

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از مخازن با استفاده از الگوریتم فراکاوشی WCA (مطالعه موردی: سد جیرفت)

حمیدرضا یآوری^۱، امیر رباطی^{۲*} و نوید جلال کمالی^۳

چکیده

با توجه به اینکه انرژی برق‌آبی به‌عنوان سومین منبع تولید برق و همچنین مهم‌ترین انرژی تجدیدپذیر مولد برق در جهان به شمار می‌آید، ضرورت استفاده بهینه از منبع عظیم و گران‌قیمت آب که هرروزه شاهد کاهش چشمگیر آن هستیم، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در این پژوهش از الگوریتم فراکاوشی چرخه آب (WCA) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی مخزن سد جیرفت واقع در حوضه هلیل‌رود (جنوب ایران)، برای یک دوره ۲۲۳ ماهه (از مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸) استفاده شد. الگوریتم چرخه آب (WCA) براساس شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی در طبیعت بوده که توانایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی در مقالات مختلف به اثبات رسیده و باعث ارتقا و افزایش اعتمادپذیری در پیدا کردن جواب بهینه شده و در مسائل منابع آب، ازجمله بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد، به‌طور مؤثری کارآمد است. متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی از مخزن، مقادیر رهاسازی بهینه از خروجی برق‌آبی ماهانه از مخازن سدها هستند. پس از اطمینان از درستی عملکرد الگوریتم WCA با استفاده از چندین تابع محک استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه برق‌آبی سد جیرفت توسعه داده شد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج روش‌های شناخته‌شده الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HS) و الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مقایسه شد. میزان انرژی تولیدی حاصل از سناریوهای بهینه‌شده از روش چرخه آب در سطح بالاتری قرار داشته و در اکثر ماه‌ها به ظرفیت تولید نیروگاه نزدیک‌تر است و مقادیر به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های WCA، ICA و HS به‌ترتیب ۷۲۰۳/۲۹، ۷۱۳۸/۶۶ و ۷۱۱۵/۷۸ مگاوات در طول دوره آماری و همچنین مقدار تابع هدف که حداقل‌سازی کمبود توان تولید است، برای الگوریتم‌های WCA، ICA و HS به‌ترتیب برابر با ۴/۷۸، ۵/۸۲ و ۸/۶۳ به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه انرژی برق‌آبی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم چرخه آب، بهره‌برداری از مخزن، تولید انرژی، حوضه رودخانه هلیل‌رود.

ارجاع: یآوری ح.، رباطی ا. و جلال کمالی ن. ۱۴۰۱. بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از مخازن با استفاده از الگوریتم فراکاوشی WCA (مطالعه موردی: سد جیرفت). مجله پژوهش آب ایران، ۴۶: ۶۱-۷۲. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10201.2377>

۱- دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

۲- استادیار گروه عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

نویسنده مسئول: Robatiamir56@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۳

مقدمه

با گسترش اهداف پروژه‌ها نظیر بازگشت سرمایه، اهداف اجتماعی و انسانی (گسترش و ارتقای فرهنگ و تکنولوژی)، کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست، مسئله بهره‌برداری بهینه اهمیت بیشتری پیدا کرده است. همین مسئله موجب شده تا پژوهشگران برای دستیابی به اهداف خود، راه‌کارها و روش‌های گوناگونی را مدنظر قرار داده و در پروژه‌های مختلف به کار گیرند؛ به‌طوری‌که شاهد گسترش به‌کارگیری روش‌ها و تکنیک‌های مختلف بهینه‌یابی در جهت بهره‌برداری منابع و طرح‌های آبی باشیم.

یک سیاست بهره‌برداری شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره‌برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی شود، تعیین می‌کند (وربز، ۱۹۹۳). تعیین یک برنامه بهره‌برداری مناسب از سیستم‌های منابع آب، به‌گونه‌ای که در همه شرایط موردنظر بتوان عملکرد مطلوبی از سیستم به‌دست آورد، بهینه‌سازی نامیده می‌شود که به‌منظور بهینه‌سازی و تعیین برنامه بهره‌برداری از مخازن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی الزامی است. در دنیای واقعی مدیریت بهینه‌سازی مخازن سد می‌تواند بسیار پیچیده باشد. افزایش پیچیدگی در مسائل مهندسی و نگاه سیستمی به مدیریت به‌خصوص در مهندسی منابع آب باعث کاهش کارایی روش‌های بهینه‌یابی کلاسیک شده‌است که در راستای رفع این مشکل در چند دهه اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای به‌منظور تهیه و ارائه الگوریتم‌های بهینه‌یابی مناسب‌تر صورت پذیرفته است. ازجمله آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی اشاره کرد. این الگوریتم‌ها که الهام‌گرفته از طبیعت هستند، در مطالعات تئوریک و کاربردی متعددی توسعه داده شده‌اند و انواع متعددی از آن‌ها شکل گرفته‌است و در سال‌های اخیر در بسیاری از مقوله‌های علمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از این الگوریتم‌های نسبتاً جدید، الگوریتم چرخه آب (WCA) است که توسط اسکندر و همکاران (۲۰۱۲) بر پایه چرخه آب یا چرخه هیدرولوژیکی در طبیعت ارائه شده است. اسکندر و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم چرخه آب در بهینه‌سازی وزن سازه خرابا استفاده کرده‌اند و نشان داده‌اند که الگوریتم ارائه‌شده قادر به دستیابی به راه‌حل‌های بهینه بهتر و سرعت همگرایی بیشتری نسبت به سایر

الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر است. این برتری الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های رقیب در مطالعات مختلف دیگر نیز به اثبات رسیده‌است (باقیپور و همکاران، ۲۰۱۴؛ قادری و همکاران ۲۰۱۸).

