بهره‌برداری بهینه از مخازن به منظور تامین نیازهای آبیاری بر پایه الگوریتم جدید پروانه پادشاه

میرامید هادیانی[1*] و حمیدرضا وزیری[2]

۱) استادیار گروه مهندسی محیط زیست، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.
*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: m.omidhadiani@qaemiau.ac.ir

۲) دانش‌آموخته دکتری تخصصی رشته مهندسی عمران آب، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

چکیده

مطالعه حاضر به بهره برداری از مخزن به منظور تامین نیازهای آبیاری بر اساس الگوریتم تکاملی جدید پروانه پادشاه با هدف حداقل نمودن کمبودهای آبیاری پرداخته است. از الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات به عنوان الگوریتم های پرکاربرد و موفق برای مقایسه با الگوریتم پروانه پادشاه استفاده شد و به منظور انتخاب روش برتر از یک مدل تصمیم گیری چندمعیاره بهره برده شد. نتایج نشان داد الگوریتم پروانه پادشاه با کسب رتبه اول بر اساس مدل تصمیم گیری چندمعیاره و شاخص های مختلف نظیر اطمینان پذیری، آسیب پذیری، انعطاف پذیری و تابع هدف دارای عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات است. علاوه بر آن، مقادیر کمبودهای تامین آب آبیاری بر اساس الگوریتم پروانه پادشاه نسبت به دو الگوریتم دیگر در طی هفت سال مطالعاتی کمتر می باشد. بنابراین مطالعه انجام شده نشان داد الگوریتم پروانه پادشاه دارای عملکرد مناسبی برای استفاده در مسایل مدیریت منابع آب می باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم پروانه پادشاه، بهره‌برداری مخزن، مدیریت منابع آب، هوش مصنوعی.

مقدمه

کمبود آب و خشکسالی‌های پی‌درپی همواره یکی از مسایل مورد توجه بشر بوده است. طی سال‌های اخیر، تصمیم‌گیرندگان منابع آب همواره در تلاش بوده‌اند تا بتوانند نیازهای آبی را بر اساس بهره‌برداری بهینه از مخازن آب رفع نمایند. راهبردهای مختلف و سیاست‌های مختلف اعمال گردید تا نیازهای آبی مصرف‌کنندگان در پایین دست به بهترین شکل ممکن تامین گردد (Delis *et al*., 2017; Ai *et al*., 2017). بهره‌برداری بهینه از مخازن آب توسط پژوهشگران طی سال‌های اخیر بر اساس مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های تکاملی، مسئله‌ای قابل توجه بوده است (Bozorg-Hadad *et al*., 2016). روش‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی در طی سال‌های قبل به‌عنوان یکی از ابزارهای حل مسایل مربوط به مدیریت منابع آب و بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده قرار می‌گرفت (Brambilla *et al*., 2017). اما روش‌هایی نظیر روش برنامه‌ریزی خطی و یا غیرخطی و یا روش برنامه‌ریزی پویا نیاز به زمان بالای محاسباتی برای دستیابی به پاسخ بهینه مسایل بهینه‌سازی و مدیریت بهینه بهره‌برداری مخازن دارند (Choong *et al*., 2017). همچنین روش‌های مذکور گاه قادر به حل برخی از مسایل پیچیده نبودند، بنابراین در طی سال‌های اخیر الگوریتم-های تکاملی جهت حل مسایل مرتبط با بهره‌برداری مخزن پیشنهاد گردیده است.

Pianosi و همکاران (۲۰۱۱)، رویکرد جدیدی بر پایه ترکیب سیستم شبکه عصبی مصنوعی[1] و الگوریتم ژنتیک چندمنظوره[2] برای مدیریت یکپارچه سیستم آب مخزن

1 ANN
2 MOGA

Hoabinh در ویتنام برای شرایط توسعه در فصول سیل‌خیزی ارایه داده که قابلیت استفاده در شرایط بحرانی جدی مانند خشکسالی هیدرولوژیک را هم دارد. مشکل بهینه‌سازی این مدل عبارت از فرموله کردن عمومی مدل و چالش‌های اصلی منطقه‌ای و همچنین توسعه شبیه‌سازی نتایج به‌دست آمده است.

Ahmadi و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم ژنتیک به منظور حل مسئله بهره‌برداری مخزن و مدیریت بهینه آب با تامین چند هدف شامل نیازهای آبی، زیست محیطی و کشاورزی استفاده نمودند. الگوریتم مذکور با ضرایب اطمینان‌پذیری بالا و آسیب‌پذیری پایین توانست انواع نیازهای آبی را تامین نماید. همچنین منحنی‌های فرمان[1] خروجی انطباق بالایی با مقادیر نیاز داشتند. Bolouri-Yzadeli و همکاران (۲۰۱۴) از روش الگوریتم ژنتیک و سیاست بهره‌برداری استاندارد برای بهره‌برداری مخازن با رویکرد کاهش کمبودهای آبیاری استفاده نمودند. مطالعه مذکور به مطالعه مدیریت بهینه منابع آب بر اساس استخراج منحنی‌های فرمان غیرخطی و خطی پرداخت. نتایج بیانگر آن بود که الگوریتم ژنتیک نسبت به روش سیاست بهره‌برداری استاندارد با رویکرد منحنی‌های غیرخطی دارای انطباق بیشتری با مقادیر نیاز دارد.

Hadad و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم چرخه آب برای بهره‌برداری یک مخزن آب با رویکرد افزایش تولید انرژی در نیروگاه‌های پایین دست استفاده نمودند. نتایج مطالعه مذکور نشان داد الگوریتم چرخه آب بر خلاف الگوریتم‌هایی نظیر ژنتیک و ازدحام ذرات دارای زمان محاسباتی کمتر و همچنین تولید انرژی بیشتر در نیروگاه پایین دست بود. Bozorg-Hadad و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم خفاش جهت بهره‌برداری یک سیستم چندمخزنه با رویکرد افزایش تولید انرژی استفاده نمودند. نتایج بیانگر آن بود الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک دارای سرعت همگرایی بیشتر و پاسخ بهینه نزدیک‌تری به پاسخ بهینه مطلق است و علاوه بر آن تولید انرژی بر اساس روش مذکور نسبت به روش‌های الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات همراه با مقدار بیشتری است. Aboutalebi و همکاران (۲۰۱۵) از روش ماشین‌بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک چندهدفه به منظور بهره‌برداری بهینه از یک مخزن بر اساس افزایش تولید انرژی استفاده نمودند. هدف مسئله افزایش قابلیت اطمینان‌پذیری و کاهش قابلیت آسیب‌پذیری برای تامین نیازهای پایین دست بود. روش هبیریدی مذکور سبب گردید عوامل موثر و تاثیرگذار در استخراج منحنی‌های فرمان را به خوبی شناسایی کند و در نهایت منحنی‌های فرمان خروجی سد را بر اساس عواملی نظیر تبخیر ماهانه، ذخیره و ورودی‌های مخزن تنظیم نماید. Bashiri-Atrabi و همکاران (۲۰۱۵) بهره‌برداری مخزن را مبتنی بر کاهش کمبودهای آبیاری با استفاده از الگوریتم هارمونی انجام دادند. نتایج بیانگر آن بود الگوریتم هارمونی نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات می‌تواند مقادیر نیازهای آبی پایین دست را بهتر تامین نماید. همچنین سرعت همگرایی الگوریتم مذکور از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بیشتر بود. یکی از الگوریتم‌هایی که تازگی در زمینه بهینه‌سازی مهندسی عمران معرفی گردیده الگوریتم پروانه پادشاه[2] می‌باشد. الگوریتم مذکور برای حل مسایل توابع محک ریاضی[3] مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج بیانگر آن بود که الگوریتم مذکور با زمان محاسباتی کمتر و سرعت همگرایی بیشتر به جواب‌های بهینه مطلق توابع ریاضی با هدف ماکزیمم نمودن یا مینیمم نمودن این توابع دست پیدا می‌کند (Wang *et al*., 2015).

