کارآیی روش‌های مختلف بهینه‌سازی در بهره‌برداری از مخزن سد هراز

عیسی کیاء[۱]، علیرضا عمادی[*]، محمدعلی غلامی سفیدکوهی[۳]

مقاله برگرفته از رساله دکتری

چکیده

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها با توجه به نقش آنها در کنترل آب‌های سطحی و تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در این پژوهش، قابلیت الگوریتم کرم شب تاب (FA) برای حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد هراز به منظور تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، شرب و صنعت و زیست‌محیطی پایاب سد برای یک دوره ۲۷ ساله (از سال آبی ۶۴-۶۳ تا ۹۰-۸۹) مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف به صورت کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای نسبی ماهانه در طول دوره بهره‌برداری تعریف گردید. کارآیی این الگوریتم‌ها با تعیین شاخص‌های عملکردی مخزن، مقدار تابع هدف، کمبود سالانه، متوسط ماهانه کمبود و برداشت آب مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. روش FA با اعتمادپذیری تأمین آب ۸۸/۳ درصد، بهتر از دو روش GA و SOP با مقدار ۸۲/۴ و ۶۶/۷ توانسته است نیازهای پایین‌دست سد را تأمین کند. شاخص آسیب‌پذیری سه مدل به ترتیب ۰/۲۰، ۰/۲۳ و ۰/۹۹ به دست آمد. نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم FA نسبت به دو روش دیگر در حل مسآله بهره‌برداری از مخزن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اعتمادپذیری، بهره‌برداری، ژنتیک، سیاست بهره‌برداری استاندارد، کرم شب‌تاب، هراز.

[۱]دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ۰۹۱۱۳۵۴۳۱۶۳ ، eassa_kia@yahoo.com
[۲]دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (*- نویسنده مسئول)، ۰۹۱۲۳۹۳۱۳۱۱، emadia355@yahoo.com
[۳]دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۰۹۱۲۱۵۳۵۴۷۷ ، magholamis@yahoo.com

مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون نیاز به منابع آب که نتیجه رشد جمعیت، صنعت و کشاورزی است، نمی‌توان تنها با اکتفا به منابع آب متغیر و غیرمطمئن، برنامه‌ریزی نمود. لذا احداث مخازن، جهت رسیدن به اهداف فوق یک امر اجتناب‌ناپذیر و قطعی است. افزایش بی‌رویه مصرف و منابع محدود آب در آینده بسیار نزدیک، کشور را با بحران‌های جـدی مواجه می‌سازد. بنابراین، علاوه بر احـداث سد، چگونگی بهره‌برداری از سدهای مخزنی نیز باید به نحوی انجام شود که با توجه به دبی ورودی به سد، هندسه مخزن، شرایط آب و هوایی و نوع مصرف، کمترین کمبود در طول دوره بهره‌برداری اتفاق افتد.

با احداث سد، برنامه‌های کشاورزی، صنعتی و توسعه شهری و در نهایت ساختار سیستم آبی حوضه آن تغییر می‌کند. تغییر در ساختار سیستم آبی حوضه به علت تغییر در سیستم تأمین آب و یا تقاضای آبی، تغییر در شرایط زمانی و مکانی از سیستم آبی را به همراه دارد. بنابراین، کاربرد شیوه کنونی بهره‌برداری از سیستم آبی در شرایط جدید، الزاماً بهینه نبوده و باعث کاهش ظرفیت تأمین آب و عدم قابلیت اطمینان تأمین و در نهایت منجر به ناکـارآمـدی بهره‌برداری از سیستم آبی می‌گردد. لـذا، بـرای برنامه‌ریزی در مورد نحوه بهره‌برداری از سد در حال ساخت، نیاز به مدل‌سازی و تخصیص بهینه منابع آب می‌باشد. تاکنون از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی برای بهره‌برداری از مخازن استفاده شده است. با این وجـود روش‌های جدیدتر بـه منظور رفـع نواقص روش‌های قبلی توسعه داده می‌شوند. به طور نمونه، با توجه به میزان آب مصرفی در سه بخش کشاورزی، صنعت و خدمات به عنوان مهمترین مصرف کنندگان منابع آب، تابع هدف غیرخطی تشکیل یافت. برای حل این مدل بهینه‌سازی، از الگوی پیشرفته‌ای مانند الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی GA-PSO استفاده گردید. با ارائه این مدل، جواب‌های قابل قبولی در زمینه حداکثرسازی سود اقتصادی در حوضه کویر مرکزی ایران به دست آمد (حبیبی داویجانی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، برای اولین بار یک سامانه سه مخزنه نمونه با اهداف کلی تولید انرژی برق‌آبی، تأمین نیازهای پائین‌دست (کشاورزی، شـهری و صنعتی) و کنتـرل سیـل ارائه شد. نتایج نشان داد که اطلاعات تعیین شده برای این سامانه، کاملاً به صورت منطقی و با روند واقعی تعریف شده‌اند و می‌توانند عملکرد سامانه مخازن را در حالت‌های تک مخزنه یا چند مخزنه و تک هدفه یا چند هدفه به خوبی نمایان سازند (سیف‌اللهی آغمیونی و بزرگ حداد، ۱۳۹۳). Esat and Hall (1994)، الگوریتم ژنتیک را در یک مسئله چهار مخزنه به کار برده و نتیجه گرفتند که GA با صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان و حافظه کامپیوتر، پتانسیل مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب دارد. در پژوهشی در تایلند، برای تخصیص بهینه آب در دسترس محدود به چهار بخش کشاورزی، خانگی، صنعت و برق‌آبی، مدلی با هدف حداکثرسازی سود خالص اقتصادی برای حوضه رودخانه چائو فاریا ارائه کردند. این مدل قادر به بهبود سود اقتصادی در مقایسه با شیوه‌های تخصیص آب می‌باشد (Divakar et al.,2011). برای حداقل کردن کمبود آب و تولید حداکثر نیروی برق‌آبی منابع آب رودخانه تائو از مدل تلفیقی GA-PSO استفاده گردید (Chang et al.,2013). در پژوهشی دیگر، طرح بهره‌برداری از سامانه سه مخزنه با هدف تأمین آب شرب، کشاورزی و تولید انرژی در حوضه رودخانه کوتیادی مـورد بررسی قرار گرفت. برای مدل‌سازی این سیستم در مراحل آغازین، از سیاست بهره‌برداری خطی استاندارد[1] به دلیل رابطه خطی میان تولید انرژی و ذخیره مخزن استفاده شد. همچنین، برای تحلیل مخزن از نرم‌افزار موسسه ملی هیدرولوژی بنام NIH-ReSyp استفاده شد که قادر به محاسبه ظرفیت مخزن، روندیابی مخزن، برآورد جریان ورودی، منحنی فرمان اولیه، بهره‌برداری از سیستم مخازن چند هدفه، کنترل سیلاب و ... بوده است (Thankachan and Anitha,2015).

