

## بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی مخازن با استفاده از الگوریتم ازدحام پروانه (مطالعه موردی: سد کارون ۴)

سعید اکبری فرد<sup>۱</sup>، محمدرضا شریفی<sup>۲</sup>، کورش قادری<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷

مقاله پژوهشی

### چکیده

انرژی برق آبی به عنوان سومین منبع تولید برق و همچنین مهم‌ترین انرژی تجدیدپذیر مولد برق در جهان به شمار می‌آید. استفاده بهینه از این منبع عظیم و گرانبه که هر روزه شاهد کاهش چشمگیر آن هستیم، بیش از پیش احساس می‌گردد. در این پژوهش از الگوریتم فراکاشی ازدحام پروانه (MSA) به منظور بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی مخزن سد کارون ۴ واقع در حوضه آبریز کارون، برای یک دوره ۱۰۶ ماهه (از مهر ۱۳۸۹ تا تیر ۱۳۹۸) استفاده شده است. پس از اطمینان از درستی عملکرد الگوریتم MSA با استفاده از چندین تابع محک استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه برق آبی سد کارون ۴ توسعه داده شد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم مورد بررسی با نتایج روش‌های شناخته شده الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) مقایسه شده است. الگوریتم‌های MSA، GA و PSO به ترتیب قادر به تولید بهینه انرژی به میزان ۱۰۵۸۵۳، ۱۰۵۶۹۷/۴ و ۱۰۵۸۴۱/۶ مگاوات نسبت به مقدار واقعی آن به میزان ۶۴۹۸۷/۵۴ مگاوات، در طول دوره آماری بودند. همچنین مقدار تابع هدف برای الگوریتم‌های MSA، GA و PSO به ترتیب برابر با ۰/۱۴۷، ۰/۳۰۲۶ و ۰/۱۵۸۴ بدست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم MSA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های فراکاشی؛ تولید بهینه انرژی برق آبی؛ حوضه آبریز کارون

<sup>۱</sup> دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.  
تلفن تماس نویسنده اول: ۰۹۱۳۸۴۳۹۷۶۴ آدرس پست الکترونیکی نویسنده اول: akbarifard\_saeid@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. تلفن تماس نویسنده دوم: ۰۹۱۶۳۰۰۱۷۴۰ آدرس پست الکترونیکی نویسنده دوم: msharifi@scu.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران. تلفن تماس نویسنده سوم: ۰۹۱۲۷۱۵۴۷۳۴ آدرس پست الکترونیکی نویسنده سوم: kouroshqaderi@uk.ac.ir

## مقدمه

کشور ایران را می‌توان جزء معدود کشورهایی دانست که دارای انواع مختلفی سد است که با اهداف گوناگونی از جمله تولید انرژی برق آبی شکل گرفته‌اند. یکی از سدهای مخزنی مهم کشور، سد مخزنی کارون ۴ است که در حوضه آبریز کارون قرار گرفته و از سال ۱۳۸۹ در حال بهره‌برداری است. از جمله اهداف اولیه سد مخزنی کارون ۴، تولید انرژی برق آبی به میزان ۲۱۰۷ گیگاوات ساعت در سال بوده است. این سد نیز همانند سایر سدها با مشکلات بهره‌برداری مواجه است که یکی از موضوعات کلیدی در بین مسائل گوناگون منابع آب می‌باشد (شرکت مهندسی مشاور دزآب، ۱۳۸۹).

یک سیاست بهره‌برداری شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره‌برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی گردد، تعیین می‌نماید (Wurbs, 1993). تعیین یک برنامه بهره‌برداری مناسب از سیستم‌های منابع آب، به گونه‌ای که در تمام شرایط مورد نظر بتوان عملکرد مطلوبی از سیستم به دست آورد، بهینه‌سازی نامیده می‌شود که به منظور بهینه‌سازی و تعیین برنامه بهره‌برداری از مخازن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی الزامی است. در دنیای واقعی مدیریت بهینه‌سازی مخازن سد می‌تواند بسیار پیچیده باشد. افزایش پیچیدگی در مسائل مهندسی و نگاه سیستمی به مدیریت به خصوص در مهندسی منابع آب باعث کاهش کارایی روش‌های بهینه‌یابی کلاسیک شده است که در راستای رفع این مشکل در چند دهه اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای به منظور تهیه و ارائه الگوریتم‌های بهینه‌یابی مناسب‌تر صورت پذیرفته است که از جمله‌ی آنها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی اشاره کرد. این الگوریتم‌ها که الهام گرفته از طبیعت هستند، در مطالعات تئوریک و کاربردی متعددی توسعه داده شده‌اند و انواع متعددی از آنها شکل گرفته است و در سال‌های اخیر در بسیاری از مقاله‌های علمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از این الگوریتم‌های به نسبت جدید، الگوریتم ازدحام پروانه (MSA) است که توسط علی محمد و همکاران (۲۰۱۷)

با الهام از رفتار پولک‌بالان (پروانه‌ها و شب‌پره‌ها) در طبیعت ارائه شده است. آن‌ها در مطالعه‌ی خود با الهام از رفتار این موجودات و با بکارگیری مکانیسم یادگیری سازمانی (انجمنی) با حافظه ضروری و تقسیم جمعیتی برای جهش لوی (Lévy)، به ترتیب به منظور بهبود در قابلیت‌های بهره‌وری یا استخراج و شناسایی یا اکتشاف، علاوه بر پیاده‌سازی گوسی و حرکت مارپیچ سازگار، الگوریتم مزبور را توسعه دادند. شایان ذکر است در مطالعات دیگری، عملکرد الگوریتم جدید ازدحام پروانه، مورد بررسی قرار گرفته است (Jevtic et al., 2017, Zhou et al., 2018).

استفاده از الگوریتم پروانه، صرفاً در مواردی نظیر مسأله توزیع اقتصادی در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تولید برق (Jevtic et al., 2017) و همچنین در صنعت تصاویر دیجیتال (Zhou et al., 2018) ، بوده است. جوتیک و همکاران (۲۰۱۷) از الگوریتم ازدحام پروانه در حل مسئله ترکیبی توزیع اقتصادی بار واحدهای حرارتی (CEED) استفاده نمودند. تجزیه و تحلیل رفتار و ارزیابی عملکرد الگوریتم در سیستم‌های تست استاندارد با ۳ و ۶ ژنراتور انجام شد. نتایج نشان داد که الگوریتم استفاده شده، راه حل دقیق و موثر مسئله CEED را ارائه می‌دهد. ژو و همکاران (۲۰۱۸) به منظور تقسیم‌بندی تصویر آستانه چند سطحی از الگوریتم ازدحام پروانه استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بالای روش مورد بررسی در تقسیم‌بندی تصاویر دیجیتال بوده است. از طرفی نظر به قابلیت بیشتر اکتشاف و استخراج الگوریتم ازدحام پروانه، نسبت به الگوریتم‌های رایج از یکسو و ضرورت دستیابی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی متناسب با پیچیدگی سامانه‌های برق آبی، از سوی دیگر، تصمیم به کاربرد الگوریتم ازدحام پروانه و انطباق آن در مسأله بهره‌برداری بهینه برق آبی از مخزن کارون ۴، گرفته شد.

مطالعات متعددی به بهره‌برداری بهینه از مخازن با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف پرداخته‌اند، لیکن در زمینه بهره‌برداری بهینه برق آبی از مخازن با توجه به پیچیدگی مسئله، مطالعات کمتری انجام گرفته

کوتاه، متوسط و بلند مدت مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات حاکی از کارآمدی و موثرتر بودن الگوریتم IWO در مسئله بهره‌برداری برق‌آبی بوده است. وو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی دو مرحله‌ای (SDP) به بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سیستم مخازن در رودخانه لانگانگ چین پرداختند. نتایج نشان داد که محدودیت‌های سیستم به خوبی در نظر گرفته شده و زمان محاسبات کاهش ۵۰ درصدی به همراه برتری توان تولیدی نسبت به برنامه‌ریزی پویای تصادفی معمولی داشته است. ساسیکومار و نیر (۲۰۱۹) یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر اطمینان‌پذیری فازی را برای یک مخزن برق‌آبی توسعه دادند. نتایج نشان داد که این مدل در ایجاد سیاست بهره‌برداری بهینه مفید بوده و با افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی برق‌آبی همراه می‌باشد.

