نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره پنجم / تابستان ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 5 / September 2015

بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با استفاده از دو الگوریتم چرخه آب (WCA) و جستجوی گرانشی(GSA) (مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگان‌رود)

سعید اکبری فرد[۱]
کورش قادری*[۲]
مریم علیان‌نژاد[۳]

چکیده

یکی از مسائل مهم بهینه‌سازی در زمینه مدیریت منابع آب، مسئله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها است. در این پژوهش از الگوریتم فرا ابتکاری چرخه آب (WCA) برای یافتن استراتژی‌های تخصیص بهینه منابع آب در سیستم دو مخزنه سدهای گلستان و وشمگیر واقع در حوضه آبریز گرگان‌رود (شمال ایران)، برای یک دوره 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 استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود توسعه داده شد. تابع هدف در سیستم مورد مطالعه به‌صورت کمینه‌سازی کل کمبود در طول دوره آماری تعریف شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، از شاخص‌های عملکرد قابلیت اعتماد زمانی، حجمی و آسیب‌پذیری استفاده شده است. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج الگوریتم جستجوی گرانشی(GSA) و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) مقایسه شده است. روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب قادر به تأمین ۹۷/۷۳، ۸۵/۲۶ و ۷۶/۷۸ درصد از نیاز کل پایین‌دست سد گلستان و تأمین ۹۷/۰۶، ۸۹/۳۱ و ۶۸/۲۹ درصد از نیاز کل پایین دست سد وشمگیر بودند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با دیگر روش‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن است.

واژه‌های کلیدی

الگوریتم چرخه آب، الگوریتم جستجوی گرانشی، بهره‌برداری بهینه، حوضه گرگان‌رود، سد گلستان و وشمگیر

.

۱.دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۲.استادیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان kouroshqaderi@uk.ac.ir
۳.دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۴

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

مقدمه

برای تعریف سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. اکثر روش‌های بهینه‌سازی از فن‌های ریاضی برای پیدا کردن بهترین پاسخ‌های امکان‌پذیر بر اساس عملکرد تابع هدف و قیود بهره می‌گیرند. انتخاب روش بهینه‌سازی به خصوصیات سیستم در نظر گرفته‌شده، در دسترس بودن داده‌ها، نوع تابع هدف، قیود و متغیرها بستگی دارد (لابادیه[۱]، ۲۰۰۴). در چند دهه اخیر روش‌های متعدد بهینه‌سازی توسط محققان مختلف در سراسر دنیا توسعه یافته است.

یه[۲] (۱۹۸۵)، وربز[۳] (۱۹۹۳) و لابادیه (۲۰۰۴) مروری کلی بر انواع روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در مهندسی منابع آب و به ویژه بهره‌برداری از مخازن انجام داده‌اند. ایسات و هال[۴] (۱۹۹۴) 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. اولیویرا و لاکس[۵] (۱۹۹۷) و چانگ و همکاران[۶] (۲۰۰۵) نیز از الگوریتم ژنتیک برای استخراج منحنی فرمان در سامانه‌های چندمخزنه استفاده نمودند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک بوده است. کومار و ردی[۷] (۲۰۰۶) برای استخراج سیاست بهره‌برداری برای یک مخزن چندمنظوره از الگوریتم مورچگان (ACO) استفاده کردند. نتایج، عملکرد مناسب الگوریتم ACO را نشان می‌دهد. ردی و کومار (۲۰۰۷) با استفاده از الگوریتم گروه ذرات (PSO) مسئله بهره‌برداری مخزن با اهداف کشاورزی و تولید انرژی برقابی را مورد بررسی قرار داده‌اند. بالتر و فونتن[۸] (۲۰۰۸) از الگوریتم چندهدفه گروه ذرات (MOPSO) برای بهره‌برداری کیفی از مخزن سد با سه تابع هدف استفاده نمودند. افشار و مطاعی[۹] (۲۰۱۱) با استفاده از الگوریتم انفجار بزرگ- انهدام بزرگ (BB-BC) به بهره‌برداری بهینه از مخزن دز در ایران پرداختند. نتایج نشان دهنده کارایی و قدرت بالای الگوریتم مورد بررسی در حل مسئله بهره‌برداری از مخزن نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی بوده است. پرادهان و تریپاتی[۱۰] (۲۰۱۳) به بهره‌برداری بهینه چندمنظوره از مخزن هیدراکود با استفاده از GA پرداختند. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک با سیاست فعلی بیانگر توانایی و تأثیر GA است. فلاح مهدی‌پور و همکاران[۱۱] (۲۰۱۳)، یک قاعده بهره‌برداری مؤثرتر نسبت به الگوریتم ژنتیک (GA) در سیستم سد- آبخوان بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) توسعه دادند. نتایج نشان داد که مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده ۲۶ درصد بهتر نسبت به قاعده الگوریتم ژنتیک معمولی (GA) بوده است. سونالیا و سوریانارایانا[۱۲] (۲۰۱۴) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهره‌برداری بهینه از مخزن یوکای[۱۳] در هند پرداختند. نتایج نشان داد که GA می‌تواند به‌طور کامل نیازهای پایین‌دست آبیاری را تأمین کند و رهاسازی را به حداقل برساند که منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در آب می‌شود. آجیبولا و آدیومی[۱۴] (۲۰۱۴) مروری کلی بر مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش فراابتکاری مبتنی بر جمعیت انجام دادند. آن ها از GA و PSO برای این منظور استفاده کردند.

نجفی و همکاران (۱۳۸۴) به بهره‌برداری بهینه از مخزن سد وشمگیر با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی پرداختند. نتایج نشان داد که سیاست بهره‌برداری کنونی مخزن تنها در ماه‌های پر آب توانایی تأمین نیازها را دارد، درصورتی‌که ماه‌های بحرانی مصرف، ماه‌های کم‌آب هستند. بزرگ حداد و افشار (۱۳۸۷) از الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌سازی و طراحی از مخازن چندگانه هیدروالکتریک استفاده کردند. مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۹۰) 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 نیست ولی در شرایط آتی به دلیل پر شدن سد گلستان از رسوبات برای بهره‌برداری بهینه از

[1] Labadie
[2] Yeh
[3] Wurbs
[4] Esat & Hall
[5] Oliveira & Loucks
[6] Chang
[7] Kumar & Reddy
[8] Baltar & Fontane
[9] Afshar & Motaei
[10] Pradhan & Tripathy
[11] Fallah-Mehdipour et al.
[12] Sonaliya & Suryanarayana
[13] Ukai
[14] Ajibola & Adewumi

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

سدهای گلستان و وشمگیر، افزایش ظرفیت حجم سد وشمگیر تا حدود ۹ میلیون مترمکعب ضروری است. نوروزی و همکاران (۱۳۹۰) از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چندمخزنه با تمرکز بر دو سد گلستان و وشمگیر استفاده کردند. نتایج حاصل از ضریب اطمینان کارایی سیستم، عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک را نشان داد. قادری و همکاران (۱۳۹۳) از الگوریتم تکاملی رقابتی جوامع (SCE) و الگوریتم ژنتیک (GA) در بهره‌برداری بهینه از سیستم سه‌مخزنی حوضه کرخه استفاده نمودند.