الگوریتم کـرم شب‌تاب (FA) توسط یانگ[2] در سال ۲۰۰۸ معرفی گردید. این الگوریتم، تکنیکی جدید در

[1] Standard Linear Operation Policy (SLOP)
[2] Yang

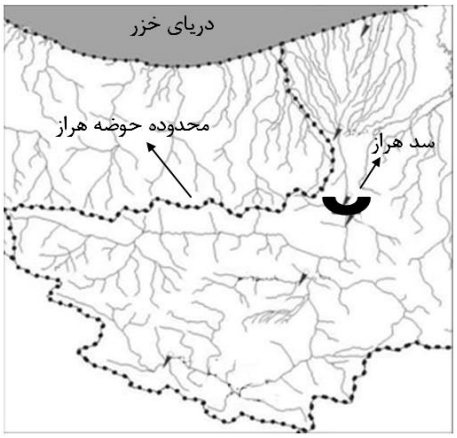
مسائل بهینه‌سازی منابع آبی بوده که کمتر به آن پرداخته شده است. در پژوهشی، جهت تأمین آب کشاورزی از الگوریتم کرم شب‌تاب برای تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن بازفت استفاده شد. سپس عملکرد آن با GA و PSO مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم FA نسبت به دو روش دیگر بود (حسینی موغاری و بنی حبیب، ۱۳۹۳). در پژوهشی دیگر، در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن در یک دوره ۹۹ ماهه از روش FA استفاده شد و نتایج حاصل از آن با نتایج الگوریتم‌های سیستم مورچگان پیوسته و ترتیبی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش FA نسبت به دو روش دیگر از تابع هدف کمتر و اعتمادپذیری بالاتری برخوردار می‌باشد (زینلی و همکاران، ۲۰۱۵). Garousi-Nejad et al. (2016)، کارآیی الگوریتم FA نسبت به GA در بهره‌برداری از مخزن با هدف تامین آب کشاورزی و تولید برق‌آبی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت همگرایی در FA برای رسیدن به نقطه بهینه سراسری و مقدار تابع هدف بهتر از GA می‌باشد. Bozorg-Haddad et al. (2017)، عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب توسعه یافته چندمنظوره (MODFA) را برای بهینه‌سازی تولید برق‌آبی یک سیستم سه مخزنه در ایران مورد ارزیابی قرار دادند. هدف از پژوهش، بیشینه کردن قابلیت اطمینان تولید برق‌آبی و کمینه کردن آسیب‌پذیری بوده است. نتایج نشان داد که MODFA از عملکرد بهتری نسبت به MOGA و MOFA برخوردار می‌باشد. Ritthipakdee et al. (2017)، از الگوریتم جفت‌گیری کرم شب‌تاب (FMA) برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته استفاده نمودند. هسته مرکزی این الگوریتم، الگوریتم ژنتیک است. برای مقایسه عملکرد این روش با ۱۱ الگوریتم دیگر نظیر FA، DE، DFOA و ...، از ۲۰ تابع معیار (شانزده تابع ۳۰ بعدی و چهار تابع ۲ بعدی) استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان موفقیت الگوریتم پیشنهادی در رسیدن به نقطه بهینه سراسری بیشتر از الگوریتم‌های دیگر بوده و در مقایسه با الگوریتم FA نیاز به تعداد تکرار کمتری دارد.

با بررسی مطالعات گذشته می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش‌های فراکاوشی در بهینه‌سازی مسئله پیچیده و غیرخطی بهره‌برداری از مخزن سد در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. این روش‌ها نه وابسته به نوع مسئله از نظر خطی و غیـرخطی بودن هستند و نه نیازی به گسسته‌سازی مسئله دارند؛ همچنین دارای سرعت و دقت مناسب در مقایسه با سایر روش‌های موجـود می‌باشند (Rani and Moreira, 2010). لذا در این تحقیق از الگوریتم فراکاوشی جدید نظیر کرم شب‌تاب با هدف بهینه‌سازی تخصیص آب در حوضه هراز، مدلی تهیه شد که خروجی‌های مخزن را کنترل نموده و میزان برداشت بهینه آب از مخزن را در ماه‌های مختلف ۲۷ سال (۱۳۹۰-۱۳۶۳) به نحوی مشخص می‌کند که در سال‌های خشک، با کمترین مقدار کمبود آب و خسارت همراه باشد. به منظور بررسی کارآیی الگوریتم FA، نتایج حاصل از آن با الگوریتم ژنتیک و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. کدنویسی هر سه روش SOP، GA و FA در نرم‌افزار MATLAB انجام شده و برای بررسی کارآیی آنها، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل؛ قابلیت اعتماد زمانی و حجمی و شاخص آسیب‌پذیری استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

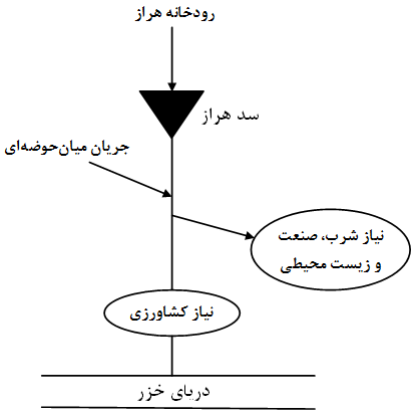
الف- مشخصات عمومی حوضه مطالعاتی

حوضه هراز در بخش شرقی منطقه ساحلی دریای مازندران بر روی یک دشت آبرفتی قرار دارد که توسط رودخانه هراز ایجاد شده است. این حوضه از شمال به دریای خزر و از شرق و شمال شرقی به حوضه رودخانه بابل‌رود و از غرب به حوضه رودخانه چالوس و از شمال غربی به حوضه رودخانه‌های حد فاصل چالوس تا آلش‌رود محدود است. شکل (۱) موقعیت حوضه هراز و ساختگاه سد در حال احداث هراز را نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت حوضه و ساختگاه سد هراز