Ehteram و همکاران (۲۰۱۷a) از الگوریتم کوسه به منظور بهره‌برداری یک مخزن با رویکرد تامین نیازهای آبیاری پایین دست استفاده نمودند. نتایج نشان داد الگوریتم کوسه در حداقل نمودن تابع هدف مسئله که شامل کمبودهای آبیاری می‌باشد نسبت به الگوریتم هارمونی و ژنتیک دارای زمان محاسباتی کمتری است و در بیشتر ماه‌های بهره‌برداری نیاز پایین دست تامین می‌گردد. تامین اهداف مختلف نظیر نیازهای آبیاری، کنترل سیلاب، تولید انرژی برقابی و سایر اهداف در زمینه مدیریت منابع آب، از مسایل مربوط به پژوهش‌های مختلف در ارتباط با بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها و مدیریت حوزه آبخیز بوده است (Raso *et al*., 2017; Li *et al*., 2017). Ehteram و همکاران (۲۰۱۷b) از الگوریتم میگو برای بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چندمخزنه با رویکرد افزایش تولید انرژی استفاده نمودند. نتایج مطالعه بیانگر آن بود که الگوریتم مذکور با تعداد دفعات کمتر به جواب بهینه مطلق

1 Rule curve

2 Monarch butterfly
3 Benchmark function

مسئله دست پیدا می‌نماید و سبب تولید انرژی بیشتر در سیستم می‌شود.

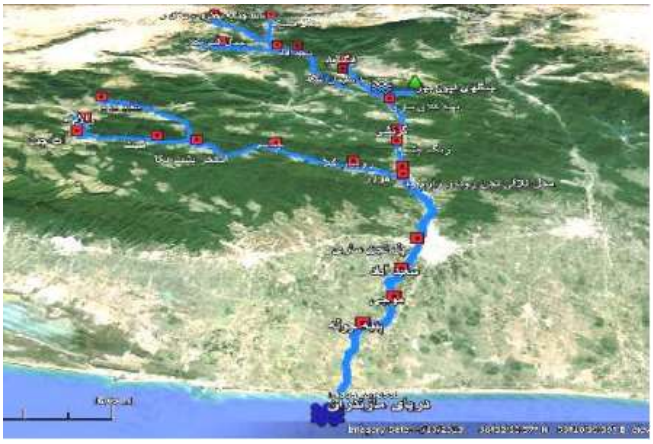
Wu و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل جدید به نام FEIOM (مدل بسط یافته ورودی- خروجی عامل اکولوژیکی)، توسعه یافته برای مدیریت منابع آب مجازی ارایه دادند. این مدل از تلفیق تکنیک‌های مدل ورودی- خروجی[1]، تحلیل شبکه‌ای اکولوژیکی[2] و تحلیل عاملی[3] در یک نمای عمومی حاصل شده است. Dong و همکاران (۲۰۲۲) نیز برای برآورد و آنالیز آب آبیاری از مدل الگوریتم بهینه‌سازی میمون عنکبوتی استفاده نمودند که مدل مربوطه قابلیت کاربری در تحلیل زمان خشکسالی هیدرولوژیک برای مدیریت توزیع منابع آب را دارد.

به نظر می‌رسد با توجه به استفاده محققین مختلف از الگوریتم‌ها و مدل‌های مختلف در تحلیل فرآیند بهره‌برداری از مخازن در مدیریت منابع آب، بهتر است در مطالعات منطقه‌ای با توجه به شرایط محیطی الگوریتم یا مدل بهینه را برای مخزن مورد نظر ارزیابی نمود. بدین ترتیب، هدف تحقیق حاضر مطالعه بهره‌برداری بهینه یک مخزن با استفاده از الگوریتم پروانه پادشاه و مقایسه نتایج با سایر الگوریتم‌های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بر اساس یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سد شهید رجایی (شکل ۱) در جنوب‌غربی شهر ساری در ایران قرار گرفته است. سد مخزنی مذکور از نوع بتنی و سرریز آزاد و به ارتفاع ۱۱۲ متر از بستر رودخانه و با طول تاج ۴۲۷ متر می‌باشد. اهداف عمده این طرح تنظیم و تامین آب کشاورزی اراضی دشت‌های اطراف و تامین آب آشامیدنی است. کل اراضی زیرکشت بهره‌برداری به میزان ۵۶۵۲۵ هکتار می‌باشد و آب آبیاری محصولات استراتژیک منطقه (شکل ۲) با سد شهید رجایی تامین می‌شود.

شکل ۱. سد شهید رجایی در جنوب‌غربی شهر ساری



شکل ۲. مسیر حرکت رودخانه تجن از سرچشمه تا دریای خزر

1 IOM
2 ENA
3 FA

تابع هدفی که هدف آن کمینه‌سازی مجذور اختلاف نیازهای آبیاری و رهاسازی برای تامین آب مورد نیاز محصولات کشاورزی است، در نظر گرفته شد. برای تامین این هدف مهم، قیود رهاسازی آب و ذخیره مخزن و همچنین توابع پنالتی تعریف شد. حداکثر ذخیره مخزن ۱۲۶ میلیون مترمکعب و حداقل ذخیره ۱۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. بنابراین به منظور حداقل‌سازی تابع هدف به نحوی که نیازهای آبیاری تامین شود از الگوریتم پروانه پادشاه استفاده گردید. همچنین برای آزمون روش از شاخص‌های انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و بازگشت‌پذیری استفاده شد. علاوه بر آن از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مقایسه الگوریتم‌های تکاملی مختلف استفاده شد. بنابراین نوآوری تحقیق حاضر به معرفی الگوریتم پروانه پادشاه به منظور استفاده در مسایل مدیریت منابع آب و همچنین بهره‌برداری بهینه از مخازن برای تامین نیازهای آبرسانی اختصاص می‌یابد.

یکی از گونه‌های معروف پروانه در آمریکای شمالی، پروانه پادشاه می‌باشد. این پروانه‌ها در شرق آمریکای شمالی زندگی می‌کنند و به توانایی بالای مهاجرت‌شان شناخته می‌شوند. آنها می‌توانند هر تابستان به جنوب کانادا و مکزیک سفر کنند (Wang *et al*., 2015). بر مبنای نظر وانگ و همکاران (۲۰۱۵) فرضیه‌های زیر در ارتباط با الگوریتم پروانه پادشاه وجود دارد:

- همه پروانه‌ها یا در سرزمین یک (آمریکای شمالی) و یا در سرزمین دو (مکزیک یا کانادا) زندگی می‌کنند، بنابراین جمعیت پروانه‌های پادشاه در سرزمین یک و دو کل جمعیت پروانه‌های پادشاه را تشکیل می‌دهند.
- هر بچه پروانه به وسیله اپراتور مهاجرت در سرزمین یک و یا دو تولید می‌گردد.
- تولید هر پروانه جدید بر اساس گام قبل سبب خواهد شد جمعیت بیشتر گردد. برای حفظ اندازه جمعیت، پروانه‌های جدید در صورتی جایگزین پروانه‌های قبل می‌گردند که دارای تابع هدف بهتر باشند. در غیر اینصورت پروانه‌های قبل باقی خواهند ماند و اندازه جمعیت بر اساس این راهبرد ثابت باقی می‌ماند.
- پروانه‌هایی که دارای تابع هدف بهتر باشند به شکل مستقیم بدون اعمال هیچ اپراتوری منتقل می‌گردند و بدین ترتیب کیفیت پروانه‌های پادشاه برای نسل‌های بعدی تضمین خواهد شد.

دلایل استفاده از الگوریتم مذکور عبارتند از: ۱. داشتن تعداد پارامترهای تصادفی کم نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی که سبب تسریع در امر بهینه‌سازی می‌گردد؛ ۲. یکی از مشکلات الگوریتم‌های تکاملی عدم تعادل میان قابلیت پویش و انتفاع می‌باشد. قابلیت پویش در الگوریتم‌های تکاملی توانایی جستجوی الگوریتم در فضای مسئله بدون توجه به دستاوردهای الگوریتم می‌باشد، درحالی‌که قابلیت انتفاع الگوریتم، به میزان توجه الگوریتم به دستاوردهای آن می‌پردازد. عدم‌تعادل میان دو قابلیت مذکور سبب می‌گردد که یا الگوریتم رفتاری محتاطانه‌تر و یا رفتاری غیرقابل پیش‌بینی و به شدت تصادفی داشته باشد. وجود دو اپراتور تنظیم[1] و مهاجرت[2] سبب می‌گردد که تعادل مناسبی میان دو قابلیت پویش و انتفاع در الگوریتم پروانه پادشاه وجود داشته باشد؛ و ۳. همچنین الگوریتم پروانه پادشاه با داشتن مراحلی ساده‌تر در روند بهینه-سازی نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی سبب می‌گردد که روند همگرایی الگوریتم و دستیابی به پاسخ بهینه مطلق سریع‌تر گردد (Wang *et al*., 2015).