الگوریتم جستجوی گرانشی[1] (GSA) توسط راشدی و نظام‌آبادی پور (۱۳۸۶) بر پایه قانون گرانش نیوتن مطرح شد. راشدی و همکاران (۱۳۸۶) از الگوریتم GSA برای انتخاب ویژگی تصاویر استفاده نمودند. عباسیان و نظام‌آبادی‌پور (۱۳۹۰) الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه را برای مرتب‌سازی جبهه‌های مغلوب نشده برای توابع محک استاندارد به کار گرفتند.

الگوریتم چرخه آب[2] (WCA) یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که توسط اسکندر و همکاران[3] (۲۰۱۲)، بر پایه چرخه آب یا چرخه هیدرولوژیکی در طبیعت ارائه شد. مفاهیم بنیادی و ایده‌هایی که زیربنای روش پیشنهادی است از طبیعت و بر اساس مشاهدات از فرآیند چرخه آب و جریان رودخانه‌ها و نهرها به دریا در جهان واقعی الهام گرفته شده است. کاربردهای بسیار کمی از این الگوریتم و به ویژه در زمینه مهندسی منابع آب گزارش شده است. اسکندر و همکاران (۲۰۱۲) الگوریتم چرخه آب را برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید مهندسی پیشنهاد دادند و اثربخشی WCAرا بیشتر از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازلحاظ تلاش‌های محاسباتی و دقت در مقدار تابع هدف در مطالعه تطبیقی نشان دادند. اسکندر و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم چرخه آب در بهینه‌سازی وزن سازه خرپا استفاده کردند و نشان دادند که الگوریتم ارائه‌شده قادر به دستیابی به راه‌حل‌های بهینه بهتر و سرعت همگرایی بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر است. باقی پور و همکاران[4] (۲۰۱۴) برای تخصیص بهینه در مسائل زیست‌محیطی از الگوریتم چرخه آب استفاده کردند. بزرگ حداد و همکاران[5] (۲۰۱۴) با استفاده از الگوریتم چرخه آب به بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن کارون ۴ و یک سیستم چهار مخزنه در ایران پرداختند. نتایج نشان‌دهنده همگرایی و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم است. در جدول (۱) نتایج و دستاوردهای محققان گذشته به‌صورت خلاصه آورده شده است.

جدول (۱): خلاصه نتایج و دستاوردهای محققان پیشین

پژوهشگران	سال	روش‌های مورداستفاده	نتیجه پژوهش
ایسات و هال	۱۹۹۴	و GAبه‌کارگیری الگوریتم در یک سیستم DPروش چهار مخزنه	عملکرد مناسب GAالگوریتم
اولیویرا و لاکس	۱۹۹۷	جهت استخراج GAبه‌کارگیری منحنی فرمان سیستم چند مخزنه	عملکرد مناسب GAالگوریتم
چانگ و همکاران	۲۰۰۵	برای استخراج GAبه‌کارگیری منحنی فرمان سیستم چند مخزنه	عملکرد مناسب GAالگوریتم
کومار و ردی	۲۰۰۶	به‌کارگیری الگوریتم جهت بهره‌برداری ACO مخزن چندمنظوره	عملکرد مناسب ACOالگوریتم
ردی و کومار	۲۰۰۷	در PSOبه‌کارگیری الگوریتم بهره‌برداری مخزن چندمنظوره	عملکرد مناسب PSOالگوریتم
بالتر و فونتن	۲۰۰۸	استفاده از الگوریتم در بهره‌برداری MOPSO کیفی از مخزن	عملکرد مناسب الگوریتم MOPSO
افشار و مطاعی	۲۰۱۱	BB-BCاستفاده از الگوریتم در بهره‌برداری از مخزن سد دز	کارایی خوب BB-BCالگوریتم
پرادهان و تریپاتی	۲۰۱۳	بهره‌برداری چندمنظوره از GAمخزن هیراکود با	در GAتوانایی تأمین نیازها
فلاح مهدی پور و همکاران	۲۰۱۳	و GAمقایسه روش‌های در بهره‌برداری از مخزن GP	عملکرد مناسب‌تر GAنسبت به GP
سونالیا و سوریانارایانا	۲۰۱۴	بهره‌برداری از مخزن یوکای با GA	عملکرد مناسب GAالگوریتم
بزرگ حداد و افشار	۱۳۸۷	بهره‌برداری و طراحی مخازن GAچندگانه با	عملکرد مناسب GAالگوریتم
مفتاح هلقی و همکاران	۱۳۹۰	به‌کارگیری برنامه‌ریزی خطی جهت حجم بهینه مخزن سد وشمگیر	نیاز به افزایش حجم مخزن در آینده
نوروزی و همکاران	۱۳۹۰	در بهره‌برداری GAاستفاده از از سیستم مخازن گلستان و وشمگیر	عملکرد مناسب GAالگوریتم
قادری و همکاران	۱۳۹۳	و SCEبه‌کارگیری الگوریتم در بهره‌برداری از سیستم GA سه مخزنه کرخه	عملکرد مناسب‌تر نسبت به SCE GA
اسکندر و همکاران	۲۰۱۲	استفاده از الگوریتم برای حل مسائل WCA بهینه‌سازی مقید مهندسی	اثربخشی بیشتر از WCA دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر

[1] Gravitational Search Algorithm
[2] Water Cycle Algorithm
[3] Eskandar
[4] Baghipour.
[5] Bozorg Haddad

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

پژوهشگران	سال	روش‌های مورداستفاده	نتیجه پژوهش
اسکندر و همکاران	۲۰۱۳	استفاده از الگوریتم WCA برای بهینه‌سازی وزن سازه خرپا	عملکرد مناسب الگوریتمWCA
باقی پور و همکاران	۲۰۱۴	استفاده از الگوریتمWCA برای تخصیص بهینه در مسائل زیست‌محیطی	عملکرد مناسب الگوریتمWCA
بزرگ حداد و همکاران	۲۰۱۴	استفاده از الگوریتم چرخه آب برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن کارون ۴ و یک سیستم چهار مخزنه	همگرایی و قابلیت اطمینان بالای الگوریتمWCA