کشور ایران را می‌توان جزو معدود کشورهایی دانست که دارای انواع مختلفی سد است که با اهداف گوناگونی ازجمله تولید انرژی برق‌آبی شکل گرفته‌اند. یکی از سدهای مخزنی مهم کشور، سد مخزنی جیرفت است که در حوزه آبریز هامون جازموریان قرار گرفته که در سال ۱۳۶۳ ساخت آن آغاز شده و در سال ۱۳۷۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌است؛ ازجمله اهداف اولیه سد مخزنی جیرفت، تولید انرژی برق‌آبی به میزان ۸۰ گیگاوات ساعت در سال و کمک به شبکه برق در زمان پیک مصرف بوده‌است. این سد نیز همانند سایر سدها با مسئله بهره‌برداری مواجه است که یکی از موضوعات کلیدی در بین مسائل گوناگون منابع آب است.

بنا به اهمیت سد مخزنی جیرفت و همچنین به‌دلیل آنکه مطالعاتی در رابطه با بهره‌برداری بهینه برق‌آبی و استفاده حداکثری از توان تولیدی نیروگاه آن شکل نگرفته است، ضرورت مطالعه‌ای که به این مهم بپردازد آشکار می‌شود؛ بنابراین در مطالعه حاضر از الگوریتم چرخه آب که جزو الگوریتم‌های قوی در راستای بهینه‌یابی است، برای بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد جیرفت استفاده شده و البته نهایتاً نتایج به‌دست‌آمده، با نتایج الگوریتم‌های جست‌وجوی هارمونی و الگوریتم رقابت استعماری مورد مقایسه قرار گرفته است تا هم بتوان توانایی الگوریتم‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد و هم بتوان بهترین نتیجه را برای بهره‌برداری بهینه از سد مذکور به‌دست آورد.

منابع آبی، حوضه‌ها و سدها زمینه‌های مطالعاتی گسترده‌ای را فراهم کرده است که محققان بر جنبه‌های مختلف آن‌ها تمرکز کرده‌اند. یکی از این جنبه‌ها، بهره‌برداری بهینه است که زمینه به‌کارگیری و سنجش توانایی روش‌های بهینه‌یابی مختلف را فراهم کرده است. مطالعات متعددی به بهره‌برداری بهینه از مخازن با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف پرداخته‌اند، لیکن در زمینه بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخازن با توجه به پیچیدگی مسئله، مطالعات کمتری انجام گرفته‌است. افشار و همکاران (۱۳۹۳) به‌منظور بهره‌برداری برق‌آبی از مخزن سد دز از چهار الگوریتم مختلف از الگوریتم‌های

یک دوره ۱۰۶ ماهه (از مهر ۱۳۸۹ تا تیر ۱۳۹۸) استفاده کرد. پس از اطمینان از درستی عملکرد الگوریتم MSA با استفاده از چندین تابع محک استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه برق‌آبی سد کارون ۴ توسعه داده شد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج روش‌های شناخته‌شده الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) مقایسه شده‌است. الگوریتم‌های MSA، GA و PSO به‌ترتیب قادر به تولید بهینه انرژی به میزان ۱۰۵۸۵۳، ۱۰۵۶۹۷/۴ و ۱۰۵۸۴۱/۶ مگاوات نسبت به مقدار واقعی آن به میزان ۶۴۹۸۷/۵۴ مگاوات، در طول دوره آماری بودند. همچنین مقدار تابع هدف برای الگوریتم‌های MSA، GA و PSO به‌ترتیب برابر با ۰/۱۴۷، ۰/۳۰۲۶ و ۰/۱۵۸۴ به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم MSA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی است.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی انرژی در یک سیستم چندمخزنه در چین استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات بود. عزیزی‌پور و همکاران (۲۰۱۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) را برای بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی سد دز برای دوره‌های کوتاه، متوسط و بلندمدت مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات حاکی از کارآمدی و مؤثرتر بودن الگوریتم IWO در مسئله بهره‌برداری برق‌آبی بوده‌است. وو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی دومرحله‌ای (SDP) به بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سیستم مخازن در رودخانه لانگانگ چین پرداختند. نتایج نشان داد که محدودیت‌های سیستم به‌خوبی در نظر گرفته‌شده و زمان محاسبات کاهش ۵۰ درصدی به همراه برتری توان تولیدی نسبت به برنامه‌ریزی پویای تصادفی معمولی داشته‌است. نایر و ساسیکومار (۲۰۱۹) یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر اطمینان‌پذیری فازی را برای یک مخزن برق‌آبی توسعه دادند. نتایج نشان داد که این مدل در ایجاد سیاست بهره‌برداری بهینه مفید بوده و با افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی برق‌آبی همراه است.

