



ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم های بهینه ساز گرگ خاکستری و رقابت استعماری در فرآیند بهره برداری بهینه از مخزن سد

سمیه امامی^{۱*}، یحیی چوپان^۲، فرزین سلماسی^۳

^۱گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۰۵

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

کلمات کلیدی:

الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم رقابت استعماری

بهره برداری بهینه

پیش بینی

سد شهرچای

خلاصه: در طول سه دهه اخیر، مسئله بهره برداری بهینه از مخازن سد ها در بین پژوهشگران مدیریت منابع آب از توجه زیادی برخوردار بوده است. در همین راستا، با توجه به کارایی و قابلیت های بالای الگوریتم های فراابتکاری در این پژوهش به پیش بینی ذخیره مخزن سد شهرچای ارومیه و ارائه یک برنامه پیش بینی کوتاه مدت چند سال آتی، با استفاده از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO) پرداخته شده است. الگوریتم GWO از سلسله مراتب رهبری و سازوکار شکار گرگ های خاکستری در طبیعت تقلید می کند. در این الگوریتم از چهار نوع گرگ خاکستری شامل آلفا، بتا، دلتا و امگا برای شبیه سازی سلسله مراتب رهبری استفاده شده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن افق دید برنامه ریزی یک ساله و بازه های زمانی ماهانه، ابتدا الگوریتم GWO برای مسئله پیش بینی ذخیره مخزن سد شهرچای ارومیه طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵، به خوبی ارزیابی و نتایج با روش بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مقایسه شد. نتایج نشان داد الگوریتم GWO، با دقت ۹۰٪ نتایج بسیار مطلوب تری در یافتن جواب بهینه، سرعت همگرایی و هزینه ی محاسباتی کم تری در مقایسه با الگوریتم ICA ارائه می کند. نتایج این پژوهش نشان داد الگوریتم GWO، الگوریتمی مناسب در حل مسئله بهره برداری بهینه از سیستم مخزن سد می باشد.

۱-مقدمه

و خشکسالی را نیز پیش بینی و مهار نمود. برای بهره برداری بهینه از یک مخزن باید مقدار تابع هدف و متغیر های مورد نظر به منظور برآورده نمودن نیاز طرح شده، بهینه گردند. در حالت واقعی معمولاً برای بهره برداری از یک مخزن، اهداف متفاوتی نظیر تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت در مناطق پایین دست، تولید انرژی برقی و کنترل سیلاب و تفریحات تعریف می شوند که می توانند همسو یا ناهمسو با یکدیگر باشند. بنابراین به منظور در نظر گرفتن تمامی اهداف بالا به طور هم زمان، سیستم تعریف شده به منظور بهره برداری بهینه از مخزن به صورت چند هدفه در نظر گرفته می شود. تکنیک های بسیاری برای بررسی و پیش بینی حجم مخزن سد مورد استفاده قرار می گیرند که بیش تر آن ها نیازمند اطلاعات ورودی فراوان و غیر قابل دسترس بوده و یا اندازه گیری این اطلاعات، نیازمند صرف

در سال های اخیر افزایش جمعیت، نیاز روز افزون به آب، محدودیت منابع آب و توزیع غیر یکنواخت آن و مصرف بی رویه از این منابع محدود، افزایش نیاز به منابع آبی را سبب گردیده است. این چالش ها موجب شده است که مدیریت بهینه منابع آب های سطحی مورد توجه بیش تری قرار گیرد و برنامه ریزی های مدیریتی به منظور پیش بینی و کنترل مصرف آب در آینده از اهمیت بیش تری برخوردار گردد. از جمله سازه هایی که در حوزه منابع آب به منظور ذخیره و استفاده از منابع سطحی استفاده می گردد، مخزن سطحی است [۱]. با پیش بینی نمودن حجم مخزن سد علاوه بر مدیریت بهره برداری منابع آب به منظور تأمین نیاز، می توان حوادث طبیعی نظیر سیل

* نویسنده عهده دار مکاتبات: somayehemami70@gmail.com



بهینه‌سازی زمانی و مالی فراوانی است [۲]. روش‌های فراابتکاری به دلیل انعطاف‌پذیری، ساز و کار آزاد از مشتق^۱ و اجتناب از گیر افتادن در بهینه محلی^۲ به صورت قابل ملاحظه‌ای رایج شده‌اند. این روش‌ها نسبتاً ساده هستند و عمدتاً از مفاهیم بسیار ساده الهام گرفته شده‌اند. برخی از موارد مشهور آن عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک^۳ (GA) (هاپت و هاپت، ۲۰۰۴)، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی ذرات^۴ (PSO) (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵)، الگوریتم کلونی مورچگان^۵ (ACO) (دریگو و همکاران، ۱۹۹۶)، الگوریتم زنبور عسل (ABC) (کارابوگا و باستورک، ۲۰۰۷)، الگوریتم رقابت استعماری^۶ (ICA) (آتش‌پز گرگری و لوکاس، ۲۰۰۷) و الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری^۷ (GWO) (میرجلالی و میرجلالی، ۲۰۱۴). روش‌های فراابتکاری برای جلوگیری از گیر کردن در بهینه‌های محلی در مقایسه با تکنیک‌های بهینه‌سازی معمولی دارای توانایی‌های برتری هستند. این به دلیل ماهیت تصادفی روش‌های فراابتکاری است که از گیر کردن در بهینه‌های محلی و جستجوی گسترده در کل فضای جستجو جلوگیری می‌کند [۳]. این روش‌ها با قابلیت سازگاری و با تغییرات پیش‌بینی نشده، جایگزین مناسبی برای مدل‌های تجربی و رگرسیونی جهت تخمین رفتار منابع آب محسوب می‌شوند.

در زمینه پیش‌بینی ذخیره از مخازن سدها مطالعات مختلفی انجام گرفته است که از نخستین پژوهش‌های انجام شده می‌توان به مطالعات فهمی و همکاران (۱۹۹۴)، واردلو و شریف (۱۹۹۹) و چانگیان و یی مین (۲۰۰۵)، اشاره کرد. مهدی‌پور و بزرگ حداد (۱۳۹۱)، با استفاده از الگوریتم مجموعه ذرات به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سد‌های چند منظوره پرداختند و مقایسه‌ای میان این الگوریتم در محیط متلب^۸ و CP در محیط لینگو^۹ صورت گرفت که در زمان برابر، لینگو نه تنها قادر به ارائه جواب غیر غالب نبود، بلکه در برخی موارد در مدت زمان محاسبات قادر به ارائه راه حل بهینه نیز نبود. معینی (۱۳۹۴)، با ارزیابی عملکرد الگوریتم

بهره‌برداری جامع مورچگان (چهار الگوریتم مختلف بهینه‌سازی جامع مورچگان شامل، سیستم مورچه، الگوریتم سیستم مورچه برتر، الگوریتم سیستم مورچه ترتیبی و الگوریتم سیستم مورچه بیشینه-کمینه) در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنه نشان دادند که الگوریتم بهینه‌سازی جامع مورچگان، الگوریتمی مناسب در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنه است. قدمی و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک قطعی، برنامه‌ای برای بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنی آب در شمال خراسان جهت مصارف کشاورزی تدوین کردند. در این مدل، با توجه به مقادیر مشخصی از متغیرهای حالت، اعم از حجم جریان در ابتدای سال و رژیم رودخانه در طول فصل زراعی، مناسب‌ترین الگوی بهره‌برداری از مخزن سدها تعیین شد. سمندی زاده و همکاران (۲۰۱۱)، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد امیرکبیر را به روش الگوریتم ژنتیک و برنامه ریزی پویا برای سناریوهای مارکوفی^{۱۰} و سری مشاهداتی انجام دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک در تمامی سناریوها توانایی ارائه نتایج بهتری را دارد. آدیمو (۲۰۱۱)، کارایی الگوریتم‌های فراکوشی را در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های فراکوشی روش‌های مناسبی برای حل مسائل چند بعدی، پیچیده و غیر خطی مخازن سدها می‌باشند. اصفا و سعیدی (۲۰۱۱)، مدل کوتاه مدت بهره‌برداری از مخزن سد را با استفاده از الگوریتم ژنتیک به کار بردند. نتایج با مدل سالور^{۱۱} در اکسل مقایسه شد و مشخص شد که سیاست بهره‌برداری مدل الگوریتم ژنتیک بهتر از مدل سالور اکسل می‌باشد. معینی و افشار (۲۰۱۳)، با معرفی دو فرمول‌بندی الگوریتم مفید جامع مورچگان (FCACOA)، از این روش‌ها برای حل مسائل مرجع سیستم چهار مربع، سیستم چهار مخزنه گسسته و ده مخزنه استفاده کردند. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از الگوریتم چرخه آب (WCA)^{۱۲} 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 بود. سونالیا و سوریانارایانا^{۱۳} (۲۰۱۴)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهره‌برداری بهینه از مخزن یوکای^{۱۴} در هند پرداختند. نتایج

در زمینه پیش‌بینی ذخیره از مخازن سدها مطالعات مختلفی انجام گرفته است که از نخستین پژوهش‌های انجام شده می‌توان به مطالعات فهمی و همکاران (۱۹۹۴)، واردلو و شریف (۱۹۹۹) و چانگیان و یی مین (۲۰۰۵)، اشاره کرد. مهدی‌پور و بزرگ حداد (۱۳۹۱)، با استفاده از الگوریتم مجموعه ذرات به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سد‌های چند منظوره پرداختند و مقایسه‌ای میان این الگوریتم در محیط متلب^۸ و CP در محیط لینگو^۹ صورت گرفت که در زمان برابر، لینگو نه تنها قادر به ارائه جواب غیر غالب نبود، بلکه در برخی موارد در مدت زمان محاسبات قادر به ارائه راه حل بهینه نیز نبود. معینی (۱۳۹۴)، با ارزیابی عملکرد الگوریتم

- 1 Derivation-Free Mechanism
- 2 Local Optima Avoidance
- 3 Genetic Algorithm
- 4 Particle Swarm Optimization
- 5 Ant Colony Optimization
- 6 Imperialist competitive Algorithm
- 7 Gray Wolf Optimizer Algorithm
- 8 Matlab
- 9 Lingo

- 10 Markov Chain
- 11 Solver
- 12 Water Cycle Algorithm
- 13 Sonaliya & Suryanarayana
- 14 Ukai

الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه^۴ (TS) پرداختند. نتایج نشانگر عملکرد خوب الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه بود. آناند و همکاران^۵ (۲۰۱۸)، سیاست بهره برداری بهینه از آب مخزن چند منظوره واقع در حوضه رودخانه گنگا را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل سوات^۶ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد الگوریتم ژنتیک روشی موفق برای ارزیابی استراتژی‌های عملیاتی مخزن چند منظوره است.

الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO)، یکی از انواع الگوریتم‌های فراابتکاری جدید است که در سال ۲۰۱۴ با هدف بهینه سازی و با رویکرد نوین مدل سازی فرآیند سلسله مراتب رهبری و سازوکار شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت، ابداع گردیده است. از مدت زمان کوتاه پس از ارائه، از این الگوریتم در حل مسائل بسیاری در حوزه بهینه سازی استفاده شده است. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، مشخص شد که دامنه مطالعات در خصوص به کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری نوین در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها، محدود و بیش تر مطالعات معطوف به کاربرد الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و ارزیابی عملکرد این الگوریتم در بهره برداری بهینه از مخزن سدها بوده است. با توجه به قابلیت‌های بالای الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسائل پیچیده مهندسی به خصوص در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها، در پژوهش حاضر از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO)، به عنوان روشی جدید و قدرتمند در حل مسئله بهره برداری بهینه از مخزن سد شهرچای ارومیه با لحاظ مقدار آب رهاسازی شده و میزان ذخیره مخزن سد به عنوان متغیرهای تصمیم مسئله استفاده شده است. علاوه بر این نتایج با روش‌های مینا مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه (سد شهرچای ارومیه)

به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی در تعیین سیاست‌های بهینه بهره برداری و پیش بینی ذخیره مخازن سد ها از اطلاعات سد شهر چای واقع در شهرستان ارومیه استفاده شده است. این سد بر روی رودخانه شهرچای از پر آب ترین رودخانه‌های استان آذربایجان

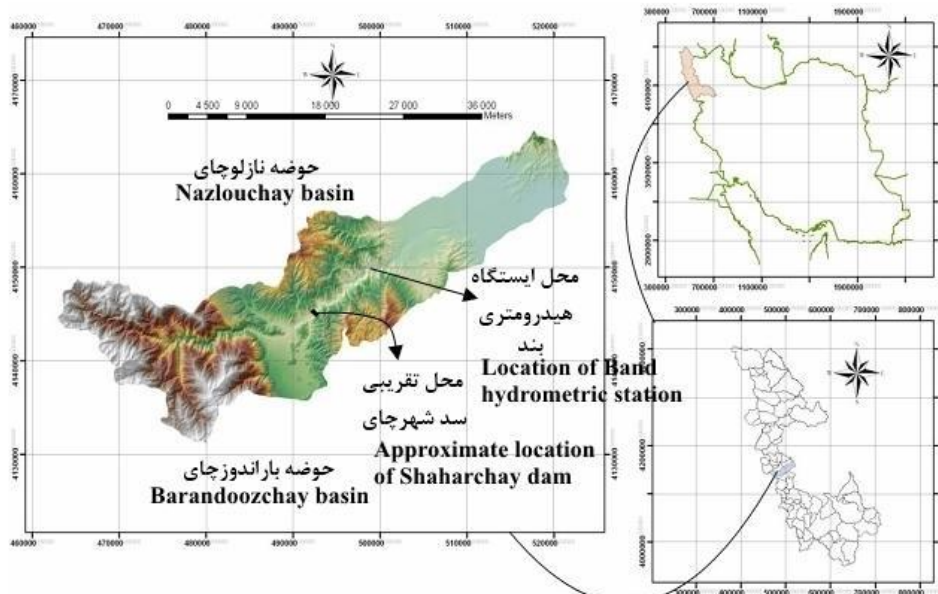
نشان داد که GA می تواند به طور کامل نیازهای پایین دست آبیاری را تأمین کند و رهاسازی را به حداقل برساند که منجر به صرفه جویی قابل توجهی در آب می شود. افشار و همکاران (۲۰۱۵)، مجموعه منحنی‌های بهینه را جهت بهره برداری یک سیستم تک مخزنی با هدف تأمین آب و تولید انرژی برق آبی توسعه دادند و برای رسیدن به این هدف از الگوریتم‌های رقابت استعماری و کلونی مورچگان برای بهینه سازی استفاده کردند. نتایج به دست آمده با استفاده از این دو روش نشان داد که الگوریتم رقابت استعماری در مقایسه با الگوریتم مورچگان عملکرد بهتری دارد.

صابر چناری و همکاران (۱۳۹۵)، از الگوریتم ژنتیک به منظور بهره برداری بهینه از سد مخزنی مهاباد در شمال غرب ایران استفاده نمودند و بیان داشتند که مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک حتی در شرایط بحرانی از خشکسالی کارایی مناسبی داشته و مدل بهینه شده می‌تواند نیاز آبی پایین دست را تأمین کند. امامی (۱۳۹۶)، حجم مخزن سد را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری انتخابات^۱ (EA)، پیش بینی نمود. هدف اصلی مطالعه ی ایشان پیش بینی میزان آب مخزن سد بر اساس بازه های زمانی ماهانه بود. نتایج حاکی از آن بود که الگوریتم انتخابات از دقت و سرعت همگرایی بسیار بالاتری برخوردار بود و توانست حجم مخزن سد را با خطای کم تری پیش بینی کند.

دین پژوه و همکاران (۱۳۹۶)، به بهره برداری بهینه از آب سد علویان با استفاده از دو روش فراابتکاری الگوریتم مجموعه ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج الگوریتم منتخب با نتایج سیاست بهره برداری استاندارد مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم مجموعه ذرات با شاخص‌های قابلیت اعتماد، آسیب پذیری و پایداری به ترتیب معادل با ۸۰/۱۱، ۸۴/۹۱ و ۵۵/۸۹ درصد مناسب تر از الگوریتم ژنتیک می باشد. پارلیکلار و همکاران^۲ (۲۰۱۷)، با ارزیابی رهاسازی مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مسئله بهره برداری بهینه، بیان کردند که الگوریتم GA با اندازه جمعیت ۶۰ و عملیات باز ترکیبی ۰/۶۴ نتایج بهینه‌تری ارائه داد. کنگرنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۸)، به توسعه ی منحنی‌های فرمان بهره برداری از مخزن سد چند منظوره Ubolrat واقع در شمال شرقی تایلند با استفاده از

4 Tabu Search
5 Anand et al
6 Coupling SWAT

1 Election Algorithm
2 Parlilar et al
3 Kangrang et al



شکل ۱. موقعیت سد شهرچای ارومیه بر روی نقشه [۹]

Fig. 1. Location of Urmia Shaharchay dam on the map

جغرافیایی ۴۵' ۴۴° طول شرقی و ۲۸' ۳۷° عرض شمالی در بالادست شهر ارومیه به فاصله تقریبی ۱۲ کیلومتر از این شهر واقع شده است [۱۰]. سد مخزنی شهرچای در تراز نرمال بهره برداری با حجم حدود ۲۲۰ میلیون مترمکعب از نوع سنگریزه ای با هسته آب بند رسی با مقطع دوزنقه ای احداث شده است. این سد به منظور تأمین آب شرب و صنعت به مقدار سالیانه ۶۷ میلیون مترمکعب، تأمین آب کشاورزی به مقدار سالیانه حداکثر ۱۳۲ میلیون مترمکعب، و نیز کاهش نیاز برداشت از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه ممانعت از شوری زدگی خاک و بهبود وضعیت اراضی زیر کشت احداث شده است [۱۰]. در جدول ۱ مشخصات فنی سد شهرچای ارومیه آورده شده است.

۲-۲- الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)، یک الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که از اساس آن، ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ ها در زمان شکار می باشد. الگوریتم GWO مبتنی بر جمعیت است و فرآیند ساده ای را در تنظیمات دارد و به راحتی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارا است [۱۱]. ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ های خاکستری به صورت زیر است:

- گرگ های خاکستری در رأس زنجیره غذایی هستند و

غربی بنا شده است. حوضه شهرچای در طول جغرافیایی ۱۷' ۴۴° تا ۳۵' ۴۴° و در عرض جغرافیایی ۱۹' ۳۷° تا ۳۵' ۳۷° قرار گرفته است (شکل ۱). رودخانه شهرچای به عنوان مهم ترین رودخانه این حوضه از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه سرچشمه می گیرد. این رودخانه پس از عبور از سمت جنوبی شهر ارومیه در سمت پایینی کشتیبان وارد دریاچه ارومیه می شود. طول رودخانه شهرچای ۶۰ کیلومتر و سطح حوضه آبریز آن ۹۶۰ کیلومترمربع است. این رودخانه دارای حجم رواناب سالیانه ۲۶۰ میلیون مترمکعب می باشد. رودخانه شهرچای ارومیه یکی از رودخانه های دائمی در ارومیه می باشد و آب آن در بهار به علت طغیان و خروج از مجرای رودخانه، شدت و سرعت جریان و در نهایت فرسایش بستر دارای مواد معلق فراوان بوده و همواره گل آلود و تیره رنگ است. اما، در تابستان به دلیل کاهش میزان آب و سرعت جریان دارای آبی زلال، صاف و قابل شرب است. مساحت حوضه آبریز رودخانه شهرچای در محل بند ۳۹۶ کیلومتر مربع و میانگین سالیانه آب این رودخانه در محل بند پس از انشعاب آب آشامیدنی به ۱۶۸ میلیون مترمکعب می رسد. یک ایستگاه هیدرومتری در محل بند دایر است و وضعیت اقلیمی این ایستگاه بر اساس طبقه بندی آمبرژه، اقلیم نیمه خشک سرد و بر اساس طبقه بندی دمارتن دارای اقلیم نیمه خشک، مدیترانه ای است [۸].

