را در حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب دارد. اولیویرا و لاکس (۱۹۹۷)، واردلو و شریف (۱۹۹۹) و چانگ و همکاران (۲۰۰۵) نیز از الگوریتم ژنتیک برای استخراج منحنی فرمان در سامانه‌های چند مخزنه استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک بوده اند. کومار و ردی (۲۰۰۶)، برای استخراج سیاست بهره‌وری یک مخزن چند منظوره از الگوریتم مورچگان (ACO) استفاده کردند. نتایج، عملکرد مناسب الگوریتم ACO را نشان می‌دهند. ردی و کومار (۲۰۰۷) با استفاده از الگوریتم گروه ذرات (PSO) مسئله‌ی بهره‌وری مخزن را با اهداف کشاورزی و تولید انرژی برقایی مورد بررسی قرار داده‌اند. بالتر و فونتن (۲۰۰۸) از الگوریتم چندهدفه‌ی گروه ذرات (MOPSO) برای بهره‌وری کیفی از مخزن سد، با سه تابع هدف، استفاده کردند. افشار و مطاعی (۲۰۱۱)، با استفاده از الگوریتم انفجار بزرگ-انهدام بزرگ (BB-BC)، به بهره‌وری بهینه از مخزن دز در ایران پرداختند. نتایج نشان دهنده‌ی کارایی و قدرت بالای الگوریتم مورد بررسی در حل مسئله‌ی بهره‌وری از مخزن نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی بوده‌اند. پرادهان و تریپاتی (۲۰۱۳) به بهره‌وری بهینه‌ی چند منظوره از مخزن هیدراکود با استفاده از GA پرداختند. مقایسه‌ی نتایج الگوریتم ژنتیک

با سیاست فعلی بیانگر توانایی و تأثیر GA می‌باشد. فلاح مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)، یک قاعده‌ی بهره‌وری مؤثرتری را نسبت به الگوریتم ژنتیک (GA) در سامانه سد-آبخوان بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) توسعه دادند. نتایج نشان دادند که مقدار تابع هدف به دست آمده ۲۶ درصد بهتر نسبت به قاعده‌ی الگوریتم ژنتیک معمولی (GA) بوده است. سونالیا و سوریانارایانا (۲۰۱۴)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به بهره‌وری بهینه از مخزن یوکای (Ukai) در هند پرداختند. نتایج نشان دادند که GA می‌تواند به طور کامل نیازهای پایاب آبیاری را تأمین کرده، و رهاسازی را به حداقل برساند که منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در آب می‌شود. آجیویلا و آدیومی (۲۰۱۴) مروری کلی را بر مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت انجام دادند. آن‌ها از GA و PSO برای این منظور استفاده کردند. آشفته و همکاران (۲۰۱۵) به بهره‌وری بهینه چند هدفه از مخزن آیدوغموش (شرق آذربایجان)، تحت تاثیر شرایط تغییر اقلیم با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک پرداختند. نتایج نشان دهنده بهبود ۲۹ تا ۳۰ درصدی در قوانین بهره‌وری از مخزن تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به حالت مبنا می‌باشد. تینوکو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌سازی بارش-رواناب به ارزیابی راهکارهای بهره‌وری از مخزن جهت آبیاری واقع در حوضه آبخیز ماکو اکوادور پرداختند. نتایج نشان دهنده مفید بودن مدل‌سازی یکپارچه بارش-رواناب به عنوان ابزاری برای بهره‌وری بهینه از مخزن می‌باشد. گروسی نژاد و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) به بهینه‌سازی بهره‌وری از سامانه مخازن با اهداف تأمین نیاز آبیاری و برقایی پرداختند. نتایج نشان دهنده عملکرد برتر الگوریتم کرم شب‌تاب از نظر نرخ همگرایی به بهینه سراسری نسبت به الگوریتم ژنتیک بوده است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) به بهره‌وری بهینه از سامانه برقایی چند مخزنه با استفاده از الگوریتم یادگیری جامع ارتقاء یافته ازدحام ذرات (ECLPSO) پرداختند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش ECLPSO به طور جدی به استخراج راه حل عملی با کیفیت بالا برای مطالعه انجام شده کمک می‌کند. عسکری و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز (WOA) به بهره‌وری بهینه از مخزن پرداختند. مقایسه نتایج الگوریتم WOA با روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، برنامه‌ریزی خطی

الگوریتم چرخه‌ی آب، به بهره‌وری بهینه از سامانه مخازن کارون ۴ و یک سامانه چهار مخزنه پرداختند. نتایج نشان‌دهنده‌ی همگرایی و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم می‌باشند.

در پژوهش حاضر کاربرد الگوریتم چرخه‌ی آب (WCA)، به عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری جدید در حل مسئله‌ی بهینه‌سازی بهره‌وری از سامانه مخازن سدهای گلستان و وشمگیر، مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد الگوریتم توسعه داده شده، نتایج حاصل از اجرای آن با روش‌های فرا ابتکاری دیگر، مانند GA و PSO، مورد مقایسه قرار گرفته اند. کدنویسی الگوریتم‌های WCA، GA و PSO در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R2014a) انجام شد. همچنین، برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله‌ی تخصیص بهینه‌ی منابع آب، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل قابلیت اعتماد زمانی، حجمی، و آسیب‌پذیری استفاده گردیده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات عمومی حوضه مطالعاتی

حوضه‌ی آبخیز 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 حوضه‌ی آبخیز رود قره‌سو به دریای خزر ختم می‌شود. طول گرگان‌رود از ابتدای تشکیل تا محل اتصال به دریا ۳۵۹/۴ کیلومتر، و پهنه‌ی حوضه از طول جغرافیایی ۵۴ درجه تا ۵۶ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و از عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی گسترده شده است (اطلس منابع آب ایران، ۱۳۸۷). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی سدهای گلستان و وشمگیر را روی گرگان‌رود نشان می‌دهد. سد وشمگیر، قدیمی‌ترین سد استان گلستان است که در سال ۱۳۴۹، با هدف توسعه و بهبود اراضی کشاورزی حاشیه‌ی گرگان‌رود و پایاب، مهار کردن سیلاب منطقه و زهکشی اراضی به بهره‌وری رسیده است. ظرفیت ذخیره‌ی این سد (MCM) ۴۷، و قابلیت تنظیم سالانه‌ی آن (MCM) ۱۱۷ است. سد مخزنی گلستان در بالادست سد وشمگیر، و در محدوده‌ی دشت گرگان در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال شرقی گنبد کاووس واقع شده است. مخزن سد در ابتدای ساخت

(LP) و الگوریتم ژنتیک (GA) نشان دهنده همگرایی سریع و نزدیک به بهینه سراسری در الگوریتم WOA می‌باشد.