در پژوهش حاضر کاربرد الگوریتم چرخه آب(WCA)، به‌عنوان 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 داده‌شده نتایج حاصل از اجرای آن با الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) مورد مقایسه قرار گرفته است. کدنویسی الگوریتم‌هایWCA وGSA در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R2014a) انجام شد. همچنین برای بررسی کارآمدی روش‌های 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

مشخصات عمومی حوضه مطالعاتی

حوضه آبریز گرگان‌رود از شریان‌های اصلی شمال کشور و استان گلستان است 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 ۳۵۹/۴ کیلومتر و پهنه 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 رودخانه گرگان‌رود نشان می‌دهد. سد وشمگیر، قدیمی‌ترین سد استان گلستان بوده که در سال ۱۳۴۹ 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 ۴۷ و قابلیت تنظیم سالیانه آن ۱۱۷ میلیون مترمکعب است. سد مخزنی گلستان در بالادست سد وشمگیر و در محدوده دشت گرگان در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال شرقی گنبدکاووس واقع شده است. مخزن سد در ابتدای ساخت حدود ۸۶ میلیون مترمکعب ظرفیت ذخیره داشته و حجم مخزن به هنگام سیلاب برابر ۱۳۵ میلیون مترمکعب طراحی شده است. به دلیل حجم رسوبات وارده به سد طی سال‌های اخیر به ویژه در سیل سال ۱۳۸۰، ظرفیت ذخیره سد به ۶۲ میلیون مترمکعب کاهش یافته و قابلیت تنظیم سالیانه آن ۱۱۵ میلیون مترمکعب است. جدول(۲) مشخصات عمومی سدهای وشمگیر و گلستان در حوضه آبریز گرگان‌رود را نشان می‌دهد (آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۹۳). نیازهای پایین‌دست سد گلستان شامل کشاورزی، صنعت، رهاسازی برای سد وشمگیر و زیست‌محیطی است. نیازهای پایین‌دست سد وشمگیر شامل کشاورزی، آبزی‌پروری مخزن، آبزی‌پروری شبکه، زیست‌محیطی و سایر نیازها است.

جدول (۲): مشخصات عمومی سدهای گلستان و وشمگیر

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

سطح آزاد آب دریاچه در هر دوره زمانی به‌عنوان تابعی از حجم ذخیره در همان دوره در نظر گرفته می‌شود که از منحنی حجم-

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

سطح مخزن به دست می‌آید. در این مطالعه رابطه حجم- سطح به‌صورت یک تابع توانی درجه دوم بیان شده است. رابطه حجم- سطح برای سدهای گلستان و وشمگیر به ترتیب در روابط (۱) و (۲) ارائه شده است.

$$A_1 = -0.0037V_1^2 + 0.4568V_1 + 1.2026 \quad (۱)$$

$$A_2 = -0.0114V_2^2 + 0.464V_2 - 0.0505 \quad (۲)$$

که A_1 و A_2 به ترتیب سطح و V_1 و V_2 حجم مخزن گلستان و وشمگیر هستند. ضریب تبیین (R^2) روابط (۱) و (۲) به ترتیب برابر با ۰/۹۹۱۹ و ۰/۹۹۹۵ محاسبه شده است. با توجه به ضریب تبیین به‌دست‌آمده روابط (۱) و (۲) از نظر آماری اطمینان بالایی داشته و برای محاسبه حجم تبخیر قابل‌قبول هستند.



شکل (۱): نقشه موقعیت سدهای وشمگیر و گلستان در حوضه گرگان‌رود

الگوریتم چرخه آب (WCA)

مشابه دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، روش WCA نیز با جمعیت اولیه به‌اصطلاح قطرات باران شروع می‌شود. در ابتدا، فرض می‌شود که باران یا بارش وجود دارد. بهترین فرد (بهترین قطره آب) به‌عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن، تعدادی از قطرات باران خوب به‌عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران به‌عنوان 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 GA و PSO اصطلاحاً چنین آرایه‌ای به ترتیب «کروموزوم» و «موقعیت ذرات» نامیده می‌شوند. در یک مسئله بهینه‌سازی چند بعدی، یک قطره باران، آرایه‌ای به شکل $N_{var}\times 1$ است. این آرایه به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Raindrop = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{Nvar}] \quad (۳)$$

که، X_1 تا X_{Nvar} بیانگر متغیرهای تصمیم هستند. برای شروع، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه $N_{pop}\times N_{var}$ به‌طور تصادفی ایجاد می‌گردد.

$$Population\ of\ raindrops = \begin{bmatrix} Raindrop_1 \\ Raindrop_2 \\ \vdots \\ Raindrop_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 X_2^1 X_3^1 & \cdots & X_{N_{var}}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} X_2^{N_{pop}} X_3^{N_{pop}} & \cdots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

که، N_{pop} و N_{var} به ترتیب تعداد قطرات باران(جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی هستند. مقادیر تابع هزینه (C)، از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$C_i = Cost_i = f\left(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{Nvar}^i\right) \ , i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (۵)$$

که، Ci مقدار هدف هر قطره است. در گام اول، به تعداد N_{pop} قطره باران ایجاد و سپس به تعداد N_{SR} از بهترین قطرات (حداقل ارزش) به‌عنوان دریا و رودخانه انتخاب می‌شوند. قطره باران با کمترین مقدار به‌عنوان دریا در نظر گرفته می‌شود. N_{SR}، مجموع تعداد رودخانه‌ها (که یک پارامتر کاربردی است) و یک دریا (رابطه ۶) هستند. بقیه جمعیت (نهرهایی که ممکن است به رودخانه‌ها و یا به‌طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند) با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$N_{SR} = Number\ of\ Rivers + \overset{sea}{\overbrace{1}} \quad (۶)$$

$$N_{Raindrops} = N_{pop} - N_{SR} \quad (۷)$$

به منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودخانه‌ها و دریا، بسته به شدت جریان از رابطه (۸) استفاده می‌شود.

$$NS_n = round\left\{\left|\frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} Cost_i}\right| \times N_{Raindrops}\right\} \ , \ n = 1, 2, \dots, N_{SR} \quad (۸)$$