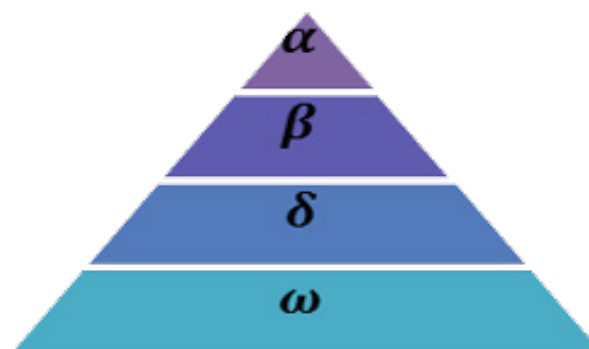
سد شهرچای بر روی رودخانه شهرچای و در محلی با مختصات

جدول ۱. مشخصات فنی سد شهرچای ارومیه

Table 1. Technical specifications of Urmia Shahrchay dam

نوع سد	خاکی سنگریزه ای با هسته آب بند رسی
ارتفاع از پی	۱۱۹ متر
ارتفاع از بستر رودخانه	۸۴ متر
طول تاج	۵۵۰ متر
حجم کل مخزن	۲۲۰ میلیون مترمکعب
حجم مفید مخزن	۲۱۳ میلیون مترمکعب
حجم آب قابل تنظیم سالیانه	۱۹۹ میلیون مترمکعب
ظرفیت تخلیه	۳۷۰ میلیون مترمکعب

- گرگ های امگا (ω): پایین ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب که کم ترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند. بعد از همه غذا می خورند و در فرآیند تصمیم گیری مشارکتی ندارند [۱۱ و ۱۲]. در شکل ۲، ساختار سلسله مراتبی گروه های گرگ ها نشان داده شده است.



شکل ۲. ساختار سلسله مراتبی گروه های گرگها، گرگهای آلفا، گرگهای بتا، گرگهای دلتا و گرگهای امگا

Fig. 2. Hierarchy exists in pack; α is the leader and decision maker, β and γ assist α in decision making, Rest of the wolves (ω) are followers

۲-۲-۱- فرآیند شکار گرگ های خاکستری

مطابق بررسی های مورو^۱ و همکارانش مراحل اصلی شکار گرگ های خاکستری شامل ۳ فاز اصلی است [۱۳ و ۱۴]:

(الف) مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن^۲

(ب) نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت بازماند^۳.

(ج) حمله به شکار

بهینه سازی با استفاده از گرگ های α , β و δ انجام می شود. یک گرگ به عنوان α هدایت کننده اصلی الگوریتم فرض می شود و یک گرگ β و δ نیز مشارکت دارند و بقیه گرگ ها به عنوان دنبال کننده آن ها محسوب می شوند. در شکل ۳، این مراحل نشان داده شده است.

فلوچارت الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری در شکل ۴، آورده شده است.

۲-۳- الگوریتم رقابت استعماری

همانند دیگر الگوریتم های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی

زندگی اجتماعی دارند. تعداد متوسط گرگ های هر گله بین ۵ تا ۱۲ است. در هر گله ۴ رتبه اصلی وجود دارد.

- گرگ های رهبر گروه آلفا (α) نامیده می شوند که می توانند مذکر یا مؤنث باشند. این گرگ ها بر گله مسلط هستند و مواردی مانند محل استراحت یا نحوه شکار را مدیریت می کنند، اما علاوه بر رفتار مسلط گرگ های α نوعی ساختار دموکراتیک هم در گروه دیده می شود.

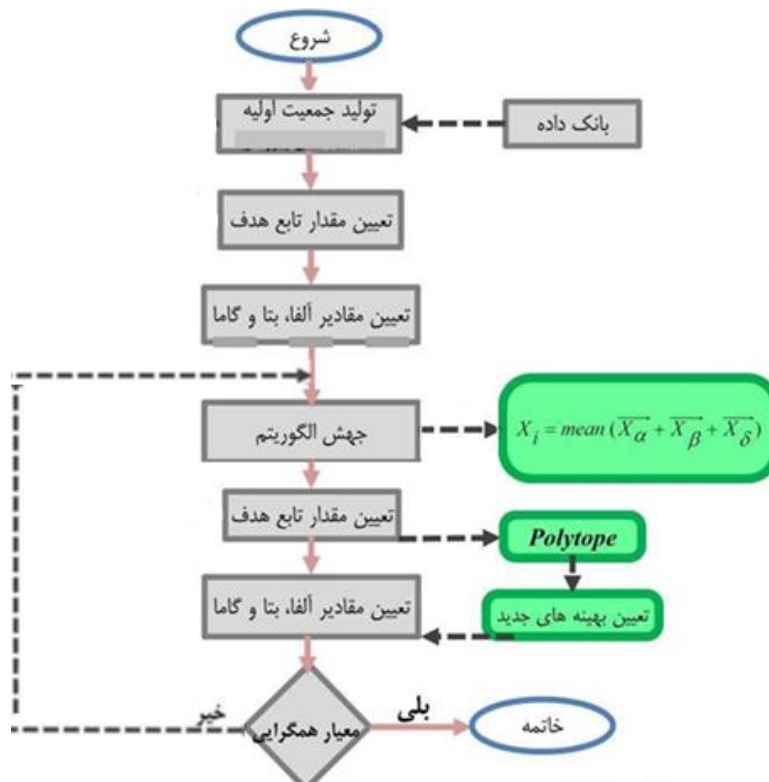
- گرگ های بتا (β): کمک به گرگ های α در فرآیند تصمیم گیری بوده و هم چنین مستعد انتخاب شدن به جای آن ها هستند.

- گرگ های دلتا (δ): پایین تر از گرگ های β و شامل گرگ های پیر، شکارچی ها و گرگ های مراقبت کننده از نوزادان هستند.

1 Muro
2 Tracking and approaching
3 Pursing and encircling



شکل ۳. رفتار شکار گرگهای خاکستری: (الف) تعقیب، نزدیک شدن و ردیابی طعمه، (ب، ج و د) تعقیب، محاصره و آزار طعمه و (و) وضعیت ثابت و حمله
 Fig. 3. Hunting behavior of grey wolves: (A) chasing, approaching, and tracking prey (B-D) pursuing, harassing, and attacking prey (E) stationary situation and attack



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری
 Fig. 4. Flowchart of Gray Wolf optimizer algorithm

حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است. با شکل گیری امپراطوری های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن ها شروع می شود. هر امپراطوری ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و

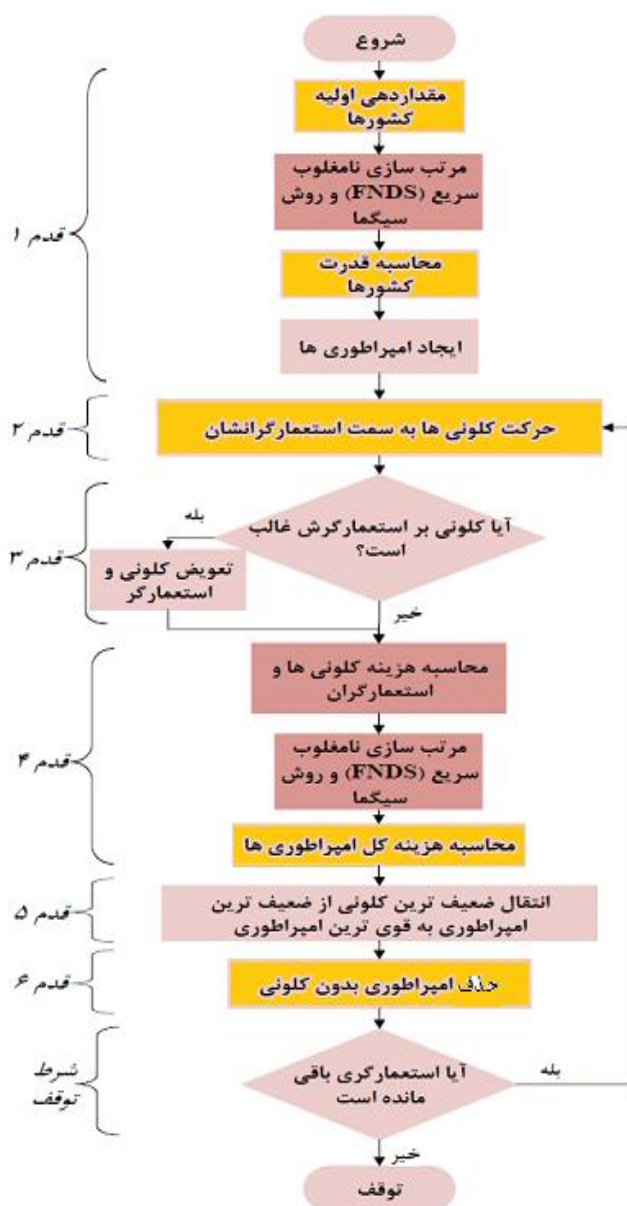
جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن ها یک "کشور" نامیده می شوند؛ شروع می شود. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روندی به نام سیاست جذب؛ به سمت خود می کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست و مستعمرات آن، بستگی دارد. در

در روابط بالا تابع $F(x)$ ، به عنوان تابع هدف، $M(x)$ و $N(x)$ محدودیت های مساوی و نامساوی مسئله می باشند.

در پژوهش حاضر تابع هدف نسبی مدل به صورت اختلاف مقدار جریان خروجی با نیاز پایین دست با توجه به برقراری رابطه ی پیوستگی ارائه شد. پس از تنظیم این تابع، حداقل آن به صورت رابطه ۴ محاسبه خواهد شد.

Minimize (4)

$$F = \sum_{t=1}^{12} (R_t - D_t)^2 + \sum_{t=1}^{12} (S_t - S_{t+1} + R_t - E_t)^2 \quad t+1 \leq 12$$



شکل ۵. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری

Fig. 5. Flowchart of imperialist competitive algorithm

یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری های رقیب و به سیطره در آوردن آن ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری های بزرگ تر افزوده شده و امپراطوری های ضعیف تر، حذف خواهند شد. امپراطوری ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. بدین ترتیب، با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراطوری ها نزدیک تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی (زمان توقف الگوریتم)، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشیم، با مستمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست، خیلی نزدیک هستند [۱۵]. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری در شکل ۵، ارائه شده است.