نجفی و همکاران (۱۳۸۴) به بهره‌وری بهینه از مخزن سد وشمگیر با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی پرداختند. نتایج نشان دادند که سیاست بهره‌وری کنونی مخزن تنها در ماه‌های پر آب توانایی تأمین نیازها را دارد، در صورتی که ماه‌های بحرانی مصرف، ماه‌های کم آب می‌باشند. شفییعی و همکاران (۱۳۸۶) از الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌سازی و طراحی از مخازن چندگانه‌ی برقایی استفاده کردند. مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی، مقدار کمبود حجم بهینه‌ی مخزن سد وشمگیر را در سامانه بهره‌وری دو سدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که در شرایط فعلی، نیاز به افزایش حجم سد وشمگیر نمی‌باشد، ولی در شرایط آتی به دلیل پر شدن سد گلستان از رسوبات برای بهره‌برداری بهینه از سدهای گلستان و وشمگیر، افزایش ظرفیت حجم سد وشمگیر تا حدود ۹ میلیون متر مکعب ضروری است. نوروزی و همکاران (۱۳۹۰) از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی بهره‌وری از یک سامانه چند مخزنه با تمرکز بر دو سد گلستان و وشمگیر استفاده کردند. نتایج حاصل از ضریب اطمینان کارایی سامانه، عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک را نشان دادند. قادری و همکاران (۱۳۹۳) از الگوریتم تکاملی رقابتی جوامع (SCE)، و الگوریتم ژنتیک (GA) در بهره‌وری بهینه از سامانه سه مخزنی حوضه‌ی کرخه استفاده کردند.

الگوریتم چرخه‌ی آب (WCA)، یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که به وسیله‌ی اسکندر و همکاران (۲۰۱۲)، بر پایه‌ی چرخه‌ی آب یا چرخه‌ی آبشناسی در طبیعت ارائه شده است. مفاهیم بنیادی و ایده‌هایی که زیربنای روش پیشنهادی است از طبیعت و بر اساس مشاهدات از فرآیند چرخه‌ی آب و جریان رودها و نهرها به دریا در جهان واقعی الهام گرفته شده است. کاربردهای بسیار کمی از این الگوریتم، به ویژه در زمینه مهندسی منابع آب، گزارش شده است. اسکندر و همکاران (۲۰۱۲) از الگوریتم چرخه‌ی آب در بهینه‌سازی وزن سازه‌ی خرپا، و باقی پور و همکاران (۲۰۱۴) برای تخصیص بهینه در مسائل زیست محیطی، از این الگوریتم استفاده کرده‌اند. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از

الگوریتم چرخه آب (WCA)

مشابه دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، روش WCA نیز با جمعیت اولیه‌ی به اصطلاح قطرات باران شروع می‌شود. در ابتدا، فرض می‌شود که باران یا دیگر انواع بارش وجود دارند. بهترین فرد (بهترین قطره‌ی آب) به عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن، تعدادی از قطرات باران خوب به عنوان رود و بقیه‌ی قطرات باران به عنوان نهرها در نظر گرفته می‌شوند که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان می‌یابند. در روش WCA، به یک راه‌حل واحد «قطره باران» اطلاق می‌شود. در روش‌های PSO و GA، اصطلاحاً چنین آرایه‌ای به ترتیب «کروموزوم» و «موقعیت ذرات» نامیده می‌شوند. در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چند بعدی، یک قطره باران، آرایه‌ای به شکل $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Raindrop = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_{var}}] \quad (3)$$

که در آن، X_1 تا $X_{N_{var}}$ بیانگر متغیرهای تصمیم می‌باشند. برای شروع، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه‌ی $N_{pop} \times N_{var}$ به طور تصادفی ایجاد می‌گردد:

$$\begin{aligned} & \text{Population of raindrops} \\ & = \begin{bmatrix} Raindrop_1 \\ Raindrop_2 \\ \vdots \\ Raindrop_{N_{pop}} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & X_3^1 & \dots & X_{N_{var}}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & X_3^{N_{pop}} & \dots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

که N_{pop} و N_{var} به ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی می‌باشند. مقادیر تابع هدف (C) داده شده از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} C_i &= Cost_i \\ &= f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{N_{var}}^i), i \\ &= 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن، C_i مقدار تابع هدف هر قطره می‌باشد. در گام اول، به تعداد N_{pop} قطره‌ی باران ایجاد، سپس به تعداد N_{SR} از بهترین قطرات (حداقل ارزش) به عنوان دریا و رود انتخاب می‌شوند. در مسائل کمینه‌سازی، قطره‌ی باران با کمترین مقدار به عنوان دریا در نظر گرفته می‌شود. N_{SR} ، مجموع تعداد رودها (که یک فراسنج کاربردی است) و یک دریا (رابطه‌ی ۶) می‌باشد. بقیه‌ی جمعیت (نهرهایی

حدود (MCM) ۸۶ ظرفیت ذخیره داشته، و حجم مخزن به هنگام بروز سیلاب برابر با (MCM) ۱۳۵ طراحی شده است. به دلیل حجم زیاد رسوب‌های وارده به سد طی سال‌های اخیر، به ویژه در سیل سال ۱۳۸۰، ظرفیت ذخیره‌ی سد به (MCM) ۶۲ کاهش یافته، و قابلیت تنظیم سالانه‌ی آن (MCM) ۱۱۵ است. جدول (۱) مشخصات عمومی سدهای وشمگیر و گلستان را در حوضه‌ی آبخیز گرگان‌رود نشان می‌دهد (شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۹۲). نیازهای پایاب سد گلستان شامل کشاورزی، صنعت، رهاسازی برای سد وشمگیر و زیست محیطی، نیازهای پایاب سد وشمگیر شامل کشاورزی، آبی‌پروری مخزن، آبی‌پروری شبکه، زیست محیطی و سایر نیازها می‌باشند.

سطح آزاد آب دریاچه در هر دوره‌ی زمانی به عنوان تابعی از حجم ذخیره در همان دوره در نظر گرفته می‌شود، که از منحنی حجم-سطح مخزن به دست می‌آید. در این مطالعه، رابطه‌ی حجم-سطح به صورت یک تابع توانی درجه‌ی دوم بیان شده است. رابطه‌ی حجم-سطح برای سدهای گلستان و وشمگیر به ترتیب در روابط (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

$$A_1 = -0.0037V_1^2 + 0.4568V_1 + 1.2026 \quad (1)$$

$$A_2 = -0.0114V_2^2 + 0.464V_2 - 0.0505 \quad (2)$$

که در آن‌ها A_1 و A_2 سطح و V_1 و V_2 حجم مخزن گلستان و وشمگیر می‌باشد. ضریب تبیین (R^2) روابط (۱) و (۲) به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹۵ و ۰/۹۹۱۹ محاسبه شده است. با توجه به ضریب تبیین به دست آمده، روابط (۱) و (۲) از نظر آماری اطمینان بالایی داشته و برای محاسبه‌ی حجم تبخیر قابل قبول می‌باشند.