که، N_{Sn} 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 به‌طور تصادفی انتخاب شده، جریان می‌یابد که این فاصله با توجه به رابطه (۹) مشخص می‌شود.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

$$X \in (0, C \times d), \qquad C > 1 \qquad (۹)$$

که، 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 فاصله فعلی بین نهر و رودخانه است. مقدار X در رابطه (۹) متناظر با یک عدد تصادفی توزیع‌شده (یکنواخت و یا ممکن است هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و (C × d) است. موقعیت جدید نهرها و رودخانه‌ها را می‌توان با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه نمود.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^{i} + rand \times C \times (X_{River}^{i} - X_{Stream}^{i}) \qquad (۱۰)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^{i} + rand \times C \times (X_{Sea}^{i} - X_{River}^{i}) \qquad (۱۱)$$

که، rand یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع‌شده بین صفر و یک است. منظور از تصادفی تأکید بر این مطلب است که استفاده از یک روش قطعی و مشخص برای اعداد تصادفی، امکان بالقوه تصادفی بودن واقعی را از بین می‌برد. بنابراین اعداد تولید شده واقعاً تصادفی نیست. هدف این است که به نحوی اعداد تصادفی در محدوده (۱و۰) تولید کند تا دو خاصیت استقلال و توزیع یکنواخت را داشته باشند. اگر راه‌حل ارائه‌شده توسط یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر عوض می‌شود (یعنی نهر، رودخانه می‌شود و رودخانه، نهر می‌شود). این تبادل نیز می‌تواند به همین شکل برای رودخانه‌ها و دریا اتفاق افتد.

یکی از مهم‌ترین عواملی که از همگرایی سریع الگوریتم (همگرایی نابالغ) و به دام افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند تبخیر است. فرآیند تبخیر باعث می‌شود که آب دریا با تبخیر به‌صورت جریان رودخانه‌ها و یا نهرها دوباره به دریا بریزد. شبه کد زیر چگونگی تعیین اینکه آیا رودخانه به دریا می‌ریزد یا نه را نشان می‌دهد.

$$if \left|X_{Sea}^{i} - X_{River}^{i}\right| < d_{max}\ , i = 1,2,3 \dots, N_{SR} - 1 \qquad (۱۲)$$

→ فرآیند بارش و تبخیر

→ پایان

که، d_{max} عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است. بنابراین، اگر فاصله بین رودخانه و دریا کمتر از d_{max} باشد، نشانگر آن است که رودخانه به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرآیند تبخیر اثر می‌کند و همان‌طور که در طبیعت دیده می‌شود بعد از تبخیر کافی، باران (بارش) شروع خواهد شد. d_{max} شدت جستجو در نزدیکی دریا (راه‌حل بهینه) را کنترل می‌کند. مقدار d_{max} به‌صورت رابطه (۱۳) در هر مرحله کاهش می‌یابد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^{i} - \frac{d_{max}^{i}}{max\ iteration} \qquad (۱۳)$$

پس از برآورده شدن فرآیند تبخیر، فرآیند بارندگی اعمال می‌شود. در فرآیند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان‌های مختلف تشکیل می‌دهند (شبیه به عملگر جهش در GA). برای تعیین مکان جدید نهرهای تازه شکل‌گرفته، از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = LB + rand \times (UB - LB) \qquad (۱۴)$$

که، LB و UB به ترتیب، کران پایین و بالای تعریف شده توسط مسئله است. بهترین قطرات باران جدید تشکیل‌شده به‌عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران جدید به‌عنوان نهرهای جدید که به سمت رودخانه‌ها در جریان هستند و یا ممکن است به‌طور مستقیم به دریا برسند، در نظر گرفته می‌شوند. به‌منظور افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$X_{Stream}^{new} = X_{Sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \qquad (۱۵)$$

که، μ ضریبی است که محدوده جستجوی در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد. $randn$ عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقادیر بزرگ μ امکان خروج از منطقه امکان‌پذیر را افزایش می‌دهد و مقادیر کوچک μ منجر به جستجوی الگوریتم در منطقه کوچک‌تر در نزدیکی دریا می‌شود. مقدار مناسب μ، ۰/۱ تعیین شده است (اسکندر و همکاران، ۲۰۱۲).

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

مدل‌سازی و نتایج

برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های (WCA و GSA) که کد نویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شد، از چندین تابع محک استاندارد استفاده شده است. جدول (۳) نتایج پیاده‌سازی الگوریتم WCA و GSA 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 ۱۰۰۰ است.

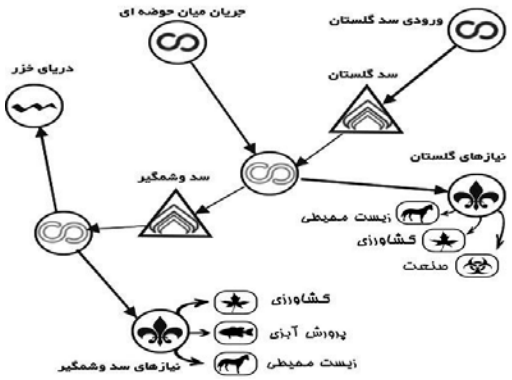
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

جدول (۳): نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر روی توابع محک استاندارد

تابع	فرمول	بعد	مقدار بهینه	WCA	GSA
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
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
Rosenbrock	$F_3(x)=\sum_{i=1}^{n-1}\left[100(x_{i+1}-x_i^2)^2+(x_i-1)^2\right]$	۲	۰	۸/۹۱×۱۰$^{-۹}$	۵/۳×۱۰$^{-۴}$
Rosenbrock	=	۱۰	۰	۴/۰۶۴×۱۰$^{-۷}$	۵/۲
Rosenbrock	=	۳۰	۰	۲/۸۲×۱۰$^{-۶}$	۲۶/۱۶
Shekel	$F_4(x)=-\sum_{i=1}^{m}(\sum_{j=1}^{4}(x_j-C_{ji})^2+\beta_i)^{-1}$	۴	-۱۰/۵۳۶۴	-۱۰/۵۳۲	-۵/۹۶۵
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

نتایج جدول (۳) نشان‌دهنده عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با الگوریتم GSA است. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر دو الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب است. با افزایش بعد مسئله و پیچیدگی آن (تابع *Rosenbrock* با ابعاد ۳۰) عملکرد الگوریتم GSA سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته است. اما الگوریتم WCA به‌مراتب به جواب بهینه نزدیک‌تر بوده و خطای پایین‌تری دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۳)، الگوریتم چرخه آب چه در مسائل با بعد کم و چه در مسائل بزرگ‌مقیاس دارای عملکرد مناسبی است. پس از صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد بررسی با استفاده از توابع محک استاندارد، دو مدل برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر بر اساس الگوریتم‌های WCA و GSA توسعه داده شد. شماتیک مدل ساخته‌شده برای سیستم دو مخزنی(گلستان و وشمگیر) در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): شماتیک مدل ساخته‌شده برای سیستم دو مخزنه گلستان و وشمگیر