بهینه‌سازی جامعه مورچگان به‌نام‌های الگوریتم پایه سیستم مورچگان، الگوریتم سیستم مورچگان نخبه، الگوریتم سیستم مورچگان ترتیبی و الگوریتم سیستم مورچگان بیشینه-کمینه استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، الگوریتمی مناسب در حل مسائل بهره‌برداری از مخازن سدها است. احمدیان‌فر و ادیب (۱۳۹۴) به بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از سد دز با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که الگوریتم ترکیبی باعث افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود توانایی الگوریتم ازدحام ذرات در جهت ایجاد جمعیتی با سرعت همگرایی بالا شده و کارایی بسیاری در حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب دارد. احترام و همکاران (۱۳۹۵) ترکیبی از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و ازدحام ذرات را به‌منظور افزایش تولید انرژی برق‌آبی از مخزن سدهای مهاباد و کارون ۴ ارائه کردند. مقایسه نتایج نشان داد که روش هیبریدی پاسخ نزدیک‌تری به پاسخ بهینه مطلق مسائل نسبت به الگوریتم‌های جست‌وجوی هارمونی و ازدحام ذرات دارد. حسینی موغاری و همکاران (۱۳۹۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) در بهره‌برداری بهینه از آبگیرهای برق‌آبی مخزن سد کارون ۴ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بودند که الگوریتم فاخته توانایی بالاتری را در رسیدن به جواب بهینه نسبت به الگوریتم ژنتیک از خود نشان داد و همچنین فاصله کمی با جواب بهینه مطلق دارد. اکبری‌فرد و همکاران (۱۴۰۰) از الگوریتم فراکاوشی ازدحام پروانه (MSA) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی مخزن سد کارون ۴ واقع در حوضه کارون، برای یک دوره ۱۰۶ ماهه (از مهر ۱۳۸۹ تا تیر ۱۳۹۸) استفاده کردند. نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج روش‌های شناخته‌شده الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) مقایسه و نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم MSA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی است. احمدیان‌فر و همکاران (۱۳۹۸) از الگوریتم فراکاوشی ازدحام پروانه (MSA) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی مخزن سد کارون ۴ واقع در حوضه کارون، برای

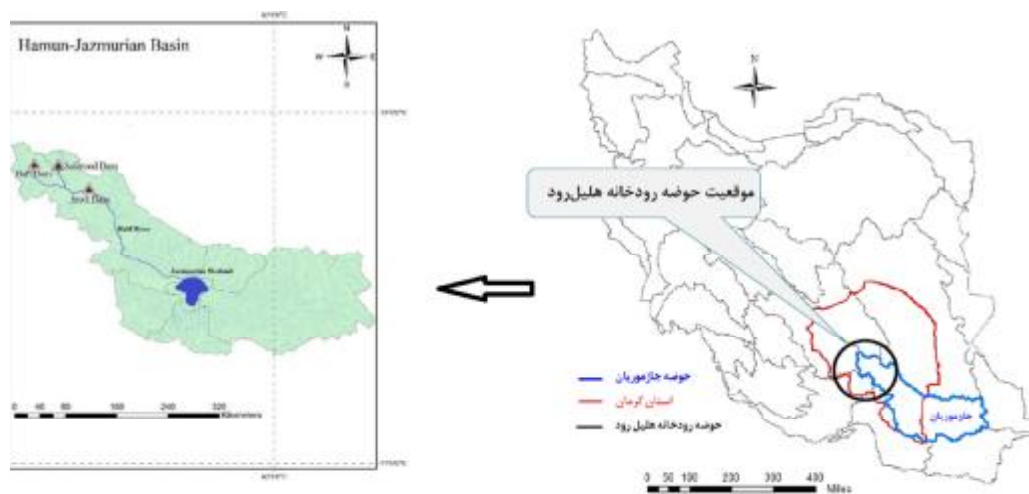
مواد و روش‌ها

حوضه هلیل‌رود از زیرحوضه‌های اصلی هامون-جزموریان است که نقش عمده‌ای در تولید جریان سالانه آن دارد و در قسمت غربی هامون-جزموریان، بین طول‌های جغرافیایی ۵۱°-۵۶° تا ۳۰°-۶۱° درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۱۸°-۲۶° تا ۳۰°-۲۹° درجه شمالی واقع شده است. این حوضه قسمتهایی از جنوب و شرق استان کرمان، شامل شهرستان‌های بافت، جیرفت، کهنوج و قسمتهایی از غرب استان سیستان و بلوچستان شامل ایرانشهر را دربرمی‌گیرد. با وجود احداث سدهای متعدد روی رودخانه‌های اصلی تأمین‌کننده آب تالاب و سرشاخه‌های آن‌ها، روند رو به نزاید مطالعه و احداث سدهای جدید در این حوضه همچنان ادامه دارد. در نتیجه این امر، با احداث روزافزون سدها و برنامه‌ریزی در جهت استحصال آب رودخانه‌ها در این حوضه، بدیهی است که آب ورودی به تالاب جزموریان از طریق منابع آب سطحی تأمین‌کننده آب تالاب تا حد بسیار زیادی کاهش یابد که در این میان، نقش سد جیرفت واقع بر رودخانه هلیل در قسمت غربی جزموریان از دیگر سدها مشهودتر است. شهر جیرفت در ارتفاع ۷۲۰ متر از سطح دریا و در دره‌ای

پهن گسترده شده و از موقعیتی دشتی و کوهستانی برخوردار است. شهر جیرفت به دلیل قرارگرفتن در عرض‌های جنوبی کشور و واقع‌شدن در ارتفاع نه چندان بالا، دارای تابستان‌های گرم و نسبتاً مرطوب و زمستان‌هایی معتدل و کوتاه است؛ به شکلی که روزهای با دمای صفر درجه یا کمتر در طول فصل سرد از یک هفته تجاوز نمی‌کند و کمتر اتفاق می‌افتد. میزان بارندگی شهرستان جیرفت به‌طور میانگین بیش از ۲۲۰ میلی‌متر در سال است و این رقم در مناطق کوهستانی اطراف به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد.

از اهداف اولیه سد مخزنی جیرفت، ذخیره ۴۱۲ میلیون مترمکعب آب سالیانه برای آبیاری اراضی پایین‌دست، کنترل، پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از سیل و خشک‌سالی و تولید انرژی برق آبی به میزان ۸۰ گیگاوات ساعت در سال و کمک به شبکه برق در زمان پیک مصرف، با توجه به انتهای خط واقع‌شدن موقعیت نیروگاه سد جیرفت است.