اطلاعات پایه سدها

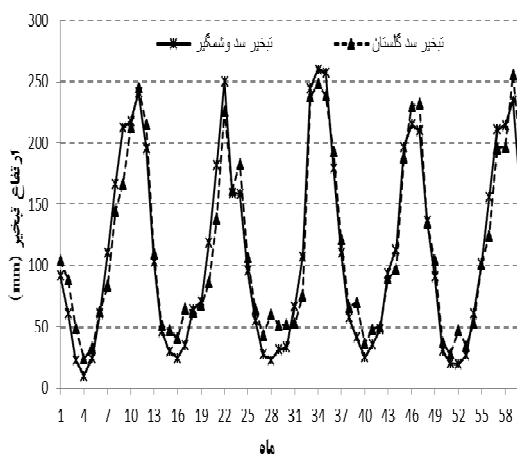
اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق شامل سری زمانی ورودی و نیازهای یک دوره‌ی ۵ ساله (از سال آبی ۸۷-۸۶ تا ۹۱-۹۰) می‌باشد. شکل‌های (۲) و (۳) مقادیر نیازها، حجم جریان ورودی و ارتفاع تبخیر از مخزن سدهای گلستان و وشمگیر را در طول دوره‌ی تاریخی نشان می‌دهد. به طور متوسط، بیشترین ورودی‌های ماهانه مربوط به زمستان و کمترین ورودی‌ها مربوط به تابستان می‌باشد. همچنین، بیشترین نیاز پایاب سد گلستان در تیر و بیشترین نیاز پایاب سد وشمگیر در اردیبهشت می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات عمومی سدهای گلستان و وشمگیر

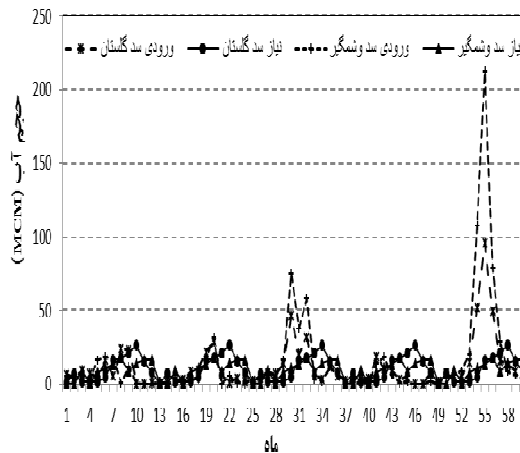
سد وشمگیر	سد گلستان	خصوصیت
خاکی	خاکی	نوع سد
۱۳۴۹	۱۳۷۸	سال شروع بهره‌وری
۱۷/۸	۱۷	ارتفاع از کف (m)
۴۳۰	۱۳۶۷	طول تاج (m)
۴۷	۶۲	حجم کل (MCM)
۴۴	۶۰	حجم مفید (MCM)
۱۰	۴۹	تراز عادی (متر از سطح دریا)
۱۱۷	۱۱۵	حجم آب قابل تنظیم سالیانه (MCM)
۹۳۵	۱۵۵۰	تخلیه سرریز ($m^3.s^{-1}$)
۲۱۰۰۰	۱۰۰۰۰	سطح زیر کشت (ha)



شکل ۱- نقشه‌ی موقعیت سدهای وشمگیر و گلستان در حوضه‌ی گرگان‌رود.



شکل ۳- مقدار ارتفاع تبخیر از مخزن سدهای گلستان و وشمگیر (۱۳۸۶-۱۳۹۱).



شکل ۲- نیاز پایاب و جریان ورودی به سدهای گلستان و وشمگیر (۱۳۸۶-۱۳۹۱).

یکی از مهم‌ترین عواملی که از همگرایی سریع الگوریتم (همگرایی نابالغ)، و به دام افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند، تبخیر است. فرایند تبخیر باعث می‌شود که آب دریا با تبخیر به صورت جریان رودها و یا نهرها دوباره به دریا بریزد. رابطه‌ی زیر چگونگی تعیین اینکه آیا رود به دریا می‌ریزد یا نه را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} \text{if } |X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max}, i \\ = 1, 2, 3, \dots, N_{SR} - 1 \\ \rightarrow \text{فرایند بارش و تبخیر} \\ \rightarrow \text{پایان} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن، d_{max} عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است، بنابراین، اگر فاصله‌ی بین رود و دریا کمتر از d_{max} باشد، نشانگر آن است که رود به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرایند تبخیر اثر می‌کند، و همان طور که در طبیعت دیده می‌شود، بعد از تبخیر کافی، باران (بارش) شروع خواهد شد. d_{max} شدت جستجو را در نزدیکی دریا (راه حل بهینه) تنظیم می‌کند. مقدار d_{max} به صورت رابطه‌ی (۱۳) در هر مرحله کاهش می‌یابد:

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{\text{max iteration}} \quad (13)$$

پس از برآورده شدن فرایند تبخیر، فرایند بارندگی اعمال می‌شود. در فرایند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان‌های مختلف تشکیل می‌دهند (شبهه به عملکرد جهش در GA). برای تعیین مکان جدید نهرهای تازه شکل گرفته، از رابطه‌ی (۱۴) استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (14)$$

که در آن، LB و UB به ترتیب، کران پایین و بالای تعریف شده به وسیله‌ی مسئله می‌باشند. بهترین قطرات باران جدید تشکیل شده به عنوان رود، و بقیه‌ی قطرات باران جدید به عنوان نهرهای جدید، که به سمت رودخانه‌ها در جریانند، و یا ممکن است به طور مستقیم به دریا برسند، در نظر گرفته می‌شوند. به منظور افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$X_{Stream}^{new} = X_{Sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \quad (15)$$

که در آن، μ ضریبی است که محدوده‌ی جستجو در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد. $randn$ عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقادیر بزرگ μ امکان خروج از منطقه‌ی امکان‌پذیر را افزایش می‌دهد، و مقادیر کوچک μ منجر به

که ممکن است به رودخانه‌ها و یا به طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند) با استفاده از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود

$$N_{SR} = \text{Number of Rivers} + \overset{sea}{\bar{1}} \quad (6)$$

$$N_{Raindrops} = N_{pop} - N_{SR} \quad (7)$$

به منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودها و دریا، بسته به شدت جریان از رابطه‌ی (۸) استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} N_{S_n} = \text{round} \left\{ \left| \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} Cost_i} \right| \right. \\ \left. \times N_{Raindrops} \right\}, n \\ = 1, 2, \dots, N_{SR} \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن، N_{S_n} تعدادی از نهرها است که به رودهای 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 رابطه‌ی (۹) مشخص می‌شود.

$$X \in (0, C \times d), \quad C > 1 \quad (9)$$

که در آن، C مقداری بین یک و دو (نزدیک به دو) دارد و بهترین مقدار برای C برابر با دو در نظر گرفته می‌شود (اسکندر و همکاران، ۲۰۱۲). d فاصله‌ی فعلی بین نهر و رودخانه می‌باشد. مقدار X در رابطه (۹) متناظر با یک عدد تصادفی توزیع شده (یکنواخت و یا ممکن است هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و $(C \times d)$ می‌باشد. موقعیت جدید نهرها و رودخانه‌ها را می‌توان با روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه کرد:

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (10)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (11)$$

که در آن، $rand$ یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع شده بین صفر و یک است. اگر راه حل ارائه شده به وسیله‌ی یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر عوض می‌شود (یعنی نهر، رودخانه می‌شود و رودخانه، نهر). این تبادل نیز می‌تواند به همین شکل برای رودخانه‌ها و دریا اتفاق افتد.

$$Sp_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} + Q_{i,t} - S_{max\ i} & \text{if } S_{i,t} + Q_{i,t} > S_{max\ i} \\ 0 & \text{if } S_{i,t} + Q_{i,t} \leq S_{max\ i} \end{cases} \quad (17)$$

$$Loss_{i,t} = A_{i,t} \times (Ev_{i,t} - R_{i,t}) \quad (18)$$

$$A_{i,t} = a + b \times S_{i,t} + c \times S_{i,t}^2 \quad (19)$$

که در آنها، $Sp_{i,t}$ مقدار آب سرریز شده از مخزن سد i ام در ماه t ، $S_{i,t}$ حجم مخزن سد i ام در ابتدای دوره t ، $S_{max\ i}$ حجم مخزن سد i ام در رقوم حداکثر، $Q_{i,t}$ حجم آب ورودی به مخزن سد i ام در ماه t ، $Loss_{i,t}$ میزان تلفات مخزن سد i ام در ماه t ، $Ev_{i,t}$ ارتفاع تبخیر از دریاچه ی پشت سد i ام در ماه t ، $R_{i,t}$ ارتفاع بارش مخزن سد i ام در ماه t ، a ، b و c ضرایب رابطه ی حجم- سطح مخزن سد i ام می باشند.

رابطه ی پیوستگی: در تمامی مراحل بهینه سازی بهره وری از مخزن بایستی موازنه ی جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد:

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + Q_{1,t} - Re_{1,t} - Loss_{1,t} - Sp_{1,t} \quad (20)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + Q_{2,t} + Sp_{1,t} + (Re_{1,t} - De_{1,t}) - Re_{2,t} - Loss_{2,t} - Sp_{2,t} \quad (21)$$

که در آن، $S_{i,t+1}$ حجم مخزن سد i ام، در انتهای دوره ی t می باشد.

محدودیت متغیرهای تصمیم

$$S_{min\ i} \leq S_{i,t} \leq S_{max\ i} \quad (22)$$

$$Re_{min\ i,t} \leq Re_{i,t} \leq Re_{max\ i,t} \quad (23)$$

که در آنها، $Re_{min\ i,t}$ حداقل رهاسازی سد i ام در ماه t ، $S_{min\ i}$ حداقل حجم مخزن سد i ام و $Re_{max\ i,t}$ حداکثر رهاسازی سد i ام در ماه t می باشند. به منظور اعمال قیود (۲۲) و (۲۳) در مدل از توابع جریمه ی زیر استفاده شده است:

- تابع جریمه مربوط به حجم مخازن

$$Penalty1_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left(\frac{S_{i,t} - S_{min\ i}}{S_{min\ i}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} < S_{min\ i} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left(\frac{S_{i,t} - S_{max\ i}}{S_{max\ i}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} > S_{max\ i} \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \geq S_{min\ i} \text{ and } S_{i,t} \leq S_{max\ i} \end{cases} \quad (24)$$

- تابع جریمه مربوط به رهاسازی

جستجوی الگوریتم در منطقه ی کوچک تر در نزدیکی دریا می شوند. مقدار مناسب μ ، 0.1 تعیین شده است (اسکندر و همکاران، ۲۰۱۲).

معیار همگرایی در این پژوهش رسیدن به حداکثر تعداد تکرار برابر، ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

ساختار مدل بهینه سازی

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه سازی بهره برداری از مخزن، مقادیر خروجی بهینه ی ماهانه از مخازن سدها شده است: افق برنامه ریزی در این پژوهش ۶۰ ماه (دوره ۹۱-۸۶) در نظر گرفته: بنابراین، الگوریتم WCA در سامانه ی دو مخزنه، دارای ۱۲۰ متغیر می باشد. قیود ذکر شده برای هر دو مخزن یکسانند. معیار سنجش پاسخها مقایسه آنها با نیاز پایاب، و بهترین مقدار برای ذخیره در ماههای مختلف سال است. رهاسازی از مخازن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم، و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت می باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم آورد رود، ارتفاع تبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به صورت ماهانه می باشد. تابع هدف مدل بهینه سازی در این پژوهش به صورت کمینه سازی کل کمبود (کشاورزی، زیست محیطی و صنعت) در طول دوره ی آماری تعریف گردید. تابع هدف سامانه دو مخزنه مورد بررسی به صورت رابطه (۱۶) می باشد:

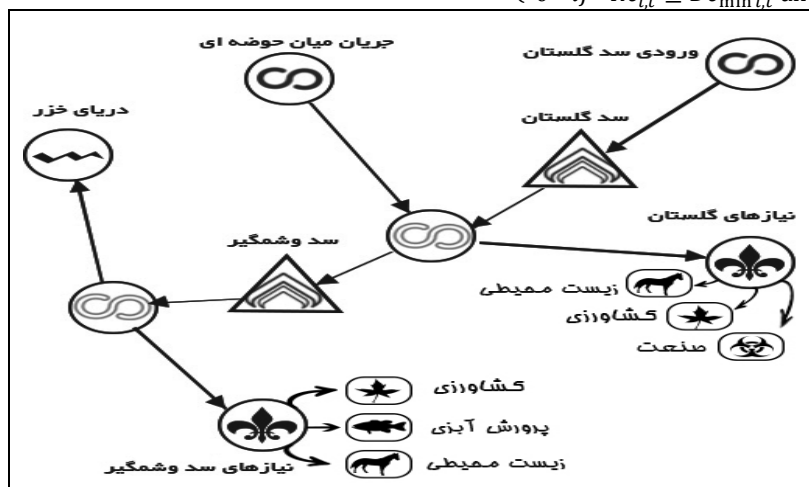
$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(Re) \\ & = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left(\frac{Re_{i,t} - De_{i,t}}{De_{max\ i}} \right)^2 + Penalty1_{i,t} \\ & \quad + Penalty2_{i,t} \end{aligned} \quad (16)$$

که $F(Re)$ مقدار تابع هدف (کمبود)، $Re_{i,t}$ حجم رهاسازی از مخزن سد i ام در ماه t ، $De_{i,t}$ مقدار نیاز سد i ام در ماه t ، $De_{max\ i}$ بیشینه نیاز سد i ام در طول دوره بهره وری، T طول دوره ی بهره وری، i تعداد مخازن، $Penalty1_{i,t}$ مقدار جریمه ی مربوط به حجم مخزن در سد i ام در ماه t و $Penalty2_{i,t}$ مقدار جریمه ی مربوط به حجم رهاسازی از مخزن سد i ام در ماه t می باشند. محدودیت های سامانه دو مخزنه مورد مطالعه در معادلات (۱۷) تا (۲۵) آورده شده اند.