بدین ترتیب مراحل مطالعه بهره‌برداری مخزن با الگوریتم پروانه پادشاه را می‌توان به ترتیب زیر خلاصه نمود:

- رهاسازی آب برای تسهیل در محاسبات به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود، بنابراین جمعیت اولیه پروانه پادشاه که بر اساس موقعیت پروانه‌ها می‌باشد و شامل ماتریس مقادیر رهاسازی آب است وارد الگوریتم می‌گردد.
- در مرحله‌ی بعد، رابطه پیوستگی محاسبه شده و مقادیر ذخیره برای دوره‌های بعد محاسبه می‌گردد.
- سپس ذخیره‌های محاسبه شده در مرحله قبل، بر اساس قیود مسئله کنترل می‌شود و در صورت عدم رعایت قیود، توابع پنالتی[3] محاسبه می‌گردد.
- تابع هدف برای هر متغیر رهاسازی محاسبه شده و در صورت نیاز توابع پنالتی به آن اضافه می‌گردند.

1 Exploration
2 Exploitation
3 Inertial function

- سپس اپراتورهای مهاجرت و تنظیم بر متغیرهای تصمیم و مقادیر رهاسازی آب مطابق الگوریتم پروانه پادشاه اعمال می‌گردد.
- شرط همگرایی برای الگوریتم کنترل گشته و در صورت رضایت الگوریتم پایان می‌یابد. در غیر اینصورت به گام دوم باز می‌گردد.

در تبیین جزییات این الگوریتم لازم است به تشریح مواردی از جمله اپراتور مهاجرت، اپراتور تنظیم، معیارهای ارزشیابی سیستم بهره‌برداری و مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخت و همچنین اشاره‌ای نیز بر الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک که در این تحقیق به‌عنوان الگوریتم‌های مورد مقایسه با الگوریتم پروانه پادشاه قرار گرفته‌اند نیز به‌طور اجمالی توجه شود.

اپراتور مهاجرت

پروانه‌های مهاجر در خلال ماه آوریل از سرزمین ۱ به ۲ و در خلال ماه سپتامبر از سرزمین ۲ به ۱ مهاجرت می‌کنند. طول مدت اقامت پروانه‌ها در سرزمین ۱ به مدت ۵ ماه و در سرزمین ۲ به مدت ۷ ماه می‌باشد. بنابراین تعداد کل پروانه‌ها در سرزمین ۱ $ceil\left(p*NP\right)$ می‌باشد که *ceil* مقدار داخل پرانتز را به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد می‌نماید و NP جمعیت کل پروانه‌ها می‌باشد. p نسبت پروانه‌های پادشاه در سرزمین ۱ است. همچنین تعداد پروانه‌های پادشاه در سرزمین ۲ به میزان $NP-NP_1$ است. جمعیت پروانه‌ها در سرزمین ۱ به عنوان زیرمجموعه جمعیتی اول و جمعیت پروانه‌ها در سرزمین دوم به عنوان زیرمجموعه جمعیتی دوم شناخته می‌گردد. اپراتور مهاجرت مطابق رابطه ۱ بر روی جمعیت پروانه‌ها اعمال می‌گردد:

$$x_{i,k}^{t+1}=x_{r_1,k}^{t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که $x_{i,k}^{t+1}$ به عنوان المان kام از x_i در نسل t+1 می‌باشد که موقعیت پروانه پادشاه iام را در جمعیت نشان می‌دهد و همچنین $x_{r_1,k}^{t}$ المان kام از x_r در نسل t می‌باشد که موقعیت جدید پروانه پادشاه r_1 را نشان می‌دهد. پروانه پادشاه r_1 به‌طور تصادفی از زیرمجموعه یک انتخاب می‌گردد. زمانی که مقدار $r\le p$ می‌باشد، المان kام در نسل جدید با رابطه (۱) تولید می‌گردد و مقدار r از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$r=rand.peri \quad \text{رابطه (۲)}$$

ضریب peri معادل با ۱/۲ تنظیم می‌گردد (Wang *et al.*, 2015). از طرف دیگر اگر مقدار $r>p$ باشد، المان k در نسل جدید بر اساس رابطه ۳ تولید می‌گردد:

$$x_{i,k}^{t+1}=x_{r_2,k}^{t} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که $x_{r_2,k}^{t}$ المان kام از x_{r2} است که موقعیت جدید پروانه پادشاه r_2 می‌باشد. بر اساس آنچه در رابطه‌های بالا دیده می‌شود، جهت مهاجرت در اپراتور مهاجرت به وسیله نسبت p تنظیم می‌گردد. اگر مقدار p بزرگ باشد، المان‌های بیشتری از سرزمین ۱ انتخاب می‌گردند و در این صورت زیرمجموعه جمعیتی، نقش مهمی را بازی می‌کند. اگر مقدار p کوچک باشد، المان‌های بیشتری از سرزمین ۲ انتخاب می‌گردند. این نشان می‌دهد که زیرمجموعه جمعیتی ۲ نقش مهمتری بازی می‌کند.

اپراتور تنظیم

موقعیت پروانه پادشاه به جز اپراتور مهاجرت با اپراتور تنظیم نیز تکمیل شده و چنانچه مقدار تصادفی rand از مقدار p کوچک‌تر باشد، موقعیت پروانه بر اساس رابطه ۴ به روزرسانی می‌گردد:

$$x_{j,k}^{t+1}=x_{best,k}^{t} \quad \text{رابطه (۴)}$$

جایی که $x_{j,k}^{t+1}$ المان kام از x_j در نسل t+1 می‌باشد که موقعیت پروانه پادشاه jام را نشان می‌دهد. به طور مشابه، $x_{best,k}^{t}$ المان kام از x_{best} را نشان می‌دهد که بیانگر بهترین پروانه پادشاه در سرزمین ۱ و ۲ است. چنانچه مقدار rand بزرگ‌تر از p باشد، موقعیت پروانه پادشاه بر اساس رابطه ۵ به روزرسانی می‌گردد:

$$x_{j,k}^{t+1}=x_{r_3,k}^{t} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که $x_{r_3,k}^{t}$ المان kام از x_{r3} را نشان می‌دهد و به‌طور تصادفی در سرزمین ۲ انتخاب می‌شود. تحت این شرایط اگر rand بزرگ‌تر از BAR باشد، به روزرسانی بعدی مطابق با رابطه ۶ خواهد بود:

$$x_{j,k}^{t+1}=x_{j,k}^{t+1}+\alpha\times\left(dx_k-0.5\right) \quad \text{رابطه (۶)}$$

که BAR نرخ تنظیم را نشان می‌دهد، dx (رابطه ۷) طول گام پروانه پادشاه jام است که بر اساس شیوه Levy flight (Wang *et al.*, 2015) محاسبه می‌گردد:

$$dx=Levy\left(x_j^t\right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

در معادله ۵، α ضریب وزنی است که بر طبق معادله زیر (رابطه ۸) محاسبه می‌گردد:

$$\alpha = \frac{S_{\max}}{t^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$S_{\max}$ ماکزیمم گامی است که یک پروانه پادشاه در یک گام حرکت می‌نماید و t نسل فعلی می‌باشد. مقادیر بزرگ α طول گام را افزایش می‌دهد و سبب افزایش قابلیت پویش می‌گردد. این در حالی است که مقادیر کوچک‌تر قابلیت انتفاع را با کاهش طول گام جستجو افزایش می‌دهد.

نخست برای اعمال الگوریتم در یک مسئله بهینه‌سازی، پارامترهای تصادفی الگوریتم مطابق شکل ۳ اعمال می‌گردد. همچنین جمعیت اولیه الگوریتم که شامل موقعیت اولیه پروانه‌های حاضر می‌باشد، تعریف می‌گردد. در مرحله بعد موقعیت پروانه‌ها گام به گام به روزرسانی می‌گردد. به‌منظور تثبیت جمعیت و کاهش تعداد دفعات ارزیابی، جمعیت پروانه-های پادشاه سرزمین ۱، NP_1 و NP_2 بر اساس اپراتورهای تنظیم و مهاجرت تولید خواهد شد. نحوه اجرای الگوریتم مطابق شکل ۳ می‌باشد.

Algorithm 3 Monarch Butterfly Optimization algorithm

Begin

Step 1: Initialization. Set the generation counter $t = 1$; initialize the population P of NP monarch butterfly individuals randomly; set the maximum generation $MaxGen$, monarch butterfly number NP_1 in Land 1 and monarch butterfly number NP_2 in Land 2, max step S_{Max}, butterfly adjusting rate BAR, migration period $peri$, and the migration ratio p.

Step 2: Fitness evaluation. Evaluate each monarch butterfly according to its position.