سد مخزنی هراز از نوع خاکی با هسته مخلوط به ارتفاع ۱۲۰ متر، طول تاج ۳۸۸ متر و حجم مفید ۱۵۱ میلیون متر مکعب به فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب آمل و قبل از ورود رودخانه به دشت هراز به منظور جبران حقابه‌های حذف شده دشت هراز از سد لار، مورد مطالعه قرار گرفته و از سال ۱۳۹۲ در حال اجرا می‌باشد. آب تنظیمی این سـد با رقوم ۵۰۲ متر از سطح دریا و حجم کل مخزن ۲۳۰ میلیون مترمکعب در پی انتقال به سد انحرافی هزار سنگر از طریق شبکه آبیاری دشت هراز، اراضی کشاورزی این دشت را مشروب می‌سازد. تأمین آب آشامیدنی و صنعت شهرهای بزرگ استان به میزان ۱۱۵ میلیون متر مکعب در سال از دیگر اهداف مهم این سد می‌باشد. برای مدل‌سازی، از آمار جریان ورودی به مخزن در طی ۲۷ سال (۱۳۹۰-۱۳۶۳) به صورت سری زمانی ماهانه استفاده گردید. در جدول (۱)، توزیع ماهانه دبی ورودی، تبخیر و بارندگی از سطح آزاد آب در مخزن، در جدول (۲) توزیع ماهانه نیاز آبی پایین‌دست به تفکیک کشاورزی، شرب و صنعت و زیست‌محیطی و در شکل (۲)، وضعیت سیستم منابع و مصارف سد مخزنی هراز ارائه شده است.



شکل (۲): وضعیت سیستم منابع و مصارف سد هراز

جدول (۱): توزیع ماهانه دبی ورودی، تبخیر و بارندگی پایین‌دست مخزن سد هراز (میلیون مترمکعب)

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
بارندگی	۱۱۴/۵	۱۰۴/۳	۱۰۰/۹	۷۴/۷	۷۲/۴	۷۰/۵	۵۰/۳	۴۲/۹	۳۴/۸	۴۶/۱	۴۲/۲	۸۶/۶	۸۴۰/۰
تبخیر	۷۹/۹	۵۰/۷	۳۱/۸	۳۴/۰	۳۹/۱	۵۵/۹	۸۳/۸	۱۱۷/۳	۱۱۴/۰	۱۵۰/۸	۱۴۰/۱	۱۰۹/۸	۱۰۳۴/۲
دبی	۳۲/۵	۳۰/۹	۲۸/۹	۲۶/۵	۲۶/۴	۳۳/۳	۶۶/۹	۱۱۸/۴	۱۱۰/۳	۷۱/۸	۴۷/۳	۳۸/۸	۶۳۲/۰

جدول (۲): توزیع نیاز ماهانه پایین‌دست مخزن سد هراز (میلیون مترمکعب)

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
کشاورزی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۹/۱	۲۶۸/۰	۲۱۶/۴	۲۱۴/۶	۱۵۲/۳	۱/۵	۱۰۵۱/۹
شرب و صنعت	۹/۵	۹/۵	۹/۵	۹/۵	۹/۵	۹/۱	۹/۸	۹/۸	۹/۸	۹/۸	۹/۸	۹/۸	۱۱۵/۴
زیست‌محیطی	۳۳/۲	۳۴/۵	۳۴/۲	۳۰/۸	۲۹/۵	۳۲/۱	۴۶/۴	۸۲/۹	۸۰/۱	۵۳/۶	۳۸/۱	۳۳/۴	۵۲۸/۸
مجموع	۴۲/۷	۴۴/۰	۴۳/۷	۴۰/۳	۳۹/۰	۴۱/۲	۲۵۵/۳	۳۶۰/۷	۳۰۶/۳	۲۷۸/۰	۲۰۰/۲	۴۴/۷	۱۶۹۶/۱

ب- سیاست بهره‌برداری از مخزن سد

مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، مسأله بهینه‌سازی مقید است که به منظور مدل‌سازی آن می‌بایست تابع هدف مسأله و قیـود آن تعریف شود. تابع هدف مسـأله می‌تواند به شکل‌های مختلف تعریف

گردد. قیـود مسأله را می‌توان معادله پیوستگی، حداقل و حداکثر حجم مخزن یا مقدار آب رها شده از مخزن و غیره در نظر گرفت. در این پژوهش، تابع هدف به صورت حداقل‌سازی مجموع مجذور کمبودهای نسبی در تخصیص به آن در هر ماه در طول دوره بهره‌برداری تعریف شده است:

$$\text{Min } F = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{De_t - Re_t}{D_{max}}\right)^2 \qquad (۱)$$

که در آن: F، تابع هدف در تخصیص آب، n طول دوره بهره‌برداری، De_t حجم مورد نیاز در ماه t ام، Re_t حجم برداشت یا رهاسازی از مخزن در ماه t ام و D_{max} حـداکثر حجـم مـورد نیـاز در طـول دوره بهره‌برداری می‌باشد.

با توجه به معادله پیوستگی (رابطه ۲) که از اساسی‌ترین روابط مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن می‌باشد و نیز محدودیت‌ها و قیود مربوطه در حالت کلی (روابط ۳ تا ۸)، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سد تعیین می‌گردد.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - Ev_t - Re_t - Sp_t \qquad (۲)$$

$$0 \le Re_t \le De_t \qquad (۳)$$

$$S_{min} \le S_t \le S_{max} \qquad (۴)$$

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t + P_t - Ev_t - Re_t - S_{max} \\ \quad \text{if } S_t + Q_t + P_t - Ev_t - Re_t > S_{max} \\ 0 \\ \quad \text{if } S_t + Q_t + P_t - Ev_t - Re_t \le S_{max} \end{cases} \qquad (۵)$$

$$Re_t = \begin{cases} S_t + Q_t - Loss_t \\ \quad \text{if } S_t + Q_t - Loss_t \le R_{max} \\ R_{max} \\ \quad \text{if } R_{max} \le S_t + Q_t - Loss_t \le S_{max} \\ S_t + Q_t - S_{max} \\ \quad \text{if } S_t + Q_t - Loss_t - R_{max} \ge S_{max} \end{cases} \qquad (۶)$$

$$Loss_t = A_t \times (Ev_t - R_t) \qquad (۷)$$

$$A_t = a + b \times S_t + c \times S_t^{\,2} \qquad (۸)$$

که در آن؛ S_{t+1} و S_t، به ترتیب حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره t، Q_t حجم جریان ورودی به مخزن در طول دوره t، Sp_t حجم سرریز از مخزن در طول دوره t، Ev_t حجم تبخیر از سطح مخزن در ماه t ام، P_t حجم بارش بر روی سطح مخزن، S_{min} و S_{max} به ترتیب حجم کمینه و بیشینه مخزن، $Loss_t$ میزان تلفات مخزن، در ماه t ام و a، b و c ضرایب رابطه حجم-سطح مخزن می‌باشند.