شکل ۱ نیز موقعیت حوضه جزموریان و موقعیت سد جیرفت در بخش غربی حوضه جزموریان را نمایش می‌دهد (شرکت آب منطقه‌ای کرمان).



شکل ۱- موقعیت سد جیرفت در حوضه آبریز هامون-جزموریان

پس‌از 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 HS و ICA اصطلاحاً چنین آرایه‌ای به‌ترتیب

الگوریتم چرخه آب (WCA)

مشابه با دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، 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.

رودخانه در امتداد خط اتصال بین آن‌ها با استفاده از یک فاصله که به‌طور تصادفی انتخاب‌شده، جریان می‌یابد که این فاصله با توجه به معادله (۷) 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 (۹). d فاصله فعلی بین نهر و رودخانه است. مقدار X در معادله (۷) یک عدد تصادفی توزیع‌شده (یکنواخت یا هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و $(C \times d)$ است. موقعیت جدید نهرها و رودخانه‌ها را می‌توان با معادلات (۸) و (۹) محاسبه کرد.

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

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

که، $rand$ یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع‌شده بین صفر و یک است. اگر راه‌حل ارائه‌شده 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 به‌دام‌افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند، تبخیر است. فرایند تبخیر باعث می‌شود آب دریا با تبخیر به‌صورت جریان رودخانه‌ها یا نهرها دوباره به دریا بریزد. شبه‌کد (۱۰) چگونگی تعیین اینکه آیا رودخانه به دریا می‌ریزد یا نه را نشان می‌دهد.

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

→ فرایند 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، یعنی رودخانه به دریا رسیده‌است. در این وضعیت، فرایند تبخیر اثر می‌کند و پس از تبخیر کافی، بارش شروع خواهد شد. d_{max} شدت جست‌وجو در نزدیکی دریا (راه‌حل بهینه) را کنترل می‌کند. مقدار d_{max} به‌صورت معادله (۱۱) در هر مرحله کاهش می‌یابد.

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

پس از برآورده‌شدن تبخیر، بارندگی اعمال می‌شود. در فرایند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان‌های

«هارمونی» و «کشور» نامیده می‌شوند. در یک مسئله بهینه‌سازی چندبُعدی، یک قطره باران، آرایه‌ای به شکل $N_{var} \times 1$ است. این آرایه به‌صورت معادله (۱) تعریف می‌شود (اسکندر و همکاران (۲۰۱۲)).

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

که، X_1 تا $X_{N_{var}}$ بیانگر متغیرهای تصمیم هستند. برای شروع، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه $N_{pop} \times N_{var}$ به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود (معادله (۲)).

Population of raindrops

$$= \begin{bmatrix} Raindrop_1 \\ Raindrop_2 \\ \vdots \\ Raindrop_{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} X_1^1 X_2^1 X_3^1 \dots X_{N_{var}}^1 \\ \vdots \\ X_1^{N_{pop}} X_2^{N_{pop}} X_3^{N_{pop}} \dots X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix}$$

که، N_{var} و N_{pop} به‌ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی هستند. مقادیر تابع هزینه C داده‌شده از معادله (۳) به‌دست می‌آید.

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

که، C_i 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 (معادله (۴)) است. بقیه جمعیت (نهرهایی که ممکن است به رودخانه‌ها یا به‌طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند) با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود.

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

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

به‌منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودخانه‌ها و دریا، بسته به‌شدت جریان از رابطه (۶) 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 یا دریا جریان می‌یابد. یک نهر جریان تا رسیدن به

مختلف تشکیل می‌دهند (شبیه به عملگر جهش در GA). معادله (۱۲) مکان جدید نهرهای تازه‌شکل 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 معادله (۱۳) استفاده می‌شود.

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

که، μ ضریبی است که محدوده جست‌وجو 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 جست‌وجوی الگوریتم در منطقه کوچک‌تر در نزدیکی دریا می‌شود. مقدار مناسب μ ، 0.1 تعیین شده است. معیار همگرایی در این پژوهش رسیدن به حداکثر تعداد تکرار برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هریک از آن‌ها یک کشور نامیده می‌شود، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان استعمارگر هستند و باقیمانده جمعیت را نیز مستعمراتی تشکیل می‌دهند که هریک به یک استعمارگر تعلق دارد. استعمارگران، بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با روندی خاص به سمت خود می‌کشند. بعضی از این مستعمرات در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، ممکن است به موقعیتی بهتر از استعمارگر برسند (هزینه کمتر نسبت به استعمارگر). در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با یکدیگر عوض می‌کنند 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 می‌دهد و برای

تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان سایر استعمارگرها ایجاد می‌شود. چندی بعد، همه استعمارگرها سقوط می‌کنند 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 (آشپز و لوکاس، ۲۰۰۷).

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HS)

این الگوریتم براساس اصول و رفتار موسیقیدانان است که برای ساخت قطعه‌ای موسیقی با یکدیگر همکاری می‌کنند و سعی خواهند کرد از میان نت‌های مختلف، گزینه‌های مناسب‌تر را انتخاب کنند تا در نهایت بهترین قطعه موسیقی ایجاد شود. 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 مقایسه 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 می‌شود و به این ترتیب قطعه موسیقی بدتر از حافظه خارج خواهد شد؛ 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 فرایند آنقدر تکرار می‌شود تا بهترین قطعه موسیقی به دست آید (گیم، ۲۰۰۰).