Step 3: While the best solution is not found **or** $t < MaxGen$ **do**

Sort all the monarch butterfly individuals according to their fitness.

Divide monarch butterfly individuals into two subpopulations (Land 1 and Land 2);

for $i = 1$ to NP_1 (for all monarch butterflies in Subpopulation 1) **do**

Generate new Subpopulation 1 according to Algorithm 1.

end for i

for $j = 1$ to NP_2 (for all monarch butterflies in Subpopulation 2) **do**

Generate new Subpopulation 2 according to Algorithm 2.

end for j

Combine the two newly-generated subpopulations into one whole population;

Evaluate the population according to the newly updated positions;

$t = t+1$.

Step 4: end while

Step 5: Output the best solution.

End.

شکل ۳. نحوه اجرای اگوریتم Monarch butterfly algorithm

الگوریتم ازدحام ذرات

چنانچه یک فضای جستجوی D بعدی را در نظر گیرید، جمعیت بر اساس یک بردار D بعدی در الگوریتم ازدحام ذرات بر اساس بردار $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, .., x_{iD})^T$ معرفی می‌گردد. سرعت ذرات بر اساس بردار D بعدی و با رابطه $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, .., v_{iD})^T$ نشان داده می‌شود. بهترین موقعیت قبلی ذرات بر اساس رابطه $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, .., p_{iD})^T$ می‌باشد. همچنین شاخص g در رابطه‌های زیر به عنوان موقعیت بهترین ذره در بین تمامی تکرارها است. سرعت و موقعیت ذرات بر طبق دو رابطه ۹ و ۱۰ به روزرسانی می‌گردد:

$$v_{id}^{n+1} = \chi \left[w v_{id}^{n} + c_1 r_1^{n} \frac{\left(p_{id}^{n} - x_{id}^{n}\right)}{\Delta t} + c_2 r_2^{n} \frac{\left(p_{gd}^{n} - x_{gd}^{n}\right)}{\Delta t} \right] \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$X_{id}^{n+1} = x_{id}^{n} + \Delta t v_{id}^{n+1} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

جایی که N تعداد ذرات، χ ضریب انقباض، w ضریب اینرسی و c_1 و c_2 ضرایب شتاب می‌باشند، r_1 و r_2 به عنوان اعداد تصادفی هستند. شبه کد مربوط به الگوریتم ازدحام ذرات در شکل (۴) دیده می‌شود. در ابتدا پارامترهای تصادفی جمعیت

تعریف می‌گردند، سپس جمعیت اولیه در قالب سرعت و مکان ذرات تعریف می‌شود. در مرحله بعد تابع هدف ذارت محاسبه می‌گردد و سپس P_{best} و G_{best} مطابق با شبه کد به‌عنوان راهنمای محلی و سراسری انتخاب می‌شود. در مرحله بعد سرعت و مکان مطابق معادلات بالا به روزرسانی شده و شرط همگرایی کنترل می‌گردد.

```
Begin (Initialization)
   Generate initial positions X(0)
   Generate initial velocities V(0)
End
Set  n = 0 (n is the generation number)
Repeat
    Begin
        Compute fitness value for each individual of swarm
    End
    Compute PBest(n) and GBest
    Begin (Perform PSO operations)
        Compute V(n +1) from Equation (1)
        Compute X(n +1) from Equation (2)
    End
    Set  n = n + 1
Until termination criteria satisfied
```

شکل ۴. شبه کد مربوط به الگوریتم ازدحام ذرات Particle swarm optimization algorithm

الگوریتم ژنتیک

روش الگوریتم ژنتیک که یکی از روش‌های برنامه‌ریزی است با بهره‌گیری از نظریه تکامل بقا در علم زیست‌شناسی و استفاده از علم ژنتیک به‌عنوان روشی موثر در بهینه‌سازی مهندسی شناخته می‌شود. این روش جستجوی موثر در فضای وسیع بر اساس ژن کروموزوم‌ها است که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن پاسخ بهینه در میان سایر پاسخ‌های ممکن می‌شود. مدل‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نیازمند فرآیندهای زیر هستند:

۱. جمعیت اولیه: یک مجموعه اولیه از اعضا که به صورت رشته‌هایی از ژن‌ها کد می‌گردند و جواب‌هایی از مسئله را ارایه می‌نمایند.

۲. تابع ارزیابی: روشی برای ارزیابی کیفیت پاسخ‌ها می‌باشد، بنابراین برای هر کروموزم تابع هدف به شکل جداگانه محاسبه می‌گردد.

۳. انتخاب: فرآیندی برای گزینش اعضای مناسب برای تولید و ترکیب مجدد می‌باشد.

۴. عملگرهای ژنتیک: این عملگرها برای تولید اعضای جدید و تکامل تدریجی به‌کار می‌روند.

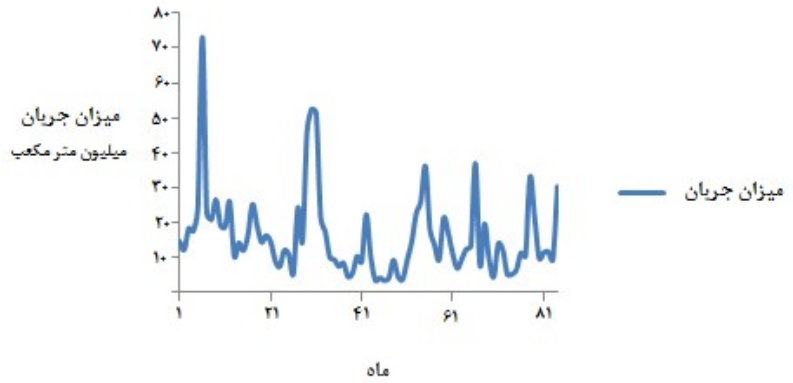
اولین مرحله، ایجاد جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی است، سپس میزان برازندگی هر یک از اعضا در جمعیت تعیین می‌گردد و مرحله انتخاب بر اساس میزان برازندگی اعضا انجام می‌پذیرد. یعنی تعدادی از بهترین کروموزوم‌ها برای تولید مجدد انتخاب می‌گردند. در انتها عملگرهای ژنتیک شامل آمیزش[1] و جهش[2] بر روی اعضای انتخاب شده عمل می‌کند و کدهای ژنتیک آنها را ترکیب و اصلاح می‌نمایند.

پژوهش حاضر به مطالعه سد رجایی در ایران می‌پردازد و هدف آن تامین نیازهای آبیاری پایین دست می‌باشد. شبکه تامین آب در پایین دست این سد تا مصب دریا در سال ۲۰۰۴ به بهره‌برداری کامل رسیده است، بنابراین یک دوره ۱۳ ساله از جریان ورودی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۸ برای این مطالعه با تابع هدف زیر در نظر گرفته شده است:

$$Minimization\left(oF\right)=\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{D_t-R_t}{D_{\max}}\right)^2 \qquad \text{رابطه (۱۱)}$$

[1] Crossover
[1] Mutation

که OF تابع هدف، D_t مقدار نیاز ماهانه آبیاری، R_t مقدار رهاسازی ماهانه آبیاری و $D_{\max}$ ماکزیمم نیاز آبیاری در دوره بهره‌برداری می‌باشد.



شکل ۵. روند جریان ورودی ماهانه به مخزن

معادله پیوستگی مخزن (رابطه ۱۲) به شرح زیر است:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Loss_t - R_t - Sp_t \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که S_{t+1} ذخیره مخزن در زمان t+1، S_t ذخیره مخزن در زمان t، Q_t ورودی جریان ماهانه (MCM)، $Loss_t$ مقدار حجم افت در دوره بهره‌برداری، R_t مقدار رهاسازی آب بر حسب میلیون مترمکعب و Sp_t مقدار سرریز می‌باشد. مقدار افت از رابطه ۱۳ به‌دست می‌آید:

$$Loss_t = A_t \times Ev_t \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که A_t سطح دریاچه مخزن و Ev_t عمق تبخیر تعرق در دوره t می‌باشد. همچنین مقدار سرریز از رابطه ۱۴ به‌دست می‌آید:

$$Sp_t = \begin{bmatrix} 0 \leftarrow if\ (S_t \le S_{\max}) \\ S_{\max} - S_t \leftarrow if\ (S_t > S_{\max}) \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که $S_{\max}$ ماکزیمم ذخیره مخزن می‌باشد. قیدهای مخزن مطابق با روابط ۱۵ و ۱۶ به‌دست می‌آیند:

$$0 \le R_t \le D_t \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$S_{\min} \le S_t \le S_{\max} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در صورت عدم رعایت قیود، توابع پنالتی بر اساس رابطه های ۱۷ الی ۱۹ تعریف می‌گردند:

$$P_{1,t} = \begin{bmatrix} 0 \leftarrow if\ (S_{t+1}) > S_{\min} \\ \frac{S_{\min} - S_{t+1}}{S_{\min}} \leftarrow otherwise \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$P_{2,t} = \begin{bmatrix} 0 \leftarrow if\ (S_{t+1}) < S_{\max} \\ \frac{S_{t+1} - S_{\max}}{S_{\max}} \leftarrow otherwise \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$P_{3,t} = \begin{bmatrix} 0 \leftarrow if\ (P_t < PPC) \\ \frac{P_t - PPC}{PPC} \leftarrow otherwise \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