بنا به اهمیت سد مخزنی کارون ۴ و همچنین به منظور استفاده حداکثری از توان تولیدی نیروگاه آن، ضرورت مطالعه‌ای که به این مهم بپردازد آشکار می‌گردد. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر از الگوریتم ازدحام پروانه که جزو الگوریتم‌های قوی در راستای بهینه‌یابی می‌باشد برای بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد کارون ۴ استفاده گردیده و البته نهایتاً نتایج به دست آمده، با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفته است تا هم بتوان توانایی الگوریتم‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد و هم بتوان بهترین نتیجه را برای بهره‌برداری بهینه از سد مذکور به دست آورد.

### مواد و روش

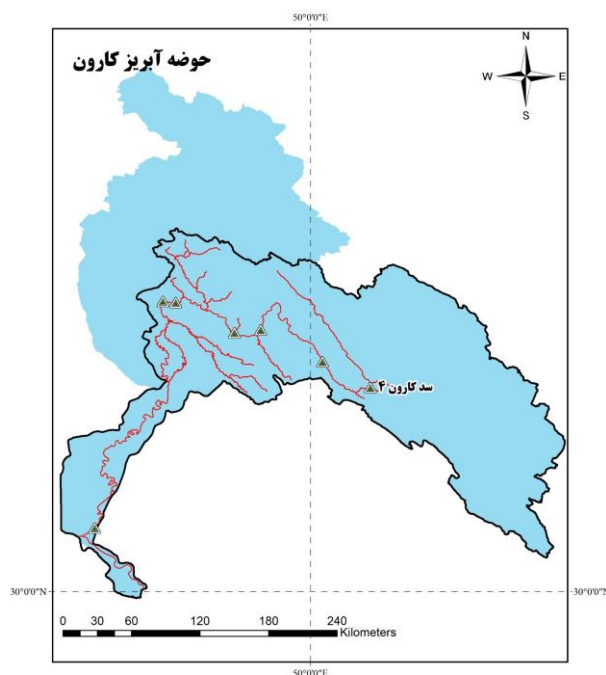
حوضه آبریز کارون (شامل رودخانه کارون) در ارتفاعات زاگرس میانی و محدوده مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. مساحت این حوضه ۴۵۲۳۱ کیلومتر مربع بوده و به عنوان پرآب‌ترین حوضه آبریز کشور، در شرایط موجود سدهای بزرگی را در خود جای داده است. رودخانه پر آب کارون از دامنه‌های غربی رشته کوه

است. افشار و همکاران (۱۳۹۳) به منظور بهره‌برداری برق‌آبی از مخزن سد دز از چهار الگوریتم مختلف از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان به نام‌های الگوریتم پایه‌ی سیستم مورچگان، الگوریتم مورچگان نخه، الگوریتم سیستم مورچگان ترتیبی و الگوریتم سیستم مورچگان بیشینه-کمینه، استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان، الگوریتمی مناسب در حل مسائل بهره‌برداری از مخزن سدها می‌باشد. احمدیان فر و ادیب (۱۳۹۴) به بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از سد دز با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که الگوریتم ترکیبی باعث افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود توانایی الگوریتم ازدحام ذرات جهت ایجاد جمعیتی با سرعت همگرایی بالا شده و کارایی بسیاری در حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب دارد. احترام و همکاران (۱۳۹۵) ترکیبی از الگوریتم جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات را به منظور افزایش تولید انرژی برق‌آبی از مخزن سدهای مهاباد و کارون ۴ ارائه نمودند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که روش ترکیبی مورد استفاده، پاسخ نزدیکتری به پاسخ بهینه‌ی مطلق مسائل نسبت به الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات دارد. حسینی موغاری و همکاران (۱۳۹۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) در بهره‌برداری بهینه از آبگیرهای برق‌آبی مخزن سد کارون ۴ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بودند که الگوریتم فاخته توانایی بالاتری را در رسیدن به جواب بهینه نسبت به الگوریتم ژنتیک از خود نشان داد و همچنین فاصله کمی با جواب بهینه‌ی مطلق دارد.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی انرژی در یک سیستم چندمخزنه در چین استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات بود. عزیزپور و همکاران (۲۰۱۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) را برای بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی سد دز برای دوره‌های

سد کارون ۴ بر روی رودخانه کارون و در ۴ کیلومتری پایین‌دست محل تلاقی رودخانه‌های ارمند و بازفت در شهرستان لردگان و ۱۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد (استان چهارمحال و بختیاری) احداث و در تیرماه سال ۱۳۹۰ افتتاح شده است. این سد بزرگ‌ترین سد بتنی دو قوسی ایران و پنجمین سد مرتفع برق‌آبی در جهان است. از اهداف اولیه سد مخزنی کارون ۴، تنظیم آب رودخانه کارون به میزان ۳/۷ میلیارد متر مکعب در سال، کنترل طغیان و سیلاب‌های مخرب رودخانه کارون و تولید انرژی برق‌آبی به میزان ۲۱۰۷ گیگاوات ساعت می‌باشد. شکل (۱) موقعیت سد کارون ۴ در حوضه آبریز کارون را نمایش می‌دهد.

زاگرس در غرب ایران سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از خروج از محدوده کوهستان در پهنه دشت خوزستان جریان می‌یابد و پس از تلاقی با رودخانه دز در بندقیق، رودخانه کارون بزرگ را تشکیل می‌دهد. حوضه آبریز رودخانه کارون از نظر تقسیم بندی هیدرولوژی ایران جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان بوده و از شمال به حوضه آبریز رودخانه‌های قره‌چای ساوه، گلپایگان و زاینده‌رود، از غرب به حوضه آبریز رودخانه کرخه، از شرق به حوضه آبریز رودخانه‌های کر و زاینده‌رود و مسیل‌های آباده و از جنوب به حوضه آبریز رودخانه زهره، مارون و جراحی محدود می‌گردد.



شکل (۱): موقعیت سد کارون ۴ در حوضه آبریز کارون

بهره‌برداری از منابع غذایی می‌پردازند. شب‌پره‌ها فاصله بسیار طولانی را به وسیله هدایت حرکت مجنون‌وار با یک زاویه نسبی ثابت به سمت نقطه نورانی (به عنوان مثال ماه که به عنوان قطب نمای نورانی عمل می‌کند)، در یک خط مستقیم حرکت می‌کنند (Ali Mohamed et al., 2017). در روش MSA پیشنهادی، راه حل ممکن مسئله بهینه‌سازی به وسیله موقعیت منبع نور نشان داده می‌شود که مناسب بودن و همچنین کیفیت این راه حل به عنوان

### الگوریتم ازدحام پروانه (MSA)

الگوریتم ازدحام پروانه که توسط علی محمد و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شده است، با الهام از رفتار راسته پولک‌بالان (پروانه‌ها و شب‌پره‌ها) در طبیعت، ارائه شده است. پروانه‌ها و دیگر حشرات شب‌زی در طول روز سعی در پنهان کردن خود از شکارچیان دارند و در طول شب با استفاده از پیمایش هوایی به اکتشاف در تاریکی و

که  $x_j^{\min}$  و  $x_j^{\max}$  به ترتیب حدود بالا و پایین می‌باشند. بعد از مقداردهی اولیه، نوع هر پروانه در جمعیت بر اساس میزان برازش آن‌ها انتخاب می‌شوند. بنابراین، بهترین پروانه‌ها به عنوان منابع نور انتخاب می‌شوند (راه‌یاب) و گروه‌های بهتر و بدتر بعدی از پروانه‌ها به ترتیب به عنوان کاشف و ناظر در نظر گرفته می‌شوند.