مدل ریاضی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی

هر نیروگاه برق‌آبی از تعدادی واحدهای مستقل تولید انرژی تشکیل شده است که هر واحد، ظرفیت تولید یا ظرفیت نصب (PPC) مشخصی دارد. همچنین، هر نیروگاه برق‌آبی دارای بازده معینی برای تولید برق است که بیان‌گر نحوه عملکرد و کارایی نیروگاه است. تولید برق در هر نیروگاه براساس ضریب کارکرد آن در طول دوره زمانی مشخص صورت می‌گیرد. این ضریب نشان می‌دهد که در چند درصد از مواقع در بازه‌های زمانی مختلف از طول دوره بهره‌برداری، واحدهای نیروگاهی با بیشترین توان خود (ظرفیت نصب) به تولید برق می‌پردازند. در سامانه سد جیرفت، ضریب کارکرد به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که هر نیروگاه در ماه‌های مختلف

ظرفیت نصب نیروگاه معادل ۳۲/۴ مگاوات و بازده آن معادل ۸۴ درصد منظور شده است. اطلاعات تکمیلی مربوط به نیروگاه براساس جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

بهره‌برداری، دست‌کم پنج الی شش ساعت در هر شبانه‌روز توانی معادل با ظرفیت نصب خود را تولید کند. تراز پایاب نیروگاه معادل ۱۰۳۰ متر از سطح دریا منظور شده و نیروگاه آن از ۲ واحد ۱۶/۲ مگاواتی تشکیل شده است.

جدول ۱- مشخصات نیروگاه سد جیرفت

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد واحد نیروگاه	تعداد	۲
قدرت هر واحد	مگاوات (MW)	۱۶/۲
مجموع ظرفیت دو واحد نیروگاهی	مگاوات (MW)	۳۲/۴
متوسط تولید انرژی سالیانه	گیگاوات ساعت (GWH)	۸۰
بازده تولید انرژی برقی	درصد	۸۴
ضریب کارکرد	درصد	۳۰
رقوم کف پایین‌دست نیروگاه	متر از سطح دریا (Masl)	۱۰۳۰

$$\text{Min } f_3 = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_t}{PPC}\right) \quad (15)$$

که در این معادله P_t توان تولیدی در دوره t ام برحسب مگاوات و PPC ظرفیت نصب مخزن برحسب مگاوات است. سایر معادلات حاکم (معادلات ۱۶) تا (۲۱) منطبق بر معادلات زیر است:

$$P_t = g \times e_t \times \frac{RP_t}{PF} / \text{Mul}_t \times (\overline{H}_t - TW_t) / 1000 \quad (16)$$

$$\overline{H}_t = (H_t + H_{t+1}) / 2 \quad (17)$$

$$H_t = a_0 + a_1.S_t + a_2.S_t^2 + a_3.S_t^3 \quad (18)$$

$$TW_t = b_0 + b_1.Re_t^{\text{Power}} + b_2.(Re_t^{\text{Power}})^2 + b_3.(Re_t^{\text{Power}})^3 \quad (19)$$

$$RPS_t = Re_t^{\text{Power}} - RP_t \quad (20)$$

$$0 \leq P_t \leq PPC \quad (21)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t^{\text{Power}} - Sp_t - Loss_t \quad (22)$$

$$Loss_t = Ev_t \times \overline{A}_t / 1000 \quad (23)$$

$$\overline{A}_t = (A_t + A_{t+1}) / 2 \quad (24)$$

$$A_t = a \times S_t^2 + b \times S_t + c \quad (25)$$

$$S_{\text{Min}} \leq S_t \leq S_{\text{Max}} \quad (26)$$

$$Re_{\text{Min}} \leq Re_t \leq Re_{\text{Max}} \quad (27)$$

که در این معادلات: g شتاب جاذبه زمین و برابر با ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه، e_t بازده نیروگاه که برای همه دوره‌ها ثابت فرض شده است، PF ضریب کارکرد نیروگاه، Mul_t ضریب تبدیل میلیون مترمکعب به مترمکعب بر ثانیه در دوره t ام، $\overline{H}_t$ متوسط تراز آب مخزن در دوره t ام برحسب متر، H_t تراز آب در ابتدای دوره t ام برحسب متر، TW_t

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی انرژی برقی از مخزن، مقادیر رهاسازی بهینه از خروجی برقی ماهانه از مخازن سدها هستند. افق برنامه‌ریزی در این پژوهش ۲۲۳ ماه (دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۸) در نظر گرفته شده است؛ بنابراین الگوریتم WCA در سیستم دارای ۲۲۳ متغیر تصمیم است. معیار سنجش پاسخ‌ها، تولید انرژی برقی در ماه‌های مختلف سال است. رهاسازی از خروجی برقی از مخزن 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.

در مسائل مخزن، تابع هدف معمول به‌منظور بهینه‌سازی قطعی سیستم مخازن (معادله ۱۴)) می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$\text{Min(Max)} Z = \sum_{t=1}^T f(S_t, Re_t) \quad (14)$$

که در این معادله: t اندیس دوره موردنظر، T تعداد دوره‌های بهره‌برداری، Z هدفی که باید بیشینه یا کمینه شود، Re_t میزان رهاسازی و S_t حجم ذخیره مخزن در دوره t است.

به‌منظور بهره‌برداری بهینه برق‌آبی، پیچیدگی‌های مسئله به‌خصوص از نظر قیود و شرایط غیرخطی اضافه‌شده و تابع هدف به‌صورت حداقل‌سازی کمبود توان تولیدی نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف می‌شود (معادله ۱۵):

حداکثر حجم ذخیره، Re_{Min} حداقل حجم رهاسازی و Re_{Max} حداکثر حجم رهاسازی است.

نتایج و بحث

برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های (WCA, HS و ICA) که کدنویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شد، از چندین تابع محک استاندارد استفاده شده‌است. جدول ۲ نتایج پیاده‌سازی الگوریتم WCA و دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری را بر توابع محک استاندارد نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت و تعداد ارزیابی تابع هدف در هر الگوریتم یکسان و متناسب با بُعد هر تابع بوده و تعداد تکرارها برابر با ۱۰۰۰ است.