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، مقادیر خروجی بهینه ماهانه از مخازن سدها هستند. افق برنامه‌ریزی در این پژوهش ۶۰ ماه (دوره ۹۱-۸۶) در نظر گرفته شده، بنابراین الگوریتم WCA در سیستم دو مخزنه دارای ۱۲۰ متغیر تصمیم است. قیود ذکرشده برای هر دو مخزن یکسان است. معیار سنجش پاسخ‌ها مقایسه آن‌ها با نیاز پایین‌دست و بهترین مقدار برای ذخیره در ماه‌های مختلف سال است. رهاسازی از مخازن در هر دوره به‌عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت هستند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم آورد رودخانه، ارتفاع تبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به‌صورت ماهانه است. تابع هدف مدل بهینه‌سازی در این پژوهش به‌صورت کمینه‌سازی کل کمبود (کشاورزی، زیست‌محیطی و صنعت) در طول دوره آماری تعریف گردید. تابع هدف سیستم دو مخزنه مورد بررسی نیز به‌صورت رابطه (۱۶) تعریف شده است:

$$Minimize\ F(Re) = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{Re_{i,t}-De_{i,t}}{De_{maxi}}\right)^2 + Penalty1_{i,t} + Penalty2_{i,t} \qquad (۱۶)$$

که، $F(Re)$ مقدار تابع هدف (کمبود)، $Re_{i,t}$ حجم رهاسازی از مخزن سد iام در ماه t، $De_{i,t}$ مقدار نیاز سد iام در ماه t، De_{maxi} ماکزیمم نیاز سد iام در طول دوره بهره‌برداری، T طول دوره بهره‌برداری، i تعداد مخازن، $Penalty1_{i,t}$ مقدار جریمه مربوط به حجم مخزن در سد iام در ماه t و $Penalty2_{i,t}$ مقدار جریمه مربوط به حجم رهاسازی از مخزن سد iام در ماه t هستند.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

محدودیت‌های سیستم دو مخزنه مورد مطالعه در معادلات (۱۷) تا (۲۵) آورده شده است.

$$Sp_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} - S_{max\,i} + S_{min\,i} & if \quad S_{i,t} > (S_{max\,i} - S_{min\,i}) \\ 0 & if \quad S_{i,t} \le (S_{max\,i} - S_{min\,i}) \end{cases} \tag{۱۷}$$

$$Loss_{i,t} = A_{i,t} \times (Ev_{i,t} - R_{i,t}) \tag{۱۸}$$

$$A_{i,t} = a + b \times S_{i,t} + c \times S_{i,t}^2 \tag{۱۹}$$

که، $Sp_{i,t}$ مقدار آب سرریز شده از مخزن سد iام در ماه t، $S_{i,t}$ حجم مخزن سد iام در ابتدای دوره t، S_{maxi} حجم مخزن سد iام در رقوم حداکثر، S_{mini} حداقل حجم مخزن سد iام، $Loss_{i,t}$ میزان تلفات مخزن سد iام در ماه t، $Ev_{i,t}$ ارتفاع تبخیر از دریاچه پشت سد iام در ماه t، $R_{i,t}$ ارتفاع بارش مخزن سد iام در ماه t، a، b و c ضرایب رابطه حجم- سطح مخزن سد iام هستند.

در تمامی مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باید موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد. رابطه پیوستگی مورداستفاده در سیستم مخازن مورد بررسی به‌صورت روابط (۲۰) و (۲۱) است.

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + Q_{1,t} - Re_{1,t} - Loss_{1,t} - Sp_{1,t} \tag{۲۰}$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + Q_{2,t} + Sp_{1,t} + (Re_{1,t} - De_{1,t}) - Re_{2,t} - Loss_{2,t} - Sp_{2,t} \tag{۲۱}$$

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

محدودیت متغیرهای تصمیم به‌صورت زیر اعمال می‌شوند:

$$S_{\min i} \le S_{i,t} \le S_{\max i} \tag{۲۲}$$

$$Re_{\min i,t} \le Re_{i,t} \le Re_{\max i,t} \tag{۲۳}$$

که، $Re_{mini,t}$ حداقل رهاسازی سد iام در ماه t و $Re_{maxi,t}$ حداکثر رهاسازی سد iام در ماه t هستند. به منظور اعمال قیود (۲۲) و (۲۳) در مدل از توابع جریمه زیر استفاده شده است:

تابع جریمه مربوط به حجم مخازن

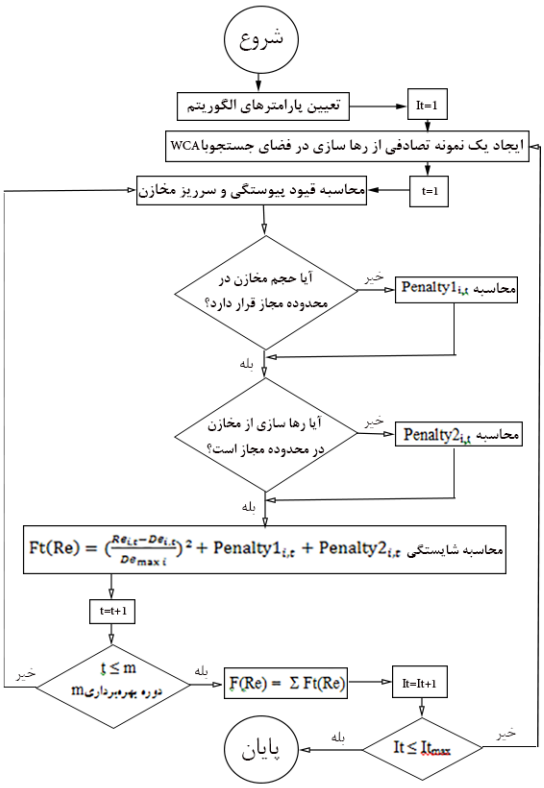
$$Penalty1_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{S_{i,t} - S_{min\,i}}{S_{min\,i}}\right)^2 & if\ S_{i,t} < S_{min\,i} \\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{S_{i,t} - S_{max\,i}}{S_{max\,i}}\right)^2 & if\ S_{i,t} > S_{max\,i} \\ 0 \quad if \quad S_{i,t} \ge S_{min\,i}\ and\ S_{i,t} \le S_{max\,i} \end{cases} \tag{۲۴}$$

تابع جریمه مربوط به رهاسازی محدودیت مربوط به حجم سرریز به‌صورت رابطه زیر اعمال می‌شود.

$$Penalty2_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{Re_{i,t} - De_{\min i,t}}{De_{min\,i,t}}\right)^2 & if\ Re_{i,t} < De_{\min i,t} \\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{Re_{i,t} - De_{\max i,t}}{De_{\max i,t}}\right)^2 & if\ Re_{i,t} > De_{\max i,t} \\ 0 \quad if \quad Re_{i,t} \ge De_{\min i,t} \text{and } Re_{i,t} \le De_{\max i,t} \end{cases} \tag{۲۵}$$

که در آن $De_{mini,t}$ حداقل نیاز سد iام در ماه t و $De_{maxi,t}$ حداکثر نیاز سد iام در ماه t هستند.