#### مرحله شناخت

در الگوریتم ازدحام پروانه (MSA)، ممکن است کیفیت جمعیت در طول فرآیند اکتشاف کاهش یابد. امکان دارد پروانه‌ها در مناطقی متمرکز شده و خوب به نظر آیند که باعث ایجاد وضعیت ایستا (به دام افتادن در بهینه محلی) شود. برای جلوگیری از همگرایی زودرس و بهبود تنوع در راه حل‌ها، گروهی از جمعیت موظف به کاوش در مناطقی با ازدحام کمتر می‌باشند. پروانه‌های راه یاب، که این نقش را بازی می‌کند، موقعیت خود را به وسیله تعامل با یکدیگر (عملیات جابجایی یا ترکیب) و با توانایی پرواز در مسافت‌های طولانی (جهش لوی) با استفاده از ارائه جابجایی انطباقی با جهش لوی، به روز می‌شوند، که در پنج گام بعدی توضیح داده خواهد شد:

#### شاخص تنوع ارائه شده برای نقاط ترکیب

استراتژی جدیدی برای تنوع در راه حل‌ها و انتخاب نقاط ترکیب پیشنهاد شده است. ابتدا، برای تکرار  $t$ ، درجه پراکندگی نرمال شده  $(\sigma_j^t)$  هر فرد در بعد  $j$ ام به صورت زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$\sigma_j^t = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (x_{ij}^t - \bar{x}_j^t)^2}}{\bar{x}_j^t} \quad (2)$$

که  $\bar{x}_j^t = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} x_{ij}^t$  و  $n_p$  تعداد پروانه‌های راه یاب است. ضریب تغییرات  $\mu^t$  که میزانی برای پراکندگی نسبی است را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$\mu^t = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d \sigma_j^t \quad (3)$$

هر جزء از پروانه‌های راه‌یاب درجه کمی از پراکندگی را تحمل نموده و در مجموعه نقاط ترکیب ( $C_p$ ) پذیرفته خواهد شد که در قسمت بعدی توضیح داده می‌شود.

شدت لومینسانس (شدت تابناکی) در نظر گرفته می‌شود. این فرضیات برای تقریب ویژگی‌های الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده است. بعلاوه ازدحام پروانه شامل سه دسته از پروانه‌ها می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

راه‌یاب: گروه کوچکی از پروانه‌ها (np) توانایی اکتشاف در فضایی بیشتر از فضای بهینه را بر اساس اصل "آخرین خروج از اولین ورود" را دارند. وظیفه اصلی این گروه، تشخیص بهترین موقعیت‌ها به عنوان یک منبع نور، جهت هدایت حرکات جمعیت اصلی و راهنمایی آن‌ها است (به عنوان مثال، مسیر نور).

اکتشاف‌کننده: گروهی از پروانه‌ها که تمایل دارند به صورت تصادفی در مسیر ماریپیچی حول منابع نور که به وسیله پروانه‌های راه‌یاب علامت‌گذاری شده‌اند، حرکت کنند.

ناظر: یک گروه از پروانه‌ها مستقیماً به سمت بهترین راه حل بهینه سراسری (مهتاب) که توسط پروانه‌های کاشف به دست آمده، کشیده می‌شوند.

#### بیان ریاضی

در هر تکرار، هر پروانه ( $x_i$ ) (که در مسئله بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی به عنوان یک سناریو بهره‌برداری شناخته می‌شود) برای پیدا کردن شدت لومینسانس متناظر منبع نور  $f(x_i)$  (سناریو بهره‌برداری بهینه) وارد مسئله می‌شود. بهترین برازش‌ها در جمعیت به عنوان موقعیت پروانه‌های راه‌یاب (تعدادی از بهترین سناریوهای بهره‌برداری) در نظر گرفته می‌شوند و برای تکرار بعدی راهنمایی می‌کند. از این رو، بهترین گروه‌های دوم و سوم به ترتیب پروانه‌های کاشف و ناظر نام‌گذاری می‌شوند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام پروانه از طریق مراحل زیر قابل اجراست:

#### مقداردهی اولیه

در آغاز پرواز برای مساله  $d$  بعدی و  $n$  تعداد از جمعیت، موقعیت پروانه‌های عامل جستجو (راه حل اولیه) به صورت تصادفی با استفاده از رابطه زیر به وجود می‌آید:

$$x_{ij} = rand[0,1] \times (x_{j}^{\max} - x_{j}^{\min}) + x_{j}^{\min} \quad \forall i \in \{1,2, \dots, n\}, j \in \{1,2, \dots, d\} \quad (1)$$



شده است. همانگونه که به صورت زیر توضیح داده شده است:

$$L_i \sim \text{step} \oplus \text{Levy}(\alpha) \sim 0.01 \frac{u}{|y|^{1/\alpha}} \quad (8)$$

که step اندازه مقیاس مربوط به مسئله مورد نظر است و  $\oplus$  ضرب داخلی می‌باشد.  $u = N(0, \sigma_u^2)$  و  $y = N(0, \sigma_y^2)$  دو توزیع نرمال تصادفی به شکل زیر می‌باشند.

$$\sigma_u = \left[ \frac{\Gamma(1 + \alpha) \cdot \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}{\Gamma(1 + \alpha) / 2\alpha 2^{(\alpha-1)/2}} \right]^{1/\alpha} \quad \text{and} \quad \sigma_y = 1 \quad (9)$$

**بردارهای مختلف جهش لوی:** برای  $n_c \in C_p$  نقاط

عملگرهای جابجایی، الگوریتم پیشنهادی با برهم زدن اجزای انتخاب شدهی بردار میزبان  $\vec{x}_p = [x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pnc}]$  یک بردار زیردنباله‌دار به وجود می‌آورد  $\vec{v}_p = [v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pnc}]$  با اجزای مرتبط در بردارهای کمکی  $\vec{x}_{r1} = [x_{r11}, x_{r12}, \dots, x_{r1nc}]$  استراتژی جهش ممکن است برای ترکیب مانند یک بردار آزمایشی به کار رود، مانند زیر:

$$\vec{v}_p^t = +L_{p1}^t \cdot (\vec{x}_{r2}^t, -, \vec{x}_{r3}^t) + L_{p2}^t \cdot (\vec{x}_{r4}^t, -, \vec{x}_{r5}^t) \quad (10)$$

$$\forall r^1 \neq r^2 \neq r^3 \neq r^4 \neq r^5 \neq p \in \{1, 2, \dots, n_p\} \vec{x}_{r^1}^t$$

$L_{p1}$  و  $L_{p2}$  دو متغیر مستقل یکسان هستند که به عنوان فاکتور مقیاس جهش به کار می‌روند و به وسیله دنباله بزرگ حرکت لوی با استفاده از  $(L_p \sim \text{random}(n_c) \oplus \text{Levy}(\alpha))$  به وجود می‌آیند. مجموعه‌ای از شاخص‌های متقابل  $(r^1, r^2, r^3, r^4, r^5, p)$  به طور انحصاری از راه حل-های پروانه‌های راه‌یاب انتخاب می‌شوند.

عملگر جابجایی انطباقی پیشنهاد شده بر اساس تنوع جمعیتی می‌باشد. به منظور دست‌یابی به راه حل دنباله‌دار کامل، هر راه‌حل از پروانه‌های راه‌یاب (بردار میزبان)، موقعیت خود را از طریق عملگرهای جابجایی به وسیله ترکیب کردن با متغیرهای جهش یافته از بردار زیردنباله‌دار نسبت به متغیرهای متناظر در بردار میزبان

$$j \in c_p \text{ if } \sigma_j^t \leq \mu^t \quad (4)$$

می‌توان مشاهده کرد که گروهی از نقاط ترکیب به صورت پویا با روند استراتژی پیشنهادی تغییر می‌کنند.

## پرواز لوی

پرواز لوی یا حرکت پروانه‌ها، فرایندهای تصادفی مبتنی بر توزیع آلفا پایدار با توانایی حرکت و جهش در فواصل بزرگ توسط گام‌هایی با اندازه‌های مختلف است. توزیع آلفا پایدار در پرواز لوی به شدت با تابع چگالی احتمال (PDF)، نظریه آماری فراکتال و انتشار ناهمگن ارتباط دارد. تابع چگالی احتمال باعث جهش انفرادی  $\lambda(q) \sim |q|^{-1-\alpha}$  در متغیر  $q$  می‌شود.