۲-۴- تعریف مسأله

در پژوهش حاضر، هدف ارائه یک برنامه بهره برداری از مخزن سد شهر چای برای یک دوره مشخص از دوران بهره برداری مخزن سد و تأمین نیاز پایین دست می باشد. لذا هدف از ارائه پژوهش حاضر ارزیابی و بررسی مقایسه ای الگوریتم های بهینه ساز گرگ خاکستری و رقابت استعماری در پیش بینی و ارائه برنامه بهره برداری از مخزن سد در ماه های بهره برداری مشخص می باشد. پارامترهای الگوریتم های بهینه ساز گرگ خاکستری و رقابت استعماری که در عمل پیش بینی ذخیره سد مورد استفاده قرار می گیرند شامل موارد زیر می باشند:

۲-۴-۱- تابع هدف

تابع هدف مد نظر در این پژوهش به صورت رابطه های ۱ تا ۴ در نظر گرفته شده است:

$$\text{Minimize} \quad : F(x)$$

$$N_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, k \quad (1)$$

$$M_j(x) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (2)$$

$$X_1 \leq X \leq X_u \quad (3)$$

دریاچه سد در هر ماه، S_{min} حداقل مقدار ذخیره در هر ماه و S_{max} حداکثر مقدار ذخیره در هر ماه می باشد.

به منظور انجام بهینه سازی مقادیر نیاز آبی پایین دست سد، میزان ورودی به سد با در نظر گرفتن ۹۰٪ نیاز آبی پایین دست، ارتفاع تبخیر خالص ماهانه دریاچه بر اساس معادلات کالیبره شده، حداکثر میزان خروجی از سد بر اساس شرایط نرمال خروجی سد محاسبه گردید:

$$I_t = \bar{I}_t - 0.5 = SD_t \quad (9)$$

که I_t ورودی مخزن در هر ماه، \bar{I}_t میانگین جریان ورودی ۷ ساله در ماه t ، $(SD)_t$ انحراف معیار جریان ورودی در ماه t می باشد.

۲-۵- شاخص های ارزیابی

در پژوهش حاضر از شاخص های ضریب تعیین (R^2)، مجذور مربعات خطا (RMSE) و معیار نش- ساتکلیف (NSE) به صورت روابط ۱۰ تا ۱۲، برای مقایسه نتایج الگوریتم های GWO و ICA با یکدیگر و مقادیر مشاهداتی و نیز ارزیابی آن ها استفاده شد.

- ضریب تعیین

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

- مجذور مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (11)$$

- معیار نش-ساتکلیف

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

که در این روابط، X_i مقادیر پیش بینی شده، Y_i ها مقادیر مشاهده شده، \bar{x} میانگین X و \bar{Y} میانگین Y ها می باشد. مقدار ایده آل به ترتیب برای R^2 و RMSE برابر یک و ۱۰-۱٪ می باشد. مقدار معیار نش ساتکلیف (NSE) از ۱ تا منفی بی نهایت تغییر می کند، به طوری که محدوده های ۱-۰/۷۵ و ۰/۷۵-۰/۳۶ و کم تر از ۰/۳۶ به ترتیب بیانگر عملکرد بسیار خوب، رضایت بخش و ضعیف مدل مورد استفاده می باشد.

در رابطه ۴، بخش اول بیانگر اختلاف مقدار جریان خروجی با نیاز پایین دست می باشد و بخش دوم تابع شامل رابطه پیوستگی می باشد که مقدار جریان ورودی I_t به ازاء احتمالات مختلف می تواند مورد بررسی واقع گردد. در واقع ساختار رابطه ۴ به گونه ای است که با محاسبه مقدار خروجی از سد، می توان مقادیر ذخیره مخزن سد را در هر ماه پیش بینی نمود. پس از تعریف تابع هدف، برای قسمت های مختلف الگوریتم های بهینه ساز گرگ خاکستری و رقابت استعماری، همانند جمعیت اولیه، حداکثر تکرار و... باید مقادیر مناسب را انتخاب نمود که البته انتخاب صحیح این مقادیر تأثیر مستقیمی در نحوه عملکرد و سرعت الگوریتم ها در مسئله مدنظر خواهد داشت.

۲-۴- محدودیت ها

- میزان آب رهاسازی شده در هر ماه بایستی کم تر و یا معادل نیاز آبی پایین دست در آن ماه باشد:

$$R_t \leq D_t \quad t = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (5)$$

- میزان ذخیره سد در هر ماه بایستی کم تر و یا معادل نیاز آبی پایین دست در آن ماه باشد:

$$S_{min} \leq S_t \quad \text{and} \quad S_t = S_{max}, \quad t = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (6)$$

۲-۴-۳- قیود

الف) قید پیوستگی

ذخیره آب مخزن در ماه آینده برابر خواهد بود با ذخیره آب مخزن در ماه جاری به علاوه مقدار آب ورودی به مخزن سد منهای مجموع مقادیر خروجی از سد و مقدار تبخیر خالص از سطح دریاچه سد در همین ماه جاری، که در بخش دوم رابطه ۴ ارائه شده است.

ب) محدودیت حجم مخزن

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall_t \quad (7)$$

ج) نامنفی بودن میزان آب رهاسازی

میزان آب رهاسازی از مخزن باید دارای مقادیر مثبت و بزرگ تر از صفر در هر ماه باشد.

$$R_t \geq 0 \quad \forall_t \quad (8)$$

در این روابط، R_t مقدار خروجی از سد در هر ماه، D_t نیاز پایین دست در هر ماه، S_t مقدار ذخیره در هر ماه، E_t مقدار تبخیر از سطح

۳- نتایج عددی

۳-۱- آنالیز آماری داده های ورودی

داده های جریان ماهانه ورودی به سد طی دوره آماری ۸ سال (۹۳-۱۳۸۵) مورد استفاده در پژوهش حاضر، از نظر همگنی و تصادفی بودن با استفاده از روش جرم مضاعف مورد بررسی و آنالیز قرار گرفتند. نتایج تصادفی بودن داده ها که با استفاده از آزمون ران تست انجام شد در جدول ۲ ارائه شده است.

از ۷۵ درصد داده های موجود به منظور آموزش و از ۲۵ درصد داده ها برای صحت سنجی مدل ها استفاده شد. از آنجایی که وارد کردن داده ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت مدل ها می شود، از این رو داده های ورودی به مدل به صورت رابطه ۱۳، بین ۰-۱ نرمالیزه شدند. هدف از نرمال سازی داده ها، یکسان سازی اهمیت ورودی های مختلف به مدل های مورد استفاده است.

$$Z_n = \frac{Z - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} \quad (13)$$

در این رابطه، Z معرف داده به صورت خام، Z_n داده های نرمالیزه شده، Z_{min} حداقل داده ها، Z_{max} حداکثر داده ها می باشند. پس از معرفی تابع هدف، انجام تحلیل حساسیت و یافتن مقادیر بهینه

پارامترهای مؤثر الگوریتم ها و به کارگیری آن ها در مدل ها، متغیرهای تصمیم مسئله که شامل ۲۴ متغیر بود محاسبه گردید. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم های GWO و ICA مطابق جدول ۳ می باشند.

در اجرای تابع هدف توسط الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری، متغیرهای مسأله که ۲۴ متغیر بود، محاسبه گردید که متغیرهای ۱ تا ۱۲ مربوط به مقدار خروجی از سد در ماه های مختلف و متغیرهای ۱۳ تا ۲۴ نیز مربوط به مقدار ذخیره در ماه های مذکور می باشند. در شکل ۶ مقدار ذخیره سد شهر چای ارومیه در ماه های مختلف سال که با استفاده از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری پیش بینی شده است، آورده شده است.

همان گونه که از شکل ۶ نیز استنباط می شود بیش ترین مقدار ذخیره در ماه های اردیبهشت و خرداد یعنی ماه های منتهی به تابستان که در منطقه ی آذربایجان بیش ترین تقاضای آب در این فصل می باشد، پیش بینی شده است. از سوی دیگر کم ترین مقدار ذخیره در ماه های آبان و آذر که در این منطقه بیش ترین احتمال خطر سیلاب وجود دارد، پیش بینی گردیده است.

با توجه به شکل ۷، مقدار ذخیره حاصل از اجرای الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری بسیار نزدیک به مقدار اندازه گیری شده

جدول ۲. نتیجه آزمون تصادفی بودن داده های سالانه

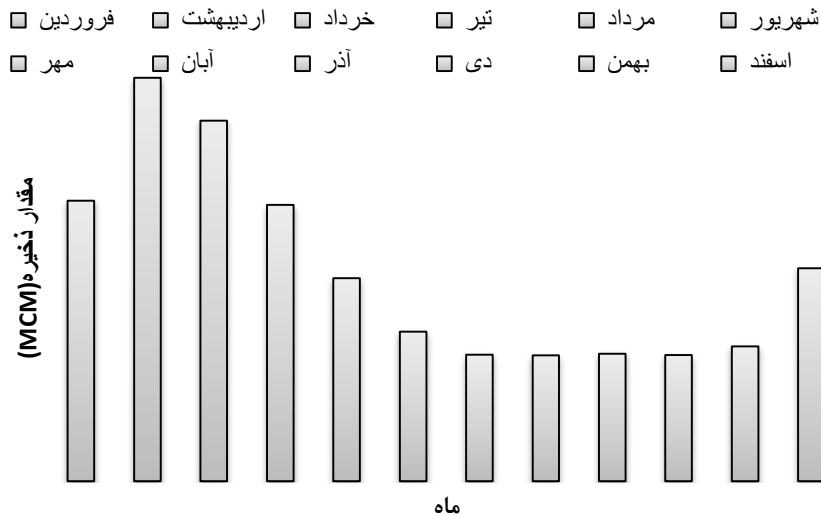
Table 2. The result of the annual data randomness test

ازمون تصادفی بودن داده ها	حد مجاز	سد شهرچای
-۱/۲۲	± ۱/۶۹	

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم های GWO و ICA

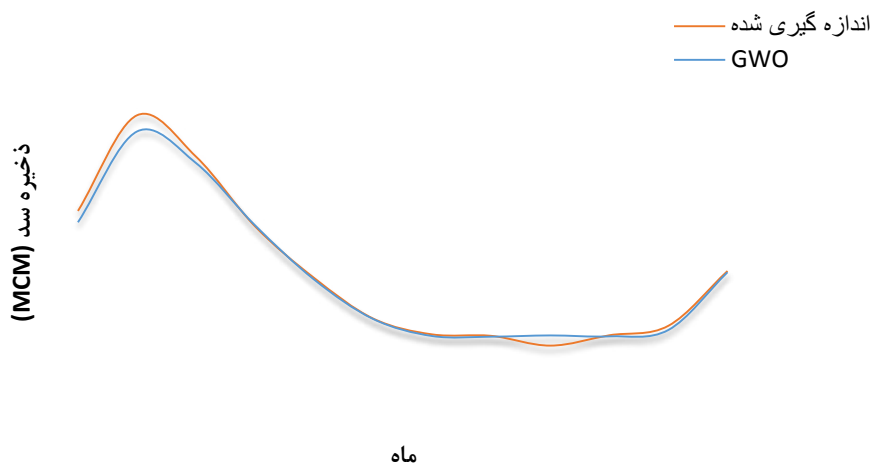
Table 3. Parameters used in GWO and ICA algorithms