شکل (۳) فلوچارت الگوریتم WCAرا در بهره‌برداری از سیستم دو مخزنه گلستان و وشمگیر نشان می‌دهد.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم WCAدر بهره‌برداری از سیستم مخازن

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)

در این سیاست، رهاسازی از مخزن فقط بر اساس حجم آب ذخیره موجود هر دوره انجام می‌شود. اگر آب در دسترس (مجموع آورد رودخانه و حجم ذخیره مخزن) کم‌تر از میزان کل نیاز باشد، همان میزان آب در دسترس رهاسازی می‌شود و مخزن خالی می‌گردد اما اگر آب در دسترس بیش از نیاز موجود باشد، میزان رهاسازی برابر با مقدار نیاز خواهد بود و آب مازاد در مخزن ذخیره می‌شود و در صورت پر شدن مخزن سرریز خواهد کرد. این مفاهیم را می‌توان برای سامانه تک مخزنه توسط رابطه (۲۶) بیان نمود.

$$\begin{cases} Re_t = S_t + Q_t - LOSS_t & if \quad S_t + Q_t - LOSS_t \le R_{max} \\ Re_t = R_{max} & if \quad R_{max} \le S_t + Q_t - LOSS_t \le S_{max} \\ Re_t = S_t + Q_t - S_{max} & if \quad S_t + Q_t - LOSS_t - R_{max} \ge S_{max} \end{cases} \quad (\forall t = 1, \dots, T) \qquad (۲۶)$$

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 به‌طور کامل نیازهای موجود را تأمین کرده و با شکست روبرو نمی‌شود. مقدار این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\alpha_t = \left(1 - \frac{NDe_f}{T}\right) \times 100 \quad ، \; {}_{ND}ef = \text{تعداد}(\alpha \times De_t > Re_t) \qquad (۲۷)$$

که NDe_f تعداد کل شکست‌های رخداده در طول دوره بهره‌برداری، De_t مقدار نیاز در دوره‌ی t و Re_t مقدار خروجی دوره‌ی t، α درصد تأمین نیاز و α_t اعتمادپذیری سیستم در طول دوره‌ی بهره‌برداری هستند. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، قابلیت اعتماد زمانی سیستم بیشتر خواهد بود.

نوع دیگر قابلیت اعتماد، قابلیت اعتماد حجمی است که عبارت است از مقدار حجم آب رهاشده در کل دوره نسبت به مقدار کل نیاز مخزن و از رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود (هاشیموتو و همکاران[1]، ۱۹۸۵).گاهی اوقات قابلیت اعتماد را به‌صورت مخالف ریسک مطرح می‌شود (قابلیت اعتماد-۱=ریسک).

$$\alpha_v = \frac{Re_t}{De_t} \times 100 \qquad (۲۸)$$

آسیب‌پذیری

این شاخص نشان دهنده بزرگی شکست‌های سیستم است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (هاشیموتو و همکاران، ۱۹۸۵).

$$\eta = max\left\{\frac{(De_i - Re_i)}{De_i}\right\} \quad , \; i = 1,2, \dots, t \qquad (۲۹)$$

که η بزرگی شکست، De_i مقدار نیاز در دوره i، Re_i مقدار خروجی در دوره i و t تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری است.

همچنین در این پژوهش به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از الگوریتم WCA در بهره‌برداری از مخزن، نتایج به‌دست‌آمده با الگوریتم GSA و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. کد نویسی الگوریتم‌های موردنظر در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R2014a) انجام شده است. برای تخمین بهترین تعداد جمعیت اولویت تحلیل حساسیت نسبت به جمعیت اولیه از ۵۰ تا ۴۰۰ مورد آزمون قرار گرفت.

پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی جهت همسنگ شدن و مقایسه یکسان در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت تعداد جمعیت اولیه در الگوریتم WCA برابر با ۱۰۰ و در الگوریتم GSA برابر ۳۰۰ محاسبه شده است. میانگین مقادیر تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از ۵۰ بار اجرای مختلف الگوریتم‌های مورداستفاده در این پژوهش و روش SOP، در جدول (۴) ارائه شده است. تعداد تکرار در دو الگوریتم برابر

[1] Hashimoto et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

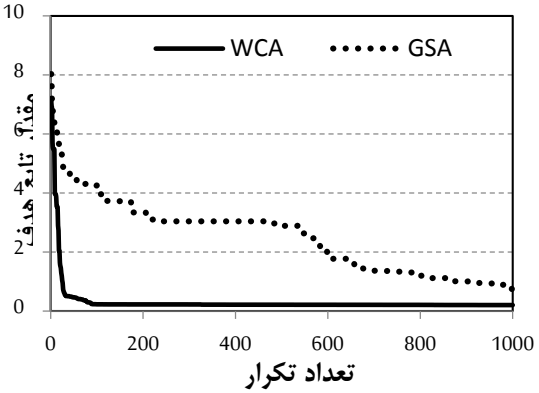
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

۱۰۰۰ و تعداد ارزیابی تابع هدف در الگوریتم‌های WCA و GSA
به ترتیب برابر ۱۰۰۱۰۰ و ۳۰۰۳۰۰ بوده است.