پایداری یا شاخص کشیدگی  $\alpha \in [0, 2]$  که به آن توان مشخصه گویند، نرخی که دنباله توزیع تدریجی از آن پیروی می‌کند را توصیف می‌کند که در آن شاخص کشیدگی برای مقادیر بزرگتر، کندتر است. چند توزیع خاص که فرمی نزدیک به فرم چگالی توزیع عمومی لوی دارند وجود دارد، که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر بیان نمود:

توزیع نرمال یا گوسین  $q \sim N(\mu, \sigma_G^2)$  اگر چگالی به میزان زیر باشد:

$$f(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_G} \exp\left(-\frac{(q-\mu)^2}{2\sigma_G^2}\right) \quad (5)$$

$$-\infty < q < \infty$$

توزیع کوشی،  $q \sim \text{cauchy}(\sigma, \mu)$  به صورت زیر تعریف شده است:

$$f(q) = \frac{1}{\pi(\sigma^2 + (q-\mu)^2)} \quad (6)$$

$$-\infty < q < \infty$$

نسخه ساده توزیع لوی،  $q \sim \text{Levy}(\sigma, \mu)$  اگر چگالی برابر مقدار زیر باشد:

$$f(q) = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \times \frac{1}{(q-\mu)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{\sigma}{2(q-\mu)}\right) \quad (7)$$

$$0 < \mu < q < \infty$$

توزیع لوی دنباله زیادتری نسبت به نمونه‌های دیگر حاصل می‌کند. از الگوریتم منتگنا (Mantegna, 1994) با استفاده از تولید نمونه تصادفی  $L_i$  که رفتار یکسانی با حرکت لوی داشت، برای تقلید از توزیع پایدار استفاده

عنوان پروانه‌های اکتشاف کننده تنظیم می‌شوند. پیشنهاد می‌شود تعداد پروانه‌های اکتشاف کننده  $n_f$  در طی  $T$  تکرار با استفاده از رابطه زیر کاهش پیدا یابد:

$$n_f = \text{round}\left(\left(n - n_p\right) \times \left(1 - \frac{t}{T}\right)\right) \quad (15)$$

پیشنهاد می‌شود هر اکتشاف کننده  $x_i$  موقعیت خود را با توجه به مسیر پرواز مارپیچی به روز کند که به صورت ریاضی به شرح زیر بیان می‌شود:

$$x_i^{t+1} = |x_i^t - x_p^t| \cdot e^{\theta} \cdot \cos(2\pi\theta) + x_p^t \quad (16)$$

$$\forall p \in \{1, 2, \dots, n_p\}; i \in \{n_p + 1, n_p + 2, \dots, n_f\}$$

که،  $\theta \in [r, 1]$  عددی تصادفی برای تعریف شکل مارپیچی است و  $r = -1 - t/T$ .

در رابطه (۱۶) از مسیر پرواز لگاریتمی در الگوریتم MFO استفاده شده است. با این حال دو اصلاحیه بر روی این برنامه حرکتی استفاده شده است. اولی، اصلاح مقدار هر متغیر (پروانه) به عنوان یک واحد یکپارچه برای کاهش هزینه محاسبات به کار می‌رود. دومی، منبع نور  $x_p$  (شعله) بر اساس تابع احتمال  $p_p$  با استفاده از رابطه (۱۳) انتخاب می‌شود تا توانایی استخراج را بهبود بخشد.

در مدل MSA، نوع هر پروانه به صورت پویا تغییر می‌کند، به این ترتیب، هر پروانه اکتشاف کننده که بتواند راه حل بهتری، که تابناکی بیشتری نسبت به منابع نور موجود داشته باشد پیدا کند، به پروانه‌ی راه‌یاب ارتقاء می‌یابد. به این معنا که، در آخر این مرحله منابع نور جدید و مهتاب حضور خواهند داشت.

### جهت‌یابی فلکی

در طول فرآیند بهینه‌سازی، کاهش تعداد پروانه‌های اکتشاف کننده، تعداد پروانه‌های ناظر را افزایش می‌دهد ( $n_0 = n - n_f - n_p$ )، که می‌تواند باعث افزایش سریع سرعت همگرایی الگوریتم پیشنهادی به سمت راه حل سراسری شود. پروانه‌هایی که کمترین میزان منابع تابناکی را در گروه دارند به عنوان پروانه ناظر در نظر گرفته می‌شوند. این پروانه‌ها قصد دارند به صورت مستقیم به سمت بهترین راه حل (ماه) حرکت کنند (Ali Mohamed et al., 2017). در این مرحله، MSA به گونه‌ای طراحی شده که پروانه‌های ناظر مجبور به جستجوی موثرتر با

بروز می‌کند. راه حل نهایی دنباله‌دار / مختلط ( $V_{pj}$ ) ممکن است به صورت زیر باشد:

$$V_{pj}^t = \begin{cases} V_{pj}^t & \text{if } j \in c_p \\ x_{pj}^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

باید توجه داشت که در اینجا ضریب تغییرات  $\mu^t$  به عنوان شاخص اعتبارسنجی استفاده نمی‌شود، اما برای کنترل نرخ جابجایی استفاده می‌شود. این عملیات ممکن است برای استفاده از سایر معیارهای آماری برای کنترل رفتار مشخصات هر الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی در آینده گسترش یابد.

**استراتژی انتخاب:** بعد از اتمام مراحل قبلی، میزان برآزش راه حل دنباله‌دار کامل محاسبه شده و با راه حل متناظر میزبان مقایسه می‌شود. راه حل‌های سازگارتر برای ماندن در نسل بعد انتخاب می‌شوند که ممکن است برای مسایل کمینه‌سازی به صورت زیر باشند:

$$\overrightarrow{x_p^{t+1}} = \begin{cases} \overrightarrow{x_p^t} & \text{if } f(\overrightarrow{V_p^t}) \geq f(\overrightarrow{x_p^t}) \\ \overrightarrow{V_p^t} & \text{if } f(\overrightarrow{V_p^t}) < f(\overrightarrow{x_p^t}) \end{cases} \quad (12)$$

میزان احتمال  $P_p$  متناسب با شدت لومینانس  $fit_p$  با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$P_p = \frac{fit_p}{\sum_{p=1}^{n_p} fit_p} \quad (13)$$

شدت لومینانس با استفاده از مقدار تابع هدف ( $f_p$ ) برای مسائل کمینه‌سازی، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$fit_p = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_p} & \text{for } f_p \geq 0 \\ 1 + |f_p| & \text{for } f_p < 0 \end{cases} \quad (14)$$

### جهت‌یابی عرضی

مارپیچ‌های لگاریتمی مخروطی شکل اغلب در طبیعت رخ می‌دهد و به طور گسترده توسط دانشمندان مورد مطالعه قرار گرفته است. مجموعه‌ای از مسیرها که سطحی از مخروط را مشخص می‌کنند، برای یافتن مسیر پرواز حشرات به سمت یک منبع نور، با در نظر گرفتن راس مخروط در یک زاویه ثابت، توصیف می‌شوند. این ایده به دو بعد کاهش پیدا کرد که نتیجه آن مارپیچی مسطح در الگوریتم MFO است. گروهی از پروانه‌ها که بیشترین شدت لومینانس (نوردهی) بعدی را دارند به

حال در دنیای واقعی پروانه‌ها به دلیل نداشتن حافظه تکاملی در آتش سقوط می‌کنند. رفتار پروانه‌ها شدیداً تحت تاثیر یادگیری انجمی و حافظه کوتاه مدت (۱ تا ۳ ثانیه) است. توانایی یادگیری انجمی نقش مهمی در برقراری ارتباط بین پروانه‌ها ایفا می‌کند. بنابراین، بخش دوم پروانه‌های ناظر با اندازه‌ای برابر  $n_A = n_0 - n_G$  به منظور کشیده شدن به طرف نور ماه براساس عامل یادگیری انجمی با حافظه ضروری به کار برده می‌شوند تا از رفتار پروانه‌ها در طبیعت تقلید کنند. حافظه ضروری با استفاده از توزیع گوسی یکنواخت پیوسته در فاصله‌ی  $x_i^t - x_i^{\min}$  تا  $x_i^t - x_i^{\max}$  مقداردهی اولیه می‌شود. رابطه بروزرسانی این الگو، می‌تواند به فرم زیر کامل شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + 0.001 \cdot G[x_i^t - x_i^{\min}, x_i^{\max} - x_i^t] + \left(1 - \frac{g}{G}\right) \cdot r1 \cdot (best_p^t - x_i^t) + \frac{2g}{G} \cdot r2 \cdot (best_g^t - x_i^t) \quad (19)$$

که  $2g/G, i \in \{1, 2, \dots, n_A\}$  یک فاکتور اجتماعی (وابسته به اجتماع)،  $1-g/G$  یک فاکتور شناختی (وابسته به فرد)،  $r1$  و  $r2$  اعداد تصادفی در فاصله [۰ و ۱] می‌باشند. همانند مرحله جهت‌یابی عرضی  $best_p^t$ ، منبع نوری است که به صورت تصادفی از گروه جدید پروانه‌های راه‌یاب بر اساس میزان احتمال راه‌حل مربوط آن انتخاب می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، در انتهای هر تکرار، میزان برازش (مقدار تابع هدف) کل گروه در دسترس خواهد بود تا نوع هر پروانه را برای تکرار بعدی، اصلاح کند. فلوجارت الگوریتم مورد بررسی در شکل (۲) نشان داده شده است.