معیارهای ارزیابی سیستم بهره‌برداری مخزن

از آنجایی که مقایسه بین مقادیر رهاسازی شده از روش‌های مختلف برای انتخاب مدل مناسب بهره‌برداری حایز اهمیت است، در ادامه معیارهایی معرفی می‌گردد که این مقایسه را آسان و منطقی‌تر می‌کند. این معیارها توسط Hashimoto (۱۹۸۲) معرفی گردید. یکی از شاخص‌های مورد مطالعه، اعتمادپذیری حجمی می‌باشد. مقدار اعتمادپذیری حجمی عبارت است از مقدار حجم آب کل رها شده نسبت به مقدار کل نیاز مخازن که برای محاسبه آن از رابطه ۲۰ استفاده می‌گردد و برای سد شهید رجایی در فصل زراعی، ۴۵ درصد است:

$$\alpha_V = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} R_t}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} D_t} \times 100 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

که در آن α_V اعتمادپذیری حجمی سیستم در طول دوره بهره‌برداری است. هرچه اعتمادپذیری حجمی سیستم بیشتر باشد، قابلیت اطیمنان‌پذیری سیستم بیشتر می‌شود. در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، معمولا شکست‌های رخ داده در یک سیستم اهمیت و مقدار یکسانی ندارند. به‌طور مثال

کمبود یک میلیون مترمکعب در یک سیستم با نیاز ۱۰ میلیون مترمکعب نسبت به کمبود ۵ میلیون مترمکعب، با همین مقدار نیاز اهمیت کمتری دارد. بنابراین معیاری به نام آسیب‌پذیری تعریف می‌شود که عبارت است از نسبت حداکثر شکست ایجاد شده در طول دوره بهره‌برداری در یک سیستم منابع آب و مقدار آن از رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود:

$$\lambda = Max_{t=1}^{T}\left(\frac{D_t - R_t}{D_t}\right) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

که در آن λ معیار آسیب‌پذیری است و هرچه این مقدار بیشتر باشد، آسیب‌پذیری سیستم بیشتر می‌شود. مدلی مناسب‌تر است که آسیب‌پذیری آن کمتر باشد.

یکی دیگر از شاخص‌های استفاده شده، شاخص انعطاف‌پذیری است. این شاخص نشان‌دهنده آن است که در صورت مواجه شدن با شکست، سیستم با چه سرعتی از آن خارج می‌گردد. مثلا اگر در یک دوره بهره‌برداری ۱۲ ماهه در چهار دوره، سیستم با شکست روبه‌رو شود، توالی دوره‌های شکست بر عملکرد سیستم تاثیرگذار است. یعنی چهار دوره متوالی شکست، تاثیر متفاوتی نسبت به حالتی دارد که هر دوره شکست، با یک دوره عدم‌شکست همراه باشد. شاخص انعطاف‌پذیری از رابطه ۲۲ به‌دست می‌آید:

$$\gamma_i = \frac{f_{si}}{F_i} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

که در آن γ_i شاخص انعطاف‌پذیری، f_{si} تعداد سری‌های شکست ایجاد شده در مخزن و F_i تعداد دوره‌های شکست ایجاد شده می‌باشد.

مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره

برای انتخاب بهترین روش بین الگوریتم‌های پروانه پادشاه، ژنتیک و ازدحام ذرات با توجه به شاخص‌های معرفی شده در قسمت قبل از یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌گردد. مدل مذکور بر اساس مدل حاصلضرب وزنی و مجموع باقیمانده وزنی عمل نموده و چنانچه f بیان کننده یک شاخص و e بیان‌کننده یک روش باشد، در نتیجه روابط ۲۳ و ۲۴ ایجاد می‌شوند که x_{ef} بیان‌کننده عملکرد هر روش بر اساس هر شاخص است.

$$\bar{x}_{ef} = \frac{x_{ef}}{Max\left(x_{ef}\right)} \leftarrow (benefical)creteria \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\bar{x}_{ef} = \frac{Min\left(x_{ef}\right)}{x_{ef}} \leftarrow (nonbenefical)creteria \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

مقادیر متغیرهای نرمال شده بر اساس روش مجموع باقی‌مانده وزنی و حاصلضرب وزنی بر اساس روابط ۲۵ و ۲۶ محاسبه می‌گردد:

$$\bar{x}_{ef} = \sum_{f=1}^{n_c} \bar{x}_{ef} w_f \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\phi_e^2 = \prod_{f=1}^{nc}\left(\bar{x}_e^f\right)^{w_f} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

که n_c تعداد کل شاخص‌های ارزیابی و w_f ونیز مربوط به هر شاخص است.

در مرحله‌ی بعد شاخص ϕ کل بر اساس رابطه ۲۷ جهت محاسبه رتبه هر روش محاسبه می‌گردد که در آن λ ضریبی است که بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند.

$$\phi = \lambda\left(\phi_e^1\right) + \left(1-\lambda\right)\left(\phi_e^2\right) \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

نتایج

جدول (۱) تحلیل پارامترهای تصادفی الگوریتم پروانه پادشاه، ژنتیک و ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. اندازه جمعیت برای الگوریتم پروانه معادل با ۳۰ پروانه می‌باشد که تابع هدف معادل آن کمترین مقدار را دارد. بهترین مقدار S_{max}، ۰/۵ است که دارای بهترین تابع هدف معادل با ۰/۵ می‌باشد و پارامتر p دارای بهترین مقدار ۰/۴ می‌باشد که تابع هدف متناظر با آن ۰/۸۴۵ است. همچنین آنالیز حساسیت پارامترهای الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات مشاهده می‌شود. p_c به‌عنوان نرخ تزویج و p_m به عنوان نرخ جهش می‌باشند.

جدول ۱. تحلیل پارامترهای تصادفی الگوریتم پروانه پادشاه (a)، ازدحام ذرات (b) و ژنتیک (c)

a

تابع هدف	p	تابع هدف	S_{max}	تابع هدف	اندازه جمعیت
۰/۸۹۹	۰/۲	۰/۹۱۱	۰/۳	۰/۹۱۴	۱۰
۰/۸۴۵	۰/۴	۰/۸۴۵	۰/۵	۰/۸۴۵	۳۰
۰/۸۱۱	۰/۶	۰/۸۲۳	۰/۷	۰/۸۵۹	۵۰
۰/۸۰۵	۰/۸	۰/۸۱۲	۰/۹	۰/۸۷۹	۷۰

b

تابع هدف	p_m	تابع هدف	p_c	تابع هدف	اندازه جمعیت
۱/۱۹	۰/۰۰۸	۱/۱۴	۰/۵	۱/۲۴	۱۰
۱/۱	۰/۰۰۹	۰/۹۹۹	۰/۶	۰/۹۹۹	۳۰
۰/۹۹۹	۰/۱۱	۱/۱	۰/۷	۱/۱	۵۰
۱/۱۲	۰/۱۱۱	۱/۱۲	۰/۸	۱/۲۲	۷۰

C

تابع هدف	$c_1=c_2$	تابع هدف	w	تابع هدف	اندازه جمعیت
۱/۰۳	۱/۶	۱/۰۱	۰/۵	۱/۰۴	۱۰
۱/۰۱	۱/۸	۰/۹۱	۰/۶	۰/۹۱	۳۰
۰/۹۱	۲	۱/۰۳	۰/۷	۱/۰۲	۵۰
۰/۹۱۴	۲/۱	۱/۱	۰/۸	۱/۱۱	۷۰

جدول ۲، نتایج ۱۰ اجرای تصادفی الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد که نتایج زیر از آنها قابل برداشت است:

۱. پاسخ بهینه مطلق مسئله بر اساس نرم‌افزار لینگو و روش غیرخطی به‌دست آمده است که ۰/۸۴۴ می‌باشد. متوسط پاسخ‌های الگوریتم پروانه پادشاه در ۱۰ اجرای مختلف ۰/۸۴۵ است که دارای نزدیکی قابل توجه با پاسخ بهینه مطلق مسئله است. اگرچه پاسخ بهینه مطلق مسئله بر اساس نرم‌افزار لینگو قابل محاسبه است، اما زمان اجرای برنامه ۵ ساعت می‌باشد و این در شرایطی است که الگوریتم پروانه پادشاه (Pc with i5 CPU 2.4GHz/4 GB ram/500GB HDD) با زمان ۲۰ دقیقه پاسخ بهینه مطلق را پیدا می‌نماید. الگوریتم مذکور می‌تواند جواب دقیق را در زمان کمتر محاسبه نماید.