وجود قیود در مسأله بهینه‌سازی موجب می‌شود که برخی از جواب‌های موجود در فضای جستجوی مسأله، جواب‌های ناشدنی باشند. در این مسأله از روش تابع جریمه برای اعمال قیود استفاده شده است. بدین منظور پس از ساخت یک جواب کامل، مقدار حجم مخزن در طول دوره بهره‌برداری توسط رابطه پیوستگی به دست می‌آید. سپس اگر حجم و رهاسازی مخزن از محدودهای مجاز تعریف شده تخطی کرده باشد، تابع هدف مسأله به صورت رابطه زیر اصلاح می‌گردد.

$$\text{Min } F = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{De_t - Re_t}{D_{max}}\right)^2 + Pen1 + Pen2 \qquad (۹)$$

که در آن:

$$Pen1 = \begin{cases} D \times (S_{min} - S_t)/S_{min} & \text{if } S_t < S_{min} \\ D \times (S_t - S_{max})/S_{max} & \text{if } S_t > S_{max} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

(۱۱)

$$Pen2 = \begin{cases} E \times (Re_t - De_{min\,t})/De_{min\,t} & \text{if } Re_t < De_{min\,t} \\ E \times (Re_t - De_{max\,t})/De_{max\,t} & \text{if } Re_t > De_{max\,t} \end{cases}$$

که، Pen1 و Pen2 به ترتیب تابع جریمه مربوط به حجم و رهاسازی از مخزن، De_{maxt} و De_{mint} حداکثر و حداقل نیاز سد در ماه t، D و E ضرایب ثابت که در این مسأله با سعی و خطا حدود ۱ بدست آمدند.

ج- الگوریتم کـرم شب‌تاب (FA)

الگوریتم کـرم شب‌تاب، تکنیکی جدید مبتنی بر رفتارهای جمعی است که از رفتار اجتماعی کـرم شب-تاب در طبیعت الهام گرفته شده است. کرم‌های شب-تاب به منظور جذب جفت و شکار نورهایی تولید می-کنند که الگوی نوری هر کدام با دیگری متفاوت است. میزان این نور رابطه مستقیم با جذابیت کرم شب‌تاب دارد. با در نظر گرفتن میزان نور کرم به عنوان تابع هدف، می‌توان رفتار کرم‌های شب‌تاب را به صورت یک الگوریتم بهینه‌ساز مدل نمود.

در این الگوریتم، هر کرم شب‌تاب یک راه حل

ممکن مسأله در یک فرم برداری است که هر بردار، طولی برابر N خواهد داشت. پس از ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی و تعیین ارزیابی شایستگی متناظر با هر کرم با استفاده از تابع ارزیابی، میزان درخشندگی کرم شب‌تاب i از رابطه (۱۲) حاصل می‌گردد.

$$Brightness_i = \frac{1}{Cost_i} \qquad (۱۲)$$

که در رابطه‌ی فوق، $Cost_i$ بیان‌گر تابع هدف محاسبه شده برای هر کرم شب‌تاب است و $Brightness_i$ میزان درخشندگی کرم شب‌تاب i را بیان می‌کند. در این الگوریتم برای بهبود سرعت همگرایی الگوریتم، در هر تکرار، تعدادی از کرم شب‌تاب‌ها که بیشترین میزان درخشندگی را بدست آورده‌اند، انتخاب شده و از بین کرم‌های باقیمانده، هر کدام به سمت نزدیکترین کرم شب‌تاب درخشنده حرکت می‌کنند. فاصله بین دو کرم از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$r_{i,j} = \left\| x_i - x_j \right\| \qquad (۱۳)$$

میزان جذابیت کرم‌های شب‌تاب (β) نسبی بوده و به فاصله بین دو کرم ($r_{i,j}$) و ضریب جذب نور (γ) بستگی دارد که از رابطه (۱۴) قابل محاسبه است:

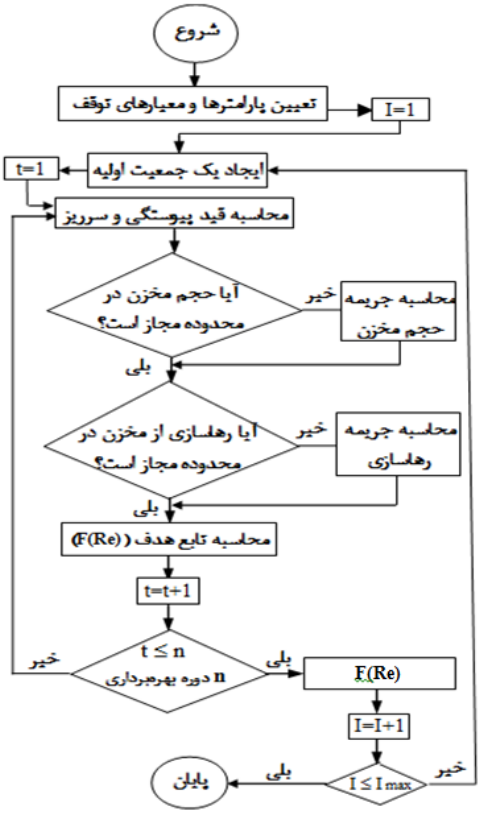
$$\beta_{(r)} = \beta_0 e^{-\gamma r_{i,j}^2} \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه، β_0، میزان جذابیت کرم درخشان‌تر در $r = 0$ می‌باشد. موقعیت کرم i ام پس از حرکت به سمت کرم j ام که درخشان‌تر است از رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد:

$$x_i = x_i + \beta(x_j - x_i) + \alpha(rand - 0.5) \qquad (۱۵)$$

که x_i، موقعیت کرم شب‌تاب کم نورتر، x_j، موقعیت کرم شب‌تاب درخشان‌تر و α عددی تصادفی که نشان دهنده میزان جهش هر کرم شب‌تاب است. جمله سوم در این رابطه، حرکت تصادفی در فرآیند جذب را بیان می‌کند که باعث جستجوی جامع‌تر فضای تصمیم مسأله توسط الگوریتم می‌شود.

در مسأله بهره‌برداری از مخزن، هدف یافتن بهترین نقطه از فضای تصمیم مسئله است، با این شرط که تمامی قیودات مسئله رعایت شوند. بنابراین در صورت استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب، بهترین نقطه محلی است که کرم شب‌تاب بیشترین جذابیت را داشته باشد. این نقطه خروجی‌های بهینه مخزن در دوره بهره‌برداری می‌باشد. شکل (۳)، الگوریتم تلفیقی FA و سیستم بهره‌برداری از مخزن را نشان می‌دهد.