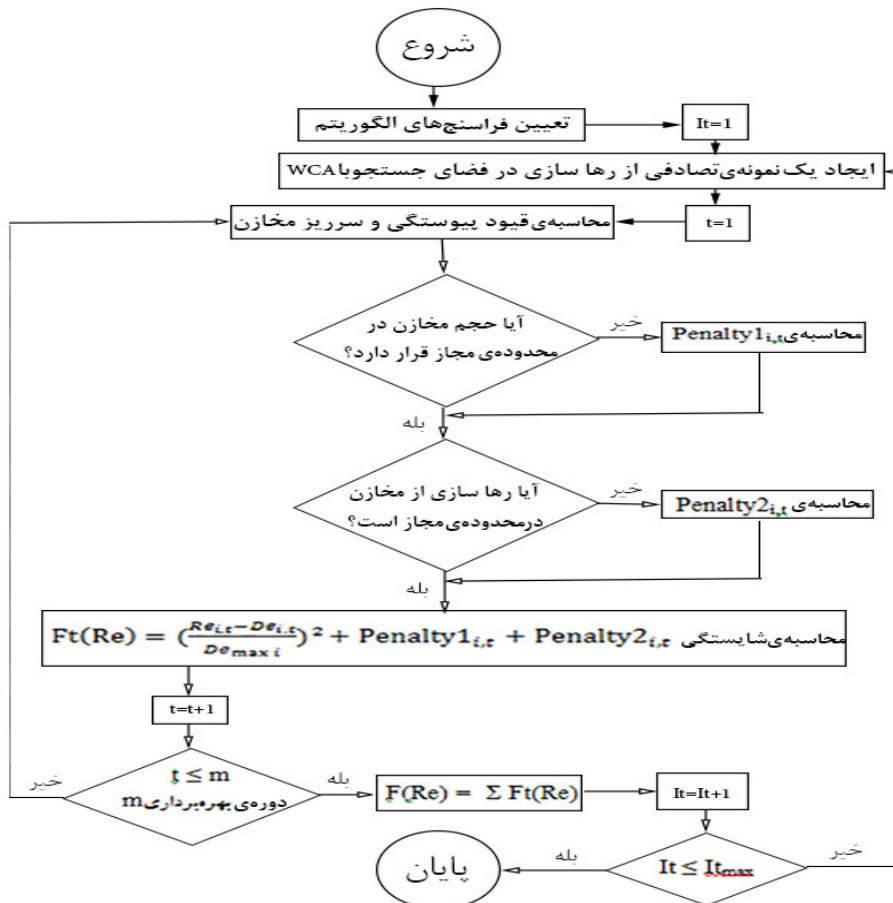
محدودیت مربوط به حجم سرریز به صورت رابطه های زیر اعمال می شوند:

که، $De_{min\ i,t}$ حداقل نیاز سد نام در ماه t و $De_{max\ i,t}$ حداکثر نیاز سد نام در ماه t می‌باشند. طرح‌واره مدل ساخته شده برای سامانه‌ی دو مخزنی (گلستان و وشمگیر) در شکل ۴ آورده شده است.

$$Penalty2_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left(\frac{Re_{i,t} - De_{min\ i,t}}{De_{min\ i,t}} \right)^2 & \text{if } Re_{i,t} < De_{m} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^2 \left(\frac{Re_{i,t} - De_{max\ i,t}}{De_{max\ i,t}} \right)^2 & \text{if } Re_{i,t} > De_{m} \\ 0 & \text{if } Re_{i,t} \geq De_{min\ i,t} \text{ and } Re_{i,t} \leq De_{ma} \end{cases} \quad (25)$$



شکل ۴- طرح‌واره مدل ساخته شده برای سامانه دو مخزنی گلستان و وشمگیر.



شکل ۵- نمودار گردش الگوریتم WCA در بهره‌وری از سامانه مخازن.

که در آن η بزرگی شکست، De_i مقدار نیاز در دوره i ، Re_i مقدار خروجی در دوره i و t تعداد کل دوره‌های بهره‌وری می‌باشد.

بحث و نتایج

برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های WCA، PSO و GA، که کدنویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شد، از چندین تابع محک معیار استفاده گردیده است. جدول ۲ نتایج پیاده‌سازی الگوریتم WCA و دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری را بر روی توابع محک معیار 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 ۱۰۰۰ می‌باشد.

نتایج جدول ۲ نشان دهنده عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر است. همان‌طور که در جدول ۲ 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 ۳۰ و ۱۲۰) عملکرد دو الگوریتم GA و PSO 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. این مسئله در تحقیق چنگ و پرایوگو (۲۰۱۴) نیز اشاره شده است که عملکرد الگوریتم‌های GA و PSO در مسائل با ابعاد بالا کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۲، 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 معیار، مدلی برای تخصیص بهینه‌ی سامانه‌ی مخازن سدهای گلستان و وشمگیر بر اساس الگوریتم WCA توسعه داده شد.

همچنین، در این پژوهش، به منظور ارزیابی نتایج حاصل از الگوریتم WCA در بهره‌وری از مخزن، نتایج به دست آمده با الگوریتم‌های شناخته شده‌ی PSO و GA نیز مورد مقایسه قرار گرفته اند. کدنویسی الگوریتم‌های مورد نظر در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R2014a) انجام شده است. برای تخمین بهترین تعداد

شکل ۵ نمودار گردشی الگوریتم WCA را در بهره‌وری از سامانه‌ی دو مخزنه گلستان و وشمگیر نشان می‌دهد.

شاخص‌های عملکرد مخزن

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

• قابلیت اعتمادپذیری

اعتمادپذیری را می‌توان به دو صورت زمانی و حجمی تعریف کرد. منظور از اعتمادپذیری زمانی، درصد دوره‌هایی است که سامانه به طور کامل نیازهای موجود را تأمین کرده و با شکست روبرو نمی‌شود. مقدار این فراسنج از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_t = \left(1 - \frac{NDe_f}{T}\right) \times 100, NDe_f = \text{تعداد } (\alpha \times De_t > Re_t) \quad (26)$$

که در آن NDe_f تعداد کل شکست‌های رخ داده در طول دوره‌ی بهره‌وری، De_t مقدار نیاز در دوره‌ی t ، Re_t مقدار خروجی دوره‌ی t ، α درصد تأمین نیاز و α_t اعتمادپذیری سامانه در طول دوره‌ی بهره‌وری می‌باشند. هر چه مقدار این فراسنج بیشتر باشد، قابلیت اعتماد زمانی سامانه 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 (۲۷) محاسبه می‌شود (هاشیموتو و همکاران، ۱۹۸۵). گاهی اوقات قابلیت اعتماد به صورت متمم خطر مطرح می‌شود (قابلیت اعتماد-۱=خطر).

$$\alpha_v = \frac{Re_t}{De_t} \times 100 \quad (27)$$

• آسیب پذیری

این شاخص نشان دهنده‌ی بزرگی شکست‌های سامانه است که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (هاشیموتو و همکاران، ۱۹۸۵).

$$\eta = \max \left\{ \frac{(De_i - Re_i)}{De_i} \right\}, i = 1, 2, \dots, t \quad (28)$$

۹۷/۱ درصد از نیازهای کل پایاب سدهای گلستان و وشمگیر، و شاخص‌های عملکرد مناسب نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در این پژوهش که در جدول ۶ آورده شده‌اند، عملکرد مناسب خود را در مسئله‌ی تخصیص بهینه‌ی سامانه‌ی مخازن به خوبی نشان می‌دهند، نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری از سامانه مخازن سدهای گلستان و وشمگیر در شکل ۷ آورده شده است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، الگوریتم چرخه‌ی آب نسبت به الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات سریع‌تر همگرا شده است.