تراز آب در انتهای دوره t ام برحسب متر، TW_t تراز آب پایاب در دوره t ام برحسب متر، a_0, a_1, a_2 و a_3 ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به ارتفاع متناظر آن، b_0, b_1, b_2 و b_3 ضرایب ثابت تبدیل آب خروجی از نیروگاه به تراز آب پایاب، RP_t میزان رهاسازی از خروجی برق‌آبی به‌منظور تولید توان در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب، RPS_t میزان سرریز از خروجی برق‌آبی در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب، Q_t جریان ورودی رودخانه در دوره t ام، Sp_t سرریز در دوره t ام، $Loss_t$ کل تلفات آب در دوره t ام، Ev_t مقدار متوسط افت در دوره t ام (تبخیر منهای بارش) برحسب میلی‌متر، $\bar{A}_t$ میانگین میزان سطح آب مخزن در دوره t ام برحسب کیلومترمربع، A_t و A_{t+1} به‌ترتیب میزان سطح آب مخزن برحسب کیلومترمربع در ابتدا و انتهای دوره t ام، a, b و c ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به سطح متناظر مخزن، S_{Min} حداقل حجم ذخیره، S_{Max}

جدول ۲- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری بر توابع محک استاندارد

تابع	بعد	مقدار هدف	WCA	HS	ICA
Goldsten-Price	۲	۳	۳	۳	۳
Mccormick	۲	-۱/۹۱۳۳	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲
Rosenbrock	۲	۰	$8/9 \times 10^{-9}$	$1/0.8 \times 10^{-6}$	$2/7 \times 10^{-15}$
Rosenbrock	۲	۰	$2/82 \times 10^{-6}$	۶۳/۰۳	۲/۱۱
Rosenbrock	۱۲۰	۰	$2/21 \times 10^{-5}$	۱۳۶۹/۹۲	۳۷۱/۶۶
Shekel	۴	-۱۰/۵۳۶۴	-۱۰/۵۳۱۶	-۶/۴۶۱۹	-۱۰/۵۳۲
Six-Hump Camel	۲	-۱/-۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶

الگوریتم چرخه آب چه در مسائل با بُعد کم و چه در مسائل بزرگ‌مقیاس دارای عملکرد مناسبی است. پس از صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد بررسی با استفاده از توابع محک استاندارد، سه مدل برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر براساس الگوریتم‌های WCA, HS و ICA توسعه داده شد. بهترین مقادیر پارامترهای اولیه الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن جیرفت که با تحلیل حساسیت بر آن‌ها به‌دست آمد، در جداول ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

نتایج جدول ۲ نشان‌دهنده عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر سه الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب است. با افزایش بُعد مسئله و پیچیدگی آن (تابع Rosenbrock با ابعاد ۳۰ و ۱۲۰) عملکرد دو الگوریتم HS و ICA سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته‌است؛ اما الگوریتم WCA نسبت به دو الگوریتم دیگر به‌مراتب به جواب بهینه نزدیک‌تر بوده و خطای پایین‌تری دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲،

جدول ۳- مقادیر پارامترهای الگوریتم WCA در بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن جیرفت

تعداد تکرار	تعداد قطرات باران	تعداد رودخانه‌ها و دریا	تعداد متغیرهای تصمیم	C1	d_{max}
۱۰۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۲۳	۲	۱

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل HS در مسئله بهره‌برداری بهینه برق آبی از مخزن جیرفت

تعداد تکرار	اندازه حافظه هارمونی	تعداد متغیرهای تصمیم	HMCN	PAR
۱۰۰۰۰	۱۰۰	۲۲۳	۰/۹۵	۰/۳

جدول ۵- مقادیر پارامترهای مدل ICA در مسئله بهره‌برداری بهینه برق آبی از مخزن جیرفت

تعداد تکرار	تعداد کشور اولیه	تعداد متغیرهای تصمیم	تعداد استعمارگر اولیه	نرخ انقلاب	نرخ جذب
۱۰۰۰۰	۱۰۰	۲۲۳	۱۰	۰/۴	۰/۵

مسئله موردنظر با استفاده از الگوریتم‌های چرخه آب، جست‌وجوی هارمونی و رقابت استعماری برای سری زمانی ۱۹ ساله (مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸) از آمار در دسترس و به‌ازای مقادیر پارامترهای جداول ۳ تا ۵ حل شده است. تعداد تکرارها برای الگوریتم‌های مورد بررسی برابر با ۱۰۰۰۰ است. جدول ۶ مقادیر تابع هدف مسئله را به‌ازای ۱۰ اجرای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتایج الگوریتم‌های مختلف به‌ازای ۱۰ اجرای مختلف

تعداد اجرا	WCA	HS	ICA
۱	۶/۵۸	۸/۶۳	۸/۳۸
۲	۵/۵۷	۱۳/۸۹	۹/۷۸
۳	۵/۸۱	۱۶/۲۳	۹/۳۲
۴	۶/۲۹	۱۲/۶۵	۶/۸۸
۵	۵/۶۴	۱۴/۱	۷/۲۲
۶	۵/۴۷	۱۲/۷۵	۱۱/۰۶
۷	۴/۷۸	۸/۶۹	۹/۳۸
۸	۶/۲۹	۱۳/۸۸	۱۱/۵۴
۹	۵/۵۷	۱۳/۳۹	۵/۸۲
۱۰	۵/۵۶	۱۲/۶۴	۱۰/۶
میانگین	۵/۷۵	۱۲/۶۹	۹
حداقل	۴/۷۸	۸/۶۳	۵/۸۲
حداکثر	۶/۵۸	۱۶/۲۳	۱۱/۵۴
انحراف معیار	۰/۵۲	۲/۳۶	۱/۸۹

هارمونی و رقابت استعماری سریع‌تر به همگرایی رسیده و به مقدار بهینه سراسری نزدیک‌تر است.