شکل (۳): فلوچارت تلفیقی الگوریتم FA و بهره‌برداری از مخزن

د- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک، مشهورترین الگوریتم فراکاوشی است که توسط هالند[1] در سال ۱۹۷۵ معرفی گردید. ابتدا یک نسل تصادفی یا جمعیت اولیه‌ای از کروموزوم-ها تولید می‌گردد. این کروموزوم‌ها به تعداد ابعاد مسئله دارای ژن می‌باشند. سپس با اعمال عملگر انتخاب، نسل بعدی انتخاب می‌شود. در ادامه، عملگرهای ترکیب و جهش برای بهبود فرآیند بهینه‌سازی بر

[1] Holland

روی نسل انتخاب شده اعمال می‌شوند. در تولید هر نسل جدید سه عملگر انتخاب، جهش و ترکیب، فرآیند بهینه‌سازی را به نحوی پیش می‌برند که کروموزوم‌های ایجاد شده، مقدار تابع هدف را در هر تکرار، بهتر و بهتر کنند تا جایی که این فرآیند توسط یکی از شرط‌های توقف پایان یابد. مقدار هر یک از عملگرها وابسته به نوع مسأله است و نمی‌توان مقدار دقیقی برای آنها در نظر گرفت. نوع تابع انتخاب و تابع جهش نیز تأثیر بسزایی در عملکرد الگوریتم دارند و باید با روش آزمون و خطا برای هر مسأله تعیین گردد. بهترین کروموزوم در انتهای الگوریتم، بهترین خروجی‌های مخزن در طول دوره بهره‌برداری (هر ژن خروجی یک ماه) را نشان می‌دهد.

ر- سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)

در بهره‌برداری از مخزن با روش SOP، میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می‌شود. هنگامی که مخزن نتواند نیاز را به طور کامل تأمین کند، درصدی از آن را تأمین می‌کند. در این روش، فرض می‌شود که: $Re_t = De_t$ ، سپس صحت این فرضیات کنترل می‌شود که در صورت برقرار نبودن آنها دو حالت زیر ممکن است رخ دهد:

۱- اگر $S_{t+1} > S_{max}$، به علت بیشتر بودن حجم آب مخزن از حجم نرمال سد سرریز خواهیم داشت که در این حالت، به مقدار نیاز از مخزن آب برداشته می‌شود.

$$Sp_t = S_{t+1} - S_{max} \;,\; S_{t+1} = S_{max} \;,\; Re_t = De_t \quad (۱۶)$$

۲- اگر $S_{t+1} < S_{max}$: کل آب موجود در مخزن برداشته شده و مخزن کاملاً خالی می‌شود.

$$Def_t = S_{min} - S_{t+1} \quad , \quad S_{t+1} = S_{min} \quad (۱۷)$$

۲-۱- اگر $Def_t < De_t$، آنگاه: $Re_t = De_t - Def_t$

۲-۲- اگر $Def_t > De_t$، آنگاه: $Re_t = S_{t+1} + De_t$

ز- شاخص‌های عملکرد مخزن

برای مقایسه و ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی در تخصیص آب، از شاخص‌های اعتمادپذیری زمانی و حجمی و آسیب‌پذیری به عنوان یک مبنا برای مقایسه روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن استفاده می‌گردد (Hashimoto et al.1982).

$$Rel_t = \left(1 - \frac{N_{Def}}{T}\right) \times 100 \quad (۱۸)$$

$$N_{Def} = \text{تعداد} \;\; (\alpha \times De_t > Re_t)$$

$$Rel_V = \frac{\sum_{t=1}^{T} Re_{(t)}}{\sum_{t=1}^{T} De_{(t)}} \quad (۱۹)$$

$$Vul = \underset{t=1}{\overset{T}{Max}} \left(\frac{De_{(t)} - Re_{(t)} \,|\, De_{(t)} > Re_{(t)}}{De_{(t)}} \right) \quad (۲۰)$$

که در آن، N_{Def} تعداد کل شکست‌های رخ داده در طول دوره بهره‌برداری، α درصد تأمین نیاز، Rel_t شاخص اعتمادپذیری زمانی، Rel_V، شاخص اعتماد-پذیری حجمی (بر حسب درصد) و Vul شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد. برای دستیابی به عملکرد مطلوب مخزن، لازم است معیار اعتمادپذیری زمانی و حجمی، حداکثر و معیار آسیب‌پذیری حداقل شود.

بحث و نتایج

معمولاً پس از تهیه مدل بهینه‌ساز، کارآیی مدل تهیه شده در یافتن نقاط بهینه مورد بررسی قرار می-گیرد که در این پژوهش جهت صحت‌سنجی مدل از چند تابع استاندارد نظیر Rosenbrock، Six Hump، Mc Cormic و Goldsten-Price که دارای یک نقطه بهینه سراسری و چندین نقطه بهینه محلی می‌باشند، استفاده شده است. نتایج نشان داد که هر دو مدل قابلیت حل هر یک از توابع استاندارد را دارند، اما الگوریتم FA از عملکرد بهتری نسبت به GA برخوردار است. بنابراین ساختار مدل‌ها به شکلی است که جهت بهینه‌سازی توابع مختلف نیازی به تغییر آنها نمی‌باشد. برای حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علاوه بر مدل بهینه‌ساز، جهت ارزیابی تابع در فرآیند بهینه-سازی نیاز به یک مدل شبیه‌ساز است که در مواقع لزوم مقدار تابع هدف تعیین شود. بنابراین یک مدل ریاضی شبیه‌سازی مخزن بر اساس سیاست بهره‌برداری استاندارد تهیه شده و با تلفیق آن با مدل بهینه‌سازی و تعریف تابع هدف، قیدها و محدودیت‌ها، متغیر حالت و

متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شوند.

به منظور استفاده از سری درازمدت آبدهی ورودی به مخزن سد هراز در فرآیند مدل‌سازی، ابتدا یک سری تحلیل‌های آماری از قبیل بازسازی و تخمین داده‌ها، آزمون همگنی، کفایت داده‌ها، حذف داده‌های پرت و حذف روند داده‌ها بر روی آنها انجام گرفت. سپس مقادیر اصلاح شده آنها به همراه حجم نیازها و مقادیر تبخیر و بارش به صورت ماهانه به عنوان اطلاعات ورودی به مدل معرفی شد. متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی، حجم برداشت یا رهاسازی از مخزن سد در ماه‌های مختلف دوره برنامه‌ریزی (۳۲۴ ماه) و تابع هدف آن به صورت کمینه‌سازی کل کمبود (کشاورزی، زیست‌محیطی، شرب و صنعت) در طول دوره آماری تعریف گردید.