شکل‌های ۸ و ۹ مقدار رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف را در مخازن گلستان و وشمگیر در طول دوره‌ی مورد مطالعه (سال آبی ۸۶ تا ۹۱) نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار رهاسازی به دست آمده از الگوریتم چرخه‌ی آب بسیار نزدیک به مقدار کل نیازهای پایاب سدهای مورد مطالعه بوده و حداقل کمبود در بین روش‌های دیگر مورد مطالعه را داشته است. میزان کل کمبودها برای سدهای گلستان و وشمگیر در روش WCA به ترتیب برابر با ۲/۲۶ و ۲/۹۳ درصد است در حالی که این مقادیر در روش PSO به ترتیب برابر با ۵/۷ و ۵/۵ درصد و در روش GA، برابر با ۱۲/۹ و ۱۲/۴ درصد می‌باشد. روش WCA نسبت به روش‌های GA و PSO از کمبودهای کم‌تری در بیش‌تر دوره‌ها برخوردار می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، الگوریتم GA در سامانه دو مخزنه مورد بررسی به خوبی نتوانسته است نیاز ماهانه‌ی پایاب سدهای گلستان و وشمگیر را تأمین کند، و در تعدادی از ماه‌ها دچار کمبود می‌باشد. در الگوریتم PSO، شدت و تعداد ماه‌هایی که سامانه با کمبود روبرو است به نسبت الگوریتم GA کمتر است.

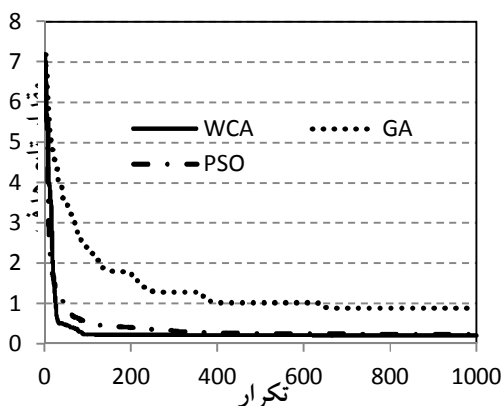
شکل ۱۰ مقادیر مبه وسیله‌ی کمبود سالانه‌ی مخزن سد گلستان و وشمگیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ (الف) شدت کمبودها در الگوریتم GA، نسبت به دو الگوریتم دیگر بیشتر بوده است. مقدار حداکثر کمبود در الگوریتم‌های WCA، GA و PSO به ترتیب ۵/۳۴، ۱۹/۵۸ و ۱۱/۵ (MCM) می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ (ب)، مقدار حداکثر کمبود در الگوریتم‌های WCA، GA و PSO به ترتیب ۱۰/۱، ۲۰/۵ و ۱۷/۹۷ (MCM) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار کمبودها در الگوریتم WCA نسبت به دو الگوریتم دیگر پایین‌تر بوده است.

جمعیت اولیه، تحلیل حساسیت نسبت به جمعیت اولیه از ۵۰ تا ۴۰۰ مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۶ آمده‌اند.

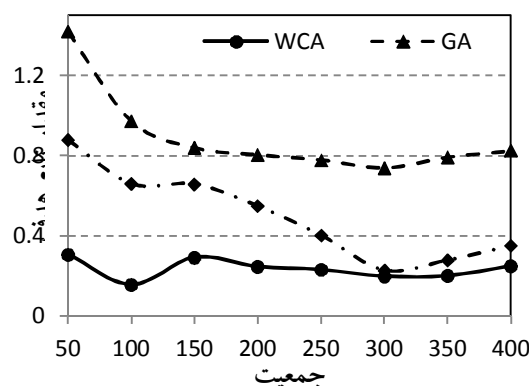
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های GA و PSO با ۳۰۰ جمعیت اولیه مناسب‌ترین مقدار تابع هدف را در مسئله‌ی بهره‌وری از مخزن ارائه کرده‌اند. این در حالی است که الگوریتم WCA با تغییر جمعیت اولیه نوسان کمتری را در تابع هدف داشته است، که نشان می‌دهد این الگوریتم حساسیت کمتری را نسبت به تعداد جمعیت اولیه دارد. به منظور حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، اندازه‌ی جمعیت اولیه برای هر الگوریتم بهترین مقدار به دست آمده از شکل ۶ تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. بهترین مقادیر فراسنج‌های اولیه‌ی الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله‌ی بهره‌وری از سامانه مخازن سدهای گلستان و وشمگیر، که با تحلیل حساسیت برای آنها به دست آمد، در جداول ۳ تا ۵ نشان داده شده‌اند.

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، تعداد جمعیت اولیه در الگوریتم WCA برابر با ۱۰۰، و در الگوریتم‌های GA و PSO برابر ۳۰۰ محاسبه شده است. میانگین مقادیر تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از ۵۰ بار اجرای مختلف الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش، در جدول ۶ ارائه شده است. تعداد تکرار در سه الگوریتم برابر ۱۰۰۰ و تعداد ارزیابی تابع هدف در الگوریتم‌های WCA، PSO و GA به ترتیب برابر با ۱۰۰۱۰۰، ۳۰۰۳۰۰ و ۳۳۰۳۰۰ بوده‌اند.