۲. مقایسه مقادیر ضریب تغییرات الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تغییرات الگوریتم پروانه پادشاه نسبت به دو الگوریتم دیگر مقدار کوچکتری است. بنابراین حتی نتایج یک‌بار اجرای برنامه نیز قابل اعتماد است.

۳. متوسط پاسخ‌های به‌دست آمده بر اساس الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد که متوسط پاسخ‌های به‌دست آمده بر اساس الگوریتم پروانه پادشاه کوچک‌تر می باشد که بیانگر آن است روش مذکور نسبت به سایر روش‌ها توانسته تابع هدف را به مقدار کوچک‌تری همگرا کند.

جدول ۲. نتایج ۱۰ اجرای تصادفی الگوریتم‌های مختلف

Run	الگوریتم پروانه پادشاه	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک
۱	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۲	۰/۸۴۴	۰/۹۱۴	۱/۰۴
۳	۰/۸۴۴	۰/۹۱۴	۱/۰۴
۴	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۵	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۶	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۷	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۸	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۹	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
۱۰	۰/۸۴۴	۰/۹۱	۰/۹۹۹
میانگین	۰/۸۴۵	۰/۹۱	۰/۹۹۹
ضریب واریانس	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۱۸
راه حل جهانی		۰/۸۴۴	
زمان (دقیقه)	۲۰	۳۰	۳۴

جدول ۳ مقادیر مربوط به شاخص‌های مختلف را در ارتباط با روش‌های مختلف نشان می‌دهد. الگوریتم پروانه پادشاه با شاخص اطمینان‌پذیری ۹۲ درصد دارای بهترین عملکرد در بین سایر روش‌ها است. همچنین الگوریتم ازدحام ذرات در بین سایر روش‌ها با شاخص انعطاف‌پذیری ۸۹ درصد دارای بهترین عملکرد می‌باشد. علاوه بر آن الگوریتم پروانه پادشاه با شاخص آسیب‌پذیری ۱۴ درصد کمترین آسیب‌پذیری را در بین سایر روش‌ها دارا است. همچنین جدول ۳ مقادیر نرمال شده شاخص‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر ϕ^1 و ϕ^2

روش	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم پروانه پادشاه
ϕ^1	۰/۸۳	۰/۹۱۵	۰/۹۸۷۵
ϕ^2	۰/۸۴۳	۰/۹۱	۰/۹۸۷۲

جدول ۴ مقادیر ϕ^1 و ϕ^2 را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۵ مقادیر ϕ را برای هر روش نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر ϕ به‌دست آمده مشخص می‌باشد که در تمامی بازه‌های λ، الگوریتم پروانه پادشاه دارای مقدار بیشتری برای پارامتر ϕ می‌باشد. جدول ۶ مقایسه تعداد بردها و باخت های روش‌های مختلف را بر اساس رقابت[1] جفتی[2] نشان می‌دهد و نتایج بیانگر آن است در ۱۱ بازه λ، الگوریتم پروانه پادشاه نسبت به دو الگوریتم دیگر برتری داشته است. جدول ۷ نیز رتبه‌بندی نهایی روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

1 Contest
2 Pairwise

جدول ۴. ماتریس مقادیر مربوط به شاخص‌های مختلف در ارتباط با الگوریتم‌های مختلف

روش‌ها	میزان اعتبار (٪)	برگشت‌پذیری (٪)	آسیب‌پذیری (٪)	تابع هدف
الگوریتم ژنتیک	۸۸	۸۲	۲۲	۰/۹۹۹
الگوریتم ازدحام ذرات	۹۰	۸۹	۱۸	۰/۹۱
الگوریتم پروانه پادشاه	۹۲	۸۵	۱۴	۰/۸۴۵
ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده				
الگوریتم ژنتیک	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۶۳	۰/۸۴۱
الگوریتم ازدحام ذرات	۰/۹۷	۱	۰/۷۷	۰/۹۲
الگوریتم پروانه پادشاه	۱	۰/۹۵	۱	۱

جدول ۵. مقادیر محاسبه الگوریتم‌ها به ازای مقادیر مختلف λ

مقادیر λ	ϕ_{Ga} (رتبه ۳)	ϕ_{PSO} (رتبه ۲)	ϕ_{PSO} (رتبه ۱)
۰	۰/۸۴۳	۰/۹۱	۰/۹۷
۰/۱	۰/۸۴۱	۰/۹۱۱	۰/۹۷۱
۰/۲	۰/۸۴	۰/۹۱۲	۰/۹۷۲
۰/۳	۰/۸۳۹	۰/۹۱۳	۰/۹۷۳
۰/۴	۰/۸۳۷	۰/۹۱۴	۰/۹۷۴
۰/۵	۰/۸۳۶	۰/۹۱۵	۰/۹۷۵
۰/۶	۰/۸۳۵	۰/۹۱۶	۰/۹۷۶
۰/۷	۰/۸۳۳	۰/۹۱۷	۰/۹۷۷
۰/۸	۰/۸۳۲	۰/۹۱۸	۰/۹۷۸
۰/۹	۰/۸۳۱	۰/۹۱۹	۰/۹۷۹
۱	۰/۸۳	۰/۹۲	۰/۹۸

جدول ۶. مقایسه زوجی نتایج بر پایه سرعت همگرایی الگوریتم

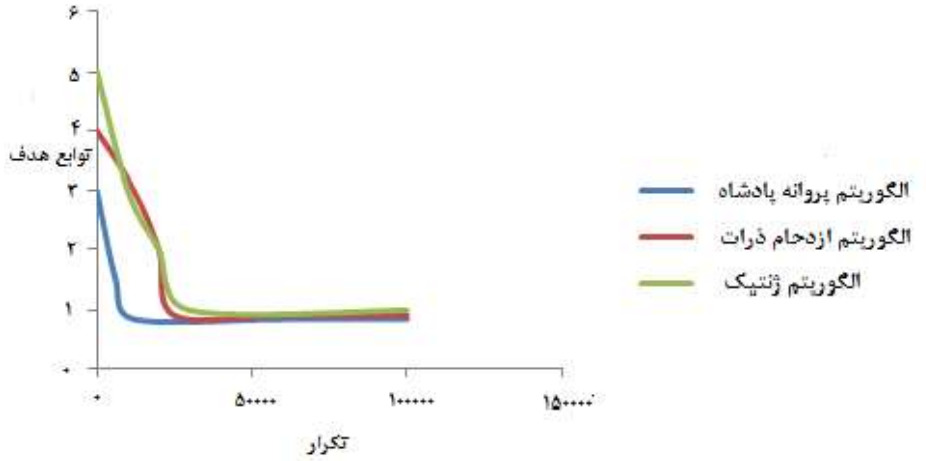
A	B	A تعداد موفقیت	B تعداد موفقیت	برنده
الگوریتم پروانه پادشاه	الگوریتم ازدحام ذرات	۱۱	۰	الگوریتم پروانه پادشاه
الگوریتم پروانه پادشاه	الگوریتم ژنتیک	۱۱	۰	الگوریتم ژنتیک
الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ازدحام ذرات	۰	۱۱	الگوریتم ازدحام ذرات

جدول ۷. رتبه‌بندی کارکرد الگوریتم‌ها بر پایه سرعت همگرایی

رتبه	الگوریتم برآورد
۱	الگوریتم پروانه پادشاه
۲	الگوریتم ازدحام ذرات
۳	الگوریتم ژنتیک