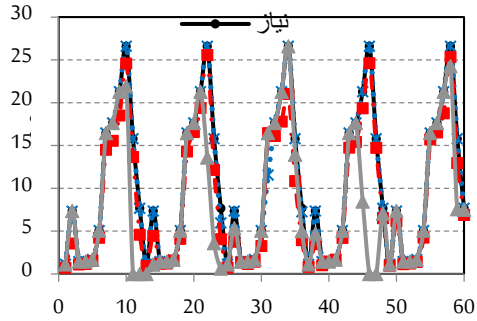
جدول (۴): مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای روش‌ها

الگوریتم	زمان اجرا (S)	تابع هدف	کمبود گلستان (MCM)	کمبود وشمگیر (MCM)	قابلیت اعتماد گلستان			قابلیت اعتماد وشمگیر			آسیب‌پذیری	
					حجمی	زمانی		حجمی	زمانی			
						α=۰/۹	α=۰/۹۵		α=۰/۹	α=۰/۹۵	گلستان	وشمگیر
WCA	۶۹/۹	۰/۱۶	۱۴	۱۷/۲	۹۷/۷	۹۵	۹۳/۳	۹۷/۱	۹۱/۷	۸۸/۳	۰/۳۳	۰/۶۹
GSA	۱۹۶/۸	۰/۷۳	۹۱/۰۴	۶۲/۴۶	۸۵/۲۶	۲۸/۳۳	۱۰	۸۹/۳۱	۴۳/۳۳	۲۶/۶۷	۰/۵۲۵	۰/۹۶۲
SOP	-	۹/۶۸	۱۴۳/۵	۱۸۵/۳	۷۶/۷۸	۷۳/۳۳	۷۰	۶۸/۲۹	۶۵	۶۵	۱	۱

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف در الگوریتم چرخه آب برابر ۰/۱۶ به دست آمده درحالی‌که مقدار تابع هدف محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم GSA برابر با ۰/۷۳ بوده است. دلیل این امر می‌تواند با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۴)، عملکرد پایین الگوریتم‌های GSA در مسائل با ابعاد بزرگ باشد. الگوریتم WCA با رفع این ضعف توانسته نتایج قابل قبولی در مسائل با ابعاد بزرگ داشته باشد. روش SOP نیز با توجه به این‌که بدون در نظر گرفتن نیاز سامانه در دوره‌های آینده اقدام به تأمین نیاز در دوره فعلی می‌نماید، فاقد آینده‌نگری لازم جهت مدیریت کارا در بهره‌برداری از مخازن است و به همین دلیل تابع هدف در این روش از مقدار بهینه فاصله گرفته است. همچنین شاخص‌های عملکرد (قابلیت اعتماد و آسیب‌پذیری) محاسبه‌شده در جدول (۴) عملکرد مناسب‌تر الگوریتم WCAنسبت به دو روش دیگر را نشان می‌دهد. الگوریتم چرخه آب به ترتیب با تأمین ۹۷/۷ و ۹۷/۱ درصد از نیازهای کل پایین‌دست سدهای گلستان و وشمگیر و شاخص‌های عملکرد مناسب نسبت به الگوریتم GSA که در جدول (۴) آورده شده عملکرد مناسب خود را در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن به خوبی نشان می‌دهد. بهره‌برداری با روش SOP نیز باعث افزایش اعتمادپذیری زمانی می‌شود، درحالی‌که به علت افزایش شدت کمبودها در این روش، آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود اعتمادپذیری زمانی در روش SOP نسبت به الگوریتم GSA بالاتر بوده است اما با توجه به عدم تأمین نیازها در تعدادی از ماه‌ها و افزایش شدت کمبودها، آسیب‌پذیری سیستم در این روش برابر یک شده است. نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است الگوریتم چرخه آب نسبت به الگوریتم جستجوی گرانشی سریع‌تر همگرا شده است.



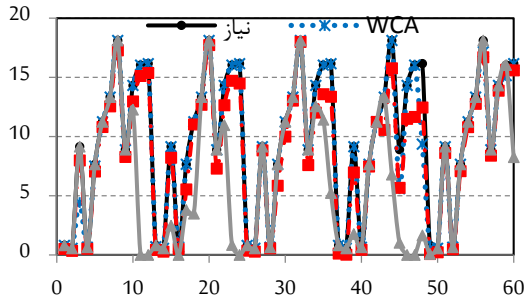
شکل (۴): روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری از سیستم مخازن



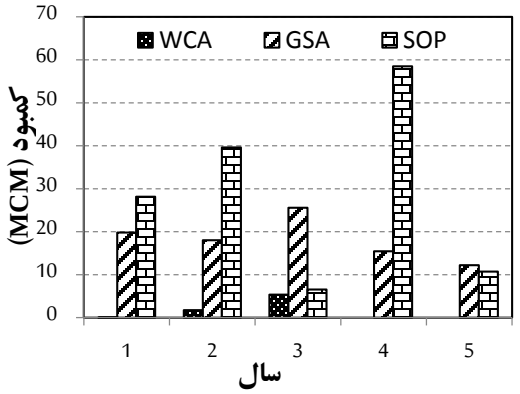
شکل (۵): مقدار رهاسازی حاصل از روش‌های مختلف در مقابل نیاز سد گلستان

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

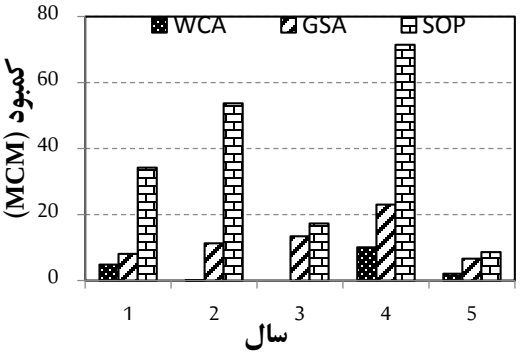
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار رهاسازی به‌دست‌آمده از الگوریتم چرخه آب بسیار نزدیک به مقدار کل نیازهای پایین‌دست سدهای مورد مطالعه بوده و حداقل کمبود را داشته است. میزان کل کمبودها برای سدهای گلستان و وشمگیر در روش WCA به ترتیب برابر ۲/۲۶ و ۲/۹۳ درصد است درحالی‌که این مقادیر در الگوریتم GSA به ترتیب برابر ۱۴/۷ و ۱۰/۶۸ درصد و در روش SOP برابر ۲۳/۲ و ۳۱/۷ درصد است. روش WCA نسبت به روش GSA و SOP از کمبودهای کم‌تری در بیش‌تر دوره‌ها برخوردار هستند. با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) الگوریتم GSA و روش SOP در سیستم دو مخزنه مورد بررسی به خوبی نتوانسته‌اند نیاز ماهانه پایین‌دست سدهای گلستان و وشمگیر را تأمین کنند و در تعدادی از ماه‌ها دچار کمبود هستند. شکل (۷) مقادیر متوسط کمبود سالانه مخزن سد گلستان و وشمگیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷- الف) شدت کمبودها در روشSOP، نسبت به دو الگوریتم دیگر بیشتر بوده است. مقدار حداکثر کمبود در مخزن سد گلستان در روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب ۵/۳۴، ۲۵/۵۷ و ۵۸/۴۸ (MCM) هستند. با توجه به شکل (۷- ب)، مقدار حداکثر کمبود در مخزن سد وشمگیر در روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب ۱۰/۱، ۲۳/۰۱ و ۷۱/۴۵ (MCM) هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار کمبودها در الگوریتم WCAنسبت به دو روش دیگر پایین‌تر بوده است.