به منظور ارزیابی، نتایج حاصل از الگوریتم FA در بهره‌برداری از مخزن با نتایج حاصل از الگوریتم GA و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) مورد مقایسه قرار گرفت. کدنویسی الگوریتم‌های مورد نظر در نرم‌افزار MATLAB 2011b انجام شد. برای دستیابی به بهترین عملکرد مدل‌ها، مقدار مطلوب پارامترهای آزاد دو الگوریتم با تحلیل حساسیت به دست آمد که در جداول (۳) و (۴) مقادیر مناسب پارامترهای آنها ارائه شده است.

جدول (۳): پارامترهای بهینه الگوریتم FA با توجه به نتایج تحلیل حساسیت

تعداد تکرار	تعداد جمعیت	α	β_o	γ
۱۰۰۰	۲۰	۰/۰۲	۲/۰	۱۰

جدول (۴): پارامترهای بهینه الگوریتم GA با توجه به نتایج تحلیل حساسیت

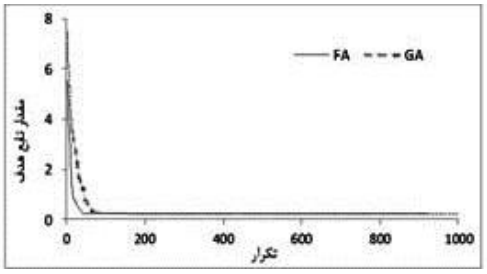
تعداد تکرار	تعداد جمعیت	نرخ ترکیب	نرخ جهش	تابع انتخاب	تابع جهش
۱۰۰۰	۲۰۰	۰/۸	۰/۳	چرخ رولت	یکنواخت

با توجه به متفاوت بودن جواب حاصل از فرآیند اجرای هر الگوریتم در اجراهای مختلف به دلیل انتخاب تصادفی جمعیت اولیه، ۱۰ اجرای مختلف با ۱۰۰۰ تکرار برای هر الگوریتم انجام شد و به ترتیب ۲۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰ هزار تابع هدف برای FA و GA ارزیابی گردید. میانگین مقادیر تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای مختلف دو الگوریتم و روش SOP، در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): نتایج حاصل از اجرای مختلف الگوریتم FA، GA و روش SOP

الگوریتم	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	کمبود سالانه (MCM)	اعتمادپذیری زمانی	اعتمادپذیری حجمی	آسیب‌پذیری
FA	۱۶۰	۰/۲۱	۱۹۹/۴	۹۴/۲	۸۸/۳	۰/۲۰
GA	۲۴۰	۰/۲۳	۳۰۱/۱	۷۹/۲	۸۲/۴	۰/۲۳
SOP	-	۲/۵۰	۵۶۴/۴	۷۲/۲	۶۶/۷	۰/۹۹

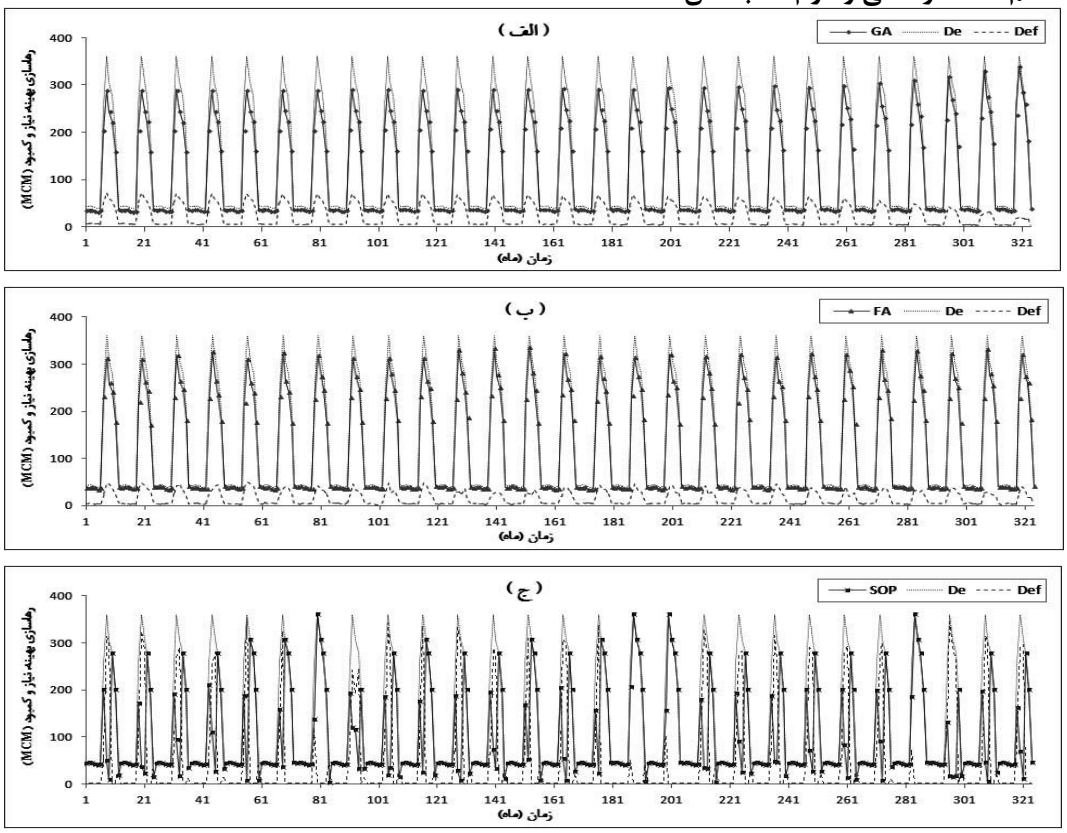
با توجه به جدول (۵) ملاحظه می‌شود که متوسط تابع هدف حاصل از الگوریتم FA برابر ۰/۲۱ و کمتر از روش SOP با مقدار ۲/۵ و حتی الگوریتم GA با مقدار ۰/۲۳ می‌باشد. برای مقایسه بهتر، نحوه همگرایی دو الگوریتم FA و GA در شکل (۴) نشان داده شده است.