GWO		ICA	
۱۲	تعداد گرگ ها	۱۰۰	تعداد کشورهای اولیه
۳۰	محدوده پایین	۶	تعداد استعمارگران اولیه
-۳۰	محدوده بالا	۹۴-۱۰۰	تعداد مستعمرات
۳۰۰	حداکثر تکرار	۲	β
-	-	$\pi/4$	γ
-	-	۰/۰۱	ζ



شکل ۶. مقدار ذخیره سد طی دوره آماری ۱۳۸۵-۹۳

Fig. 6. Dam storage amount during the statistical period of 2006-2014



شکل ۷. مقایسه ی مقدار ذخیره اندازه گیری شده و مقدار ذخیره به دست آمده سد از اجرای الگوریتم GWO در ماه های مختلف طی دوره آماری ۱۳۸۵-۹۳

Fig. 7. Comparison of the measured and the obtained storage from the implementation of the GWO algorithm in different months during the statistical period of 2006-2014

آمده است، ولی نتایج حاصل از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری با مقدار جواب بهینه ی ۳۰۴/۵۷۲ به دلیل عدم همگرایی سریع و نابهنگام الگوریتم، مطلوب تر است و یا به عبارتی دیگر با به کارگیری الگوریتم GWO، حداکثر مقدار تابع هدف در مقایسه با الگوریتم ICA، ۳/۰۶ درصد کاهش می یابد. دلیل این امر آن است که طول بازه گسسته سازی شده متغیر تصمیم در الگوریتم GWO و نیز تعداد اجراهای با جواب شدنی (حصول جواب در تمامی ۱۰ اجرای برنامه) بیش تر از الگوریتم ICA است. معینی (۱۳۹۴)، مسئله بهره برداری از مخزن سد را با استفاده از چهار الگوریتم مختلف بهینه سازی

ذخیره سد می باشد و این مسئله بیانگر هم گرایی، کارایی و راندمان بالای الگوریتم GWO در سیستم های منابع آب می باشد.

در جدول ۴، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری و رقابت استعماری برای سد شهر چای در ماه های مختلف سال و در جدول ۵، مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط مقدار تابع هدف، انحراف معیار نرمال سازی شده و تعداد اجراهای با جواب شدنی در ۱۰ بار اجرای برنامه برای الگوریتم های پیشنهادی، ارائه شده است.

نتایج نشان دهنده آن است که با استفاده از هر دو الگوریتم پیشنهادی (ICA و GWO) جوابی مناسب برای مسئله به دست

جدول ۴. نتایج حاصل از الگوریتم های ICA و GWO

Table 4. Results from GWO and ICA algorithms

ماه	حجم خروجی بهینه حاصل از مدل بهینه‌ساز گرگ خاکستری میلیون مترمکعب (MCM)	حجم خروجی بهینه حاصل از مدل رقابت استعماری میلیون مترمکعب (MCM)	حجم ذخیره بهینه حاصل از مدل رقابت استعماری میلیون مترمکعب (MCM)	حجم ذخیره بهینه حاصل از مدل بهینه‌ساز گرگ خاکستری میلیون مترمکعب (MCM)
مهر	14.33	15.90	59.53	56.58
آبان	8.58	9.70	59.11	55.26
آذر	6.49	6.10	52.92	50.00
دی	7.66	6.63	59.33	56.29
بهمن	7.03	6.36	63.42	59.20
اسفند	7.70	7.70	100.09	85.27
فروردین	9.45	8.82	131.87	124.99
اردیبهشت	18.65	18.28	189.62	182.74
خرداد	20.52	19.70	169.50	154.72
تیر	29.84	29.12	126.89	121.16
مرداد	25.99	25.60	95.41	89.40
شهریور	24.66	23.52	70.35	65.42

جدول ۵. مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه با استفاده از الگوریتم های پیشنهادی

Table 5. Mean, maximum and minimum values of the objective function for 10 times of program execution using the proposed algorithms

نوع سد	خاکی سنگریزه ای با هسته آب‌بند رسی
ارتفاع از پی	۱۱۹ متر
ارتفاع از بستر رودخانه	۸۴ متر
طول تاج	۵۵۰ متر
حجم کل مخزن	۲۲۰ میلیون مترمکعب
حجم مفید مخزن	۲۱۳ میلیون مترمکعب
حجم آب قابل تنظیم سالیانه	۱۹۹ میلیون مترمکعب
ظرفیت تخلیه	۳۷۰ میلیون مترمکعب

در شکل ۸، مقدار ذخیره مخزن سد شهر چای در ماه های مختلف سال با استفاده از دو الگوریتم GWO و ICA و مقدار ذخیره واقعی سد در هر ماه، مقایسه گردیده است.

همان گونه که ملاحظه می شود نتایج به دست آمده از الگوریتم GWO بسیار بهینه بوده و اختلاف بسیار ناچیزی با مقدار ذخیره اندازه گیری شده دیده می شود که این نشان دهنده کارایی و راندمان

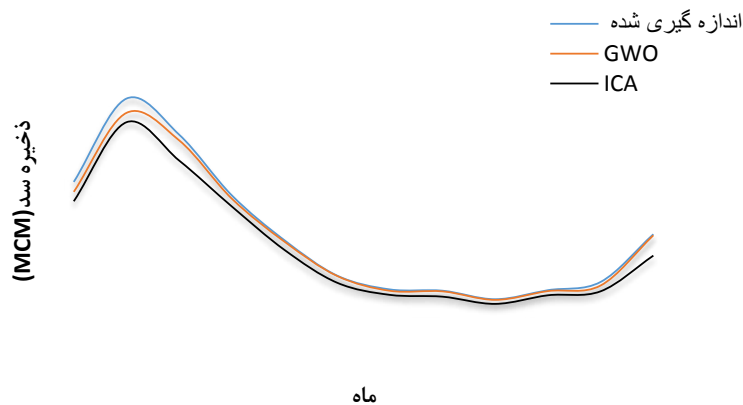
جامعه مورچگان، مورد بررسی قرار داد که مقدار جواب بهینه مسئله را به ترتیب با به کارگیری دو فرمول بندی I و II و الگوریتم سیستم مورچه برابر با ۲۷۸/۱۹۹ و ۲۷۲/۹۹۱ به دست آورد که در مقایسه با نتایج بهینه الگوریتم GWO، ۸ درصد کاهش داشته است، به عبارت دیگر نتایج حاصل از الگوریتم GWO در مقایسه با نتایج الگوریتم سیستم مورچه مطلوب تر است.

هم چنین بر اساس نتایج حاصله، میانگین مقادیر حاصل از پارامترهای ارزیابی الگوریتم های GWO و ICA، R^2 ، RMSE و NSE به ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۰/۰۲۵، ۰/۷۶، ۰/۸۹، ۰/۰۴۲ و ۰/۷ به دست آمد که نتایج حاصل از الگوریتم GWO در مقایسه با نتایج الگوریتم ICA در محدود ایده آل تر و رضایت بخش تری قرار دارد. در شکل ۱۰ نمودار روند همگرایی مقدار خسارت کلی برای کل ۱۲ ماه دوره بهره برداری از مخزن بر اساس بهترین جمعیت به دست آمده از مدل بهره برداری نشان داده شده است. (با اختصاص تعداد مراحل اجرای برنامه: ۱۰۰۰ و تعداد جمعیت اولیه: ۱۰۰). همان طور که از شکل ۱۰ مشخص می باشد میزان خسارت برنامه بهره برداری ارائه شده با الگوریتم GWO نسبت به الگوریتم ICA به طور معنی داری کم تر می باشد. پس از اثبات کارایی و دقت الگوریتم GWO در یافتن مقدار

بسیار بالای الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم ICA می باشد. درصد خطای بین مقادیر اندازه گیری شده ذخیره سد و مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم های GWO و ICA محاسبه (با استفاده از رابطه ۱۴) و در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به درصد خطای اجرای هر دو الگوریتم، می توان دریافت که نتایج حاصل از اجرای الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم ICA بسیار رضایت بخش است.

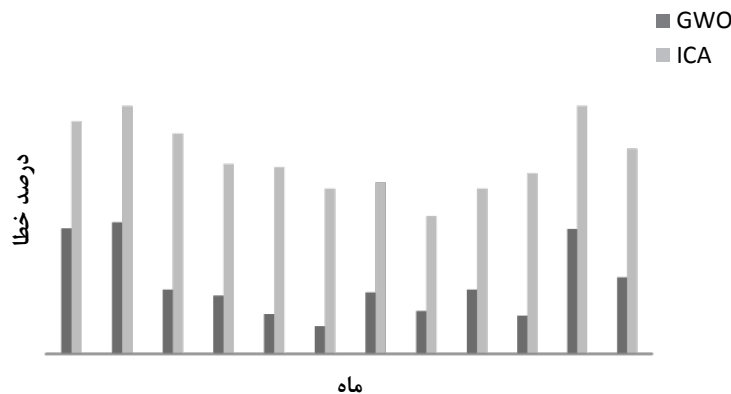
$$ARE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (St_{real} - St_{predict})}{\sum_{i=1}^N St_{real}} \times 100 \quad (14)$$

در رابطه بالا، St_{real} مقدار ذخیره سد اندازه گیری شده، $St_{predict}$ مقدار ذخیره سد پیش بینی شده توسط الگوریتم ها و N تعداد ماه ها می باشد.