توجه کردن به نقاط مهم از پروانه‌های اکتشاف‌کننده می‌باشند. ناظران به دو بخش تقسیم می‌شوند:

### پیاده‌روی گوسی

در این مرحله تمرکز بر ناحیه امیدبخش از فضای جستجو می‌باشد. توزیع احتمالی گوسی به دلیل تواناییش در محدود کردن توزیع نمونه‌های تصادفی، می‌تواند برای ایفای این نقش استفاده شود و در نتیجه تنوع در موقعیت جمعیت بعدی را محدود می‌کند. قسمت اول با اندازه‌ای برابر  $n_G = \text{round}(n_0/2)$ ، با استفاده از رابطه ۵ بر طبق توزیع گوسی حرکت می‌کند. پروانه‌های ناظر جدید در زیر گروه  $x_i^{t+1}$  با سری گام‌های گوسی حرکت می‌کنند که به صورت زیر توضیح داده شده است:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon_1 + [\varepsilon_2 \times best_g^t - \varepsilon_3 \times x_i^t]; \quad (17)$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n_G\}$$

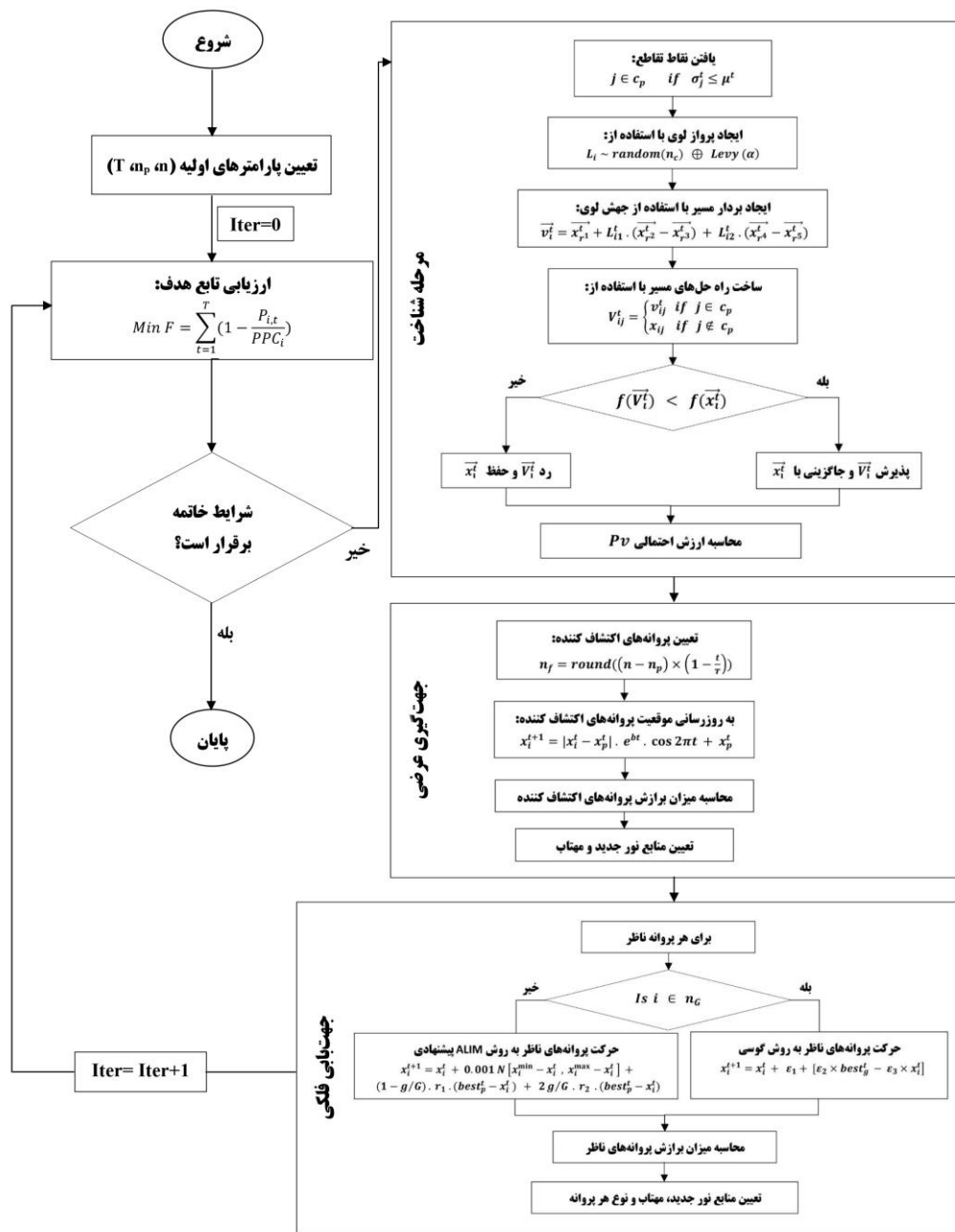
$$\varepsilon_1 \sim \text{random}(\text{size}(d)) \oplus N\left(best_g^t, \frac{\text{Log } t}{t} \times (x_i^t - best_g^t)\right) \quad (18)$$

که  $\varepsilon_1$  یک نمونه تصادفی از توزیع تصادفی گوسی مقیاس‌بندی شده با اندازه این گروه است،  $best_g^t$  بهترین پاسخ سراسری بدست آمده در مرحله جهت‌یابی عرضی است (هم اکتشاف‌کننده و هم راه‌یاب)،  $\varepsilon_2$  و  $\varepsilon_3$  اعداد تصادفی هستند که به صورت یکنواخت در بازه [۰ و ۱] توزیع شده است.

### مکانیزم یادگیری انجمی با حافظه ضروری:

نوعی حافظه در بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای انتقال اطلاعات از نسلی به نسل بعدی وجود دارد. با این





شکل (۲): فلوجارت الگوریتم MSA در مسئله بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی

### مدل ریاضی بهره‌برداری انرژی برق آبی

هر نیروگاه برق آبی از تعدادی واحد مستقل تولید انرژی تشکیل شده است که هر واحد، ظرفیت تولید یا ظرفیت نصب (PPC) مشخصی دارد. همچنین، هر نیروگاه برق آبی دارای بازده معینی برای تولید برق است که بیان گر نحوه عملکرد و کارایی نیروگاه می‌باشد. تولید برق در هر نیروگاه بر اساس ضریب کارکرد آن در طول دوره

زمانی مشخص صورت می‌گیرد. این ضریب نشان می‌دهد که در چند درصد از مواقع در بازه‌های زمانی مختلف از طول دوره بهره‌برداری، واحدهای نیروگاهی با بیش‌ترین توان خود (ظرفیت نصب) به تولید برق می‌پردازند. در سامانه سد کارون ۴، ضریب کارکرد به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌است که هر نیروگاه در ماه‌های مختلف بهره‌برداری، دست کم پنج الی شش ساعت در هر شبانه

۱۰۶ ماه (دوره ۱۳۹۸-۱۳۸۹) در نظر گرفته شده، بنابراین الگوریتم MSA در سیستم دارای ۱۰۶ متغیر تصمیم می‌باشد. معیار سنجش پاسخ‌ها، تولید انرژی برق‌آبی در ماه‌های مختلف سال است. رهاسازی از خروجی برق‌آبی مخزن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت می‌باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم آورد رودخانه، ارتفاع تیبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به صورت ماهانه می‌باشد

روز توانی معادل با ظرفیت نصب خود را تولید کند. تراز پایاب نیروگاه معادل ۸۳۰ متر از سطح دریا منظور شده‌است و نیروگاه آن از ۴ واحد ۲۵۰ مگاواتی تشکیل شده‌است. ظرفیت نصب نیروگاه معادل ۱۰۰۰ مگاوات و بازده آن معادل ۸۰ درصد منظور گردیده‌است. اطلاعات تکمیلی مربوط به نیروگاه بر اساس جدول (۱) در نظر گرفته شده‌است.