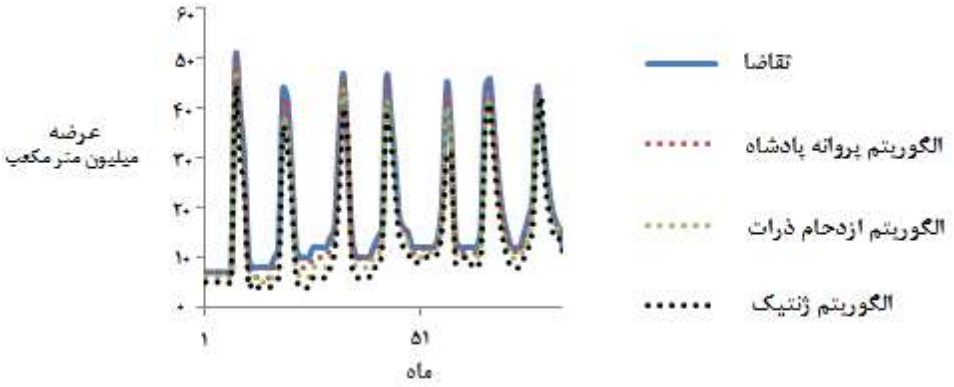
شکل ۶ بیانگر آن است که الگوریتم پروانه پادشاه نسبت به دو الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک دارای سرعت همگرایی بالایی‌تری می‌باشد و به ازای تعداد دفعات کمتری همگرا گردیده است. همچنین پاسخ نهایی نیز برای الگوریتم پروانه پادشاه نسبت به دو روش دیگر کوچک‌تر گردیده است

.

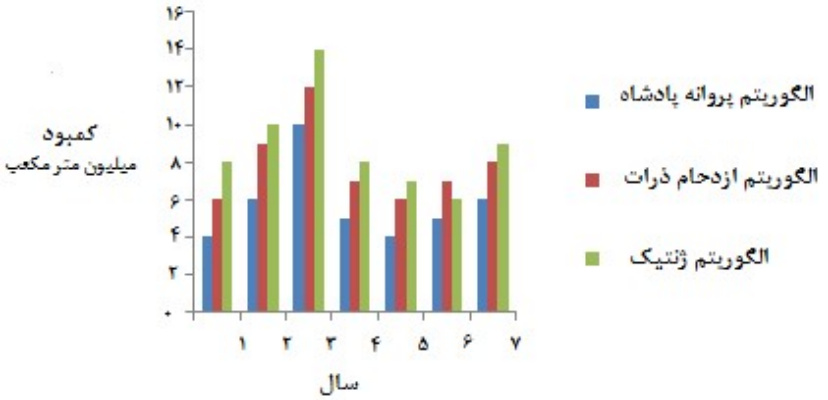


شکل ۶. تعداد دفعات همگرایی الگوریتم‌های مختلف

شکل ۷ مقادیر رهاسازی آب و شکل ۸ بیانگر مقادیر کمبودهای آبیاری سالانه برای روش‌های مختلف است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که در تمامی سال‌ها کمبود آبیاری برای دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذارت نسبت به الگوریتم پروانه پادشاه بیشتر است. بنابراین الگوریتم پروانه پادشاه دارای عملکرد بهتری است.



شکل ۷. مقادیر رهاسازی آب در الگوریتم‌های مختلف



شکل ۸. میزان کمبود آب آبیاری در الگوریتم‌های مختلف

بحث و نتیجه‌گیری

میزان حجم آب انتقالی از مخزن سد به پایاب، همواره از مسایل مهم مدیریتی سیستم‌های انتقال آب بوده و راهکارهای متعددی نیز برای حل این موضوع وجود دارد. کاربرد روش‌های بهینه‌سازی خطی و غیرخطی از جمله الگوریتم‌های ژنتیک، پروانه پادشاه، جستجوی کلاغ، ازدحام ذرات، هارمونی، خفاش و سایر مدل‌های الگوریتمی در حل مسئله تخصیص بهینه منابع آب و مدل‌های بهینه‌سازی در مخازن سدها کاربرد فراوانی دارند. تابع هدف در این الگوریتم‌ها معمولا عبارت است از تعیین حجم آب انتقالی از مخزن سدهای منطقه به شهرها و مناطق مجاور به نحوی که ضمن تامین نیازها، هزینه کل طرح انتقال نیز حداقل شود.

در مجموع، بهینه‌سازی یکی از روش‌های حل مسئله و تبدیل آن به یک فرآیند جستجو است، یعنی اینکه مسئله را به صورت مجموعه‌ای از حالات در نظر گرفت که در آن از یک حالت اولیه شروع کرده و به دنبال رسیدن به یک حالت خاص می‌باشد. به عنوان مثال در مسئله تخصیص آب، دنبال یافتن مسیری بین کل حالت‌های تخصیص می‌باشند که کمترین هدررفت آب را داشته باشد. حالتی که با شروع از یک کارکرد خاص و عبور از تمام مراکز دارای نیاز تخصیص آب، مصرف بهینه با کمترین هدررفت را داشته باشد.

الگوریتم‌های قطعی برای مسایلی با فضای حالت زیاد نمی‌توانند کارایی داشته باشند. در این حالت، الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری عملکرد بهتری دارند. در الگوریتم‌های ابتکاری سعی می‌شود ترفندی به‌کار رود که کل فضای حالت را جستجو کند. به عبارتی تلاش می‌شود که با استفاده از یک هیوریستیک خاص، دامنه جستجو را محدود کرده تا بتوان به جواب رسید. یک هیوریستیک، تخمینی از مسئله است که به می‌گوید هر حالت موجود چقدر می‌تواند به جواب نزدیک باشد و هر چه این تخمین دقیق‌تر باشد، عملکرد الگوریتم هم بهتر خواهد بود. اما اینکه این تخمین چقدر دقیق است معمولا مشخص نیست. مهمترین مشکل این الگوریتم‌ها گرفتار شدن در بهینه محلی است. الگوریتم‌های فراابتکاری سعی می‌کنند که مشکل گرفتار شدن در بهینه محلی را رفع کنند. در این الگوریتم‌ها مشخص می‌شود که تخمین در نظر گرفته چقدر درست است. این نوع الگوریتم‌ها وابسته به مسئله خاصی نیستند و یک راهبرد کلی را تعریف می‌کنند که برای حل هر مسئله‌ای ثابت است. با این تفاوت که مسئله مورد نظر باید بر اساس راهبرد موجود تعریف شود تا قابل حل باشد. الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچه، الگوریتم زنبور عسل، جستجوی کلاغ، خفاش و پروانه پادشاه همگی از این نوع هستند.

در مقایسه پیشینه تحقیقاتی که از الگوریتم‌های مختلف برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب استفاده نموده‌اند باید اظهار داشت که در استفاده الگوریتم ژنتیک توسط Pianosi و همکاران (۲۰۱۱) مشخص شده که این الگوریتم قابلیت استفاده در شرایط بحرانی جدی مانند خشکسالی هیدرولوژیک و سیل-خیزی را دارد. اما مشکل بهینه‌سازی این مدل عبارت از فرموله کردن عمومی مدل و چالش‌های اصلی منطقه‌ای و همچنین توسعه شبیه‌سازی نتایج به‌دست آمده است. Ahmadi و همکاران (۲۰۱۴) در استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان دادند که این الگوریتم با ضرایب اطمینان‌پذیری بالا و آسیب‌پذیری پایین می تواند انواع نیازهای آبی را تامین نماید. نتایج Bolouri-Yzadeli و همکاران (۲۰۱۴) در استفاده از این الگوریتم بیانگر آن بود که الگوریتم ژنتیک نسبت به روش سیاست بهره‌برداری استاندارد با رویکرد منحنی‌های غیرخطی دارای انطباق بیشتری با مقادیر نیاز بود. در عین حال Hadad و همکاران (۲۰۱۴) معتقد بودند که الگوریتم چرخه آب به منظور بهره‌برداری یک مخزن آب با رویکرد افزایش تولید انرژی در نیروگاه‌های پایین دست برخلاف الگوریتم‌هایی نظیر ژنتیک و ازدحام ذرات دارای زمان محاسباتی کمتر و همچنین تولید انرژی بیشتر در نیروگاه پایین دست می‌باشد. Bozorg-Hadaad و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از الگوریتم خفاش برای بهره‌برداری یک سیستم چندمخزنه با رویکرد افزایش تولید انرژی نشان دادند که الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک دارای سرعت همگرایی بیشتر و پاسخ بهینه نزدیک‌تری به پاسخ بهینه مطلق است و علاوه بر آن تولید انرژی بر اساس روش مذکور نسبت به روش‌های الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات همراه با مقدار بیشتری همراه است. نتایج تحقیق Bashiri-Atrabi و همکاران (۲۰۱۵) بیانگر آن بود که

الگوریتم هارمونی نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات می‌تواند مقادیر نیازهای آبی پایین دست را بهتر تامین نماید. همچنین سرعت همگرایی الگوریتم مذکور از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بیشتر بوده است. نتایج مطالعات Wang و همکاران (۲۰۱۵) بیانگر آن بود که الگوریتم پروانه پادشاه با زمان محاسباتی کمتر و سرعت همگرایی بیشتر به جواب‌های بهینه مطلق توابع ریاضی با هدف حداکثر یا حداقل نمودن این توابع دست پیدا می‌کند.