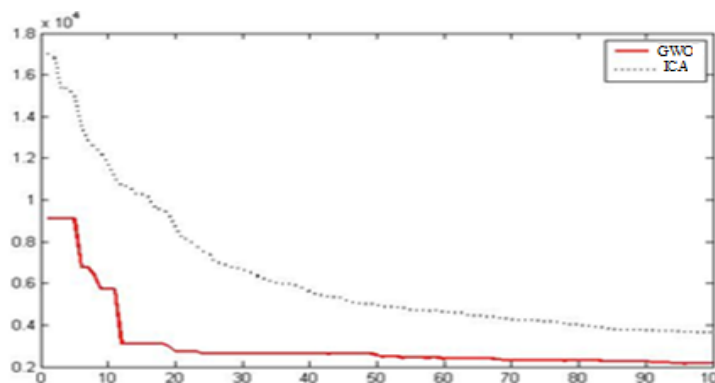
شکل ۸. مقایسه ی مقدار ذخیره سد در ماه های مختلف طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵

Fig. 8. Comparison of dam storage in different months during the statistical period of 2006-2014



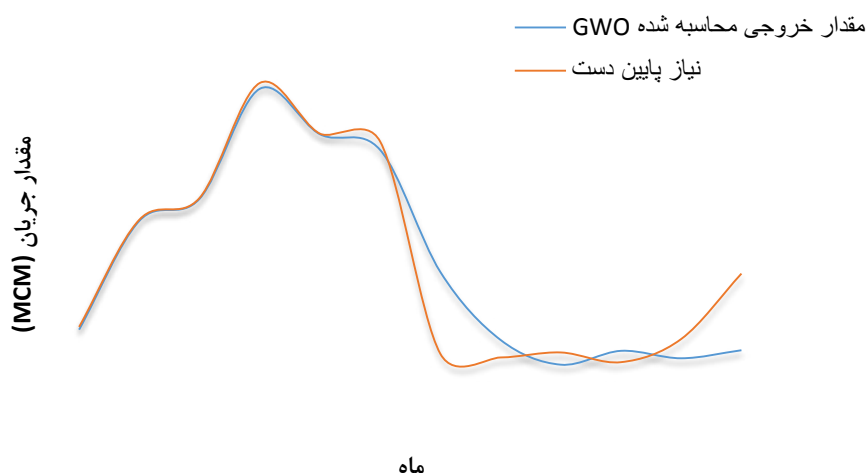
شکل ۹. مقایسه ی درصد خطا در ماه های مختلف طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵

Fig. 9. Comparison of error rates in different months during the statistical period 2006-2014



شکل ۱۰. نمودار روند همگرایی مقدار خسارت کلی برای کل ۱۲ ماه طبق کد الگوریتم های GWO و ICA

Fig. 10. Convergence trend chart of the total damage amount for the whole 12 months according to the code of GWO and ICA algorithms



شکل ۱۱. روند تطابق نیاز پایین دست و مقدار خروجی محاسبه شده از سد برای کل ۱۲ ماه طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵

Fig. 11. Downstream demand matching process and the amount of output obtained from the dam for a total of 12 months during the statistical period of 2006-2014

مخزن به دست آمده در ماه هایی که تقاضای آبی بالاست در حدود تعیین شده و پاسخگوی نیاز آبی پایین دست می باشد. این درحالی است که در ماه های بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت فضای لازم برای کنترل سیلاب نیز به خوبی تأمین شده است (جدول ۶). لذا مشخص می شود که نتایج حاصل از الگوریتم GWO به دلیل تعیین ظرفیت مخزن بین حدود و تأمین نیاز های آبی پایین دست با درصد بالا، رضایت بخش تر می باشد.

با توجه به آن که نتایج به ازای ورودی با احتمال ۹۰ درصد پیش بینی شده است، با استفاده از قابلیت های الگوریتم GWO می توان احتمالات مختلف را برای ورودی ها بررسی نمود (شکل ۱۲). همان گونه که مشخص می شود، با تغییر در مقدار ورودی الگوریتم در

جواب بهینه و پیش بینی ذخیره مخزن سد شهرچای در مقایسه با الگوریتم ICA، در شکل ۱۱ روند تطابق مقدار خروجی ماهانه برای کل ۱۲ ماه دوره بهره برداری از مخزن ارائه شده است. مطابق شکل، هر دو نمودار کاملاً بر هم منطبق بوده و یعنی نیاز های آبی پایین دست به طور کامل برآورده شده است. هم چنین بررسی مقادیر خروجی از سد بیانگر این است که نیاز پایین دست کاملاً برآورده شده و حتی با وجود در نظر گرفتن بدترین شرایط خشکسالی، یعنی ورودی ۹۰ درصد نیز مشکلی در این زمینه وجود ندارد (شکل ۱۱).

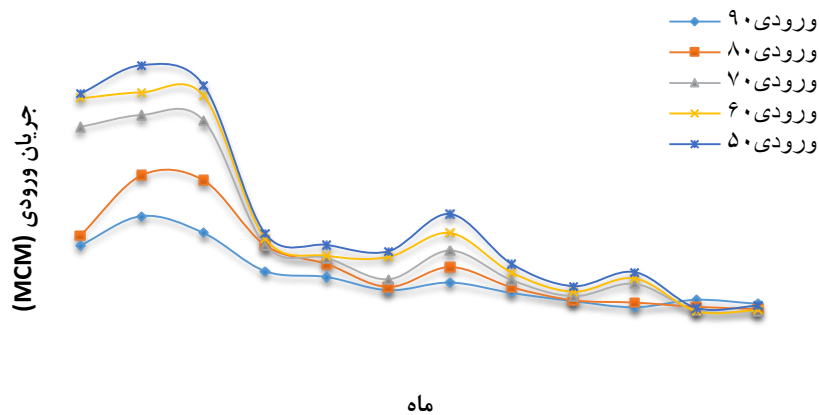
با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می شود که دو نمودار تا حد بسیار خوبی بر هم منطبق بوده به نحوی که هم نیاز های آبی پایین دست تأمین شده و هم از اتلاف آب جلوگیری شده است. حجم بهینه ذخیره

که در مقایسه با نتایج حاصل از الگوریتم GWO، به ترتیب ۳۰٪، ۲۳٪، ۳۲٪ و ۲۵٪ درصد کم‌تر است.

۲-۳- ارائه معادلاتی جهت پیش بینی ذخیره مخزن سد شهرچای
 به منظور تعیین معادله‌ای جهت تخمین ذخیره مخزن سد شهرچای، از رگرسیون خطی و غیر خطی استفاده شد. برای به دست آوردن بهترین معادله، توابع مختلفی برای S_t به عنوان متغیر وابسته در رابطه با متغیرهای مستقل به عنوان (D_t, R_t, I_t) ارائه شد. معادلات زیر با ضریب تبیین $R^2=0.91$ به عنوان بهینه ترین معادلات جهت تخمین ذخیره مخزن سد شهرچای معرفی گردیدند.

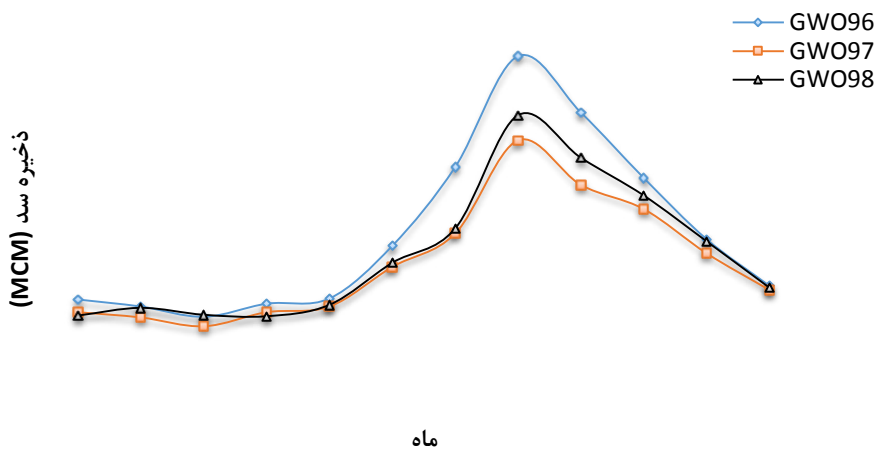
$$S_t = 14.8D_t - 17.8R_t + 0.5I_t + 58 \quad (15)$$

مقدار خروجی تغییر قابل توجهی دیده نمی شود و نیاز پایین دست همین مقدار باقی می ماند و تغییر اصلی که الگوریتم ایجاد می کند بر روی مقدار ذخیره خواهد بود. طبق شکل مقدار ذخیره در ماه های منتهی به تابستان که مقدار نیاز پایین دست حداکثر می باشد، افزایش می یابد و عکس این مورد در ماه های سیلابی مشاهده می شود که در این ماه ها همانند ماه های آذر و دی افزایشی در مقدار ذخیره سد صورت نمی گیرد. هم چنین فضای مورد نیاز کنترل سیلاب های فصلی نیز تأمین شده است. هم چنین این مسئله را امامی (۱۳۹۳) و صابرنجاری و همکاران (۱۳۹۲)، به ترتیب برای سدهای شهرچای و مهاباد با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) انجام دادند و نتیجه گرفتند مقدار آب رهاسازی محاسبه شده توسط الگوریتم GA در طی ۲۴ ماه به ترتیب در ۰.۷۵SD و ۰.۷۰SD تلفات آب به صفر رسیده



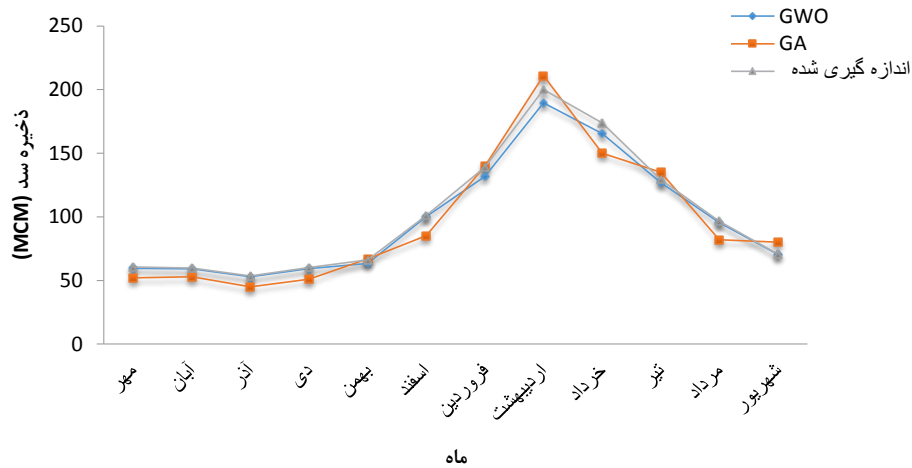
شکل ۱۲. مقایسه ی مقدار ذخیره مخزن سد به ازای ورودی با احتمالات مختلف در ماههای مختلف طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵

Fig. 12. Comparison of dam reservoir storage per input with different probabilities in different months during statistical period of 2006-2014

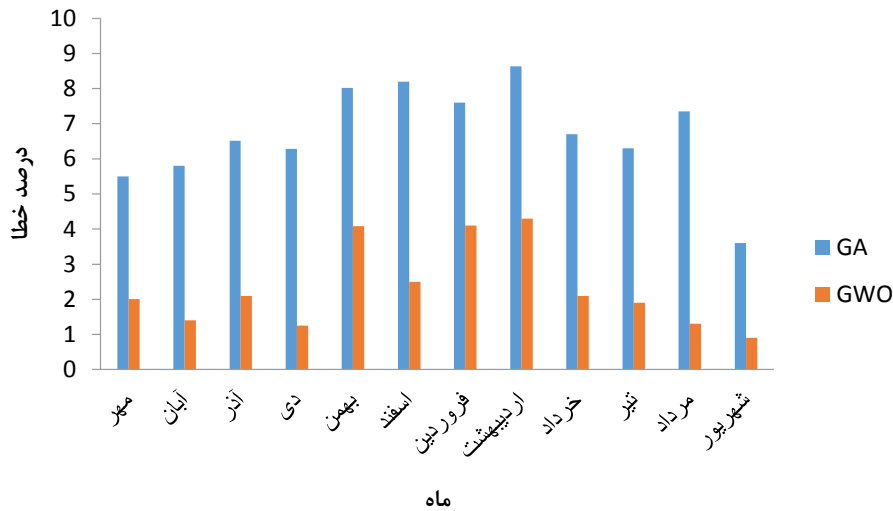


شکل ۱۳. پیش بینی ذخیره مخزن سد برای سال های ۹۸-۱۳۹۶ با استفاده از الگوریتم GWO

Fig. 13. prediction of dam reservoir storage for the years 2017-2019 using GWO algorithm



شکل ۱۴. مقایسه ی مقدار ذخیره سد حاصل از اجرای الگوریتم های GWO و GA با یکدیگر و با مقادیر اندازه گیری شده طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵
 Fig. 14. Comparison of the amount of dam storage resulting from the implementation of GWO and GA algorithms with each other and the values measured during the statistical period of 2006-2014



شکل ۱۵. مقایسه ی درصد خطا در پیش بینی مقدار ذخیره سد در ماه های مختلف طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵

Fig. 15. Comparison of error percentage in predicting the amount of dam storage in different months during the statistical period of 2006-2014

و مقادیر اندازه گیری شده ذخیره سد در ماه های مختلف سال های مورد مطالعه (۹۳-۱۳۸۵) مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان گونه که از شکل ۱۴ و ۱۵ نیز مشخص است، الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم GA توانسته است مقدار ذخیره مخزن سد را با خطای کم تری پیش بینی کند و این مسئله بیانگر هم گرایی، کارایی و راندمان بالای کاربرد الگوریتم GWO در سیستم های منابع آب می باشد.

در جدول ۷ نیز نتایج حجم خروجی و ذخیره بهینه حاصل از اجرای الگوریتم های GA و GWO برای سد شهر چای در ماه های مختلف سال مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج حاصل از الگوریتم

$$S_t = (D_t) 0.41(I_t) 0.92(R_t)^{-0.9} \quad (16)$$

در شکل ۱۳، مقادیر ذخیره مخزن سد، توسط الگوریتم GWO و با استفاده از معادلات ۱۵ و ۱۶ برای سال های ۹۸-۱۳۹۶ پیش بینی شده است که نشان دهنده قدرت، کارایی بالا و انعطاف پذیری روش پیشنهادی برای حل مشکلات پیچیده منابع آبی است.

در شکل های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب نتایج مقدار ذخیره مخزن سد شهرچای ارومیه با استفاده از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO)، الگوریتم ژنتیک (GA) (امامی، ۱۳۹۳) و مقادیر اندازه گیری شده و هم چنین درصد خطای بین الگوریتم های مذکور

GWO در مقایسه با نتایج الگوریتم GA در مورد سد شهرچای، رضایت بخش می باشد.

مامی (۱۳۹۳)، مسئله بهره برداری از مخزن سد شهرچای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار داد که مقدار جواب بهینه مسئله را برابر با ۲۸۱/۵۰ به دست آورد که در مقایسه با نتایج بهینه الگوریتم GWO، ۷/۵ درصد کاهش داشته است که حاکی از جواب های مطلوب الگوریتم GWO می باشد. در جدول ۸، مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط مقدار تابع هدف، انحراف معیار نرمال سازی شده و تعداد اجراهای با جواب شدنی در ۱۰ بار اجرای برنامه برای

الگوریتم های GWO و GA ارائه شده است.

هم چنین مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر مطالعات انجام یافته در این زمینه نشان دهنده دقت قابل قبول و در اکثر موارد بیش تر الگوریتم های فراابتکاری مورد استفاده در این پژوهش می باشد. چنان که در پژوهش مشابهی مقدم و همکاران (۱۳۹۵)، افشار و همکاران (۲۰۱۴) و افشار و معینی (۲۰۰۸)، به ترتیب یک نسخه ساده اصلاحی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (SMPSO)، الگوریتم ژنتیک (GA)، یک الگوریتم هیبرید جدید به نام HGAPSO، الگوریتم رقابت استعماری (ICA) و الگوریتم بهینه سازی مورچگان

جدول ۶. فضای محاسباتی برای کنترل سیلاب

Table 6. Computing space for flood control

ماه	فروردین	اردیبهشت	بهمن	اسفند
۵۰٪ میزان انحراف از معیار جریان ورودی	۶۷	۴۰	۷۳/۳۳	۷۰
۷۵٪ میزان انحراف از معیار جریان ورودی	۶۷	۴۹/۶	۷۴/۲۵	۱۴/۷

جدول ۷. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم های GA و GWO در ماه های مختلف طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۵

Table 7. Results of GA and GWO algorithms in different months during the statistical period of 2006-2014

ماه	حجم خروجی بهینه حاصل از مدل GWO میلیون مترمکعب (MCM)	حجم خروجی بهینه حاصل از مدل GA میلیون مترمکعب (MCM)	حجم ذخیره بهینه حاصل از مدل GWO میلیون مترمکعب (MCM)	حجم ذخیره بهینه حاصل از مدل GA میلیون مترمکعب (MCM)
مهر	14.33	۱۶/۱	59.53	۱۵/۶۰
آبان	8.58	۹/۸	59.11	۵۴/۲۰
آذر	6.49	۶/۲	52.92	۴۸/۱۱
دی	7.66	۶/۸	59.33	۵۷/۱۳
بهمن	7.03	۶/۷۶	63.42	۵۸/۴
اسفند	7.70	۷/۹	100.09	۸۸/۲۵
فروردین	9.45	۹/۱۲	131.87	۱۲۲/۳۱
اردیبهشت	18.65	۱۷/۳۰	189.62	۱۸۰/۱۷
خرداد	20.52	۱۹/۳	169.50	۱۸۹/۶۵
تیر	29.84	۲۶/۹	126.89	۱۲۰/۲۵
مرداد	25.99	۲۲/۴	95.41	۱۹/۳۰
شهریور	24.66	۲۰/۹	70.35	۶۳/۱۱

جدول ۸. مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه برای الگوریتم های GWO و GA

Table 8. Values of mean, maximum and minimum objective function for 10 program execution times for GWO and GA algorithms

تعداد اجرای شدنی	انحراف معیار نرمال سازی شده	مقادیر تابع هدف			الگوریتم
		متوسط	حداقل	حداکثر	
۱۰	۰/۰۰۰۵	۳۰۴/۴۲۳	۳۰۴/۰۹۴	۳۰۴/۵۷۲	GWO
۹	۰/۰۲۲	۲۸۱/۵۰	۲۸۳/۷۱	۲۹۰/۱۳	GA

جدول ۹. مقایسه عملکرد الگوریتم بهینه ساز GWO در مقابل روش های مذکور در مورد بهینه سازی مخزن سد

Table 9. Comparison of the performance of GWO optimizer algorithm against the mentioned methods for dam reservoir optimization

تعداد اجرا	GWO (پژوهش حاضر)	HGAPSO (مقدم و همکاران (۱۳۹۵))	PSO مقدم و همکاران (۱۳۹۵)	GA مقدم و همکاران (۱۳۹۵)	ICA (افشار و همکاران، ۲۰۱۴)	PCACOA افشار و معینی (۲۰۰۸)
۱	۱/۰۰۷۵	۱/۰۰۹۸	۱/۱۱۳۵	۱/۴۷۰۵	۴/۰۲	-
۲	۰/۹۳۲۰۱	۰/۹۴۵۵۱	۱/۲۲۶۵	۱/۳۰۱۴	۴/۱۹۹	-
۳	۰/۹۱۸۰۲	۰/۹۳۲۹۳	۱/۰۸۶۳	۱/۲۱۴۵	۳/۲۵۶	-
۴	۰/۹۹۸۱۷۲	۱/۰۰۱	۱/۱۳۰۷	۱/۶۶۸۳	۳/۸۱۸	-
۵	۱/۰۰۱۴	۱/۰۲۸۶	۱/۱۵۶۶	۱/۲۶۵۷	۳/۱۱۶	-
۶	۱/۰۲۱۴	۱/۱۰۴۶	۱/۰۹۵۴	۱/۲۳۱۴	۳/۱۳۷	-
۷	۰/۹۰۱۱۷	۰/۹۰۳۰۳	۱/۱۹۰۳	۱/۳۵۸۱	۲/۹۲۳	-
۸	۱/۰۰۸۵	۱/۰۶۴۱	۱/۱۸۹۶	۱/۵۱۸۲	۳/۰۹۴	-
۹	۰/۹۳۲۱۱	۰/۹۵۲۳۶	۱/۲۶۴۷	۱/۲۳۹۶	۳/۳۷۲	-
۱۰	۰/۹۲۵۴۰	۰/۹۴۰۳۹	۱/۱۲۸	۱/۱۹	۴/۱۲	-
تعداد ارزیابی تابع هدف	۸۲۱۰۰	۸۴۱۰۰	۴۰۱۰۰	۴۴۱۰۰	۳۰۰۰۰۰	۷۷۴۰۰
کمینه	۰/۹۰۱۰۰	۰/۹۰۳۰۳	۱/۰۸۶۳	۱/۱۹	۲/۹۲۳	۱/۰۰۳۶۹
بیشینه	۱/۰۲۱۴	۱/۱۰۴۶	۱/۲۶۴۷	۱/۶۶۸۳	۴/۱۹۹	۱/۱۷۹۴۳
میانگین	۰/۹۶۳۵۶	۰/۹۸۸۲۷۱	۱/۱۵۸۱۶	۱/۳۴۵۷۷	۳/۵۰۵	۱/۰۹۷۲۵
انحراف معیار	۰/۰۴۵۸۲۰	۰/۰۶۱۰۱۷	۰/۰۵۵۵۰	۰/۱۴۹۵۶۴۷	۰/۴۸۲۷	۰/۱۷۵۷۴

نتایج بیانگر آن است که روش پیشنهادی GWO با در نظر گرفتن تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰، از لحاظ فاکتورهای کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار در مقایسه با الگوریتم های بهینه سازی مورچگان جزئی مقید (PCACOA)، رقابت استعماری (ICA)، ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (SMPSO)، و الگوریتم هیبریدی

جزئی مقید (PCACOA) را برای بهره برداری از مخزن سد در با هدف تأمین آب استفاده کردند. در جدول ۹، عملکرد الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری در مقابل روش های مذکور در مورد بهینه سازی مخزن سد برای بررسی اختلاف جواب ها در هر الگوریتم، ارائه شده است.