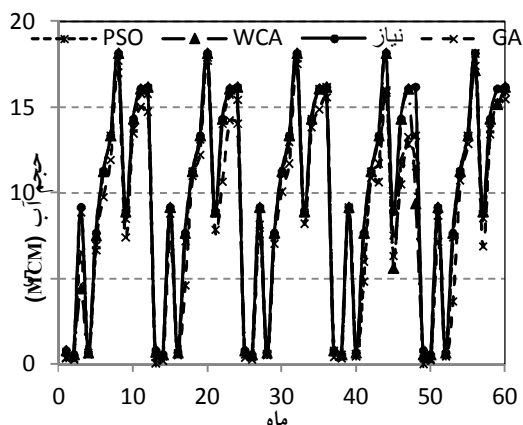
همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف در الگوریتم چرخه‌ی آب برابر با ۰/۱۶ به دست آمده، در حالی که مقدار تابع هدف محاسبه شده با استفاده از الگوریتم‌های GA و PSO به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۲۳ بوده است. دلیل این امر می‌تواند با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ عملکرد پائین الگوریتم‌های GA و PSO در مسائل با ابعاد بزرگ باشد. الگوریتم WCA با رفع این ضعف توانسته است که نتایج قابل قبولی را در مسائل با ابعاد بزرگ در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر داشته باشد. همچنین، شاخص‌های عملکرد (قابلیت اعتماد و آسیب‌پذیری) محاسبه شده در جدول ۶ عملکرد مناسب‌تر الگوریتم WCA را نسبت به دو الگوریتم دیگر نشان می‌دهد. الگوریتم چرخه‌ی آب به ترتیب با تأمین ۹۷/۷ و



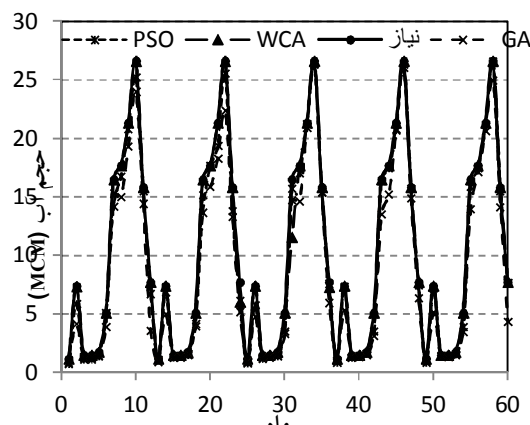
شکل ۷- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌وری از سامانه مخازن.



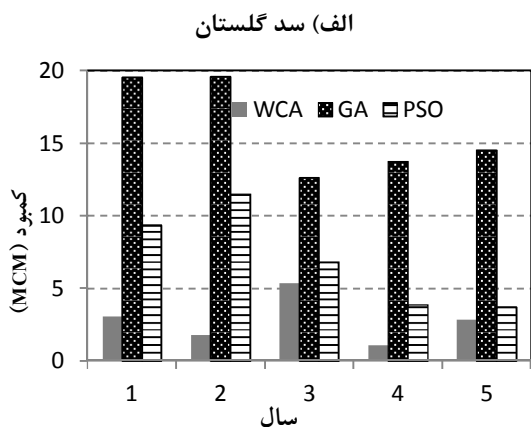
شکل ۶- روند تغییرات مقدار تابع هدف در الگوریتم‌های مورد بررسی.



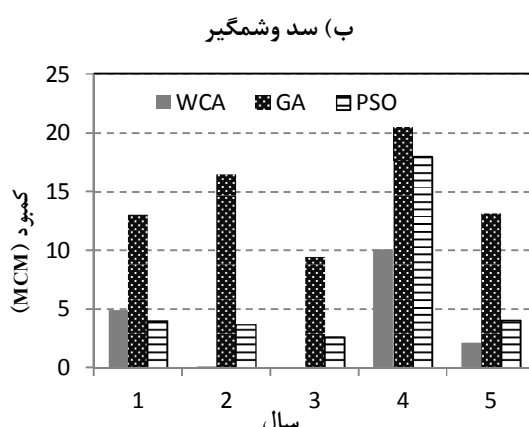
شکل ۹- مقدار رهاسازی حاصل از الگوریتم‌های مختلف در مقابل نیاز سد وشمگیر.



شکل ۸- مقدار رهاسازی حاصل از الگوریتم‌های مختلف در مقابل نیاز سد گلستان.



الف) سد گلستان



ب) سد وشمگیر

شکل ۱۰- مقدار کمبود مخزن به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف.

مسئله تخصیص بهینه‌ی سامانه‌ی مخازن سد های 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

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از الگوریتم چرخه‌ی آب (به عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری جدید)، پس از بررسی کارآمدی آن به وسیله‌ی تعدادی توابع محک معیار، در حل

جدول ۲- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای توابع محک معیار

تابع	رابطه	بعد	مقدار بهینه	WCA	GA	PSO
Goldsten-Price	$F_1(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] \times [30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	۲	۳	۳	۳/۰۰۰۴	۳
Mccormick	$F_2(x) = \sin(x_1 + x_2) + (x_1 + x_2)^2 - 1.5x_1 + 2.5x_2 + 1$	۲	-۱/۹۱۳۳	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲
Rosenbrock	$F_3(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	۲	۰	$8/91 \times 10^{-9}$	$2/35 \times 10^{-5}$	۰
Rosenbrock	=	۱۰	۰	$4/064 \times 10^{-7}$	۴/۵۵	۰/۰۳۵
Rosenbrock	=	۳۰	۰	$2/82 \times 10^{-6}$	۲۵/۵۲	۰/۰۸۷
Rosenbrock	=	۱۲۰	۰	$2/21 \times 10^{-5}$	۴۹۷/۷	۱۰۱/۶۲
Shekel	$F_4(x) = - \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^4 (x_j - C_{ji})^2 + \beta_i \right)^{-1}$	۴	-۱/۰۵۳۶۴	-۱/۰۵۳۲	-۱/۰۴۳۴	-۱/۰۵۳۲
Six-Hump Camel	$F_5(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$	۲	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶

جدول ۳- مقادیر فراسنج‌های الگوریتم WCA در بهره‌وری از سامانه دو مخزنه

تعداد تکرار	تعداد قطرات باران	تعداد رودخانه‌ها و دریا	تعداد متغیرهای تصمیم	CI	d_{max}
۱۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۱۲۰	۲	۱

جدول ۴- مقادیر فراسنج‌های الگوریتم GA در بهره‌وری از سامانه دو مخزنه

تعداد تکرار	اندازه‌ی جمعیت	تعداد ژن‌ها	نرخ جهش	نرخ توزیع (ادغام)
۱۰۰۰	۳۰۰	۱۲۰	۰/۰۱	۰/۸

جدول ۵- مقادیر فراسنج‌های الگوریتم PSO در بهره‌وری از سامانه دو مخزنه

تعداد تکرار	اندازه‌ی جمعیت	تعداد متغیرهای تصمیم	C1	C2
۱۰۰۰	۳۰۰	۱۲۰	۱/۴۹	۱/۴۹

جدول ۶- مقدار تابع هدف و شاخص های عملکرد مخزن حاصل از اجرای الگوریتمها

الگوریتم	زمان اجرا (S)	تابع هدف	کمبود گلستان (MCM)	کمبود وشمگیر (MCM)	قابلیت اعتماد گلستان		قابلیت اعتماد وشمگیر		آسیب پذیری (درصد)			
					حجمی	زمانی	حجمی	زمانی	گلستان	وشمگیر		
											$\alpha = 0/95$	$\alpha = 0/9$
WCA	۶۹/۹	۰/۱۶	۱۴	۱۷/۲	۹۷/۷	۹۵	۹۳/۳	۹۷/۱	۹۱/۷	۸۸/۳	۳۳	۶۹
GA	۱۷۲/۶	۰/۷۴	۷۹/۹	۷۲/۶	۸۷/۱	۲۶/۷	۱۱/۷	۸۷/۶	۳۸/۳	۱۸/۳	۵۳/۴	۶۵/۳
PSO	۱۷۱/۲	۰/۲۳	۳۵/۲	۳۲/۳	۹۴/۳	۵۰	۵۸/۳	۹۴/۵	۶۶/۷	۶۳/۳	۳۶/۴	۹۵/۴

حاصل از اجرای این الگوریتم با روش های فرا ابتکاری دیگر از قبیل GA و PSO مورد مقایسه قرار گرفت.