مطالعه حاضر به بررسی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد شهید رجایی پرداخت. هدف از این مطالعه حداقل نمودن کمبودهای آبیاری بود، بنابراین الگوریتم پروانه پادشاه برای نخستین بار در زمینه مدیریت منابع آب استفاده شد. مقایسه نتایج با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات بر پایه یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شد. همچنین از شاخص‌های انعطاف‌پذیری، اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده شد. مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه مدل مجموع باقی‌مانده وزنی و حاصلضرب وزنی نشان داد الگوریتم پروانه پادشاه دارای رتبه یک در بین سایر روش‌ها می‌باشد. علاوه بر آن الگوریتم مذکور می‌تواند پاسخ بهینه مطلق مسئله را به شکل دقیق و در زمان کمتری نسبت به نرم‌افزار لینگو و روش غیرخطی محاسبه کند. همچنین مقادیر کمبودهای آبیاری بر اساس الگوریتم پروانه پادشاه نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات کمتر می‌باشد. در مطالعات آینده می‌توان برای ارتقای روش از سیستم‌های فازی و الگوریتم پروانه پادشاه استفاده نمود. همچنین روش مذکور را می‌توان بر روی سیستم‌های چندمخزنه استفاده نمود.

در مجموع با وجود استفاده از الگوریتم‌های مختلفی از جمله الگوریتم‌های جستجوی کلاغ، خفاش، کوسه، کلنی مورچه، زنبور عسل و غیره، اغلب مطالعات الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات را مدل‌های بهینه تشخیص داده‌اند. اما باید توجه داشت عموما تا آنجایی که در این تحقیق بررسی شده است، در موارد محدودی بین کارکرد الگوریتم پروانه پادشاه و سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده و از جمله در تحقیق حاضر که نشان دادند عملکرد این الگوریتم در منطقه مورد مطالعه بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده و در نتیجه کاربرد آن میزان کمبود آب آبیاری را به شکل محسوسی کمتر کرده است. در عین حال باید توجه داشت که شرایط منطقه‌ای در انتخاب الگوریتم بهینه در مدیریت منابع آب بسیار تاثیرگذار است. بدین ترتیب پیشنهاد می‌شود حتما در انتخاب الگوریتم بهینه در مقایسه با عملکرد چند الگوریتم و مدل خطی و غیرخطی، به انتخاب بهترین روش اقدام نمود.

منابع

Aboutalebi, M., Bozorg Haddad, O. and Loáiciga, H.A. (2015) Optimal monthly reservoir operation rules for hydropower generation derived with SVR-NSGAII. Journal of Water Resources Planning and Management, 141(11): 04015029.

Ahmadi, M., Haddad, O.B. and Mariño, M.A. (2014) Extraction of flexible multi-objective real-time reservoir operation rules. Water Resources Management, 28(1): 131-147.

Ai, X., Dong, Z. and Mo, M. (2017) A method for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands. In EGU General Assembly Conference Abstracts, (19): 4238-4238.

Bashiri-Atrabi, H., Qaderi, K., Rheinheimer, D.E. and Sharifi, E. (2015) Application of harmony search algorithm to reservoir operation optimization. Water Resources Management, 29(15): 5729-5748.

Bolouri-Yazdeli, Y., Haddad, O.B., Fallah-Mehdipour, E. and Mariño, M.A. (2014) Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation. Water Resources Management, 28(3): 715-729.

Bozorg-Haddad, O., Azarnivand, A., Hosseini-Moghari, S.M. and Loáiciga, H.A. (2016) WASPAS Application and evolutionary algorithm benchmarking in optimal reservoir optimization problems. Journal of Water Resources Planning and Management, 143(1): 04016070.

Brambilla, M., Fontes, A.S. and Medeiros, Y.D.P. (2017) Cost-benefit analysis of reservoir operation scenarios considering environmental flows for the lower stretch of the São Francisco River (Brazil).

Choong, S.M., El-Shafie, A. and Mohtar, W.W. (2017) Optimization of multiple hydropower reservoir operation using artificial bee colony algorithm. Water Resources Management, 31(4): 1397-1411.

Delice, Y., Aydoğan, E.K., Özcan, U. and İlkay, M.S. (2017) A modified particle swarm optimization algorithm to mixed-model two-sided assembly line balancing. Journal of Intelligent Manufacturing, 28(1): 23-36.

Dong, L., Mingliang, L., Kexin, W., Qiang, F., Liangliang, Zh., Mo, L., Xuesong, L., Tianxiao, L. and Song, C. (2022) Evaluation and analysis of irrigation water use efficiency based on an

operation of China's South-to-North Water Diversion Project. Science of The Total Environment, 575(4): 970-981.

Pianosi, F., Quach Thi, X. and Soncini-Sessa, R. (2011) artificial neural networks and multi objective
genetic algorithms *for* water *resources* manage ment*:* An application to the Hoabinh reservoir in Vietnam, IFAC Proceedings Volumes January, pp. 187-198.

Raso, L., Malaterre, P.O. and Bader, J.C. (2017) Effective Streamflow process modeling for optimal reservoir operation using stochastic dual dynamic programming. Journal of Water Resources Planning and Management, 143(4): 04017003.

Wang, G.G., Zhao, X. and Deb, S. (2015) A novel monarch butterfly optimization with greedy strategy and self-adaptive. Soft Computing and Machine Intelligence (ISCMI), 2015 Second International Conference, IEEE, pp. 45-50.

Wu X.J., Li, Y.P., Liu, J., Huang, G.H., Ding, Y.K., Sun, J. and Zhang, H. (2021) Identifying optimal virtual water management strategy for Kazakhstan: A factorial ecologically-extended input-output model. Journal of Environmental Management, 297(3): 113303.

extreme learning machine model optimized by the spider monkey optimization algorithm. Journal of Cleaner Production, 330(4): 129935

Ehteram, M., Karami, H., Mousavi, S.F., El-Shafie, A. and Amini, Z. (2017a) Optimizing dam and reservoirs operation-based model utilizing shark algorithm approach. Knowledge-Based Systems, 122(2): 26-38.

Ehteram, M., Mousavi, S.F., Karami, H., Farzin, S., Emami, M., Othman, F.B. and El-Shafie, A. (2017b) Fast convergence optimization model for single and multi-purposes reservoirs using hybrid algorithm. Advanced Engineering Informatics, 32(5): 287-298.

Haddad, O.B., 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.

Hashimoto, T., Stedinger, J.R. and Loucks, D.P. (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, 18(1): 14-20.

Li, Y., Cui, Q., Li, C., Wang, X., Cai, Y., Cui, G. and Yang, Z. (2017) An improved multi-objective optimization model for supporting reservoir

Optimizing reservoirs exploitation for irrigation system based on new King Butterfly algorithm

Miromid Hadiani [*1] , Hamid Reza Vaziri [2]

1) Assistant Prof. Department of Environmental Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University,Qaemshahr, Iran.
*Corresponding Author Email Address : m.omidhadiani@qaemiau.ac.ir
2) Graduated PhD in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Date of Submission: 2021/12/17 Date of Acceptance: 2022/03/12

Abstract

In the present study, the exploitation of the dam reservoir to meet irrigation needs has been investigated based on the new evolutionary algorithm of the King Butterfly with the aim of minimizing irrigation deficiencies. Genetic and particle swarm algorithms were used as the most widely used and successful algorithms for comparison with the King Butterfly algorithm and a multi-criteria decision model to select the superior method. The results showed that the King Butterfly algorithm with the first rank based on the multi-criteria decision model and various indicators such as reliability, vulnerability, reversibility and objective function has a better performance than the particle swarm and genetic algorithm. In addition, the amount of irrigation water supply shortages based on the King Butterfly algorithm is lower than the other two algorithms during the seven years of study. Therefore, the study showed that the King Butterfly algorithm has a good performance for use in water resources management issues.

Keywords: Artificial intelligence, King Butterfly algorithm, Reservoir exploitation, Water resource management.