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی از مخزن، مقادیر رهاسازی بهینه از خروجی برق‌آبی ماهانه از مخازن سدها می‌باشند. افق برنامه‌ریزی در این پژوهش

جدول (۱): مشخصات نیروگاه سد کارون ۴

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد واحد نیروگاه	تعداد	۴
قدرت هر واحد	مگاوات (MW)	۲۵۰
مجموع ظرفیت چهار واحد نیروگاهی	مگاوات (MW)	۱۰۰۰
متوسط تولید انرژی سالیانه	گیگاوات ساعت (GWH)	۲۱۰۷
بازده تولید انرژی برق‌آبی	درصد	۸۰
ضریب کارکرد	درصد	۲۵
رقوم کف پایین دست نیروگاه	متر از سطح دریا (Masl)	۸۳۰

که در این رابطه  $P_t$  توان تولیدی در دوره  $t$ ام بر حسب مگاوات و PPC ظرفیت نصب مخزن بر حسب مگاوات است.

سایر روابط حاکم به شکل زیر است:

$$P_t = g \times e_t \times \frac{RP_t}{Mul_t} \times (\bar{H}_t - TW_t) / 1000 \quad (22)$$

$$\bar{H}_t = (H_t + H_{t+1}) / 2 \quad (23)$$

$$H_t = a_0 + a_1 \cdot S_t + a_2 \cdot S_t^2 + a_3 \cdot S_t^3 \quad (24)$$

$$TW_t = b_0 + b_1 \cdot Re_t^{Power} + \quad (25)$$

$$b_2 \cdot (Re_t^{Power})^2 + b_3 \cdot (Re_t^{Power})^3$$

$$RPS_t = Re_t^{Power} - RP_t \quad (26)$$

$$0 \leq P_t \leq PPC \quad (27)$$

در مسائل مخزن، تابع هدف معمول به منظور بهینه‌سازی قطعی سیستم مخازن می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$Min(Max) Z = \sum_{t=1}^T f(S_t, Re_t) \quad (20)$$

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

به منظور بهره‌برداری بهینه برق‌آبی پیچیدگی‌های مسئله به خصوص از نظر قیود و شرایط غیرخطی اضافه شده و تابع هدف به صورت حداقل‌سازی کمبود توان تولیدی نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف می‌شود:

$$Min F = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_t}{PPC}\right) \quad (21)$$

حسب میلیون مترمکعب،  $Q_t$  جریان ورودی رودخانه در دوره  $t$ ام،  $Sp_t$  سرریز در دوره  $t$ ام،  $Loss_t$  کل تلفات آب در دوره  $t$ ام،  $Ev_t$  مقدار متوسط افت در دوره  $t$ ام (تبخیر

منهای بارش) بر حسب میلی‌متر،  $\bar{A}_t$  میانگین میزان سطح آب مخزن در دوره  $t$ ام بر حسب کیلومترمربع،  $A_t$  و  $A_{t+1}$  به ترتیب میزان سطح آب مخزن بر حسب کیلومترمربع در ابتدا و انتهای دوره  $t$ ام،  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به سطح متناظر مخزن،  $S_{Min}$  حداقل حجم ذخیره،  $S_{Max}$  حداکثر حجم ذخیره،  $Re_{Min}$  حداقل حجم رهاسازی و  $Re_{Max}$  حداکثر حجم رهاسازی است.

### نتایج و بحث

برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های (MSA، GA و PSO) که کدنویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB R2014a انجام شد، از چندین تابع محک استاندارد استفاده گردیده است. جدول (۲) نتایج پیاده‌سازی الگوریتم MSA و دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی را بر روی توابع محک استاندارد نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت و تعداد ارزیابی تابع هدف در هر الگوریتم یکسان و متناسب با بعد هر تابع بوده و تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ می‌باشد.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t^{Power} - Sp_t - Loss_t \quad (28)$$

$$Loss_t = Ev_t \times \bar{A}_t / 1000 \quad (29)$$

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1}) / 2 \quad (30)$$

$$A_t = a \times S_t^2 + b \times S_t + c \quad (31)$$

$$S_{Min} \leq S_t \leq S_{Max} \quad (32)$$

$$Re_{Min} \leq Re_t \leq Re_{Max} \quad (33)$$

که در این روابط:  $g$  شتاب جاذبه زمین و برابر  $9/81$  متر بر مجذور ثانیه،  $e_t$  بازده نیروگاه که برای تمامی دوره‌ها ثابت فرض شده است،  $PF$  ضریب کارکرد نیروگاه،  $Mul_t$  ضریب تبدیل میلیون متر مکعب به متر مکعب بر

ثانیه در دوره  $t$ ام،  $\bar{H}_t$  متوسط تراز آب مخزن در دوره  $t$ ام بر حسب متر،  $H_t$  تراز آب در ابتدای دوره  $t$ ام بر حسب متر،  $H_{t+1}$  تراز آب در انتهای دوره  $t$ ام بر حسب متر،  $TW_t$  تراز آب پایاب در دوره  $t$ ام بر حسب متر،  $a_0$ ،  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به ارتفاع متناظر آن،  $b_0$ ،  $b_1$ ،  $b_2$  و  $b_3$  ضرایب ثابت تبدیل آب خروجی از نیروگاه به تراز آب پایاب،  $RP_t$  میزان رهاسازی از خروجی برق‌آبی به منظور تولید توان در دوره  $t$ ام بر حسب میلیون مترمکعب،  $RPS_t$  میزان سرریز از خروجی برق‌آبی در دوره  $t$ ام بر

جدول (۲): نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراکاوشی بر روی توابع محک استاندارد

PSO	GA	MSA	مقدار هدف	بعد	تابع
۳	۳/۰۰۰۴	۳	۳	۲	Goldsten-Price
-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۲	۲	Mccormick
۰	$10^{-5} \times 2/3$	۰	۰	۲	Rosenbrock
۰/۰۳۵	۴/۵۵	۰	۰	۱۰	Rosenbrock
۰/۰۸۷	۲۵/۵۲	$10^{-6} \times 2/66$	۰	۳۰	Rosenbrock
-۱۰/۵۳۲	-۱۰/۴۳۳۹	-۱۰/۵۳۲۱	-۱۰/۵۳۶۴	۴	Shkel
-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	۲	Six-Hump Camel

پسچیدگی آن (تابع Rosenbrock با ابعاد ۱۰ و ۳۰) عملکرد دو الگوریتم GA و PSO سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته است اما الگوریتم MSA نسبت به دو الگوریتم دیگر به مراتب به جواب بهینه نزدیک‌تر بوده و خطای پایین‌تری دارد. با توجه به نتایج به دست

نتایج جدول (۲) نشان دهنده عملکرد بالای الگوریتم MSA در مقایسه با الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر سه الگوریتم به طور تقریبی یکسان و مناسب می‌باشد. با افزایش بعد مسئله و



بهترین مقادیر پارامترهای اولیه الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن کارون ۴ که با تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها بدست آمد، در جداول (۳) تا (۵) نشان داده شده است

آمده در جدول (۲)، الگوریتم ازدحام پروانه چه در مسائل با بعد کم و چه در مسائل بزرگ مقیاس دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. پس از صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد بررسی با استفاده از توابع محک استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن کارون ۴ بر اساس الگوریتم‌های GA، MSA و PSO توسعه داده شد.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای الگوریتم MSA در بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن کارون ۴

تعداد تکرار	تعداد متغیر تصمیم	تعداد عوامل جستجو	تعداد پروانه‌های راه‌یاب
۱۰۰۰	۱۰۶	۱۰۰	۲۰

جدول (۴): مقادیر پارامترهای مدل GA در مسئله بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن کارون ۴

تعداد تکرار	تعداد متغیر تصمیم	تعداد ژن‌ها	نرخ جهش	نرخ توزیع
۱۰۰۰	۱۰۶	۱۰۰	۰/۰۱	۰/۸

جدول (۵): مقادیر پارامترهای مدل PSO در مسئله بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخزن کارون ۴

تعداد تکرار	تعداد متغیر تصمیم	اندازه جمعیت	C1	C2
۱۰۰۰	۱۰۶	۱۰۰	۱/۴۹	۱/۴۹

در کمیته‌سازی تابع هدف می‌باشد. میانگین تابع هدف در ۱۰ اجرای مختلف برای الگوریتم MSA برابر ۰/۱۴۸۹ می‌باشد که این مقدار برای الگوریتم‌های GA و PSO به ترتیب برابر ۱/۰۷۴۴ و ۰/۳۸۰۲ می‌باشد. همچنین انحراف معیار حاصل از الگوریتم‌های GA، MSA و PSO به ترتیب برابر ۰/۰۰۲۹، ۰/۵۸۶۴ و ۰/۳۰۷۸ است که نشان دهنده همگرایی بهتر الگوریتم MSA در اجراهای مختلف می‌باشد.