شکل ۳ مقادیر انرژی تولیدی به‌دست‌آمده برای دوره آماری بلندمدت ۲۲۳ ماهه را نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۴ مقادیر رهاسازی بهینه (سناریوی بهره‌برداری بهینه) به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای دوره آماری مذکور، نشان داده شده است.

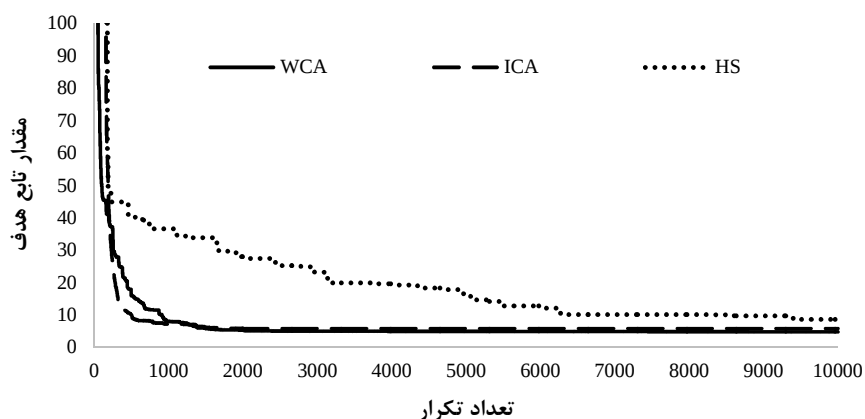
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میزان انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم WCA نسبت به الگوریتم‌های ICA و HS مورد بررسی، در سطح بالاتری قرار دارد و در اکثر ماه‌ها به ظرفیت تولید نیروگاه به مقدار ۳۲/۴ مگاوات نزدیک‌تر است. میزان انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم‌های WCA، ICA و HS به‌ترتیب برابر با

نتایج حاصل از جدول ۶ نشان‌دهنده برتری الگوریتم WCA نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در مینیمم‌سازی تابع هدف است. میانگین تابع هدف در ۱۰ اجرای مختلف برای الگوریتم WCA برابر با ۵/۷۵ است که این مقدار برای الگوریتم‌های ICA و HS به‌ترتیب برابر با ۹ و ۱۲/۶۹ است. همچنین انحراف معیار حاصل از الگوریتم‌های WCA، ICA و HS به‌ترتیب برابر با ۰/۵۲، ۱/۸۹ و ۲/۳۶ است که نشان‌دهنده همگرایی بهتر الگوریتم WCA در اجراهای مختلف است.

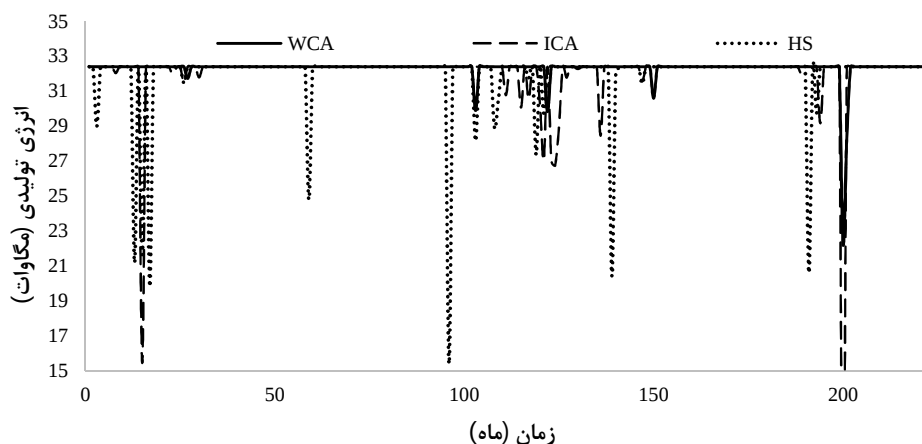
نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری بهینه برق آبی سد جیرفت در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، الگوریتم چرخه آب نسبت به الگوریتم جست‌وجوی

به‌دست‌آمده توسط الگوریتم WCA در ماه‌های مختلف سال و طول دوره آماری قابل‌توجه بوده و مقادیر بیشتری را نسبت به الگوریتم‌های ICA و HS ارائه کرده است.

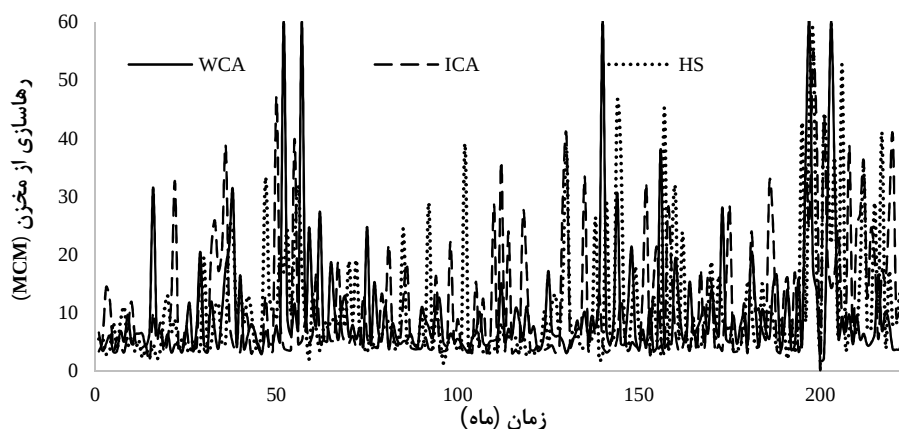
۷۲۰۳/۲۹، ۷۱۳۸/۶۶ و ۷۱۱۵/۷۸ مگاوات در طول دوره ۲۲۳ ماهه (از مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸) بوده که حاکی از برتری الگوریتم چرخه آب در تولید انرژی مخزن جیرفت است. در شکل ۴ مقادیر رهاسازی از مخزن،