شکل (۶): مقدار رهاسازی حاصل از الگوریتم‌های مختلف در مقابل نیاز سد وشمگیر



الف) سد گلستان



ب) سد وشمگیر

شکل(۷): مقدار کمبود مخزن به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف

شکل‌های (۵) و (۶) مقدار رهاسازی به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف را در مخازن گلستان و وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه (سال آبی ۸۶ تا ۹۱) نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از الگوریتم چرخه آب (به‌عنوان یکی از روش-های فرا ابتکاری جدید)، پس از بررسی کارآمدی آن توسط تعدادی توابع محک استاندارد، در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر، استفاده شد. همچنین عملکرد الگویتم توسعه داده‌شده با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن (قابلیت اعتماد زمانی و حجمی و آسیب‌پذیری) بررسی شد و نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم با الگوریتم فرا ابتکاری GSA و روش SOP مورد مقایسه قرار گرفت.

میزان خروجی حاصل از اجرای روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب قادر به تأمین ۹۷/۷۳، ۸۵/۲۶ و ۷۶/۷۸ درصد از نیاز

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

کل پایین‌دست سد گلستان و تأمین ۹۷/۰۶، ۸۹/۳۱ و ۶۸/۲۹ درصد از نیاز کل پایین‌دست وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه (دوره ۸۶ تا ۹۱) است که عملکرد مناسب‌تر الگوریتم WCA را نسبت به دو روش دیگر نشان می‌دهد. همچنین میزان حجم کل کمبودها در کل دوره ۵ ساله برای روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب برابر ۱۴/۰۲۱، ۹۱/۰۴ و ۱۴۳/۵ (MCM) برای سد گلستان و ۱۷/۱۷، ۶۲/۴۶ و ۱۸۵/۳ (MCM) برای سد وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه است. قابلیت اعتماد زمانی (α=۰/۹) در روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب برابر ۲۸/۹۵،۳۳و ۷۳/۳۳ درصد برای سد گلستان و ۴۳/۹۱،۳۳/۶۷و ۶۵ درصد برای سد وشمگیر به دست آمده است. بنابراین الگوریتم WCA نسبت به دو روش مورد بررسی دیگر، در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن دارای قابلیت بالاتری است.

منابع

۱- اطلس منابع آب ایران. (۱۳۸۷). گزارش مطالعات منابع آب حوزه رودخانه‌های قره‌سو و گرگان‌رود. آب منطقه‌ای استان گلستان.

۲- بزرگ حداد، ا. و افشار، ع. (۱۳۸۷). "بررسی ساختارهای جدید از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن." مجله فناوری و آموزش، سال اول، جلد اول، شماره ۱۱۷:۳-۱۲۲.

۳- راشدی، ع .، نظام آبادی‌پور ،ح. و توحیدی، ح. (۱۳۸۶). " انتخاب ویژگی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی." سومین کنفرانس فناوری اطلاعات و دانش. دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- عباسیان، ا. و نظام آبادی‌پور، ح. (۱۳۹۰). "استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی چندهدفه با جبهه‌های مغلوب نشده برای ایجاد مصالحه فشردگی." ششمین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصاویر ایران، دانشگاه اصفهان.

۵- قادری، ک.، زلقی، آ. و بختیاری، ب.(۱۳۹۳). "بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع(SCE) (مطالعه موردی: حوضه کرخه)." مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره ۴، شماره ۲: ۲۱۵-۲۲۸.

۶- مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا. ا.، مساعدی، ا. و اسلامی، ح. ر. (۱۳۹۰). "تعیین کمبود حجم بهینه مخزن سد وشمگیر در سیستم بهره‌برداری چند سدی." مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شماره ۱:۲۱۵-۲۳۰.

۷- نجفی، م. ر.، هاشم‌پور، ج. و خیاط خلقی، م. (۱۳۸۴). "بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و کاربرد آن در سد وشمگیر." مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شماره ۵:۲۷-۳۵.

۸- نوروزی، ب.، بارانی، غ. ع.، مفتاح هلقی، م. و دهقانی، ا. ا. (۱۳۹۰). "بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه به روش الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی مطالعه موردی (سدهای گلستان و وشمگیر)." مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شماره ۴:۴۳-۶۲.

9- 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.

10- Ajibola, A.S. and Adewumi, A. O. (2014). “Review of Population Based Metahueristics in Multi-objective Optimization Problems.” *International Journal of Computing, Communications & Instrumentation Engineering*. 1(1), 126-128.

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*. 141(5), 04014064.

14- Chang, J. X., Huang, Q. and Wang, Y. M. (2005). “Genetic algorithms for optimal reservoir dispatching.” *Journal of Water Resources Management*. 19(4), 321-331.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]

15- Esat, V. and Hall, M. J. (1994). "Water resources system optimization using genetic algorithms hydroinformatics." *Processes Its International Conference on Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands*. 225-231.

16- 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.

17- Eskandar, H., Sadollah, A. and Bahreininejad, A. (2013). "Weight optimization of truss structures using water cycle algorithm." *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 3(1),115-129.

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(10), 872-879.

19- 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.

20- 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.

21- 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.

22- Oliveira, R. and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multi-reservoir system." *Journal of Water Resources Research*. 33(4), 839-852.

23- Pradhan, S. N. and Tripathy, U. K. (2013). "Optimization of the operating policy of the multipurpose Hirakudreservoir by Genetic Algorithm." *American Journal of Engineering Research*. 2(11), 260-266.

24- Reddy, M. J. and Kumar, D. N. (2007). "Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation". *Hydrological Processes*. 21(21), 2897-2909.

25- 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.

26- Wurbs, R. A. (1993). "Reservoir-system simulation and optimization models." *Journal of Water Resource Planning and Management*. 119(4), 455-472.

27- Yeh, W. G. (1985). "Reservoir management and operation models: State-of-the-art review." *Journal of Water resource Research*. 21(12), 1797-1818.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.4.9]