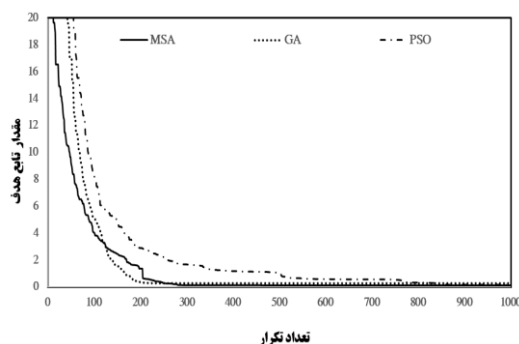
مسئله مورد نظر با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام پروانه، ژنتیک و ازدحام ذرات برای سری زمانی ۹ ساله (مهر ۱۳۸۹ تا تیر ۱۳۹۸) از آمار دردسترس و به ازای مقادیر پارامترهای جداول (۳) تا (۵) حل شده است. تعداد تکرارها برای الگوریتم‌های مورد بررسی برابر ۱۰۰۰ می‌باشد. جدول (۶) مقادیر تابع هدف مساله را به ازای ۱۰ اجرای مختلف، نشان می‌دهد. نتایج حاصل از جدول (۶) نشان‌دهنده برتری الگوریتم MSA نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی

جدول (۶): نتایج الگوریتم‌های مختلف به ازای ۱۰ اجرای مختلف

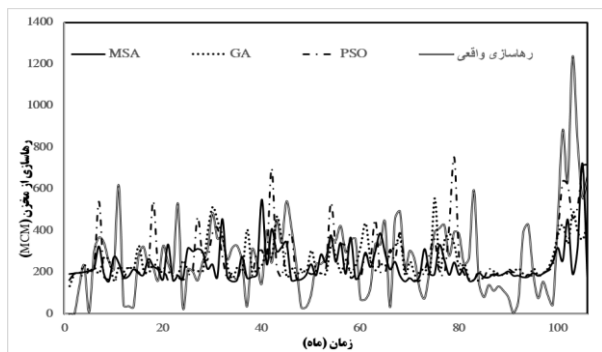
PSO	GA	MSA	تعداد اجرا
۰/۱۵۸۴	۱/۶۹۱۸	۰/۱۵۵۹	۱
۱/۰۷۰۸	۱/۴۳۵۲	۰/۱۴۷۳	۲
۰/۲۴۹۹	۱/۹۶۱۶	۰/۱۴۷	۳
۰/۵۴۶۳	۱/۴۷۰۲	۰/۱۴۸۶	۴
۰/۲۷۵۶	۰/۳۷۶۲	۰/۱۵۰۸	۵
۰/۱۷۰۴	۰/۶۶۲۳	۰/۱۴۷۲	۶
۰/۲۵۷	۱/۳۷۱۷	۰/۱۵۰۶	۷
۰/۱۵۹۱	۰/۹۲۲۵	۰/۱۴۷	۸
۰/۷۳۲	۰/۵۴۹۵	۰/۱۴۷۳	۹
۰/۱۸۲۳	۰/۳۰۲۶	۰/۱۴۷۱	۱۰
۰/۳۸۰۲	۱/۰۷۴۴	۰/۱۴۸۹	میانگین
۰/۱۵۸۴	۰/۳۰۲۶	۰/۱۴۷	حداقل
۱/۰۷۰۸	۱/۹۶۱۶	۰/۱۵۵۹	حداکثر
۰/۳۰۷۸	۰/۵۸۶۴	۰/۰۰۲۹	انحراف معیار
۰/۱۸۰۹۶	۰/۵۴۵۸	۰/۰۱۹۲	ضریب تغییرات

بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات سریع‌تر به همگرایی رسیده و به مقدار بهینه سراسری نزدیکتر می‌باشد. شکل (۴) مقادیر ذخیره مخزن در دوره آماری بلند مدت ۱۰۶ ماهه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) مقادیر رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای دوره آماری مذکور، نشان داده شده است.

نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری بهینه برق‌آبی سد کارون ۴ در شکل (۳) آورده شده است. با توجه به ماهیت و قابلیت بالای الگوریتم ازدحام پروانه در حل مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس که در مسائل محک استاندارد (جدول ۲) به اثبات رسید، در شکل (۳) نیز مشاهده می‌شود که الگوریتم ازدحام پروانه در مسئله پیچیده و بزرگ مقیاس

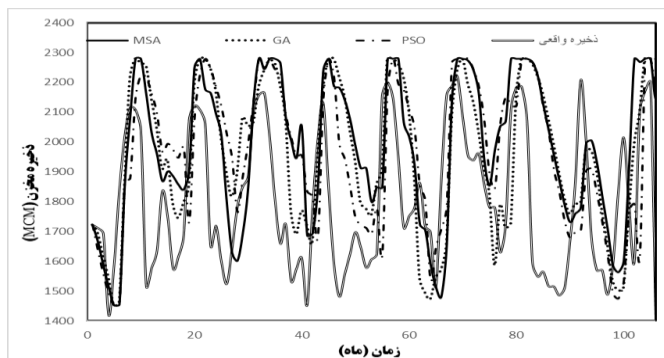


شکل (۳): روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سد کارون ۴



شکل (۵): مقادیر آب رهاسازی شده از خروجی برق آبی مخزن کارون ۴ در دوره آماری بلند مدت ۱۰۶ ماهه

بهینه مطلق که همان همگرایی زودرس و کند آن است جلوگیری کرده و باعث ارتقاء و افزایش اعتمادپذیری در پیدا کردن جواب بهینه گردیده که نتایج حاصل از آن تا حد زیادی قابل قبول می‌باشد به طوری که بدون قرار گرفتن در بهینه موضعی، در مسائل منابع آب از جمله بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد، به طور مؤثری کارآمد است. پس از بررسی کارآمدی الگوریتم ازدحام پروانه توسط تعدادی توابع محک استاندارد، از آن برای بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد کارون ۴ در دوره بلندمدت ۱۰۶ ماهه استفاده شد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ازدحام پروانه با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از الگوریتم MSA، در مقایسه با الگوریتم‌های GA و PSO، جواب‌های حاصل شده بهبود قابل توجهی داشته‌اند، به طوری که بهترین مقدار برای تابع هدف در الگوریتم MSA برابر با ۰/۱۴۷ نسبت به دو الگوریتم GA و PSO به ترتیب با ۰/۳۰۲۶ و ۰/۱۵۸۴، کاهش محسوس‌تری داشته و این موضوع بیانگر عملکرد مناسب این روش در زمینه بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی سد کارون ۴ می‌باشد



شکل (۴): مقادیر ذخیره مخزن در دوره آماری بلند مدت ۱۰۶ ماهه سد کارون ۴

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود میزان ذخیره مخزن حاصل از الگوریتم MSA نسبت به الگوریتم‌های GA و PSO مورد بررسی، در سطح بالاتری قرار داشته و الگوریتم ازدحام پروانه در کنترل میزان ذخیره مخزن نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد بررسی برتر بوده است. میزان انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم‌های MSA، GA و PSO به ترتیب برابر ۱۰۵۸۵۳، ۱۰۵۶۹۷/۴ و ۱۰۵۸۴۱/۶ مگاوات نسبت به مقدار واقعی آن به میزان ۶۴۹۸۷/۵۴ مگاوات، در طول دوره ۱۰۶ ماهه (از مهر ۱۳۸۹ تا تیر ۱۳۹۸) بوده که حاکی از برتری الگوریتم ازدحام پروانه در تولید انرژی مخزن کارون ۴ می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

الگوریتم ازدحام پروانه با الهام از رفتار راسته پولک‌بالان (پروانه‌ها و شب‌پره‌ها) در طبیعت، ارائه شده است که توانایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی در مقالات مختلف به اثبات رسیده است. الگوریتم ازدحام پروانه که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است می‌تواند از مشکلاتی که الگوریتم‌های قدیمی‌تر در به دست آوردن

### منابع

- افشار، م.، رضایی سنگدهی، س.، معینی، ر. (۱۳۹۳). الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان در مسأله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها: مطالعه‌ی مقایسه‌ای چهار الگوریتم. فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۲۵(۲): ۱۱۷-۱۳۴.
- احمدیان فر، ا.، ادیب، آ. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برقی از سدها با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: سد دز)، علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۳): ۶۳-۷۱.