HGAPSO بهبود قابل توجهی داشته است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با توجه به قابلیت ها و کارایی بالای الگوریتم های فراابتکاری، از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO) برای حل مسئله بهره برداری بهینه از سیستم مخزن سد شهرچای ارومیه بهره گرفته شد. بر مبنای رفتار طبیعی گرگ ها و سلسله مراتب رهبری و سازوکار شکار گرگ های خاکستری، سه مرحله اصلی شکار شامل جستجوی طعمه، محاصره طعمه و حمله به طعمه شبیه سازی گردیدند. در ادامه الگوریتم مورد نظر توسط تابع هدف و محدودیت های مورد نظر ارزیابی و نتایج به دست آمده با الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مقایسه گردید. نتایج نشان داد این الگوریتم GWO سرعت مناسبی در یافتن جواب بهینه دارد، به نحوی که نتایج حاصل از آن با مقدار جواب بهینه ی ۳۰۴/۵۷۲ و کاهش ۳/۰۶ درصدی مقدار تابع هدف در مقایسه با الگوریتم ICA مطلوب تر است. نتایج حاصله نشان داد الگوریتم GWO از نظر دقت پیش بینی مقدار ذخیره سد و نمودار همگرایی نتایج بهتری را نسبت به الگوریتم ICA ارائه می نماید که این امر به خاطر توانایی این الگوریتم در تنظیم فاز جستجو با فاز بهره برداری است. هم چنین نتایج حاصل نشانگر خطای ۰.۲٪ در اجرای الگوریتم GWO و ضریب بالای ۹۰ درصدی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده توسط این مدل در مقایسه با الگوریتم ICA در بهره برداری بهینه ذخیره مخزن سد است. با توجه به نتایج حاصل شده، استفاده از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری برای حل سایر مسائل بهینه سازی پیچیده مهندسی آب پیشنهاد می شود.

مراجع

- [1] S. Emami, Predict of dam reservoir using Imperialist Competitive Algorithm (case study: Umia Shaharchay dam), Water Engineering, BS.C. Thesis, Urmia University, (2014).
- [2] M. M. Mirsanjouri, F. Mohammadyari, R. Basiri, F. Hamidipour, Modeling the EC, SAR and TDS in groundwater using artificial neural network (case study: Mehran and Dehloran plain). Human and Environmental Quarterly Journal, 42 (2015) pp. 1-12. (In Persian)

- [3] Haupt, R. L. and Haupt, S. E, Practical genetic algorithms, John Wiley & Sons, (2004).
- [4] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, Proceedings of ICNN'9- International Conference on Neural Networks, (1995) pp. 1942-1948.
- [5] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni, Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 26(1) (1996) pp. 29-41.
- [6] D. Karaboga, B. Basturk, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization : artificial bee colony (ABC) algorithm, Journal of Global Optimization, 39, (2007) 459-471.
- [7] R. Moieni, Performance Evaluation of the Ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Operation of a Multi-Reservoir System: Comparing Four Algorithms, Iran-Water Resources Research, 11(2) (2015) 29-46.
- [8] www.azmet.ir
- [9] S. Samadianfard, R. Delirhasannia, Forecasting Shaharchay river flow in lake Urmia basin using Genetic programming and M5 model tree. Journal of Water and Soil, 29(5) (2015) 1190-1206.
- [10] Anonymous, Technical report of Shaharchay reservoir dam, Sakoo Consulting Engineers, Regional Water Company of West-Azerbaijan, Iran, (2008).
- [11] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili A. Lewis, Grey Wolf Optimizer, Advances in Engineering Software, 69, 920140 46-61.
- [12] L. D. Mech, Alpha Status, dominance, and division of labor in wolf packs, Canadian Journal of Zoology, 77(8) (1999) 1196-1203.
- [13] C. Muro, R. Escobedo, L. Spector and R. Coppinger, wolf-pack (canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations, Behavioural Processes, 88(3) (2011) 192-197.
- [14] M. Khishe, M. R. Mosavi, A. Ghamgosar, M. J. Ghalandari, Classification of sonar data set using the gray wolf optimizer algorithm, Electronics Industries Quarterly, 7(1) (2016) 27-41.
- [15] E. Atashpaz-Gargari C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by

- 4 (2012) 97-105.
- [25] R. Wardlaw, M. Sharif, Evaluation of Genetic Algorithm for optimal reservoir system operation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125 (1) (1999).
- [26] Jian-Xia, Chang, H. Qiang Wang, Yi-Min, Genetic Algorithms for optimal reservoir dispatching, *Journal Water Resource Managment*, ASCE, 19 (2005) 321-331.
- [27] H. S. Fahmy, J. P. King, M. W. Wentzel, J. A. Seton, Economic optimization of river management using algerthms, Paper No. 943034, ASAE, 1994 Int. Summer Meating , Am. Soc of Agricultural Engrs. St. Joseph.
- [28] R. Moeini, M. H. Afshar, Extension of the constrained Ant Colony optimization Algorithms for optimal operation of multi-reservoir systems, *Journal of Hydro-informatics*, 15(1) (2013) 155-173.
- [29] J. A. Adeyemo, Reservoir operation using multi-objective evolutionary Algorithms a review, *Asian Journal of scientific Research*, 4(1) (2011) 16-27.
- [30] T. D. Asfaw, S. Saiedi, Optimal Short-term cascade reservoir operation using Genetic Algorithm. *Asian Journal of scientific Research*, 4(3) (2011) 297-305.
- [31] O. Bozorg Haddad, M. Moravej, H. A. Loáiciga, Application of the Water Cycle Algorithm to the Optimal Operation of Reservoir Systems, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(5) (2014) 04014064.
- [32] S. Sonaliya, T. M. V. Suryanarayana, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 3(6) (2014) 13681-13687.
- [33] K. Saber-Chenari, H. Abghari, M. Erfanian, Efficiency of Genetic Algorithm in optimal operation of dam reservoir in drought condition, 9th National Conference on Watershed Management Sciences, *Watershed Management in Arid Areas (Flood and Drought)*, Department of Watershed of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University, (2013).
- [34] A. Moghaddam, M. Montaseri, H. Rezaei, The application of GA, SMP SO and HGAPSO in optimal reservoirs operation, *Journal of Water and Soil*, 30(4) (2016) 1102-1113.
- [35] A. Afshar, M. J. E. Skardi, F. Masoumi, Optimizing imperialistic competition, *IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC*, (2007) pp. 4661-4667.
- [16] H. Emami, Prediction of dam reservoir volume using Election algorithm. 1st National Conference on New Technologies in Electrical and Computer Engineering. University of Isfahan, 27 January, (2018).
- [17] Y. Dinpashoh, M. T. Sattari, S. Ebrahimi, S. Darbandi, Optimum operation of reservoir using the Genetic Algorithm and Particle Swarm optimization (case study: Alavian dam). *Soil and Water Journal*, (2017) 27(2) 17-29.
- [18] J. Anand, A. K. Gosain, R. Khosa, Optimisation of multipurpose reservoir operation by coupling SWAT and Genetic algorithm for optimal operating policy (Case Study: Ganga river basin). *Preprints*, (2018) doi:10.20944/preprints201803.0199.v1.
- [19] A. S. Parlikar, P. D. Dahe, M. Vaidya, K. Sharma, Reservoir releases using Genetic algorithm. *International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science*, 6 (11) (2017) 363-366.
- [20] A. Kangrang, H. Prasanchum, R. Hormwichian, Development of future rule curves for multipurpose reservoir operation using conditional Genetic and Tabu search algorithms. *Advances in Civil Engineering*, 2018 (2018) Article ID 6474870, 10 pages.
- [21] S. M. Ghadami, B. Ghahreman, M. Sharifi, H. Rajabi Mashhadi, Optimization of the operation of multi-reservoir systems using Genetic algorithm, *Iranian Water Resources Research*, 2(10) (2009) 1-15.
- [22] E. Atashpaz Gargari, Development of social optimization algorithm and its efficiency review. Master's Thesis, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, (2007).
- [23] M. A. Samandizadeh, A. Adib, A. Ahmadianfar, Optimal operation of Amirkabir reservoir using genetic algorithm and dynamic programming for Markov scenarios and observation series, 4th Water Resources Management Conference, Amirkabir University, Tehran, (2011).
- [24] A. Mehdipour, O. Bozorgh-Hadad, Operation optimization of multi-objective dams using particle optimization algorithm, *Journal of Water and Wastewater*,

[36] M. H. Afshar R. Moeini, Partially and fully constrained ant algorithms for the optimal solution of large scale reservoir operation problems, *Water Resource Management*, 22(12) (2008) 1835- 1857.

water supply and hydropower reservoir operation rule curves: An imperialist competitive algorithm approach, *Engineering Optimization*, vol. 47(9) (2015) 1208-1225.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Emami, Y. Choopan, F. Salmasi, Presentation of a Method Based on Gray Wolf Optimizer and Imperialist Competitive Algorithms in Optimal Operation of Dam Reservoir, Amirkabir J. Civil Eng., 52(5) (2020) 1027-1046.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15049.5818](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15049.5818)