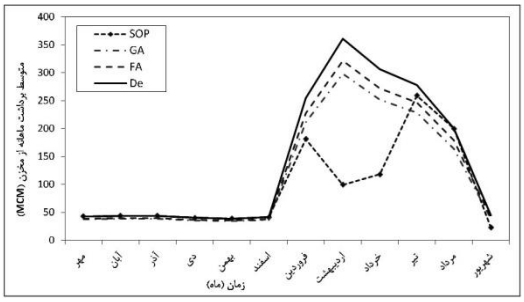
شکل (۴): نحوه همگرایی دو الگوریتم FAو GA

در شکل (۴) مشاهده می‌شود که همگرایی الگوریتم FA مناسب‌تر از الگوریتم GA می‌باشد. بنابراین با توجه به برتری روش FA نسبت به GA، چه به لحاظ مدت زمان محاسبه بهینه‌سازی و مقدار تابع هدف و چه به لحاظ سرعت همگرایی الگوریتم، اثربخش بودن این روش را نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف در روش SOP نیز به دلیل عدم آینده‌نگری و انعطاف‌پذیری لازم در سیاست بهره‌برداری، بیشتر از دو روش دیگر به دست آمده است. با مقایسه شاخص-های عملکردی مخزن مشخص می‌شود که روش FA با اعتمادپذیری زمانی ۹۴٫۲ درصد و اعتمادپذیری حجمی ۸۸٫۳ درصد، بهتر از دو روش دیگر نیازهای پایاب سد را تأمین نموده است. از لحاظ شاخص آسیب‌پذیری نیز این الگوریتم با مقدار ۰٫۲۰ از حداکثر کمبود نسبی کمتری در طول دوره بهره‌برداری برخوردار می‌باشد. الگوریتم GA با مقدار ۰٫۲۳ بعد از FA در رتبه دوم قرار داشته و بهتر از روش SOP می‌باشد. روش SOP اگرچه از نظر شاخص اعتمادپذیری زمانی و حجمی عملکرد نسبتاً خوبی دارد اما به دلیل کمبودهای شدید ناشی از خشکسالی در تعدادی از ماه‌ها، از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار بوده (برابر ۰٫۹۹) که اگر سیستم واقعاً با آن مواجه شود، زیان‌های جبران‌ناپذیری به بار خواهد آورد. مقدار خروجی بهینه حاصل از مدل‌های مختلف، نیاز واقعی پایین‌دست و کمبودهای ایجاد شده در طول دوره بهره‌برداری در شکل (۵) نشان داده شده است.

با مشاهده این شکل، مشخص است که خروجی‌های حاصل از مدل FA (شکل ۵- الف) به نیازهای واقعی پایاب سد نزدیک‌تر بوده و کمبود کمتری را ایجاد کرده است. اما روش SOP (شکل ۵- ج) از این لحاظ در وضعیت بدتری قرار داشته و نتوانسته است نیاز واقعی پایین‌دست را در اکثر ماه‌ها تأمین کند. میزان کمبود در روش FA برابر ۱۱٫۷ درصد و در روش GA و SOP به ترتیب برابر ۱۷٫۶ و ۳۳٫۳ درصد می‌باشد. شکل (۶)، نیاز کل پایاب و متوسط رهاسازی از مخزن حاصل از مدل‌های مختلف را در طول ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد. بر طبق این نمودار، مدل FA در کل ماه‌های سال، میزان برداشت آب از مخزن سد را بیشتر از مدل GA و نزدیک‌تر به نیاز کل پایاب سد برآورد نموده است. مدل SOP تنها در ماه‌های تیر و مرداد، میزان برداشت را به ترتیب ۵ و ۱۲ درصد بیشتر از مدل FA برآورد نموده است.



شکل (۵): خروجی بهینه حاصل از مدل‌های مختلف، نیاز واقعی پایاب (De) و کمبودها (Def) در دوره بهره‌برداری



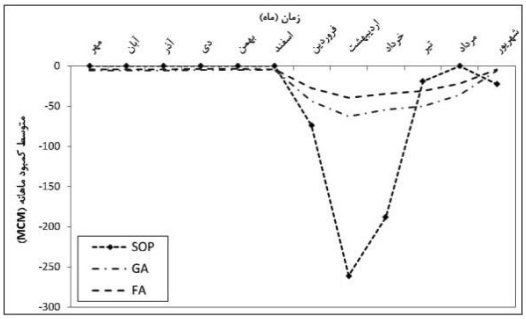
شکل (۶): نیاز واقعی پایاب و متوسط برداشت ماهانه

در بقیه ماه‌ها مدل FA این میزان را بیشتر از مدل SOP بدست آورده است. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که میزان برداشت آب از مخزن در ماه‌های اردیبهشت و خرداد که دارای بیشترین نیاز می‌باشند، در مدل FA بیشتر از دو مدل GA و SOP می‌باشد. به عبارت دیگر، روش‌های الگوریتم فراکاوشی بهتر از سیاست بهره‌برداری استاندارد، میزان رهاسازی از مخزن را بهینه نموده‌اند.

متوسط ماهانه کمبود آب در شکل (۷) رسم شده است. با توجه به کمبودهای حاصله توسط سه مدل، میزان کمبود در نیمه دوم سال ناچیز است، زیرا در این ماه‌ها، جریان ورودی به مخزن جوابگوی نیازهای پایاب سد می‌باشد. در نیمه اول سال به خصوص در ماه‌های اردیبهشت و خرداد، شدت کمبودهای حاصل

از مدل SOP بسیار زیاد است که اگر سیستم با آن مواجه شود، خسارات جبران‌ناپذیری ایجاد خواهد شد. مدل FA متوسط کمبود سالانه آب را به ترتیب به میزان ۸/۴۸ و ۳۱/۸۳ درصد کمتر از مدل‌های GA و SOP به دست آورده است. این مقدار در مدل GA حدود ۲۳/۳۵ درصد کمتر از مدل SOP است. به عبارت دیگر، تعداد ماه‌های مواجه با کمبود آب در مدل FA و GA با این که بیشتر از روش SOP می‌باشد، اما به دلیل توزیع یکنواخت این کمبودها (FA یکنواخت‌تر از GA)، از ایجاد کمبودهای شدید در برخی از ماه‌ها جلوگیری شده است.

به این ترتیب، می‌توان به این جمع‌بندی رسید که الگوریتم FA عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GA دارد که با نتایج حسینی موغاری و بنی‌حبیب (۱۳۹۳) در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن بازفت با هدف تأمین نیاز کشاورزی و Gandomi et al.,(2011) مطابقت دارد. از طرفی بر طبق نتایج حاصله، الگوریتم-های فراکاوشی نظیر FA و GA برتری کاملی بر روش‌های شبیه‌سازی سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) داشته که مطابق با نتایج برهانی و مرتضوی (۱۳۸۷) می‌باشد.