- احترام. م.، موسوی. س. ف.، کرمی. ح.، تهرانی. ن.، امیری. آ. (۱۳۹۵). ارائه ی روش هیبریدی برای بهینه سازی مخازن سدها مبتنی بر هوش مصنوعی. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران. ۳(۱۱): ۴۴-۵۴.
- حسینی موغاری. س.م.، مقدس. م.، عراقی نژاد. ش. (۱۳۹۶). کاربرد الگوریتم بهینه سازی فاخته در بهره برداری بهینه از مخزن برقآبی (مطالعه موردی: مخزن کارون ۴)، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب، ۱۰(۳۲): ۲۳-۱۹.
- شرکت مهندسی مشاور دزآب. (۱۳۸۹). گزارش مطالعات سیستمی حوضه آبریز دز و کارون.
- Mohamed, A. A. A., Mohamed, Y. S., El-Gaafary, A. A., & Hemeida, A. M. (2017). Optimal power flow using moth swarm algorithm. *Electric Power Systems Research*, 142: 190-206.
- Azizipour, M., Ghalenoei, V., Afshar, M. H., & Solis, S. S. (2016). Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm. *Water Resources Management*, 30(11): 3995-4009.
- Baghipour, R., Hosseini, S. M., & Boor, Z. (2014). A water cycle algorithm for optimal allocation of DGs in distribution system considering environmental profit. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 4(11): 430-454.
- Jevtic, M., Jovanovic, N., Radosavljevic, J., & Klimenta, D. (2017). Moth swarm algorithm for solving combined economic and emission dispatch problem. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 23(5): 21-28.
- Mantegna, R. N. (1994). Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Levy stable stochastic processes. *Physical Review E*, 49(5): 4677.
- Nair, S. J., & Sasikumar, K. (2019). Fuzzy reliability-based optimization of a hydropower reservoir. *Journal of Hydroinformatics*, 21(2): 308-317.
- Qaderi, K., Akbarifard, S., Madadi, M. R., & Bakhtiari, B. (2018, August). Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 171, No. 4, pp. 179-190)*. Thomas Telford Ltd.
- Wu, X., Cheng, C., Lund, J. R., Niu, W., & Miao, S. (2018). Stochastic dynamic programming for hydropower reservoir operations with multiple local optima. *Journal of Hydrology*, 564: 712-722.
- Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of water resources planning and management*, 119(4): 455-472.
- Zhang, J., Wu, Z., Cheng, C. T., & Zhang, S. Q. (2011). Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. *Water Science and Engineering*, 4(1): 61-74.
- Zhou, Y., Yang, X., Ling, Y., & Zhang, J. (2018). Meta-heuristic moth swarm algorithm for multilevel thresholding image segmentation. *Multimedia Tools and Applications*, 77(18): 23699-23727.



## Optimal Operation of Hydropower Energy of Reservoirs Using Moth Swarm Algorithm (Case Study: Karun-4 Dam)

Saeid Akbarifard<sup>1</sup>, Mohammadreza Sharifi<sup>2</sup>, Kourosh Qaderi<sup>3</sup>

### Abstract

Hydropower energy is the third largest source of electricity generation and also the most important renewable energy producer in the world. For this reason, the optimal use of this huge and expensive source is essential. In this study, Moth Swarm Metaheuristic Algorithm (MSA) was used for optimization of the hydropower operation of Karun-4 reservoir located in Karun basin for a period of 106 months (from October 2010 to July 2019). After verifying the reliability of the MSA algorithm using several standard benchmark functions, a model was developed for optimal hydropower operation of the Karun-4 reservoir. Also, the results of the algorithm were compared with the results of known metaheuristic algorithms of the Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The MSA, GA and PSO algorithms were capable to generate energy 105853, 105697.4, and 105841.6 MW, respectively, compared with the actual value 64987.54 MW, during the statistical period. Also, the objective function value for MSA, GA and PSO algorithms, was obtained 0.147, 0.3026, and 0.1584, respectively. The results revealed that the MSA algorithm was the superior algorithm in optimal hydropower operation.

**Keywords:** Karun Basin; Optimal generation of hydropower energy; Meta-heuristics Algorithm

---

<sup>1</sup> Ph. D. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water & Environment Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.; Email address (akbarifard\_saeid@yahoo.com)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water & Environment Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.; Email address (msharifi@scu.ac.ir)

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.; Email address (kouroshqaderi@uk.ac.ir)





## Optimal Operation of Hydropower Energy of Reservoirs Using Moth Swarm Algorithm (Case Study: Karun-4 Dam)

Saeid Akbarifard<sup>1</sup>, Mohammadreza Sharifi<sup>2</sup>, Kouros Qaderi<sup>3</sup>

**Introduction:** Water is a vital resource for socio-economic development in many parts of the world. Hydropower energy is the third largest source of electricity generation and also the most important renewable energy producer in the world. For this reason, the optimal use of this huge and expensive source is essential. The meta-heuristic algorithms have proven to be robust tools in optimization of complex hydropower reservoir operation. Reservoir operation is an essential element in water resource planning and management. In the present study, Karun-4 hydropower reservoir operation is considered in terms of careful hydropower energy generation management. The time series meteorological and hydrological dataset consists of reservoir inflow, reservoir storage, evaporation from the reservoir, precipitation on the reservoir, and release of water through the power plant for a period of 106 months (from October 2010 to July 2019).

**Methodology:** In this study, Moth Swarm Metaheuristic Algorithm (MSA) was used for optimization of the hydropower operation of Karun-4 reservoir located in Karun basin for a period of 106 months (from October 2010 to July 2019). Moth swarm algorithm (MSA), proposed by Mohammed (2017), is inspired by the behavior of moths in the nature. The moths try to hide from predators during the day, while looking for the food resources at night with a celestial navigation technique. They fly in a straight line over a long distance by steer their locomotion in a steady angle relative to moonlight as the celestial far-distant point light. In the MSA, the possible solution is represented by position of light source, and the quality of this solution is considered as luminescence intensity of the light source. Three groups of moths (pathfinder, prospectors, and onlookers) are considered in the MSA. Pathfinders are capable to find the best position over the optimization space with First-In, Last-Out principle to guide the movement of the main swarm. Prospectors tend to wander into a random spiral path nearby the light sources, which have been marked by the pathfinders. Onlookers drift directly toward the best global solution (moonlight), which has been achieved by prospectors' moths.

**Discussion and Conclusion:** After verifying the reliability of the MSA algorithm using several standard benchmark functions, a model was developed for optimal hydropower operation of the Karun-4 reservoir. Also, the results of the algorithm were compared with the results of known metaheuristic algorithms of the Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The MSA, GA and PSO algorithms were capable to generate energy 105853, 105697.4, and 105841.6 MW, respectively, compared with the actual value 64987.54 MW, during the statistical period. Also, the objective function value for MSA, GA and PSO algorithms, was obtained 0.147, 0.3026, and 0.1584, respectively. The results revealed that the MSA algorithm was the superior algorithm in optimal hydropower operation.

**The most important references:** Optimization of hydro-electricity generation through multi-reservoir systems is a complex large-scale problem. Promoting or developing of robust optimization algorithms proportional to the complexity of such problems is of significant importance. In this regard, a number of attempts were made by different researchers to improve the accuracy of solutions by developing the

<sup>1</sup> Ph. D. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water & Environment Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.; Email address (akbarifard\_saeid@yahoo.com)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water & Environment Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.; Email address (msharifi@scu.ac.ir)

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.; Email address (kourosqaderi@uk.ac.ir)



optimization algorithms. One of the most powerful optimization algorithms which has been recently introduced by Mohammed et al. (2017) is the moth swarm algorithm (MSA). Due to the high efficiency of this algorithm in exploration and exploitation, it has been quickly used by a number of researchers in various fields (Jevtic et al., 2017; Zhou et al., 2018; Akbarifard et al., 2020; Luque-Chang et al., 2020) accordingly, this study aims at using the robust MSA algorithm for optimization of hydropower generation from Karun-4 reservoir.