شکل ۲- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سد جیرفت



شکل ۳- مقادیر انرژی تولیدی در دوره آماری بلندمدت ۲۲۳ ماهه سد جیرفت



شکل ۴- سناریوهای بهره‌برداری بهینه (رهاسازی بهینه برق‌آبی) از مخزن جیرفت در دوره آماری بلندمدت ۲۲۳ ماهه

نتیجه‌گیری

الگوریتم چرخه آب براساس شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی در طبیعت است که توانایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی در مقالات مختلف به اثبات رسیده‌است. الگوریتم چرخه آب که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌است، می‌تواند از مشکلاتی که الگوریتم‌های قدیمی‌تر در به‌دست‌آوردن بهینه مطلق که همان همگرایی زودرس و گند آن است، جلوگیری کرده و باعث ارتقا و افزایش اعتمادپذیری در پیدا کردن جواب بهینه شده که نتایج حاصل از آن تا حد زیادی قابل قبول است؛ به‌طوری‌که بدون قرارگرفتن در بهینه موضعی، در مسائل منابع آب ازجمله بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد، به‌طور مؤثری کارآمد است. پس از بررسی کارآمدی الگوریتم چرخه آب توسط تعدادی توابع محک استاندارد، از آن برای بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد جیرفت در دوره بلندمدت ۲۲۳ ماهه استفاده شد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم چرخه آب با نتایج الگوریتم‌های رقابت استعماری و جست‌وجوی هارمونی مقایسه شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم WCA، در مقایسه با الگوریتم‌های ICA و HS، جواب‌های حاصل شده بهبود قابل‌توجهی داشته‌اند؛ به‌طوری‌که بهترین مقدار برای تابع هدف در الگوریتم WCA برابر با $4/78$ نسبت به دو الگوریتم ICA و HS به‌ترتیب با $5/82$ و $8/63$ کاهش محسوس‌تری داشته و این موضوع بیانگر عملکرد مناسب این روش در زمینه بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد جیرفت است.

منابع

۱. احترام م.، موسوی س.ف.، کرمی ح.، تهرانی ن. و امیری آ. ۱۳۹۵. ارائه روش هیبریدی برای بهینه‌سازی مخازن سدها مبتنی بر هوش مصنوعی. نشریه سد و نیروگاه برق‌آبی ایران. ۳(۱۱): ۴۴-۵۴.
۲. احمدیان‌فر ا.، ادیب آ. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از سدها با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: سد دز)، علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸(۳): ۶۳-۷۱.
۳. احمدیان‌فر ا.، جامعی م. و خواجه ز. ۱۳۹۸. استخراج قوانین بهره‌برداری بهینه سامانه مخازن
۴. افشار م.، رضایی سنگدهی س. و معینی ر. ۱۳۹۳. الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در مسئله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها: مطالعه مقایسه‌ای چهار الگوریتم. فصلنامه مهندسی عمران فردوسی. ۲۵(۲): ۱۱۷-۱۳۴.
۵. اکبرفرد س.، شریفی م. ر. و قادری ک. ۱۴۰۰. بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی مخازن با استفاده از الگوریتم ازدحام پروانه (مطالعه موردی: سد کارون ۴). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۱(۴): ۶۹-۸۶.
۶. حسینی موغاری س.م.، مقدس م. و عراقی‌نژاد ش. ۱۳۹۶. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی (مطالعه موردی: مخزن کارون ۴). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی منابع آب. ۱۰(۳۲): ۱۹-۲۳.
۷. شرکت مهندسين مشاور یکم، شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، وزارت نیرو. ۱۳۸۸. طرح مطالعات زیست محیطی، منابع و مصارف حوضه غرب جازموریان با رویکردی سیستمی و جامع‌نگر.
8. Atashpaz-Gargari C. L. and Lucas C. 2007. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspires by imperialistic competition. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Sep. 25-27. Singapore.
9. Azizipour M. Ghalenoei V. Afshar M. H. and Solis S. S. 2016. Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm. Water resources management. 30(11): 3995-4009.
10. Baghipour R. Hosseini S. M. and Boor Z. 2014. A water cycle algorithm for optimal allocation of DGs in distribution systems considering environmental profits. International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC). 4(11): 430-454.
11. 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.
12. Eskandar H. Sadollah A. and Bahreininejad

- A. 2013. Weight optimization of truss structures using water cycle algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 1: 115-129.
13. Geem Z. W. 2000. Optimal design of water distribution networks using harmony search. Ph.D Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Korea University.
14. Nair S. J. and Sasikumar K. 2019. Fuzzy reliability-based optimization of a hydropower reservoir. *Journal of Hydroinformatics*. 21(2): 308-317.
15. Qaderi K. Akbarifard S. Madadi M. R. and Bakhtiari B. 2018. Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. 171(4): 179-190.
16. Wu X. Cheng C. Lund J.R. Niu W. and Miao S. 2018. Stochastic dynamic programming for hydropower reservoir operations with multiple local optima. *Journal of hydrology*. 564: 712-722.
17. Wurbs R. A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models J. *Water Resource Planning and Management*. 119(4): 455-472.
18. Zhang J. Wu Z. Cheng C.T. and Zhang S.Q. 2011. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. *Water Science and Engineering*. 4(1): 61-74.