میزان خروجی حاصل از اجرای الگوریتم های WCA، GA و PSO به ترتیب قادر به تأمین ۹۷/۷۳، ۸۷/۰۷ و ۹۴/۳ درصد از نیاز کل پایاب سد گلستان و تأمین ۹۷/۰۶، ۸۷/۵۹ و ۹۴/۴۷ درصد از نیاز کل پایاب سد وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه (دوره ۸۶ تا ۹۱) می باشد که عملکرد مناسب تر الگوریتم WCA را نسبت به دو الگوریتم دیگر نشان می دهد. همچنین، میزان حجم کل کمبودها در کل دوره ۵ ساله برای روش های WCA، GA و PSO به ترتیب برابر با ۱۴/۰۲۱، ۷۹/۹۳ و ۳۵/۲ (MCM) برای سد گلستان و ۱۷/۱۷ و ۷۲/۵۶ و ۳۲/۲۹ (MCM) برای سد وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه می باشد. با توجه به نتایج حاصل، کمترین حجم کمبود مربوط به الگوریتم WCA، و بیشترین حجم کمبود مربوط به الگوریتم GA می باشد. قابلیت اعتماد زمانی ($\alpha = 0/9$) در روش های WCA، GA و PSO به ترتیب برابر با ۹۵، ۲۶/۶۷ و ۵۸/۳۳ درصد برای سد گلستان و ۹۱/۶۷، ۳۸/۳۳ و ۶۶/۶۷ درصد برای سد وشمگیر می باشد، بنابراین، الگوریتم WCA دارای قابلیت بالایی در مسئله تخصیص بهینه سامانه ی دو مخزنه در بین الگوریتم های دیگر مورد بررسی می باشد.

منابع

- ۱) اطلس منابع آب ایران. ۱۳۸۷. گزارش مطالعات منابع آب حوزه رودخانه های قره سو و گرگان رود. آب منطقه ای استان گلستان.
- ۲) شرکت آب منطقه ای استان گلستان. ۱۳۹۲. دفتر مطالعات پایه منابع آب، مطالعات سیمای سدهای گرگان رود.

۳) شفیعی، م.، بزرگ حداد، ا.، و افشار، ع. ۱۳۸۶. بررسی ساختارهای جدید از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی بهره برداری از مخازن. مجله فناوری و آموزش، ۱(۱): ۱۲۲-۱۱۷.

۴) قادری، ک.، زلفی، آ.، و بختیاری، ب. ۱۳۹۳. بهینه سازی بهره برداری از سیستم چند مخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعه موردی: حوضه کرخه). مجله مدیریت آب و آبیاری، ۴(۲): ۲۲۸-۲۱۵.

۵) مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا.، مساعدی، ا.، و اسلامی، ح.ر. ۱۳۹۰. تعیین کمبود حجم بهینه مخزن سد وشمگیر در سیستم بهره برداری چند سدی. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۱): ۲۳۰-۲۱۵.

۶) نجفی، م.ر.، هاشم پور، ج.، و خیاط خلقی، م. ۱۳۸۴. بهره برداری بهینه از مخزن با استفاده از مدل برنامه ریزی خطی و کاربرد آن در سد وشمگیر. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲(۵): ۳۵-۲۷.

۷) نوروزی، ب.، بارانی، غ.ع.، مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا. ۱۳۹۰. بهینه سازی بهره برداری از یک سیستم چند مخزنه به روش الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی مطالعه موردی (سدهای گلستان و وشمگیر). مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۴): ۴۳-۶۲.

8) Afshar, M.H. and 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.

9) Ajibola, A.S. and Adewumi, A.O. 2014. Review of population based metaheuristics in multi-objective optimization problems. Int'l Journal of Computing. Communications & Instrumentation Engg. 1(1): 126-128.

10) Ashofteh, P., Bozorg-Haddad, O. and Loáiciga, H. 2015. Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with

- 22) Kumar, D.N. and Reddy, M.J. 2006. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation. *Journal of Water Resources Management*. 20(6): 879-898.
- 23) Oliveira, R. and Loucks, D.P. 1997. Operating rules for multi-reservoir system. *Journal of Water Resources Research*. 33(4): 839-852.
- 24) Pradhan, S.N. and Tripathy, U.K. 2013. Optimization of the operating policy of the multipurpose Hirakud Reservoir by genetic algorithm. *American Journal of Engineering Research*. 2(11): 260-266.
- 25) 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.
- 26) Sonaliya, S. and 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*. 3(6): 13681-13687.
- 27) Tinoco, V., Willems, P., Wyseure, G. and Cisneros, F. 2016. Evaluation of reservoir operation strategies for irrigation in the Macul Basin, Ecuador. *Journal of Hydrology. Regional Studies*. 5(2016) 213-225.
- 28) Wardlaw, R. and Sharif, M. 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 125(1): 25-33.
- 29) Wurbs, R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 119(4): 455-472.
- 30) Yeh, W.G. 1985. Reservoir management and operation models: State-of-the-art review. *Journal of Water resource Research*. 21(12): 1797-1818.
- 31) Zhang, X., Yu, X. and Qin, H. 2016. Optimal operation of multi-reservoir hydropower systems using enhanced comprehensive learning particle swarm optimization. *Journal of Hydro-environment Research*. 10(2016) 50-63.
- multiobjective genetic programming. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000540, 04015030.
- 11) Baghipour, R., Hosseini, S.M. and 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*. 4(11): 430-454.
- 12) Baltar, A.M. and Fontane, D.G. 2008. Use of multi-objective particle swarm optimization in water resources management. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 134(3): 265-275.
- 13) Bozorg-Haddad, O., Moravej, M. and Loáiciga, H.A. 2014. Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000832, 04014064.
- 14) Chang, J.X., Huang, Q. and Wang, Y.M. 2005. Genetic algorithms for optimal reservoir dispatching. *Journal of Water Resources Management*. 19:321-331.
- 15) Cheng, M.Y. and Prayogo, D. 2014. Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Journal of Computers & Structures*. 139: 98-112.
- 16) Esat, V. and Hall, M.J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithm. *Hydro informatics*. 94:225-231.
- 17) Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. and Hamdi, M. 2012. Water cycle algorithm -A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers and Structures*. 110(111): 151-166.
- 18) Fallah-Mehdipour, E., Bozorg-Haddad, O. and 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.
- 19) Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H. and Mariño, M. 2016. Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001064, 04016041.
- 20) 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.
- 21) Labadie, J.W. 2004. Optimal operation of multi-reservoir system: State of the art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130(2): 93-111.