شکل (۷): متوسط ماهانه کمبود آب حاصل از سه مدل

نتیجه‌گیری

با توجه به لزوم استفاده بهینه از منابع آب به خصوص مخازن سطحی، در این پژوهش، کارآیی الگوریتم FA به عنوان یک روش نوین برای بهینه-سازی بهره‌برداری از سد مخزنی هراز با هدف تأمین نیاز کشاورزی اراضی پایاب، شرب و صنعت و نیاز زیست‌محیطی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. پس از آزمون صحت مدل با چند تابع ریاضی استاندارد، برای بررسی کارآیی مدل بهره‌برداری با هدف حداقل‌سازی کمبودها در یک دوره ۳۲۴ ماهه، از شاخص‌های عملکردی مخزن شامل اعتمادپذیری زمانی و حجمی، و آسیب‌پذیری استفاده گردید. همچنین برای قضاوت بهتر، با نتایج حاصل از الگوریتم GA به عنوان یکی از مطرح‌ترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش SOP مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل FA نسبت به دو روش دیگر، از لحاظ زمان اجرای مدل، مقدار تابع هدف، کمبود سالانه و شاخص آسیب‌پذیری دارای حداقل مقدار و از لحاظ شاخص اعتمادپذیری زمانی و حجمی، حداکثر مقدار را به خود اختصاص داده است. از نظر معیارهای فوق، GA در رتبه دوم و SOP در جایگاه سوم قرار دارد. بر طبق نتایج، خروجی یا رهاسازی مدل FA نسبت به دو روش دیگر، به نیازهای واقعی پایاب سد نزدیک‌تر بوده و کمبود کمتری ایجاد نموده است. همچنین، متوسط ماهانه و سالانه کمبود در مدل FA کمتر از دو مدل دیگر و مدل GA کمتر از SOP می‌باشد. به عبارت دیگر، کمبودها در مدل FA یکنواخت‌تر از GA و SOP توزیع شده و از کمبودهای شدید جلوگیری شده است. در حالی که کمبودهای حاصل از مدل SOP در برخی از ماه‌ها بسیار شدید بوده به طوری که اگر سیستم با آن مواجه شود، خسارات جبران‌ناپذیری به بار خواهد آمد.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت مدل FA نسبت به دو مدل دیگر، این قابلیت را دارد که

خروجی‌های مخزن را بهتر کنترل کند و میزان برداشت بهینه آب از مخزن را در ماه‌های مختلف سال به نحوی مشخص کند که در سال‌های خشک با کمترین مقدار کمبود آب و خسارت همراه باشد. درنتیجه، این مدل در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن و کمینه‌سازی کمبودها می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد و موثر باشد که با صحت و دقت مناسب، پاسخ-های معتبری را ارائه می‌دهد.

منابع

برهانی داریان، ع. و س. م. مرتضوی نائینی. ۱۳۸۷. مقایسه کاربرد روش‌های کاوشی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب. نشریه آب و فاضلاب، شماره ۶۸، ص ۶۶ - ۵۷.

حبیبی داویجانی، م.، م. ا. بنی حبیب و س.ر. هاشمی. ۱۳۹۲. مدل بهینه‌سازی تخصیص منابع آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات با استفاده از الگوریتم پیشرفته GAPSO. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۷، شماره ۴، ص ۶۹۱- ۶۸۰.

حسینی موغاری، م. و م. ا. بنی حبیب. ۱۳۹۳. بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال سوم، شماره ۴، ص ۳۱-۱۷.

زینلی، م. ج.، ا. محمدرضاپور و ف. فروغی. ۱۳۹۴. به کارگیری الگوریتم کرم شب‌تاب در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد درودزن. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ششم، شماره ۲۱، ص ۴۵- ۳۳.

سیف‌اللهی آغمیونی، س. و ا. بزرگ حداد. ۱۳۹۳. توسعه یک سامانه چند مخزنه چند منظوره به عنوان مورد مطالعاتی نمونه در مدیریت سامانه مخازن. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، شماره اول، ص ۴۸-۱۳.

Bozorg-Haddad, O., I. Garousi-Nejad and H. A. Loaiciga. 2017. Extended multi-objective firefly algorithm for hydropower energy generation. Journal of Hydroinformatics, 19(5): 734-751.

Chang, J. X., T. Bai, Q. Huang and D. W. Yang. 2013. Optimization of water resources utilization by PSO-GA. Water Resour. Manag., 27: 3525-3540.

Divakar, L., M. S. Babel, S. R. Perret and A. Das Gupta. 2011. Optimal allocation of bulk water supplies to competing use sectors based on economic criterion-An application to the Chao Phraya River Basin, Thailand. Journal of Hydrology, 401: 22-35.

Esat,V. and M. J. Hall. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithms. Mydroinformatics, 94: 225-231.

Gandomi, A.H., X. S. Yang and A. H. Alavi. 2011. Mixed variable structural optimization using Firefly algorithm. Computers & Structures, 89(23): 2325-2336.

Garousi-Nejad, I., O. Bozorg-Haddad, H. A. Loaiciga and M. A. Marino. 2016. Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(10), In Press.

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

Holland, J. H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. MIT Press, Cambridge, 228 pp.

Rani, D. and M. M. Moreira. 2010. Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. Water resources management, 24(6): 1107-1138.

Ritthipakdee, A., A. Thammano, N. Premasathian and D. Jitkongchuen. 2017. Firefly mating algorithm for continuous optimization problems. Computational Intelligence and Neuroscience, V. 2017, 10 p.

Thankachan, A. and A. B. Anitha. 2015. System approach for optimal operation of water resources schemes in Kuttiadi river basin, Kerala. Aquatic Procedia, 4: 593-600.

Efficiency of Various Optimization Methods in the Operation of Haraz Dam Reservoir

E. Kia[1], A. Emadi[2*] , M.A. Gholami Sefidkohi[3]

Abstract

Optimal operation of dam reservoirs is important due to their role in runoff control and water supply for different sectors. In this study, the Firefly Algorithm (FA) is investigated to solve the problem of optimal operation of Haraz dam reservoir to provide water for agriculture, drinking, industry and environmental of downstream for a period of 27 years (since 1984 to 2011). The objective function was defined as minimizing the sum of squared monthly relative deficiencies during operation. The efficiency of these algorithms was compared and evaluated by determination of reservoir performance indices, the value of objective function, annual deficit, monthly average deficit and release. FA method with reliability of 88.3 percent is supplied the downstream demands better than GA and SOP with reliability of 82.4 and 66.7 percent. The Vulnerability index of models is obtained 0.20, 0.23 and 0.99, respectively. The results showed the better performance of FA algorithm compared to the other two methods in solving the problem of the reservoir operation.

Keywords: Reliability, Operation, Genetic, Standard Operation Policy, Firefly, Haraz.

[1]Ph.D. Student, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran; eassa_kia@yahoo.com

[2]Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (*- Corresponding Author); emadia355@yahoo.com

[3]Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran; magholamis@yahoo.com